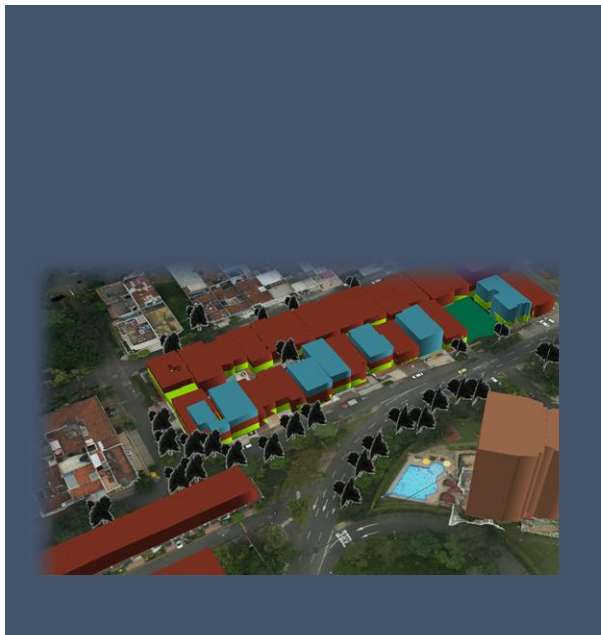




**MODELACIÓN 3D DE LA
CIUDAD SANTIAGO DE CALI
APLICADO AL CATASTRO
URBANO ZONA PILOTO:
UN SECTOR DEL BARRIO EL
INGENIO (COMUNA 17)**

**MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA
PILOTO: UN SECTOR DEL BARRIO EL INGENIO COMUNA 17**

Presentado por:
ANGELA MARIA ORTEGA PERAFAN
0749555
MIGUEL ANGEL CASTAÑEDA
0740932



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA
INGENIERIA TOPOGRAFICA
SANTIAGO DE CALI
2014

**MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA
PILOTO: UN SECTOR DEL BARRIO EL INGENIO COMUNA 17**

Presentado por:
ANGELA MARIA ORTEGA PERAFAN
0749555
MIGUEL ANGEL CASTAÑEDA
0740932

**TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL
TITULO DE INGENIEROS TOPOGRAFICOS**

Director:
FRANCISCO LUIS HERNANDEZ TORRES



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GEOMATICA
INGENIERIA TOPOGRAFICA
SANTIAGO DE CALI
2014

Nota de Aceptación

Firma Director de Tesis

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, Septiembre de 2014

DEDICATORIA

A Dios, por regalarme cada maravilloso día para poder finalizar este proyecto, ser el guía de mi vida y por ayudarme a levantar en cada caída, él es mi fortaleza.

A mi mami, por su inmenso amor y sus eternas oraciones, a mi padre por su apoyo incondicional y sacrificio, gracias a los dos por enseñarme siempre a luchar por lo que quiero, les dedico este triunfo, gracias por darme la vida.

A mi abuelito por darme la confianza, apoyo incondicional, acompañarme en cada momento de mi vida y regalarme la fuerza para seguir adelante.

A mi hermana por estar conmigo aun cuando estás tan lejos y a mi hermano, sé que desean lo mejor para mí, los quiero.

A mis sobrinas, quiero dejar una enseñanza, cuando quieran alcanzar algo en la vida no hay obstáculo que lo impida, todo aquel que lucha será recompensado tarde o temprano, llenan mi vida de felicidad mis muñecas.

A mi novio por acompañarme y guiarme en esta etapa, eres un gran profesional y un ejemplo para mí al compartir esta profesión, aportas cosas maravillosas a mi vida, gracias por todo tu amor.

Ángela...

A Dios por su bendición al concederme la oportunidad, de iniciar esta tan especial etapa y que hoy puedo culminar; por mi familia, mis amigos. Dios Padre Gracias por escuchar mis oraciones.

A mi madre por su esfuerzo, su fortaleza, su consejo, su mano. Has sido la mujer más bella y la musa de tan gran logro. Estaré siempre a tu lado como tú al mío.

A mi padre, debo su ejemplo y trabajo, gracias por darme tu confianza para continuar.

A mis hermanos, por su compañía y respeto. Son mi impulso en el camino y yo para ustedes su apoyo. Perseveren, sueñen, luchen, no pierdan de vista la familia.

A mi sobrino que es una luz, no olvides que debes seguir tus sueños e ilusiones.

A quienes confiaron en mí, a mis amigos, por su cálida bondad y ánimo para continuar.

A todos quienes han sido pacientes y no pierden las esperanzas.

Miguel...

AGRADECIMIENTOS

Son innumerables las personas que han intervenido de una u otra manera en mi vida, sobre todo en lo que a mi carrera se refiere.

Primero que todo a mis padres, María Eneida Perafan y Juan Sebastián Ortega, gracias; por darme la mayor herencia que un hijo puede recibir de sus padres; por todo su esfuerzo, dedicación y acompañarme en cada día de mi vida.

Gracias a mi abuelito Gustavo Ortega, porque más que eso eres mi padre, la persona con la cual siempre he podido contar, espero poder recompensar tu ayuda incondicional.

A mi novio Jhon Bermúdez por estar conmigo en esta etapa tan importante de mi vida y darme el ánimo y la fuerza para no rendirme.

De manera especial agradezco al profesor Francisco Hernández, nuestro director de tesis, por sus consejos, cooperación, experiencia, conocimiento y ayuda que puso en la realización de la presente investigación.

Gracias a Migue, gracias por tu esfuerzo, dedicación y la confianza para realizar la presente investigación, somos un gran equipo.

Gracias a mis amigas marce, joha y moni, por su amistad incondicional y por esa palabra de aliento que me han brindado en momentos de tristeza, hemos crecido juntas, siempre cuentan conmigo, las adoro.

Y a todos aquellos de una u otra forma me brindaron su apoyo y ayuda para la culminación de mi tesis.

Ángela...

Mi más profunda gratitud a Dios, a mis padres, a mis hermanos; son el motor de este proyecto de vida.

Mi madre Yoli y mi padre Jorge, han dado todo de ustedes para que yo pueda estar hoy aquí. Gracias.

Julián, Alfonso, Daniel, mis hermanos, les pido que por favor sigan adelante con la mirada puesta siempre en lo que es mejor. Les debo mi gratitud y mi esfuerzo, soy y seré un apoyo en sus vidas.

Mi abuela, a quien le debo su cuidado, atención, ejemplo, esfuerzo y paciencia. Gracias.

Mis amigos, Mauro, Wilmer, Charo que han sido incondicionales. Les debo mi afecto y confianza.

A la Universidad del Valle, agradezco esta oportunidad tan maravillosa, a sus profesores quienes trabajan para formar líderes, gracias.

A nuestro director Francisco Luis Hernández, agradezco su gesto de atención, apoyo, colaboración y confianza.

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de trabajar al lado de una mujer de tal fortaleza, tan especial, convincente y de corazón tan bondadoso. Gracias Ángela por tu esfuerzo.

Hoy solo culmina una etapa, vendrán nuevas batallas y estaremos en pie para seguir.

Miguel.

CONTENIDO

1	RESUMEN	2
2	INTRODUCCION.....	3
3	PROBLEMA.....	4
4	OBJETIVOS	5
4.1	Objetivo General:	5
4.2	Objetivos Específicos:	5
5	JUSTIFICACION	5
6	MARCO DE REFERENCIA	6
6.1	MARCO CONCEPTUAL	6
6.1.1	La Fotogrametría Digital:.....	6
6.1.2	Los Modelo Digitales de Elevación (MED):	8
6.1.3	La Ortofoto:	9
6.1.4	Modelamiento en 3D:	9
6.1.5	El Catastro:	10
6.2	MARCO TEORICO	10
6.2.1	Principios de la fotogrametría	11
6.2.2	Imagen Digital.....	13
6.2.3	Modelo geométrico de la cámara	14
6.2.4	Resolución	14
6.2.5	Proceso Fotogramétrico	15
6.2.6	Modelo de Distorsión.....	17
6.2.7	La Distorsión Tangencial Geométrica.....	20
6.2.8	Modelos digitales de Elevación y de Superficie	22
6.2.9	Ortorectificación	25
6.2.10	Método de Extrusión.....	26
6.3	MARCO REFERENCIAL	26
7	METODOLOGIA	29
7.1	Localización	30

7.2	 Materiales	31
7.2.1	Imágenes	31
7.2.2	Adquisición de las imágenes.....	31
7.2.3	Geometría de captura	34
7.2.4	Puntos de control.....	36
7.3	Preprocesamiento	36
7.3.1	Fotocontrol:.....	36
7.3.2	Aerotriangulación:	38
7.3.3	Modelo Digital de superficies:	39
7.3.4	Generación de la ortofoto:	40
7.3.5	Generar 3D de las edificaciones:.....	41
7.3.6	Agregar información catastral	42
7.3.7	Validación	45
8	 RESULTADOS.....	45
8.1	Obtención de las Fotografías aéreas:.....	46
8.1.1	Fotocontrol	46
8.1.2	Definición del proyecto	46
8.2	Aerotriangulación.....	46
8.3	Modelo Digital de Elevación y de Superficies.....	51
8.4	Ortofotomosaico	55
8.5	Modelo 3D aplicado al Catastro	57
8.6	Validación	58
9	 DISCUSIÓN	60
10	 CONCLUSION.....	63
11	 RECOMENDACIONES	63
12	 BIBLIOGRAFIA	65
13	 ANEXOS	58
13.1	Calibración del Vuelo y Cámara.....	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Obtención de la ortofografía	9
Figura 2. Proceso de toma fotográfica.....	11
Figura 3. Orientación interna	12
Figura 4. Orientación externa	12
Figura 5. Identificación de rayos homólogos	13
Figura 6. Distorsión radial Simétrica.....	18
Figura 7. Distorsión Tangencial	20
Figura 8: Test del círculo.	23
Figura 9. Mitades L, R y sus respectivos índices	23
Figura 10: Definición de un polígono para unir los triángulos.	24
Figura 11: Vértices del polígono	26
Figura 12. Esquema de la metodología propuesta:	29
Figura 13. Área de estudio. Zona Piloto (Sector del Barrio El ingenio)	31
Figura 14.Adquisición de las imágenes	32
Figura 15.Patron de aterrizaje UX5	32
Figura 16.Logística realizada para el fotocontrol	36
Figura 17. Transformación Inversa	40
Figura 18: Geometría de la estructura sobre ortofoto.....	41
Figura 19: Extracción de la geometría del Edificio.....	42
Figura 20.Numero identificador Predial	45
Figura 21. Comportamiento de los Residuales en X, Y y Z	49
Figura 22.Imagen Monoscópica	51
Figura 23: Imágenes Estéreo.	52
Figura 24: Curvas de nivel cada 5 m del proyecto	52
Figura 25.Modelo Digital de Elevación y de Superficies del proyecto	53
Figura 26: MDO: Altura media de objetos	54
Figura 27: Geometrías identificadas correspondientes a edificios	55
Figura 28: Ortofotomosaico del Proyecto.....	56
Figura 29: Área del modelo 3D aplicado al catastro a partir del ortofomosaico	56
Figura 30: Consulta del modelo 3D e información Catastral.	57
Figura 31. Fotografías Aéreas del Proyecto, vuelo UX5	58

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Localización y tipo de referencia del proyecto	30
Tabla 2. Tamaño de pixel según la altura del vuelo del UX5.....	33
Tabla 3. Datos GPS/IMU	34
Tabla 4. Altura de vuelo.....	36
Tabla 5. Características de la Cámara	37
Tabla 6. Puntos de control	38
Tabla 7. Zona (tipo de avaluó)	43
Tabla 8: Estructura del número identificador del predio.	43
Tabla 9. Información de Ortofoto para Validación.....	58
Tabla 10. Muestra tomada para la comparación de coordenadas para validación	58
Tabla 11: Muestra tomada para la comparación de coordenadas EMCALI y Ortofoto Obtenida	61

GLOSARIO

Catastro: Inventario o censo debidamente actualizado y clasificado, de los bienes inmuebles pertenecientes al estado y a los particulares, con el objeto de lograr su correcta identificación física, jurídica, fiscal y económica

Área urbana: Las áreas urbanas se caracterizan por estar conformadas por conjuntos de edificaciones y estructuras contiguas agrupadas en manzanas, las cuales están delimitadas principalmente por calles, carreras o avenidas. En esta categoría están incluidas las grandes ciudades y todas las restantes cabeceras municipales.

Área rural: Las áreas rurales se caracterizan por la disposición dispersa de viviendas y explotaciones agropecuarias existentes en ellas. No cuentan con un trazado o nomenclatura de calles, carreteras, avenidas, etc.

Terreno: Es el espacio geográfico que ocupa un predio urbano o rural.

Predio: Inmueble perteneciente a una persona natural o jurídica, situado en un mismo municipio y no separado por otro predio público o privado.

Número Predial: Código de identificación casa predio en catastro que permite situarlo inequívocamente en los respectivos documentos catastrales.

Predio en Propiedad Horizontal: Dentro del régimen de propiedad horizontal o del condominio, habrá tantos predios como unidades independientes se hayan establecido en el inmueble de acuerdo con el plano y reglamento respectivo.

SHP: Formato de archivo informático propietario de datos espaciales desarrollado por la compañía ESRI.

2D: Dos dimensiones plano sin profundidad y movimiento lineal a lo largo.

3D: Tres dimensiones con profundidad y movimiento libre a todos lados.

1 RESUMEN

Se debe entender modelamiento 3D, como una recopilación que posibilita gestionar con eficacia los datos y procesos relacionados con la infraestructura de una ciudad, este modelamiento 3D es un gran paso para una visualización más cercana a la del ojo humano a cerca de fenómenos de diversas clases, los cuales constantemente se han plasmado de forma bidimensional (mapas 2D). Si bien los datos en 2D continúan siendo útiles para numerosas aplicaciones, (Zambuni y Fredericque, 2010) pueden carecer de los detalles necesarios para solucionar los problemas complejos vinculados con la planificación catastral, como problemas de normatividad, sectores protegidos, índice de ocupación y de vacíos, impuestos, usos del suelo y todo lo relacionado con la propiedad horizontal, que han venido mostrando un constante y cambiante desarrollo, a nivel de construcciones y urbanización como es el caso del sur de la ciudad de Santiago de Cali.

El objetivo del proyecto es crear un modelo 3D de un sector del barrio el Ingenio de Santiago de Cali orientado a la planeación del catastro urbano a partir de fotografías aéreas tomadas desde un vuelo aéreo no tripulado. La metodología planteada en esta investigación utiliza técnicas fotogramétricas, una de las técnicas principales para obtener información de edificios en 3D, implementando el método de extrusión y los modelos digitales de elevación y superficie calculados en procesos de triangulación y ortorectificación. El producto final de los procesos, ha permitido identificar que los objetos presentes como árboles, vías y edificios alcanzan alturas máximas de 36,95 m, conforme a las edificaciones presentes y de 6 o 9 m en zonas arbóreas. En este sentido, se logra incorporar información catastral para los edificios, caracterizados por Propiedad Horizontal con hasta 2 y 10 pisos en usos de suelo residencial y comercial-residencial, con números prediales para cada uno de los pisos que componen el bloque.

El enfoque metodológico propuesto y desarrollado permite concluir que la cartografía catastral, posee en su base de datos graficas que puede ser modelada en 3D, permitiendo realizar un mejor análisis del territorio para una correcta toma de decisiones.

Palabras Claves: Modelamiento 3D, vuelo aéreo no tripulado, fotogrametría, catastro.

2 INTRODUCCION

En este proyecto se realizara un modelamiento 3D aplicado al catastro urbano en un sector del barrio el Ingenio, planteando una metodología por medio de fotografías aéreas, técnicas de fotogrametría y técnicas para el modelamiento 3D.

Esta investigación es un importante activo capaz de hacer avanzar en el perfeccionamiento de sistemas que integran las tecnologías de información y de visualización en 3D aplicadas al conocimiento de la ciudad, proporcionando modelos 3D para comenzar a construir ciudades virtuales que pueden recrear un entorno interactivo de simulación y análisis de los lugares urbanos con auténtico realismo, que a la vez pueden integrar todo el conjunto de parámetros medioambientales (físicos, sociales y económicos) que requiere el catastro urbano.

El catastro actual tiene aplicaciones no sólo fiscales sino también urbanísticas, ambientales, económicas y sociales, admite a los gobiernos conocer con exactitud su patrimonio y sus posibilidades internas, planificar correctamente sus actuaciones, y originar el desarrollo del procesamiento de información cartográfica. La adición de esta geometría no sólo supone una ayuda a la visualización, mejorando el aspecto estético de la solución final, sino que abre la puerta a otro tipo de procedimientos y análisis para la obtención de información complementaria de elevado valor añadido.

3 PROBLEMA

La cartografía hasta hace unas pocas décadas se desarrollaba exclusivamente de forma manual, elaborando planos físicos con exceso de tiempo y esfuerzo para su ejecución. Estos planos permitían su consistencia al cambio de escala, pero su manejo, almacenamiento, edición y reproducción eran labores que llevaban un considerable nivel de dedicación (Suárez Quirós et al, 2010).

El progreso en la tecnología electrónica en las últimas décadas del siglo XX y la introducción de los ordenadores en el sistema de trabajo han reformado la cartografía de una forma radical. Los planos se han convertido al formato digital, alcanzando beneficios en su portabilidad, facilidad de edición, almacenaje y la posibilidad de integración en programas de ordenador para realizar análisis, consultas, visualizar y gestionar sus datos. No obstante los planos han seguido manteniendo su formato bidimensional hasta hace bien pocos años (Suárez Quirós et al, 2010).

Los modelos de ciudad 3D se han presentado en los últimos años como un campo emergente en la ciencia de la información geográfica. El beneficio y variabilidad de sus aplicaciones parecen apuntar a que el siguiente salto en el desarrollo la cartografía urbana es la conquista de la tercera dimensión.

Se debe entender modelamiento 3D, como una recopilación que posibilita gestionar con eficacia los datos y procesos relacionados con la infraestructura de una ciudad. El modelamiento 3D es un gran paso para una visualización más cercana a la del ojo humano a cerca de fenómenos de diversas clases, que constantemente se han plasmado de forma bidimensional (mapas 2D). Si bien los datos en 2D continúan siendo útiles para numerosas aplicaciones, (Zambuni y Fredericque, 2010) pueden carecer de los detalles necesarios para solucionar los problemas complejos vinculados con la planificación catastral, como lo son:

Los problemas de normatividad, sectores protegidos, índice de ocupación y de vacíos, impuestos, usos del suelo y todo lo relacionado con la propiedad horizontal, que han venido mostrando un constante y cambiante desarrollo, a nivel de construcciones y urbanización como es el caso del sur de la ciudad de Santiago de Cali; para el que Planeamiento Territorial y las oficinas de Catastro deben de implementar nuevas técnicas de automatización que agilice los procesos territoriales de uso, ocupación y manejo del suelo, en función de los objetivos económicos, sociales, urbanísticos, ambientales, de formación y de actualización catastral.

De hecho, una representación en 2D de la infraestructura podría causar un análisis erróneo del entorno físico; de ahí que es importante implementar proyectos de urbanismos 3D, en los que se identifique el uso destinado al espacio urbano, la reserva de espacio industrial y el espacio destinado a infraestructura de transporte y comunicaciones, como medio para gestionar el territorio, renovar su organización y el desarrollo de la ciudad, con esta tecnología se realiza mejor un análisis previo del territorio para la correcta toma de decisiones.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo General:

- ✓ Crear un modelo 3D de un sector del barrio El ingenio de Santiago de Cali orientado a la planeación del catastro urbano, utilizando técnicas fotogramétricas e información auxiliar.

4.2 Objetivos Específicos:

- ✓ Identificar los métodos que permitan la generación de modelos 3D en zonas urbanas.
- ✓ Incorporar información catastral al modelo 3d en zonas urbanas.
- ✓ Validar del modelo 3d enriquecido con la información catastral tratada en la zona piloto.

5 JUSTIFICACION

Las estructuras existentes de registro catastral, apoyados en parcelas bidimensionales puntualizados a partir de datos topológicos y geométricos, acontecen limitaciones para saber la localización 3D de las construcciones y la dimensión vertical (profundidad y altura) de los derechos dispuestos para las modelos tridimensionales (Lemmen y Van Der Molen, 2004).

Los sistemas actuales de inspección catastral no admiten conocer los volúmenes jurídicos en tres dimensiones, y tampoco hallar las construcciones en sí. Para progresar en estas limitaciones, es necesario integrar el aspecto tridimensional al Modelo de Datos

Catastrales. La investigación sobre un catastro tridimensional introduce alternativas a Volumen de Propiedad del Modelo de Datos Catastrales (Lemmen y Van Der Molen, 2004).

El desarrollo de modelos de datos 3D y su estructura de datos se encuentran en una etapa conceptual y su aplicabilidad para resolver problemas en áreas urbanas espera de una mayor exploración. Es una representación de funcionalidades adecuado para la gestión y geocoordinación de la información relacionada con la infraestructura de la ciudad y la planeación catastral ya que un modelo 3d permite visualizar mejor el tipo de ciudad, permitiendo resolver fácilmente problemas de planeación mostrando alturas reales, índices de ocupación y vacíos, propiedad horizontal, alturas permitidas en determinados sectores y permitiendo reconocer fácilmente los usos del suelo, asociando diferentes tipos de usos, que serían muy difíciles mapear en cartografía 2d, ayudando así al desarrollo urbano. Así mismo, proporciona un marco compatible con el ciclo de vida de la información, desde su creación hasta su aprovechamiento.

La fotogrametría es una de las principales técnicas para obtener información de edificios 3D. La fotogrametría aérea digital ofrece mediciones precisas de puntos y estructuras, que favorece obtener el modelo 3D, en un sector de la Comuna 17, elegido por la alta dinámica de crecimiento urbano lo que permitirá la actualización de información catastral del área estudiada, y beneficiara en este caso, a la Subdirección de Catastro Cali, que es parte de la estructura administrativa del departamento de Hacienda Municipal cuya misión es consolidar un Municipio proporcionando las condiciones necesarias para el ejercicio de los derechos y deberes constitucionales, mediante la prestación oportuna de los Bienes, Obras y Servicios en procura del mejoramiento del bienestar y la calidad de vida de los ciudadanos y más aún ahora que están visionando en el 2015 hacer de Santiago de Cali un Municipio modelo a nivel nacional, por la calidad de los Procesos y Servicios.

6 MARCO DE REFERENCIA

6.1 MARCO CONCEPTUAL

6.1.1 La Fotogrametría Digital:

La Fotogrametría es la disciplina encargada de realizar mediciones e interpretaciones fiables mediante fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado (Sánchez, 2006-2007).

La fotogrametría, como parte de la interpretación de imágenes, es una disciplina que permite realizar modelos 3D a partir de fotografías 2D; es una técnica de medición indirecta ya que las mediciones no se realizan sobre el objeto, sino sobre imágenes del mismo, se respalda primordialmente en las relaciones matemáticas de la geometría proyectiva y de la visión estereoscópica que tiene naturalmente el ser humano (Jauregui, 2009).

Esta técnica de observación a distancia la transforma en una forma de análisis muy económica; es fundamental especificar que casi toda la cartografía relevada en el mundo ha sido realizada a partir de la fotogrametría. Desde sus inicios hasta la actualidad la fotogrametría ha ido de la mano de la tecnología, dando pasos desde la fotogrametría analógica, pasando por la fotogrametría analítica, llegando hoy a la fotogrametría digital; con esta prosperan las posibilidades de explotación de las imágenes, a la vez que se simplifican las tecnologías, permitiendo con ello la generación automática de modelos de elevación del terreno, ortoimágenes y estereortoimágenes, generación y visualización de modelos tridimensionales etc (Jauregui, 2009).

El principio operativo de la fotogrametría aérea se establece en un avión que avanza disparando fotos consecutivas, cada cierto lapso, en la actualidad este proceso se puede realizar desde vehículos aéreos ligeros no tripulados, lo que ha hecho posible realizar a bajo costo levantamientos fotogramétricos aéreos en áreas pequeñas, a corto plazo, son aeronaves capaces de desplazarse por el aire sin necesidad de tripulación ni de piloto. Estas plataformas no son capaces de llevar una cámara aérea de tamaño completo, así que utilizan cámaras compactas de bajo costo y compensan al volar a altitudes más bajas. La combinación del Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV, por sus siglas en inglés) con la técnica fotogramétrica es una tecnología geoespacial emergente que concede una plataforma innovadora para la adquisición de imágenes aéreas (Dpto. de Geografía Universidad de Calgary, 2010). Siempre que haya buenos puntos de control en tierra y una adecuada calibración de la cámara, no hay ninguna razón por la que los buenos resultados no se puedan alcanzar de un ajuste de bloques rigurosos con fotografías obtenidos a partir de dicho levantamiento, los vehículos UAV son una herramienta en desarrollo que cada vez más complementa la toma de datos para diferentes fines. La ejecución de las tomas es muy rápida y la obtención de los productos es muy ágil, de modo que se prevé que estos aparatos tengan un gran campo de aplicación en un futuro próximo.

La cámara digital sin dudar es la herramienta más apreciada para este tipo de labor puesto que ella definirá la calidad, del producto (Collaguazo y Domínguez, 2011). En el caso de conseguir una cámara digital existen varios tipos de cámaras con diferentes presentaciones, no solo la resolución determina su alcance sino también algunas de las

características de la misma y por lo tanto entre más finalidades, características, calidad y durabilidad en la construcción física de la cámara o geometría de la lente mayor será la utilidad al usarla en la elaboración fotogramétrica (Collaguazo y Domínguez, 2011).

La imagen digital, posee un sistema ráster 2D constituida en una malla rectangular de celdas cuadradas. A estas celdas se les llama píxeles y componen la unidad básica de información de la imagen, la ubicación de cada celda se define de acuerdo con la fila y la columna en la que se encuentren. Cada celda se caracteriza por la intensidad de tono de gris que según un valor cuantificable entre 0 y 255 (que corresponde a los tonos negro y blanco) (Espín y Guano, 2013).

El proceso fotogramétrico conlleva a obtener la Ortofotografía Aérea que es un producto cartográfico georreferenciado y corregido de deformaciones que afectan a las fotografías, en la que se pasa de la representación en perspectiva cónica del territorio a una perspectiva ortogonal, reparando las deformaciones de carácter geométrico. Este procedimiento se denomina Ortorectificación que realizado a fotografías, mediante las herramientas apropiadas permite la obtención de la Ortofotografía digital (Consejería del Medio Ambiente y del Territorio, 2012).

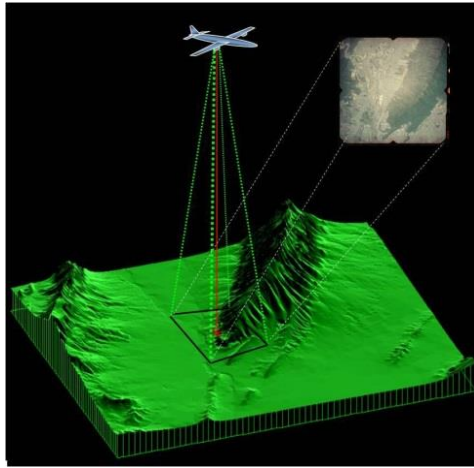
6.1.2 Los Modelo Digitales de Elevación (MED):

Un MED es una capa de datos raster que abarca valores de elevación de un lugar. Para realizar una ortofoto es indispensable usar un modelo digital de elevación, permitiendo al software modelar la superficie terrestre (diferencia en elevaciones) y de esta manera eliminar el efecto de desplazamiento del relieve (Fallas, 2004).

Para la generación de la ortofoto es necesario un modelo digital de elevación, lo cual genera la rectificación de las fotografías, de acuerdo a lo estipulado por Felicísimo (1994), que manifiesta “un modelo digital de terreno es una estructura numérica que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”, que está constituido por un conjunto de valores X, Y y Z, de puntos que definen las características de la superficie terrestre, de manera que este modelo es un arreglo de los valores numéricos que corresponden con los valores estimados de elevación de puntos en el terreno, es decir, se genera a partir de las fotografías aéreas orientadas y reproduce el relieve del terreno.

El resultado del proceso fotogramétrico mantiene toda la información de la fotografía aérea correctamente orientada que junto con el modelo digital del terreno permite llevar a cabo el proceso de ortoproyección, proporcionando una ortofotografía, es decir, una imagen georreferenciada, y a escala del territorio.

Figura 1. Obtención de la ortofografía



FUENTE: INEG, 2010

6.1.3 La Ortofoto:

Una Ortofoto Digital es la imagen de una fotografía aérea, en la cual han sido removidos los desplazamientos ocasionados por la inclinación de la cámara o sensor y el relieve del terreno. Esta referida a una proyección cartográfica, por lo que toma las características geométricas de un mapa, igualmente la calidad pictórica de la fotografía. Son una fuente usada para la actualización cartográfica topográfica y temática, así como catastral, proporcionando gran detalle y exactitud (INEG, 2010).

6.1.4 Modelamiento en 3D:

Los modelos tridimensionales son aquellos objetos que simbolizan a escalas la forma de objetos existentes, representado principalmente tres dimensiones el largo, ancho y la profundidad. Para alcanzar los modelos tridimensionales la fotogrametría es una base fundamental, esta convierte o traza un mapa de imágenes planas de dos dimensiones en el auténtico mundo tridimensional.

La modelización de entornos urbanos (es decir, la representación virtual de edificios, calles, mobiliario, vegetación o cualquier otra infraestructura) aumenta un valor significativo en muchas aplicaciones de gestión concernidas con el procesamiento de información cartográfica. La adición de esta geometría no sólo supone una ayuda a la visualización, perfeccionando el aspecto estético de la solución final, sino que parte de

otro tipo de procedimientos y análisis para la obtención de información adicional de elevado valor añadido (Suárez Quirós et al., 2010).

Por lo tanto los escenarios virtuales y la cartografía en tres dimensiones son un potente instrumento de visualización de la información territorial, cualquiera que sea su naturaleza, ofrecen multitud de ventajas a la hora de transmitir e interpretar información. En el aspecto del catastro, el modelamiento 3D de las estructuras urbanas optimizara las condiciones para una adecuada evaluación y actualización del catastro

6.1.5 El Catastro:

El Catastro, es el inventario de los inmuebles que conforman el territorio de un municipio, así como de la infraestructura y equipamiento de los mismos, estructurado por el conjunto de registros o padrones inherentes a la identificación, descripción, registro, cartografía y valuación masiva de éstos para fines fiscales y usos multifinalitarios, procurando la actualización permanente de las características cualitativas y cuantitativas de la tierra y las construcciones que en ella se asiente. El modelamiento 3D de las estructuras urbanas mejorara las condiciones para la oportuna evaluación y actualización del catastro.

6.2 MARCO TEORICO

La obtención de modelos tridimensionales 3D es una labor compleja en escenarios urbanos. En 1858 el francés Laussedat, consiguió obtener planos exactos de edificios y pequeñas extensiones de terreno a partir de la fotografía, siendo este el primer inicio de la fotogrametría, que en su día se conoció con el nombre de fotogrametría ordinaria (Polanco, 2005), pero hoy en día es importante hacerla más real a partir de la fotogrametría digital ya que esas realidades no son bidimensionales si no tridimensionales.

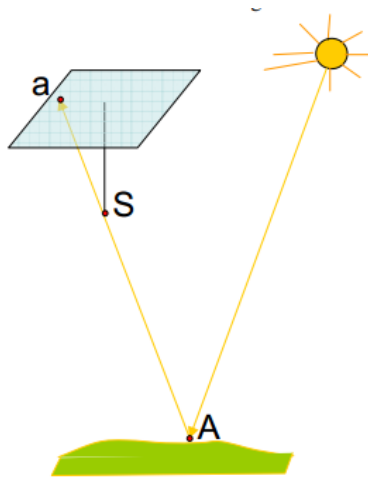
Para el desarrollo de este estudio, se propone un conjunto de procedimientos que permitirán llegar al modelo tridimensional de entornos urbanos (es decir, la representación virtual de edificios), presentando un conjunto de conceptos, incluyendo abstracciones de fenómenos observables y propiedades cuantificables, junto con reglas que expresan las relaciones entre las observaciones de dichos conceptos.

A continuación se presentan las teorías que soportan la metodología utilizada en el camino para resolver la problemática planteada.

6.2.1 Principios de la fotogrametría

Los inicios de la fotogrametría se remontan a los años 60, basándose en los conceptos del haz perspectivo, caracterizado por la unión de la superficie del objeto mediante semirrectas en el centro de proyección en el contexto de la Fotogrametría Estereoscópica análoga. El procedimiento en la captura fotográfica inicia entonces con el registro del haz perspectivo, generado por el reflejo de luz en el objeto A que cruza el lente focal de la cámara en el punto S para producir la matriz bidimensional o imagen en el plano focal (a). De esta manera entonces, conocidas las posiciones de A y S, así como la geometría de la cámara, se estima la coordenada del punto imagen (a).

Figura 2. Proceso de toma fotográfica



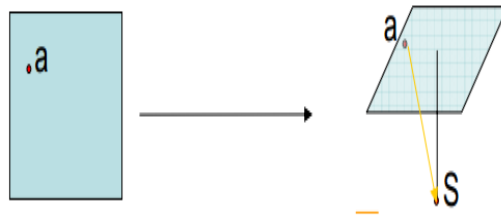
Fuente: Martín, J. et al, 2010

La construcción del plano del objeto con una imagen digital y un punto (a) en la que se determinan la posición del punto correspondiente en el plano del objeto (dar coordenadas) Este proceso se lleva a cabo a través de la orientación interna, orientación externa, identificación de rayos homólogos y la representación del punto objeto. A continuación se presentan los elementos que hacen posible cada uno de estos procesos

6.2.1.1 Orientación interna:

La orientación interna permite la obtención de la cámara reconstruida, en la que el punto (a) es expresado en términos del centro de proyección (S).

Figura 3. Orientación interna



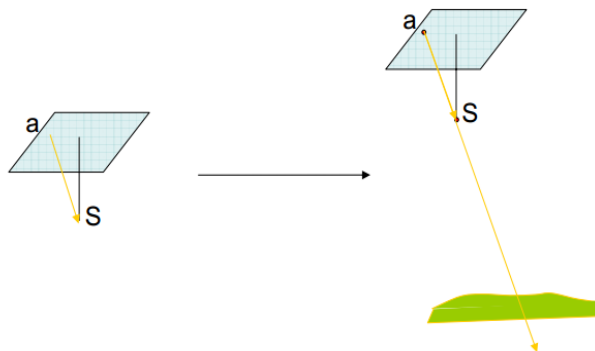
Fuente: Martín, J. et al, 2010

6.2.1.2 Orientación externa:

La orientación externa se caracteriza por la construcción de la posición y orientación del centro de proyección en referencia al objeto, es decir, las condiciones de colinealidad se deben ajustar a las condiciones lineales de la información, lo que requiere disponer de información de centros de fotografía y las Unidades de Medida Inercial (IMU) el cual proporciona medidas de ángulos y posiciones.

Esta construcción entonces se realiza mediante la incorporación de procedimientos de orientación relativa y absoluta, cuya fundamentación consiste en la alineación entre los centros de proyección y posteriormente situados con respecto al objeto.

Figura 4. Orientación externa



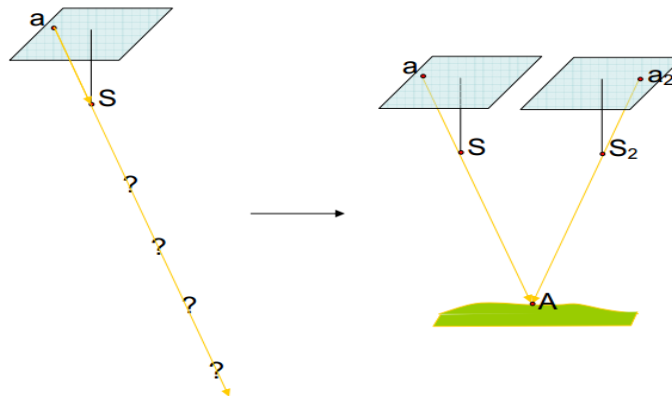
Fuente: Martín, J. et al, 2010

6.2.1.3 Identificación de rayos homólogos:

El proceso de orientación interna y externa permite la construcción del objeto, puesto que se puede ubicar la cámara tridimensionalmente en el espacio donde se capturó la imagen digital. La relación entre el punto (a) y el centro de proyección no permite reconstruir el punto A, por lo que es necesario emplear un punto adicional que sea homólogo en otra imagen. En ese momento se verifica el posicionamiento del objeto A en las relaciones a y S, a₂ y S₂.

Con la identificación del punto homólogo se representa el punto objeto. Este proceso consiste en la intercepción de las relaciones aS y a₂S₂ para encontrar la posición tridimensional del punto observado.

Figura 5. Identificación de rayos homólogos



Fuente: Martín, J. et al, 2010

6.2.2 Imagen Digital

La imagen digital es una matriz bidimensional compuesta por filas y columnas cuya unidad de medida es el pixel, al que se le asocia un valor de tono e intensidad relacionado con la capacidad de la superficie para reflejar energía electromagnética o luz. La matriz entonces está dada por la forma 2n:

$$\begin{pmatrix} p(1,1) & p(1,2) & p(1,3) & p(1,n) \\ p(2,1) & p(2,2) & p(2,3) & p(2,n) \\ p(3,1) & p(3,2) & p(3,3) & p(3,n) \\ p(m,1) & p(m,2) & p(m,3) & p(m,n) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Composición de una imagen digital

6.2.3 Modelo geométrico de la cámara

La transformación del objeto en 3D en objetos 2D es necesaria para aplicar la condición de colinealidad relacionadas con las coordenadas de terreno. La condición de colinealidad hace referencia a la construcción geométrica en la que la proyección de un punto en terreno cruzan a traves del centro óptico de la cámara se plasma en el sensor. Esta transformación busca la relación lineal de las coordenadas 3D del terreno (X; Y, Z) y las coordenadas 2D en la imagen (x, y). Al usarse coordenadas homogéneas la matriz de transformación toma la forma matricial

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Matriz de transformación de perspectiva

Se ha de tener en cuenta que en el sistema coincidente con el plano focal de la cámara, las unidades de medida están en milímetros teniendo origen en el punto principal definido en el certificado de calibración. Este sistema se relaciona con el sistema objeto o sistema de coordenadas particular referido al sistema de referencia WGS84. Con estos fundamentos, los valores a calibrar son entonces, la posición del punto principal y la distancia focal. El primero se estima en función del formato del sensor con origen teórico (0, 0) (Sánchez et al., 2004).

El modelo del sensor contiene información que caracteriza la geometría interna de la cámara, como la distancia focal, coeficientes de distorsión de lentes, tamaño en pixeles y marcas fiduciales. Generalmente, esta información se presenta dentro de un certificado de calibración.

Como se mencionó en el apartado de Orientación Externa, las características como la posición aproximada y la orientación de cada imagen se hallan en el modelo de sensor externo; la orientación está definida en términos de la rotación sobre los ejes Omega (ω), Phi (ϕ), y kappa (κ). Otro de los movimientos del avión son los generados por el alabeo (Roll) el cual afecta del recubrimiento lateral entre líneas de vuelo, el cabeceo (Pitch) el cual afecta el recubrimiento lateral entre fotos dentro de la línea de vuelo y la guiñada (Yaw) que afecta el recubrimiento longitudinal y lateral. (Gonzales, 2012)

6.2.4 Resolución

Los sensores aéreos consideran la resolución espacial, espectral y radiométrica. (Gonzales, 2012)

6.2.4.1 Resolución Espacial

La resolución espacial hace referencia a la mínima medida en el espacio que se aprecia en la imagen, generalmente se usa el tamaño de pixel. También se puede ver expresada en términos del GSD (Ground Simple Distance), el cual depende tanto del tamaño del pixel como de la focal de la cámara y la altura de vuelo (Gonzales, 2012).

$$GSD = \frac{H}{f} * p \quad (3)$$

Donde p es el tamaño del pixel, f es la distancia focal y H es la altura media sobre el terreno.

6.2.4.2 Resolución Radiométrica

La resolución radiométrica está referida a la sensibilidad del sensor para discretizar los niveles de gris producto de la radiación recibida. Su valor es numérico y corresponde al número de bits que se utiliza para cuantificar un pixel (Gonzales, 2012).

6.2.4.3 Resolución espectral

La resolución espectral hace referencia al número y anchura de bandas espectrales que distinguen un sensor. El sistema fotogramétrico corresponde a sensores de menor resolución espectral, puesto que tiene poca capacidad de resolución en términos de la longitud de onda o de frecuencia (Gonzales, 2012).

6.2.5 Proceso Fotogramétrico

El proceso fotogramétrico, se fundamenta en efectuar las orientaciones que permitan colocar a las imágenes en la posición del momento de la toma y poder obtener así el modelo estereoscópico, iniciando con la orientación interna, que tiene por objeto la reconstrucción del haz de rayos de cada imagen, partiendo de los datos que se proporcionan en el certificado de calibración de la cámara, como la distancia focal, posición del punto principal o los parámetros de distorsión.

La orientación se resuelve aplicando una transformación afín bidimensional, cuya ecuación para cada coordenada es:

$$\begin{bmatrix} X_f & aX_p & bY_p & T_x \\ Y_f & cX_p & dY_p & T_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

Esta transformación consiste en referir las coordenadas del sistema comparador al sistema fiducial, realizando un cambio de escala para cada eje (λ_x, λ_y), dos traslaciones (T_x, T_y), un giro α entre ambos sistemas y considerando el ángulo β por falta de ortogonalidad. Siendo los valores de las incógnitas a, b, c y d .

$$\begin{bmatrix} a & \lambda_x \cos \alpha \\ b & \lambda_y \sin \alpha \\ c & \lambda_x \sin \alpha \\ d & \lambda_y \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

Posteriormente, la orientación externa, la cual sitúa el haz de rayos de cada imagen en su posición correcta, con lo que, al intersectar los rayos homólogos de dos imágenes se forma el modelo real. Una vez formado el modelo real se podrá empezar a medir sobre él.

Dentro de esta fase se distinguen dos orientaciones:

- *Orientación relativa*: consiste en hacer intersectar los rayos homólogos de las dos imágenes estereoscópicas, para formar el modelo virtual.
- *Orientación absoluta*: en esta fase el modelo se escala y se nivela para conseguir que las mediciones que se realicen sobre él sean directamente en coordenadas terreno.

Tradicionalmente, estos dos últimos pasos de orientación relativa y orientación absoluta se realizaban por separado, sin embargo, con la aparición de las estaciones fotogramétricas analíticas y digitales ha pasado a resolverse en un solo paso, en la orientación externa, utilizando las ecuaciones de colinealidad:

$$\left. \begin{aligned} x &= f \frac{m_{11} X - X_0 m_{12} Y + Y_0 m_{13} Z}{m_{31} X - X_0 m_{32} Y + Y_0 m_{33} Z} \\ y &= f \frac{m_{21} X - X_0 m_{22} Y + Y_0 m_{23} Z}{m_{31} X - X_0 m_{32} Y + Y_0 m_{33} Z} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

De estas ecuaciones se busca obtener las coordenadas del centro de proyección (X_0, Y_0, Z_0) y los coeficientes mxy de la matriz de rotación, siendo conocida la distancia focal (f), las coordenadas terreno (X, Y, Z) de una serie de puntos (puntos de control) y sus coordenadas (x, y) (Vozmediano y Valle Melon, 2006).

Este proceso fotogramétrico, continua con la técnica de aerotriangulación para determinar las coordenadas de los puntos de enlace de los modelos así como los parámetros de orientación externa (relativa y absoluta), a partir de un mínimo número de puntos de apoyo tomados en campo y apoyados en mediciones realizados en fotogramas. La aerotriangulación digital es un proceso de fácil automatización. Las fases que componen este proceso son:

- Definición del bloque de fotos que cubren la zona a cartografiar, mediante el recubrimiento y datos de calibración de la cámara usada. Aquí se determinan las coordenadas imagen de los puntos de apoyo.
- Estimación automática de los puntos de apoyo empleando técnicas de correlación: seleccionando los puntos de apoyo e identificando sus puntos homólogos, midiendo las coordenadas instrumentales de los puntos y compensando.
- Para la compensación del bloque, se analizan los resultados, determinando los posibles errores groseros y realizando la correlación y depuración de los resultados.

6.2.6 Modelo de Distorsión

La Fotogrametría se basa en la perspectiva cónica en el momento de realizar las medidas sobre los fotogramas (coordenadas, orientación, restitución). Pero la posición de los puntos en la imagen no se corresponde con la teórica, definida por las leyes de la perspectiva, debido a la existencia de una serie de factores:

- Distorsiones procedentes del objetivo de la cámara.
- Falta de planeidad de la película.
- Condiciones de toma.

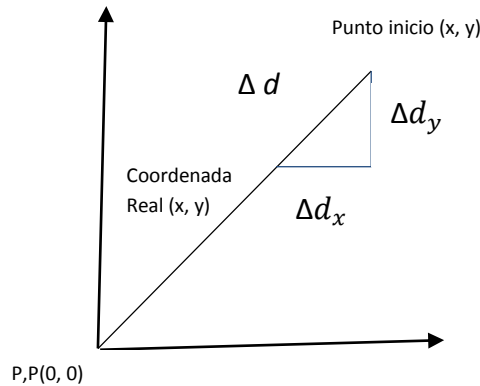
Las distorsiones se producen porque el objetivo de la cámara está compuesto por una serie de lentes que no están libres de errores. Aunque se intenta minimizarlas o compensarlas unas con otras, la imagen captada en la fotografía no posee una perspectiva cónica ideal, pudiendo decir que no existe un único punto de vista sino dos: una pupila de

entrada (punto nodal incidente) y otro de salida (punto nodal emergente). Además, los rayos pueden incidir con un ángulo y emerger con otro, atribuyendo la diferencia entre ambos a la distorsión del objetivo (Collaguazo et al., 2011). Las transformaciones son afectadas por las distorsiones que no son lineales, puesto que las características de la cámara tampoco son perfectas (Sánchez et al., 2004).

6.2.6.1 La Distorsión Radial Geométrica

La distorsión radial geométrica depende de la distancia radial del punto respecto del punto principal, y se define por un polinomio de grado impar. Se debe dar importancia al modelado de las distorsiones debidas a las lentes para aplicaciones de visión, especialmente cuando la cámara se utiliza como dispositivo de medición, obteniendo sus propiedades geométricas. Esto se debe a las grandes expectativas de esta herramienta en áreas como la robótica móvil, inspección automática y para mediciones o proyectos de corto alcance.

Figura 6. Distorsión radial Simétrica



El problema del paralelismo entre el plano de la imagen y el plano focal se minimiza con el modelo de “balanceo” expresado en la ecuación 7:

$$dr = a_1 r(r^2 - r_o^2) + a_2 r(r^4 - r_o^4) \quad (7)$$

Dónde:

dr se considera según Sánchez et al (2004) como una distorsión debida al desplazamiento en el plano imagen en relación al punto y su posición ideal; así como r un radio punto a punto y r_0 como un parámetro arbitrario para anular la distorsión.

Se ha establecido el valor de r_0 como un valor arbitrario que asume para algún punto en la imagen le corresponde una posición real coincidente con una posición matemática, lo cual permite la suavización de la ecuación de distorsión a la forma:

$$dr = a_0 + a_1 r^3 + a_2 r^5 \quad (8)$$

Si $r=r_0$ y $dr=0$ entonces será:

$$a_0 = -a_1 r_0^2 - a_2 r_0^4 \quad (9)$$

Esta fórmula hace uso del modelo “gaussiano” que se define como:

$$dr = k_1 r^3 + k_2 r^5 \quad (10)$$

Estos modelos de distorsión utilizan la distancia focal, aunque también se desconoce su valor. Para ello se relacionan la distorsión radial con la distancia focal calibrada y focal convenida para obtener una distorsión asociada de la siguiente forma:

$$\frac{r - dr_1}{f_1} = \frac{r - dr_2}{f_2} = \frac{r - dr_3}{f_3} = \dots \quad (11)$$

Esta relación de los modelos genera una función en términos de uno de los modelos. De esta manera la fórmula matemática se expresa así (Sánchez et al, 2004):

$$\frac{r - k_1 r^3 - k_2 r^5}{f_g} = \frac{r - (a_0 r + a_1 r^3 + a_2 r^5)}{f_b} \quad (12)$$

Esta forma es la distancia focal calibrada por el modelo gaussiano como f_g y una distancia focal balanceada f_b , que al ser igualadas para que conocidos sus coeficientes se obtenga el modelo gaussiano (Sánchez et al, 2004):

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{a_1}{1-a_o} \\ K_2 &= \frac{a_2}{1-a_o} \\ f_g &= \frac{f_b}{1-a_o} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Los parámetros k_1 y k_2 representan las distorsiones y f_g la distancia focal calibrada. El sentido contrario del modelo representa el modelo gaussiano balanceado en r_0 :

$$\left. \begin{aligned} a_o &= -K_1 r_o^2 - K_2 r_o^4 \\ a_1 &= K_1 (1 - a_o) \\ a_2 &= K_2 (1 - a_o) \\ f_b &= f_g (1 - a_o) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Mediante la estimación del valor de las distorsiones $dren$ en un punto x , y se da que:

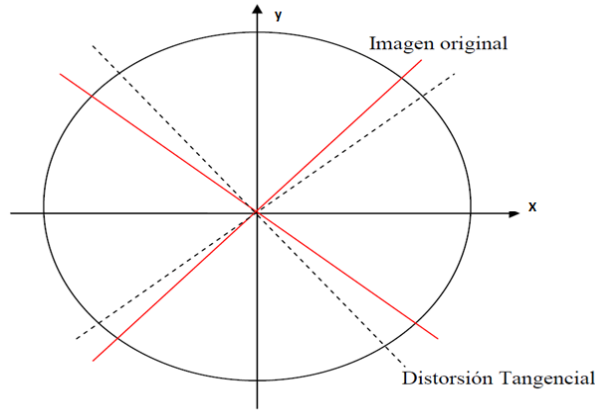
$$\left. \begin{aligned} X_c &= x + dr_x + dp_x \\ Y_c &= y + dr_y + dp_y \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Donde las componentes de x y y se representan como dr_x y dr_y , así como las distorsiones descentradas dp_x y dp_y con valores despreciables ya que no contribuyen en la deformación de la lente.

6.2.7 La Distorsión Tangencial Geométrica

Como se mencionó anteriormente, los valores despreciables de deformación del lente que causan el descentramiento en la componentes radial asimétrica, y también tangencial debidos a la falta de alineación en las unidades ópticos del lente.

Figura 7. Distorsión Tangencial



Fuente: García, 2007

El modelo propuesto por Collaguazo et al (2011), debido el descentramiento del lente se representa como:

$$\Delta d = J_1 * r^2 \quad (16)$$

Donde r es la distancia radial al punto desde el punto principal y J1, el coeficiente de distorsión (+).

El ajuste proporciona el valor de dos coeficientes que se relacionan para obtener el valor de la distorsión debida al descentramiento para la toma P1 y P2:

$$J_1 = \sqrt{P1^2 + P2^2} \quad (17)$$

Sus componentes radiales y tangenciales son dadas como:

$$\begin{aligned} \Delta d &= 3J * r^2 * \text{sen}(\phi - \phi_o) \\ \Delta d &= J_1 * r^2 * \cos(\phi - \phi_o) \end{aligned} \quad (18)$$

Donde ϕ_o es el ángulo que forma el eje de distorsión tangencial máxima con el eje x, es decir,

$$\phi_o = \text{artg}\left(-\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (19)$$

El ángulo que forma el radio-vector del punto con el eje x.

Esta distorsión, también, se puede descomponer en función de los ejes x e y del formato según se indica a continuación:

$$\begin{aligned}\Delta d_x &= P_1 * (r^2 + 2x^2) + 2P_2xy \\ \Delta d_y &= 2P_1xy + P_2(r^2 + 2y^2)\end{aligned}\quad (20)$$

6.2.8 Modelos digitales de Elevación y de Superficie

Los modelos digitales de terreno se pueden ver como *“una representación estadística del terreno, en forma de números digitales, por medio de un conjunto de puntos de coordenadas x , y y z respecto de un sistema de georeferenciación conocido”*(Martínez-Casasnovas, 1999).

La obtención del Modelo de Elevación implica la disponer de información de altitud de la zona de estudio, que con la implementación de los métodos de interpolación logra estimar valores de altura en áreas de las que no se tienen datos.

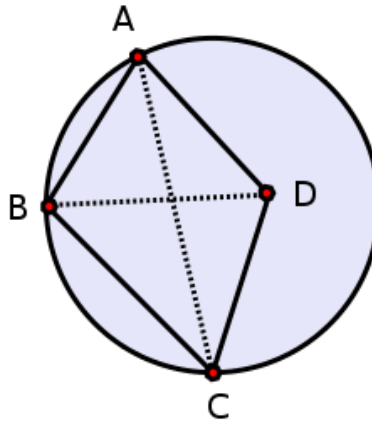
La representación más susceptible para los MDT es en formato digital, tipo TIN o Raster.

El método consiste en la triangulación de Delaunay, el cual garantiza que ningún vértice este en el interior de los círculos circunscritos de los triángulos de la red cuya representación es una malla según Martínez-Casasnovas, (1999). Esta triangulación utiliza una derivada conocida como inCircle de los comandos OpenMesh, la cual trae un plano ABCD que se define si D está contenida en el interior de la región ABC, y se representa como:

$$\det \begin{bmatrix} (A_x - D_x) & (A_y - D_y) & (A_x - D_x)^2 + (A_y - D_y)^2 \\ (B_x - D_x) & (B_y - D_y) & (B_x - D_x)^2 + (B_y - D_y)^2 \\ (C_x - D_x) & (C_y - D_y) & (C_x - D_x)^2 + (C_y - D_y)^2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

En este sentido, se debe de entender que la traslación del punto D al origen, considerando la orientación de la región ABC que de ser transpuesto en otro par adyacente se cambia el valor de la primitiva de verdadera a falsa, o viceversa.

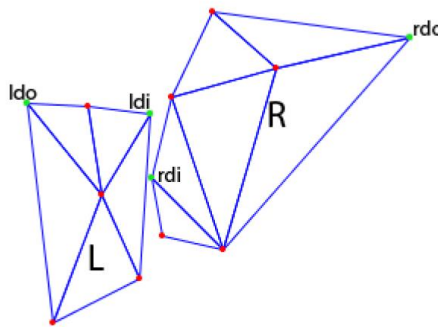
Figura 8: Test del círculo.



Fuente: Valenzuela, 2009

Este algoritmo, realiza una división del conjunto de puntos a triangular hasta generar instancias más pequeñas ordenando los puntos según su primera coordenada, para que una vez ordenados, el conjunto sea dividido en dos mitades según la primera coordenada de los puntos. Con cada mitad se construye la triangulación de Delaunay. La unión de los triángulos solo se realiza cuando las aristas toman la forma R-L o L-R, en el caso de que sean del tipo L-L y R-R se borrarán en las uniones y no se agregarán.

Figura 9. Mitades L, R y sus respectivos índices



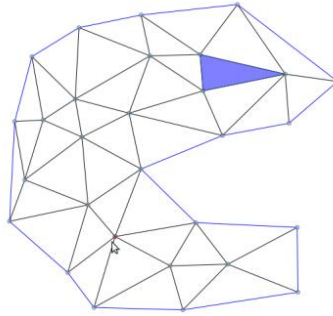
Fuente: Valenzuela, 2009

Como resultado de estas triangulaciones se obtienen vértices candidatos a unir para posteriormente ser evaluados. El algoritmo verifica que el vértice candidato sea válido.

Este procedimiento de selección puede retornar vértices no válidos, pero estos son corregidos.

Con la creación de polígonos que delimiten la triangulación, el método densifica los vértices por las restricciones aplicadas cuando el número de triángulos son acotados.

Figura 10: Definición de un polígono para unir los triángulos.



Fuente: Valenzuela, 2009

La composición del Modelo Digital de Superficie (DSM) el cual contiene elevaciones de las características del terreno natural (MDT), además de las características de vegetación y edificios, utiliza un método de correlación entre los grupos de datos representado por el coeficiente cuadrado c^2 (Pérez M, 2008).

$$c = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}} = \frac{\sum_{i,l}^n \sum_{j-l}^n (x_{ij}-\bar{x})(y_{ij}-\bar{y})}{\sqrt{(\sum_{i,l}^n \sum_{j-l}^n (x_{ij}-\bar{x})^2) (\sum_{i,l}^n \sum_{j-l}^n (y_{ij}-\bar{y})^2)}} \quad (22)$$

Donde el valor de correlación se encuentra entre +1 y -1, Indicando así que la correlación más fuerte entre dos objetos tiene valor 1, y la de menor correspondencia tiene valor 0.

Este proceso automático utiliza el modelo FeatureBasedMatching (FBM por sus siglas en inglés) que mediante correlación de imágenes halla el valor de las alturas en el terreno (Pérez M, 2008). La técnica FBM utiliza pues la correlación LSM (Mínimos Cuadrados) en una entidad de patrón de ventana de Píxeles/Escala de Grises como se muestra en la ecuación (22).

Este método permite hacer un análisis para el cálculo de la altura media de los elementos u objetos,

$$MDO = MDS - MDE \quad (23)$$

Donde *MDO* es el Modelo Digital de Objetos, y representa la altura media de los objetos (Pérez García, 2005). Estas alturas se trataran con el análisis de las geometrías que caracterizan los edificios.

6.2.9 Ortorectificación

Este proceso implica unas transformaciones necesarias para aplicar la condición de colinealidad. El fotocontrol denomina a $(x, y, -f)$ referidas al punto principal (X', Y', Z') coordenadas del objeto; (X'_s, Y'_s, Z'_s) coordenadas del terreno; R la matriz de rotación (3×3) y λ el factor de escala se obtiene:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} X' - X'_s \\ Y' - Y'_s \\ Z' - Z'_s \end{bmatrix} \quad (24)$$

Donde la matriz R , muestra las rotaciones de los tres ejes del sistema de coordenadas objeto con respecto al sistema de fotocontrol.

$$\begin{aligned} R(\chi) &= \begin{bmatrix} \cos\chi & \sen\chi & 0 \\ -\sen\chi & \cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R(\omega) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & \sen\omega \\ 0 & -\sen\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \\ R(\varphi) &= \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sen\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sen\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

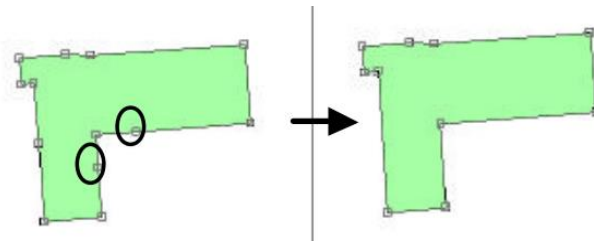
Estas transformaciones entre sistemas de coordenadas permiten la intersección espacial y ayuda en la formulación de las coordenadas de los objetos a partir de las coordenadas de pixel, calculando la huella de la imagen sobre el terreno (MDT) o sobre un plano de referencia que determina el MDT mediante la intercepción de los rayos proyectivos de una muestra de puntos de dos o más imágenes, por ejemplo la vista de adelante y atrás del sensor (Gonzales López, S., 2012).

La ortofotografía es el producto final del proceso fotogramétrico planteado, del cual se ha de tener como necesidad de primera mano para la obtención de Modelos tridimensionales de edificios.

6.2.10 Método de Extrusión

El método de extrusión utilizado para la construcción de modelos 3D de edificios obtiene poliedros que representan en forma de bloque la huella 2D (Ledoux y Martijn, 2010). El tratamiento automático se basa en la extracción de las características de la geometría que componen al edificio, es decir, las coordenadas geométricas se obtienen de polígonos bidimensionales asociados a un valor de altura. La mayoría de polígonos construidos, contienen ángulos en sus vértices de casi 90 grados (ver figura 11) y su número de vértices es limitado (Sugihara y Hayashi, 2001), lo cual significa que cualquier segmento de línea en el polígono tendrá un ángulo de flexión de aproximadamente 90 grados de derecha a izquierda en relación al segmento anterior. Como resultado de este método la forma volumétrica 3D tiene la misma forma de la parte inferior y parte superior.

Figura 11: Vértices del polígono



Fuente: Sugihara y Hayashi, 2001

La componente de altura para los edificios, se relaciona con el Modelo Digital de Objetos. La posición del polígono y la cota del edificio permitirán la extrusión del bloque.

6.3 MARCO REFERENCIAL

El procesamiento de imágenes aéreas ha venido generando adelantos muy importantes en la representación de cartografía georeferenciada. Recientes trabajos de investigación vienen introduciendo la automatización de procesos para la obtención de modelos 3D, sin dejar de mencionar que la asistencia técnica permite un acercamiento detallado de la realidad, más aun cuando se trata de representación tridimensional.

Los vuelos aéreos no tripulados se han convertido en un apoyo fundamental para la fotogrametría. Según Mora, (2013), la característica fundamental de un vuelo UAV es que la cámara que lleva a bordo es una cámara no métrica, es decir no es de gran formato ni va fijada de manera especial al vehículo, por lo que los giros de las fotografías pueden ser bastante mayores y por tanto los errores incrementarse, demostrando que la calibración de la cámara mejora los resultados de los MDT y las Ortofotos que se obtengan a partir de estas fotografías.

Por su parte Zhang (2012) realiza un estudio más complejo sobre modelación tridimensional, estudio que buscaba analizar el estado de las carreteras sin pavimentar, presentando un innovador sistema de imagen digital basada en vehículos aéreos no tripulados (UAV), y que se centra en la recopilación eficiente de datos de estado de la superficie por caminos rurales. Desarrolló un proceso fotogramétrico para obtener un modelo 3d de superficies, llevando a cabo la evaluación cuantitativa del sistema utilizando marcas y conos de tráfico con tamaños conocidos. La precisión de las mediciones de longitud y altura es de alrededor de 0,5 cm, lo que indica un buen rendimiento del sistema.

El sistema presentado es viable para las agencias de transporte local. Por lo tanto, en contraste a los enfoques convencionales de recogida de datos sobre el estado de carreteras, Este sistema no requiere trabajo de campo, Incluso no es necesaria la visita de campo debido a los resultados obtenidos.

González, et al (2009), definen que la creación de los modelos digitales de elevación de entornos urbanos exige considerar el valor altimétrico de los elementos del mobiliario urbano, identificados fundamentalmente en tres categorías: calles, aceras y edificios. Esta información puede ser considerada al ser procesada y tomar los valores altimétricos del entorno geográfico que le corresponda.

El empleo de imágenes aéreas con cubrimiento de la escena que permite la formación de pares estereoscópicos constituye la base esencial de esta tecnología de trabajo, argumentado por el alto grado de información que de ellas se puede extraer, la actualidad de la información y su calidad métrica, es por ello que el procesamiento fotogramétrico en todas sus fases se torna el elemento principal.

La exactitud de un DEM es evaluada por la calidad de los puntos de control los cuales son usados para realizar la orientación exterior del modelo estéreo, de donde se obtiene la creación de la malla aplicando técnicas de medición automatizada. Se realiza midiendo la precisión de los valores de la altitud Z en los puntos de prueba y también por la

adaptación a la superficie del terreno que el modelo representa. La calidad del MDE es afectada entre otros factores por la calidad de las imágenes, la calidad de la fuente de los datos, el algoritmo empleado, el tipo de superficie, sus variaciones de pendiente y el tipo de cubierta y el espaciado de la malla escogido.

En 2012, Escobar, implementa una metodología semiautomática para el modelamiento 3D de edificios mediante la incorporación del algoritmo para la detección de bordes Canny, puesto que por la resolución espacial de las fotografías, no lograba capturar la geometría de las estructuras mediante el análisis visual de los objetos. Como resultado el autor modelo estructuras en un solo bloque con una precisión importante.

Según Yoo y Han 2006, Presentan un estudio realizado en Corea, puesto que sus edificios tienen una forma relativamente simple, las construcciones pueden ser representados por dos elementos de información, las huellas y la altura del edificio. Al añadir la imagen de la cubierta y la fachada de los edificios, la distancia media puede ser representada de una forma realista. Las huellas, es decir, esquemas de los edificios se extraen de mapas digitales, utilizados para crear los edificios virtuales. Las alturas de los edificios se pueden conseguir mediante la aplicación de un proceso estéreo analítico de fotografías aéreas. La imagen aérea con una ortoimagen se puede conseguir a través de una corrección geométrica y la corrección ortográfica de varias fotografías aéreas.

Afirman que la eficiencia en la reconstrucción de edificios en 3D ha demostrado ser ocho veces mayor que los métodos manuales tradicionales plenamente confiando en el trabajo humano. Si los datos de vectores 2D están disponibles, el proceso de reconstrucción se hace mucho más fácil y más rápido. Los experimentos muestran que la generación de un modelo 3D de una ciudad tiene un futuro prometedor en muchas aplicaciones prácticas.

Según Flamanc, et al (2003), la reconstrucción de edificaciones con métodos semiautomáticos y automáticos para la generación de modelos tridimensionales de ciudades, se expresan mediante la utilización de un operador y un algoritmo para la reconstrucción debido a que en el proceso de selección de estas estructuras son muy complejas.

Como resultado final los costos de tiempo de obtención del modelo 3D por medio de algoritmos se vio afectado y por ello se implanto un trabajo humano para discernir en las estructuras de los modelos.

En Colombia La generación de modelos 3D ha experimentado un gran crecimiento en diferentes aplicaciones. La alcaldía de Medellín presento su proyecto para la realización del catastro de la ciudad en 3D en el año 2009 (Pineda, 2011), en la IV reunión anual del

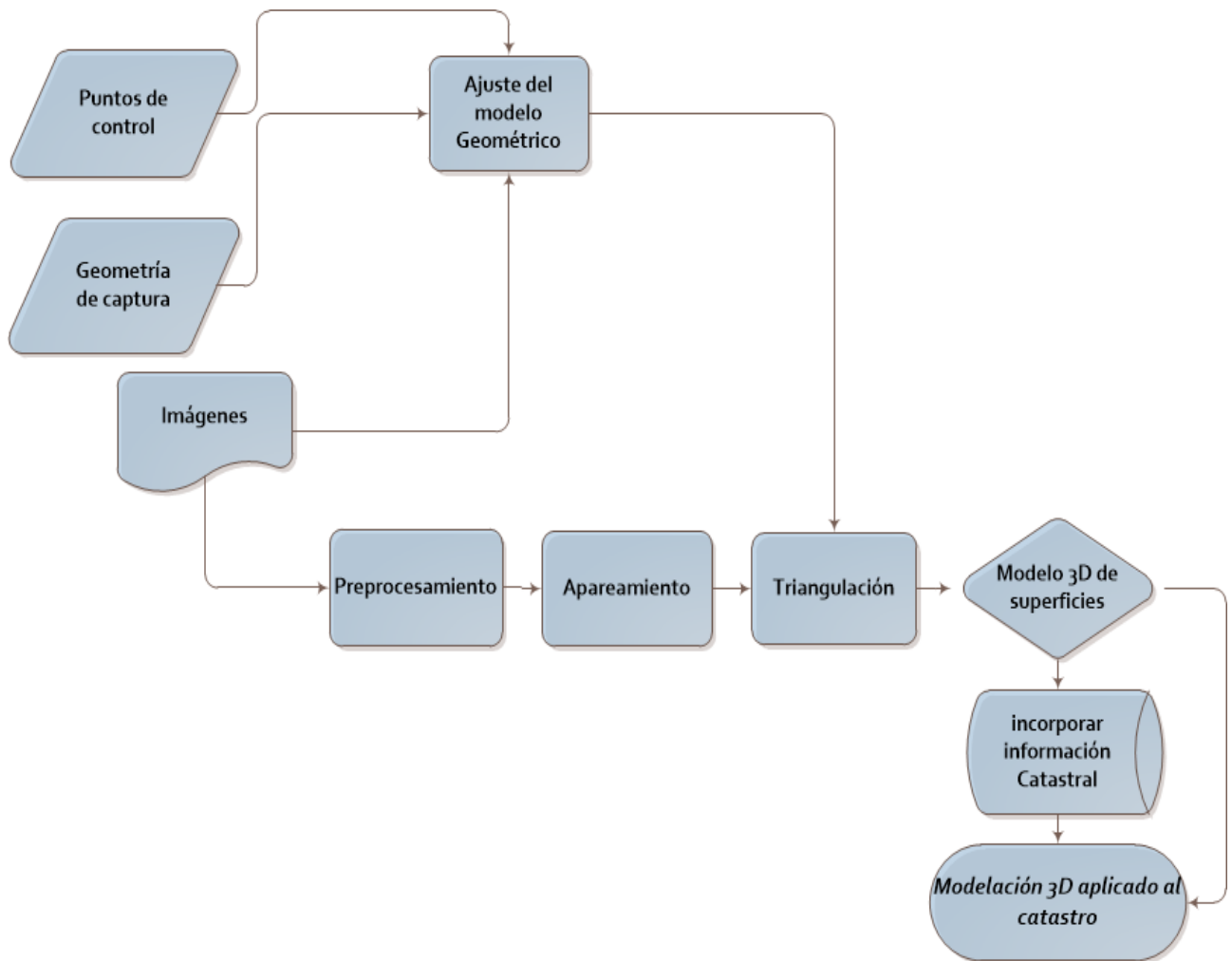
comité sobre el catastro en Iberoamérica CPCI, definiendo el catastro como el “inventario o censo, de los bienes inmuebles pertenecientes al estado y a los particulares, con el objeto de lograr su correcta identificación física, jurídica y económica”, la planificación del proyecto tuvo como fin resolver problemas complejos de planificación y gestión del territorio, partiendo de que esta realidad no son bidimensionales sino tridimensionales; tomando algunas variables como Uso-tipo, Número de pisos, Ubicación barrial, Ubicación sobre la vía, Área del lote, Área construida y Número de accesos, para el análisis del modelo de datos en el catastro 3D.

La metodología implementa imágenes satelitales de alta resolución que permiten identificar construcciones nuevas, predios en altura, conformación de nuevas vías entre otras características de suma importancia para las labores de conservación y actualización de la información catastral.

7 METODOLOGIA

El desarrollo de este estudio busca resolver la problemática propuesta y después de realizar un estudio a través del marco de referencia en el cual se estudiaron los procesos que intervienen en la construcción de la siguiente metodología, de una manera ordenada se presenta en la Figura 12 el cuadro metodológico dentro del cual se trazan las actividades necesarias para llegar a Crear un modelo 3D de un sector del barrio El ingenio de Santiago de Cali orientado a la planeación del catastro urbano y dar así cumplimiento a los objetivos planteados inicialmente.

Figura 12. Esquema de la metodología propuesta:



7.1 Localización

La zona de estudio se encuentra localizada en el sur de la ciudad de Santiago de Cali dentro de la comuna 17, en el barrio El Ingenio, comprendida entre las coordenadas presentadas de la Tabla 1. Esta zona se caracteriza por tener en su mayoría urbanizaciones.

Su densificación urbana inició con casas unifamiliares de dos y tres pisos, para luego complementar el espacio restante con conjuntos multifamiliares. Cuenta con una gran densidad de zonas verdes, y por estar ubicada muy cerca del área destinada para la expansión urbana de la ciudad se convierte en un gran potencial para el desarrollo urbano y a su vez plantea la necesidad de que los recursos naturales que la ocupan sean protegidos.

Tabla 1. Localización y tipo de referencia del proyecto

Superior	373911.117975
Izquierda	329362.869869
Inferior	373446.717975
Derecha	330019.069869
Referencia espacial	WGS 1984 UTM Zona 18N

Figura 13. Área de estudio. Zona Piloto (Sector del Barrio El ingenio)



7.2 Materiales

7.2.1 Imágenes

Debido a que es de suma importancia que este estudio se encaminara a la búsqueda de un método que permita la obtención de un modelo 3D con aplicaciones en el Catastro, se hizo indispensable que se hiciera uso de aerofotografías actualizadas de la zona anteriormente descrita, para lo cual se obtuvieron imágenes aéreas tomadas desde un vuelo aéreo no tripulado con cámara no-métrica, cuya firma encargada del vuelo fotogramétrico fue la Empresa Datum Ingeniería. (Ver Anexo Figura 31).

7.2.2 Adquisición de las imágenes

Las imágenes son tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV) llamado Trimble UX5. Una aeronave no tripulada consiste en un término genérico y se refiere a una aeronave que se opera sin un piloto a bordo. Dicha aeronave también se conoce comúnmente como una aeronave pilotada remotamente (RPA). El UX5 sigue una trayectoria pre-programada donde el despegue, el vuelo y el aterrizaje requieren de una intervención humana o manual mínima en campo realizando la simulación del vuelo con el software Trimble Access el cual se encuentra integrado en un controlador (Yuma), en este se define la zona de la misión, se identifica la dirección del viento, la ubicación del lanzamiento y el lugar de aterrizaje, a continuación se monta el avión al lanzador.

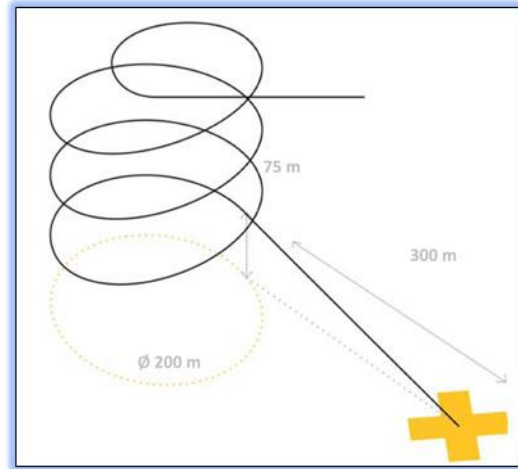
Figura 14. Adquisición de las imágenes



Fuente: Datum Ingeniería

El trimble UX5 alcanza una altura máxima de 750 mts y mínima de 75 mts, tiene una autonomía de vuelo de 50 minutos, comienza su fase de aterrizaje a una altura de 75 metros sobre el nivel del suelo, se aleja 300 metros del lugar donde se ubica el punto de aterrizaje y entra en un radio de 200 metros y un ángulo de 14° al lugar de aterrizaje

Figura 15. Patron de aterrizaje UX5



Fuente: Datum Ingeniería

La resolución de píxel y la altura a la que vuela la UX5 están vinculadas. Cuanto más alto vuela la aeronave no tripulada, mayor es la distancia en el terreno que cada píxel representa en las imágenes que se adquieren durante el vuelo como se muestra en Tabla 2.

Tabla 2. Tamaño de píxel según la altura del vuelo del UX5

Altura de vuelo (m)	Tamaño píxel (cm)
150	5
200	7
250	9
300	11
350	12
400	14
450	15
500	17
550	19
600	20
650	22
700	24

Fuente: Datum Ingeniería

Las fotografías aéreas de este vuelo tienen un costo, gracias a las pruebas comerciales realizadas por la empresa Datum Ingeniería se obtuvieron enviando la propuesta del estudio, con la cual se obtuvo 60 fotografías de la zona de estudio, certificado de calibración y una licencia académica del software fotogramétrico Uasmaster (Inpho) en el que se procesan las fotografías aéreas para obtener la ortofoto del proyecto.

7.2.3 Geometría de captura

Los datos de calibración de la cámara fueron proporcionados por la empresa Datum Ingeniería, estos parámetros definen las condiciones de la formación de la imagen, incluyendo la geometría interna y la óptica de la cámara, así como su posición y orientación respecto a un objeto de referencia; el programa captura las coordenadas de la antena y la orientación de la IMU (Unidad de medida inercial) en el momento de la toma de la imagen, expresando los tres ángulos de rotación, de cabeceo (pitch), de alabeo (roll) y guiñada (yaw) estos valores se indica en la Tabla 3.

- **Cabeceo:** es una inclinación del morro del avión, o rotación respecto al eje ala-ala.
- **Alabeo:** rotación respecto de un eje morro-cola del avión.
- **Guiñada:** rotación intrínseca alrededor del eje vertical perpendicular al avión

Tabla 3. Datos GPS/IMU

<i>Imagen</i>	<i>latitud</i>	<i>longitud</i>	<i>altitud</i>	<i>yaw</i>	<i>pitch</i>	<i>roll</i>
DSC02285.JPG	3,38109978	-76,53657	1318.49	87.47	0.44	-0.39
DSC02286.JPG	3,38111652	-76,5360313	1316.65	89.49	6.87	-1.93
DSC02287.JPG	3,3811275	-76,535468	1317.41	88.05	4.98	-1.07
DSC02288.JPG	3,38114305	-76,5348867	1317.89	87.86	7.83	-2.80
DSC02289.JPG	3,38116115	-76,5343714	1318.02	87.20	5.78	-1.32
DSC02290.JPG	3,38118106	-76,5338041	1317.69	87.24	7.89	-0.61
DSC02291.JPG	3,38119892	-76,5332308	1317.33	88.37	5.91	1.03
DSC02292.JPG	3,38121017	-76,5326791	1317.90	86.98	8.99	-4.04
DSC02293.JPG	3,38122927	-76,5321188	1320.97	88.17	7.30	-2.19
DSC02294.JPG	3,38124723	-76,5315855	1322.49	88.97	3.92	-4.06
DSC02295.JPG	3,38126719	-76,5310067	1319.41	89.94	4.05	0.50
DSC02296.JPG	3,3812694	-76,5304591	1315.82	89.81	6.19	-2.52
DSC02297.JPG	3,38040168	-76,530765	1316.72	270.63	7.40	-1.53
DSC02298.JPG	3,3803935	-76,5313271	1318.82	269.73	4.19	3.05
DSC02299.JPG	3,38039401	-76,5318565	1317.54	269.85	6.64	-1.24
DSC02300.JPG	3,38038564	-76,5324307	1320.35	268.96	7.80	1.00
DSC02301.JPG	3,38037918	-76,5329593	1319.75	267.90	4.50	-2.33
DSC02302.JPG	3,38036977	-76,5335169	1319.70	268.41	8.06	0.49
DSC02303.JPG	3,38034847	-76,5341488	1319.96	266.62	6.46	3.18
DSC02304.JPG	3,38033879	-76,5346515	1319.49	269.32	6.14	0.22
DSC02305.JPG	3,38033011	-76,5352049	1318.51	268.13	5.79	1.04
DSC02306.JPG	3,38031806	-76,5357712	1319.23	267.65	8.02	-2.47
DSC02307.JPG	3,3803096	-76,5363402	1322.38	268.62	5.01	1.29
DSC02308.JPG	3,38030054	-76,5368546	1322.97	265.06	6.94	-1.39
DSC02309.JPG	3,37945652	-76,5365549	1311.85	89.77	7.94	0.57

**MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA PILOTO:
UN SECTOR DEL BARRIO INGENIO**

Imagen	latitud	longitud	altitud	yaw	pitch	roll
DSC02310.JPG	3,37945943	-76,5359797	1314.21	90.54	8.91	0.77
DSC02311.JPG	3,37946088	-76,5354364	1316.49	88.54	7.40	-0.42
DSC02312.JPG	3,37947008	-76,5348642	1318.30	88.25	6.85	-2.07
DSC02313.JPG	3,37948225	-76,5342814	1318.90	89.33	7.45	-1.97
DSC02314.JPG	3,37949384	-76,5337793	1318.68	88.17	6.23	-2.19
DSC02315.JPG	3,37951675	-76,5331795	1317.35	87.73	7.49	0.66
DSC02316.JPG	3,3795276	-76,5326984	1318.18	89.42	6.57	-0.95
DSC02317.JPG	3,37953942	-76,5320563	1317.60	89.71	7.87	-0.78
DSC02318.JPG	3,37954835	-76,5315337	1317.87	88.99	6.89	-1.85
DSC02319.JPG	3,37956472	-76,5310032	1317.24	89.52	5.44	-0.52
DSC02320.JPG	3,37958202	-76,5304293	1317.21	88.07	6.38	-1.34
DSC02321.JPG	3,3787169	-76,5307993	1313.37	268.66	7.78	0.82
DSC02322.JPG	3,37870861	-76,5313161	1314.72	269.21	11.00	0.54
DSC02323.JPG	3,37870268	-76,5318441	1318.97	266.75	7.10	0.39
DSC02324.JPG	3,37869356	-76,5323733	1319.64	268.59	8.18	-0.35
DSC02325.JPG	3,37868671	-76,5329887	1320.19	269.37	7.40	-0.30
DSC02326.JPG	3,37868007	-76,5335111	1319.54	269.55	6.14	0.46
DSC02327.JPG	3,37867031	-76,5340444	1320.54	268.58	8.64	-1.78
DSC02328.JPG	3,37865286	-76,5346024	1321.95	267.87	6.38	1.68
DSC02329.JPG	3,37864693	-76,5351628	1320.99	268.23	5.76	-2.70
DSC02330.JPG	3,37862202	-76,5357922	1320.24	267.94	6.09	2.90
DSC02331.JPG	3,37861398	-76,5362937	1319.59	268.51	6.10	-0.47
DSC02332.JPG	3,37860107	-76,5368506	1320.04	267.98	6.90	2.47
DSC02333.JPG	3,37777166	-76,5365315	1314.12	102.14	6.63	1.67
DSC02334.JPG	3,377773	-76,5359439	1315.37	90.01	6.64	-0.84
DSC02335.JPG	3,37777344	-76,535415	1316.30	89.94	7.40	-2.30
DSC02336.JPG	3,3777795	-76,5348336	1317.97	88.35	7.76	-2.30
DSC02337.JPG	3,37779989	-76,5342699	1320.00	88.81	5.95	1.31
DSC02338.JPG	3,37780831	-76,5337334	1318.23	90.20	7.34	-2.71
DSC02339.JPG	3,37781624	-76,5331583	1318.56	88.68	6.18	-2.26
DSC02340.JPG	3,37783498	-76,5326015	1318.51	87.32	7.37	-0.22
DSC02341.JPG	3,37785393	-76,5320492	1319.14	87.86	6.96	0.05
DSC02342.JPG	3,37786729	-76,5315045	1318.50	89.91	5.50	0.81
DSC02343.JPG	3,37786776	-76,5309568	1318.73	88.95	7.31	-2.38
DSC02344.JPG	3,37788668	-76,5304086	1318.85	87.41	6.70	2.42

Durante la planificación del vuelo, se ajusta la altura de cada vuelo, tomando en cuenta los obstáculos específicos y el área de escaneado del vuelo, para este proyecto se escogió una altura considerando que en el área se encontraban edificios de altura considerable.

Tabla 4. Altura de vuelo

Altura de Vuelo	300 m
-----------------	-------

7.2.4 Puntos de control

Los puntos de control para este proyecto se determinaron a partir de la información suministrada por la empresa EMCALI E.S.P la cual cuenta con un archivo de formato .shp de las cámaras de acueducto y alcantarillado con su correspondiente coordenada (X,Y,Z). Estos puntos fueron escogidos haciendo un análisis previo en campo de manera que se ubicaran claramente los puntos tanto en la imagen como en terreno, sin que hubiera ningún tipo de objeto (árboles, arena, basura, etc.) que interfiriera en la labor de fotocontrol.

Figura 16. Logística realizada para el fotocontrol



7.3 Preprocesamiento

La propuesta metodológica determina un conjunto de procesos que están orientados a cumplir con los objetivos planteados inicialmente y que conducirán a la creación del modelo 3D aplicado al catastro de un sector del barrio El Ingenio (Cali, Valle).

Para la elaboración de las ortofotos es necesario seguir un flujo de trabajo que comienza con la obtención de las fotografías seguido de los procesos de fotocontrol, aerotriangulación, restitución, generación y edición del modelo digital de terreno. Con el tratamiento de las fotografías se obtiene el modelo estereoscópico, el cual permite percibir la profundidad de los objetos o tercera dimensión mediante el proceso de triangulación.

7.3.1 Fotocontrol:

Con base en coordenadas de puntos en el terreno, se determinan las coordenadas (X,Y,Z) de elementos registrados en las aerofotografías, a fin de fijar la posición real del mosaico espacial ortogonal del terreno. Para este fin se determinaron los puntos de control a partir de un archivo de formato .shp de la cámaras de acueducto y alcantarillado de la zona con sus respectivas coordenadas (X,Y,Z). Dentro del desarrollo de este proceso se escogieron 52 puntos de control, de tal forma que se ubicaran de manera homogénea y que abarcara toda la zona de estudio, todos los puntos de control son cámaras fácilmente identificable en las fotografías, Las coordenadas se encuentra en el sistema WGS 84/UTM zona 18, zona UTM (universal Transverse Mercator) para Santiago de Cali, Colombia.

El primer proceso consiste en la orientación interna de las fotografías aéreas, que a partir de un conjunto de parámetros permite transformar los pixeles del fichero imagen a las dimensiones físicas reales (en milímetros) de la fotografía y viceversa. Dichos parámetros son principalmente deducidos de las características de la cámara, como la distancia focal, el punto principal, las dimensiones físicas de la fotografía, y ciertos valores de distorsión de la lente, como se indica en la Tabla 5. Adicionalmente se emplean otros parámetros característicos del vuelo, como la altura de vuelo (ver Tabla 4).

Tabla 5. Características de la Cámara

TIPO VUELO	Aéreo
MODELO SENSOR	Trimble UX5
NOMBRE DE LA CAMARA	Sony Nex - 5R
TAMAÑO IMAGEN	
Height (Pixel)	3264
Width (Pixel)	4912
TAMAÑO DE PIXEL (µm)	4,74999999999941
MODELO DE LENTE	Rectilíneo
DISTANCIA FOCAL	15,5172
ANGULOS DE DISTORSION DESCENTRICA	
Columna	0,00069871
Fila	0,000393933
PERPECTIVA DEL CENTRO DE PIXEL	
Punto Principal X	-2451,439849
Punto Principal Y	-1622,823293

7.3.2 Aerotriangulación:

En este procedimiento se realiza el cálculo de las coordenadas X, Y, Z de todo el bloque fotogramétrico, este proceso tiene como finalidad dar coordenadas a todo el proyecto, se escogieron 52 puntos seleccionados por su precisión, visibilidad y homogeneidad respecto al área de recubrimiento de las imágenes. A partir de estos se generan los puntos de apoyo (tie points) para obtener la orientación absoluta del bloque y finalmente la georeferenciación del proyecto.

Los puntos de control utilizados en el proyecto se presentan en la Tabla 6:

Tabla 6. Puntos de control

ID	ESTE_X	NORTE_Y	ALTURA_Z
11103	329222,012584	373279,346405	979,889
11161	329490,481128	373457,097166	975,481
11168	329586,911643	373456,662547	974,635
12913	329863,360873	373816,395676	969,195
10785	329969,520978	373698,006343	970,377
11000	329202,142964	373425,625364	978,665
12828	329160,981043	373815,072176	976,765
12841	329260,427078	373840,823535	975,106
12842	329251,261385	373899,671514	974,563
12843	329241,536045	373963,056942	974,233
12848	329352,918799	373762,039119	974,565
12850	329449,559713	373850,910169	972,390
12851	329400,513824	373854,109243	973,016
12855	329364,233549	373919,050309	972,899
12862	329266,598505	374031,252673	972,581
12863	329354,867232	374043,911962	971,523
12871	329403,662484	374040,717157	971,198
12874	329536,918204	373748,391710	972,155
12903	329712,456601	373732,843839	969,989
12904	329752,190416	373730,792111	969,466
12910	330052,078798	373795,750800	968,886
12911	329972,144230	373800,205870	969,064
12912	329878,770434	373805,501277	969,235
12918	329807,868443	373881,850663	968,443
12927	329891,702658	373876,695314	968,463
12928	329981,486609	373871,130609	968,487
12929	330059,370797	373866,384629	968,506
12933	329748,206712	373949,981686	968,800
12936	329984,788102	373934,673177	968,443
12939	329679,130531	374018,305626	969,377

12940	329748,755036	374013,750882	968,604
12941	329817,910349	374009,340281	968,355
12943	329990,719472	373998,627257	968,399
12944	330070,451554	373993,674149	967,988
13086	329438,539054	373758,118642	973,440
13098	329453,442233	373971,026895	971,181
13103	329252,067780	374045,831167	972,405
13110	329667,241131	373741,975664	970,402
13111	329664,016578	373842,609599	969,521
13115	329459,678097	373912,136568	971,702
13122	329661,928400	373927,030624	968,891
13134	329787,980250	373746,862109	969,662
13143	330137,980620	373795,848672	968,644
13145	329873,670413	373705,716392	971,001
13148	330142,001811	373864,926435	968,178
13154	329692,338215	373893,941161	968,747
13171	329844,034477	374073,336619	968,316
13172	329917,151002	374069,179264	968,334
13276	329133,289852	373854,652408	976,679
13387	329510,978457	374029,249806	970,501
13390	329711,632130	373800,398656	969,552
13391	329767,025142	373797,152317	969,013

7.3.3 Modelo Digital de superficies:

La generación del MDS depende de una buena georeferenciación de las imágenes, para obtener las coordenadas **X,Y,Z** de cada pixel lo cual supone muchos puntos para generar una buena representación 3D de todos los elementos en el área. Este modelo contiene las elevaciones de las características naturales del terreno, además de las elevaciones de características como la vegetación, árboles y edificios. La principal ventaja del modelo de superficie es que ofrece alturas como su nombre lo indica de la superficie del suelo permitiendo que la línea de visión y análisis sea mejor para la generación 3D de los edificios.

Con el suministro de la información por parte de las Empresas Municipales de Cali (EMCALI E.S.P), las coordenadas **X, Y y Z** (Cota Rasante) de las cámaras o recamaras de alcantarillado y acueducto presentes en el área de estudio se logra modelar mediante interpolación de puntos la superficie desnuda de la zona estudiada por medio de las Ecuaciones 21 y 22.

El proceso permite realizar visualizaciones estero de las imágenes. Para la estimación de cotas se procede con el cálculo de perfiles automáticos de curvas de nivel.

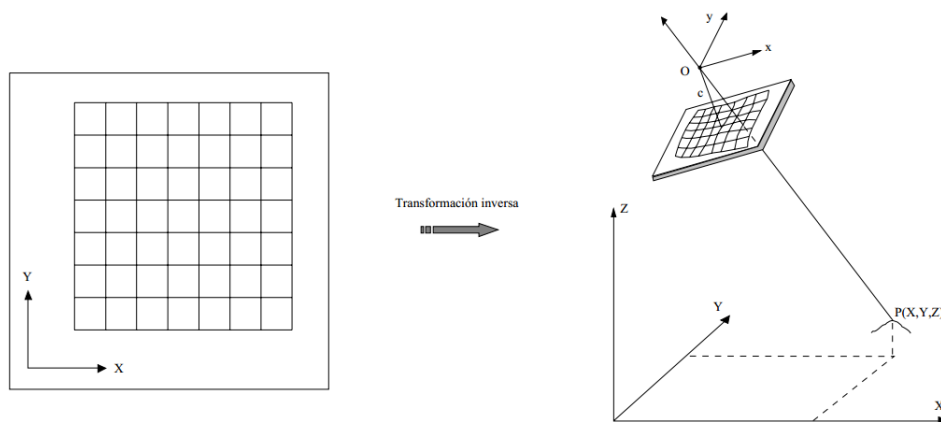
7.3.4 Generación de la ortofoto:

Para la obtención de la ortofoto es importante la calidad de las fotografías aéreas, además de buenos resultados en los procedimientos anteriores, que hayan arrojado un modelo digital de superficies que permita llevar los elementos desplazados a su verdadera posición, corrigiendo 1. El desplazamiento en la imagen producido por la inclinación de la imagen fotográfica; 2. El desplazamiento en la imagen como consecuencia del relieve de la estructura o del objeto; 3. El desplazamiento en la imagen producido por el sistema de proyección, para realizar mediciones exactas en estas y construir un modelo tridimensional de la zona con exactitud.

La eliminación de los desplazamientos anteriores se conoce como rectificación diferencial. Este método permite la obtención de ortofotografías donde la textura o color que ese le asigna a la ortofotografía final se extrae a partir de la información radiométrica de una sola imagen original o de múltiples imágenes.

Este proceso inicia con la disposición del modelo digital de elevación en igual sistema de coordenadas del derivado del proceso de fotocontrol. La ortoproyección utiliza la transformación inversa.

Figura 17. Transformación Inversa



Fuente: Pérez Álvarez, 2001

La imagen digital es proyectada a la proyección del terreno, es decir, los píxeles del mapa se proyectan a la fotografía de manera que al obtener trapecios se compone la imagen

digital. Esta relación, la ortogonal del terreno y la cónica de la fotografía vienen dadas por las ecuaciones de colinealidad expresada en la Ecuación (6).

7.3.5 Generar 3D de las edificaciones:

La creación del modelo tridimensional se realiza teniendo como base la ortofoto generada y en la cual se identifica las estructuras presentes para la construcción de las geometrías que definen los edificios.

El MDE del área de estudio permitirá analizar la cota en la cual se halla localizada la estructura. El análisis posterior involucra la altura del edificio, que debe de conservar una altura promedio al que se generó en el MDS. La diferencia entre los modelos de elevación y de superficie permitirá tener un conocimiento de la altura media de la construcción como lo indica la Ecuación (23).

El proceso continua con la construcción de la geometría de la cara superior de la estructura analizada desde la ortofoto. La resolución espacial de la misma permite obtener de forma directa y con combinación de bandas la geometría.

Figura 18: Geometría de la estructura sobre ortofoto.

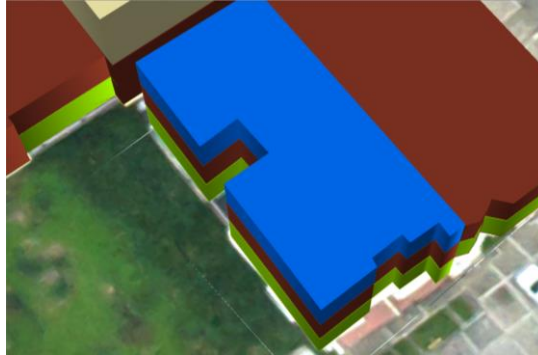


El análisis mediante combinación de bandas permite la correcta construcción de la geometría tipo polígono (Figura 18). La modelación 3D del edificio, parte de la estimación media de la altura del edificio. Este análisis permite inferir cuales con los objetos que se deben considerar como edificios, para que de esta manera se eliminen los que no lo son, como es el caso de árboles o formas especiales de relieve.

El método utilizado para la modelación 3D es el de extrusión, basado en un ajuste de propiedad para la capa de entidad y requiere que ya se haya aplicado una altura base, que

para el caso es el MDO, a la capa de entidades para que se aplique la extrusión, y que se entiende como un proceso de expansión vertical de una forma 2D plana para generar un objeto 3D.

Figura 19: Extracción de la geometría del Edificio



La geometría característica del edificio es obtenida considerando como altura la estimación media de su altura, lo que genera el bloque que representa al edificio. (Figura 19). La representación, además busca que se pueda hacer un análisis individual por pisos de acuerdo a la altura del edificio.

La información que esta entidad de polígono adquiere será construida mediante la indagación en la parte catastral, puesto que este es el interés dentro de esta investigación.

7.3.6 Agregar información catastral

Para la creación del Modelo de Datos Catastral (MDC) del proyecto se toma como dirección el instructivo que ofrece del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC (IGAC, 2012), entidad encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia; elaborar el catastro nacional de la propiedad inmueble; realizar el inventario de las características de los suelo. Es importante decir que el catastro es el inventario de la propiedad Inmueble, se constituyen como una base de datos al servicio de la comunidad y el gobierno.

En los procesos de formación y actualización catastral la información de los predios ha venido consignándose tradicionalmente en un documento análogo denominado ficha Predial, que luego se digita en las bases de datos alfanumérica y gráfica (IGAC, 2000-2012).

La siguiente información es la que se tendrá en cuenta para la construcción de la base de datos Catastral:

El municipio está dividido en área urbana y área rural, a su vez el área urbana se compone de cabecera municipal y corregimientos, los cuales para catastro corresponden a una Zona (Tipo de Avalúo) diferente así como indica en la Tabla 6:

Tabla 7.Zona (tipo de avalúo)

ZONA	AREA
00	rural
01	cabecera
≥2	corregimiento

Fuente: IGAC, 2012

Para el proyecto por ser en un área urbana y ser un proyecto piloto solo se tendrá en cuenta la zona 01, pero se expone la demás información para indicar la clasificación que realiza el IGAC para esta información como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 8: Estructura del número identificador del predio.

DPTO		MPIO		ZONA		SECTOR		COMUNA		BARRIO		MANZANA O VEREDA				TERRENO				CONDICION DE PROPIEDAD	NUMERO DE CONSTRUCCION								
																					N° del Edif o Torre		N° del piso dentro del Edif.		N° de unidad en PH o mejora				
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
DANE- DivisiónPolítico Administrativa.	DANE- DivisiónPolítico Administrativa.			00 Rural	Sector	Comuna	Barrio	Manzana	Vereda	numero de orden de terreno en la manzana o vereda	0 NPH	N° de torre dentro del terreno	N° piso dentro del Edif. o torre	Unidad Predial o mejora															
											9 PH																		
											8 condominio																		
											7 parques cementerios																		
				6 Mejoras por edificaciones en terreno ajeno en PH																									
				5 Mejoras por Edificaciones en Terreno Ajeno de propiedades no reglamentadas en PH																									
				4 Vías																									
				3 Bienes de uso público diferentes a las vías																									
				2 No ley 14																									

Fuente: IGAC, 2012

Formando finalmente un código de 30 posiciones correspondiente al terreno del predio.

1. ZONA (Posiciones 6 y 7): En este campo se diligencia con la información que anteriormente se denominaba Tipo de Avalúo.

2. COMUNA (Posiciones 10 y 11): Estos campos corresponden a los códigos de la Comunas aprobados por Acuerdo Municipal, su número corresponde con el definido en el Acuerdo o norma que las creó.

En caso que no esté numeradas oficialmente, corresponderá a la Autoridad Catastral su numeración, iniciando desde la esquina Noroccidental en el sentido de las manecillas del reloj.

3. BARRIO (Posiciones 12 y 13): Corresponden al Barrio aprobado por el POT, PBOT, o el EOT según corresponda. Su numeración corresponderá con la asignada por el Acuerdo o norma que lo creó.

Si no existe una numeración definida, la Autoridad Catastral procederá a determinarla iniciando en la esquina Noroccidental y continuando en el sentido de las manecillas del reloj. Si por alguna razón no existe el barrio en la unidad orgánica catastral, los campos irán en ceros.

4. CONDICIÓN DE PROPIEDAD (Posición 22): Este campo se compone de un número que corresponde a una caracterización temática de las condiciones de cada predio.

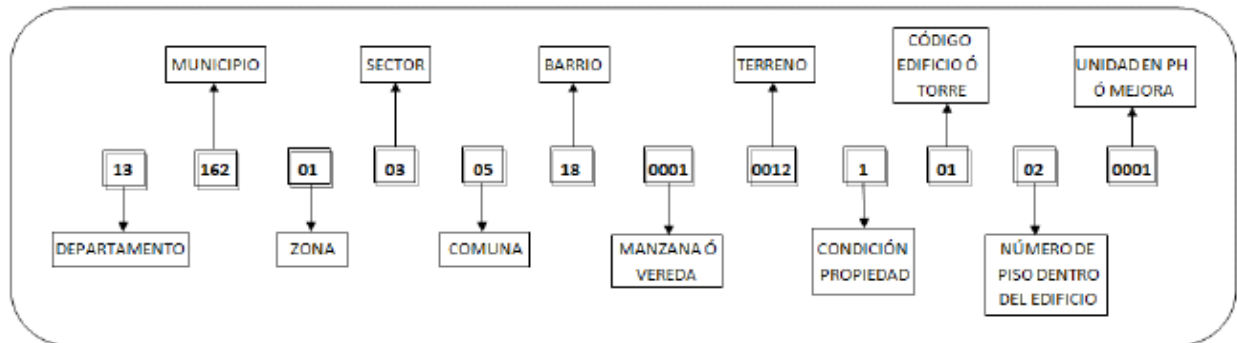
5. NÚMERO DEL EDIFICIO O TORRE (Posiciones 23 y 24): Este campo se diligencia para indicar el número de la construcción en la cual se encuentra ubicada una Unidad, y sólo debe diligenciarse cuando se trata de Unidades ubicadas en predios en Propiedad Horizontal (PH). De lo contrario, estos campos deben diligenciarse con ceros.

6. NÚMERO DEL PISO DENTRO DEL EDIFICIO (Posiciones 25 y 26): Este campo indica el piso de una construcción en el que se encuentra una Unidad, y sólo debe diligenciarse cuando se trata de Unidades ubicadas en predios en PH. De lo contrario, estos campos deben diligenciarse con ceros.

7. NÚMERO DE UNIDAD EN PH O MEJORA (Posiciones 27, 28, 29 y 30): En estos campos se diligencia el código o número catastral de la unidad (Ej.: 0153). Este no debe confundirse con el nombre genérico de la Unidad (Ej.: AP 101), y sólo debe diligenciarse cuando se trata de Unidades ubicadas en predios en PH, de lo contrario estos campos deben diligenciarse con ceros.

Nota: Se debe tener en cuenta que cuando el atributo Número de Piso dentro del Edificio corresponde a un subnivel (Numero_Sotanos ó Numero_Semisotanos), se coloca un número positivo en este campo. Y para indicar que se trata de un subnivel, se diligencia con 9 en la posición 27 del código. Ej.: 13 162 01 03 05 18 0001 0012 1 01 02 9001.

Figura 20. Numero identificador Predial



Fuente: IGAC, 2012

7.3.7 Validación

El proceso de validación se concentró en estimar cuales son los errores en precisión de posición de los edificios representados. Para ello se hace uso de una ortofoto georeferenciada de la ciudad de Santiago de Cali, con cubrimiento del área de estudio de la presente investigación.

Tomando como base las geometrías que ese utilizaron para la construcción del modelo 3D, se indaga en la posición espacial de su correspondencia en la ortofoto. Es importante señalar que la empresa prestadora de este insumo es el Catastro Municipal de la ciudad de Santiago de Cali, y que solo se toma el recubrimiento de la zona estudiada, puesto que el volumen de almacenamiento que esta ocupa es considerable.

8 RESULTADOS

Una vez constituida la metodología se presenta a continuación los resultados obtenidos, los cuales llevan una secuencia que permiten alcanzar cada logro propuesto dentro de los objetivos teniendo como fin último la modelación 3D aplicada al catastro de un sector del barrio el ingenio, Santiago de Cali.

Es importante señalar que el manejo y tratamiento de las fotografías aéreas fue realizado en conjunto bajo los software UASmaster (inpho), ®ArcGis y Arcscene.

8.1 Obtención de las Fotografías aéreas:

Este es el primer paso en el cual se adquiere el material principal para el desarrollo práctico del proyecto; La empresa Datum Ingeniería, suministró 60 fotografías del barrio El Ingenio ubicado en la ciudad de Cali (Ver Anexo Figura 31).

8.1.1 Fotocontrol

En esta fase se identifican en las fotografías aéreas los puntos existentes en el terreno y se incorporan las coordenadas horizontales y verticales de cada punto.

8.1.2 Definición del proyecto

El proceso fotogramétrico se realiza en el software UASmaster (inpho), el primer paso es definir el sistema de referencia del proyecto, el Datum utilizado es WGS84/UTM zona 18N, que es la zona para Santiago de Cali, Colombia y se define la cámara utilizada con parámetros como distancia focal, dimensión del sensor y distorsiones generadas; este software trae por defecto la información de la cámara utilizada en la toma de las fotografías.

El software obliga que se introduzcan unos datos iniciales de orientación externa, en los que se incluyan las coordenadas X, Y y Z y los giros omega, phi y kappa de cada uno de los puntos de vista de cada fotografía como se muestran en la (Tabla 3).

Después se selecciona las fotografías que se incluirán en el proyecto, en este caso 60 fotografías (Figura 31) y se fija la cámara con la que se tomaron, la altura media de vuelo igual a 300 metros, el número de líneas de vuelo y que fotografías perteneces a cada línea, en este caso fueron 5 líneas de vuelo con 12 fotografías en cada una.

Por último se importan las coordenadas de los puntos de control (Tabla 6) los que permitirán dar coordenadas al proyecto.

8.2 Aerotriangulación

En este paso se definieron los parámetros de orientación externa de las fotografías y su georreferenciación. Este proceso se lleva a cabo con la finalidad de determinar las coordenadas de todo el proyecto a partir de puntos del terreno, es necesario obtener un error por debajo de 1 para que este proceso resulte satisfactorio.

Para este proyecto se usan 52 puntos de control, luego de los procesos de orientación interna y selección de sistema de coordenadas se procede a poner dentro de la fotografía aérea los puntos posicionado dentro de la imagen con sus respectivas coordenadas para Generar los puntos de paso de forma automática que se distribuyen homogéneamente en todo el bloque.

Para cada punto se calcularon los valores residuales y desviación estándar y todos se encuentran por debajo de lo requerido, lo que indica un buen resultado en este proceso

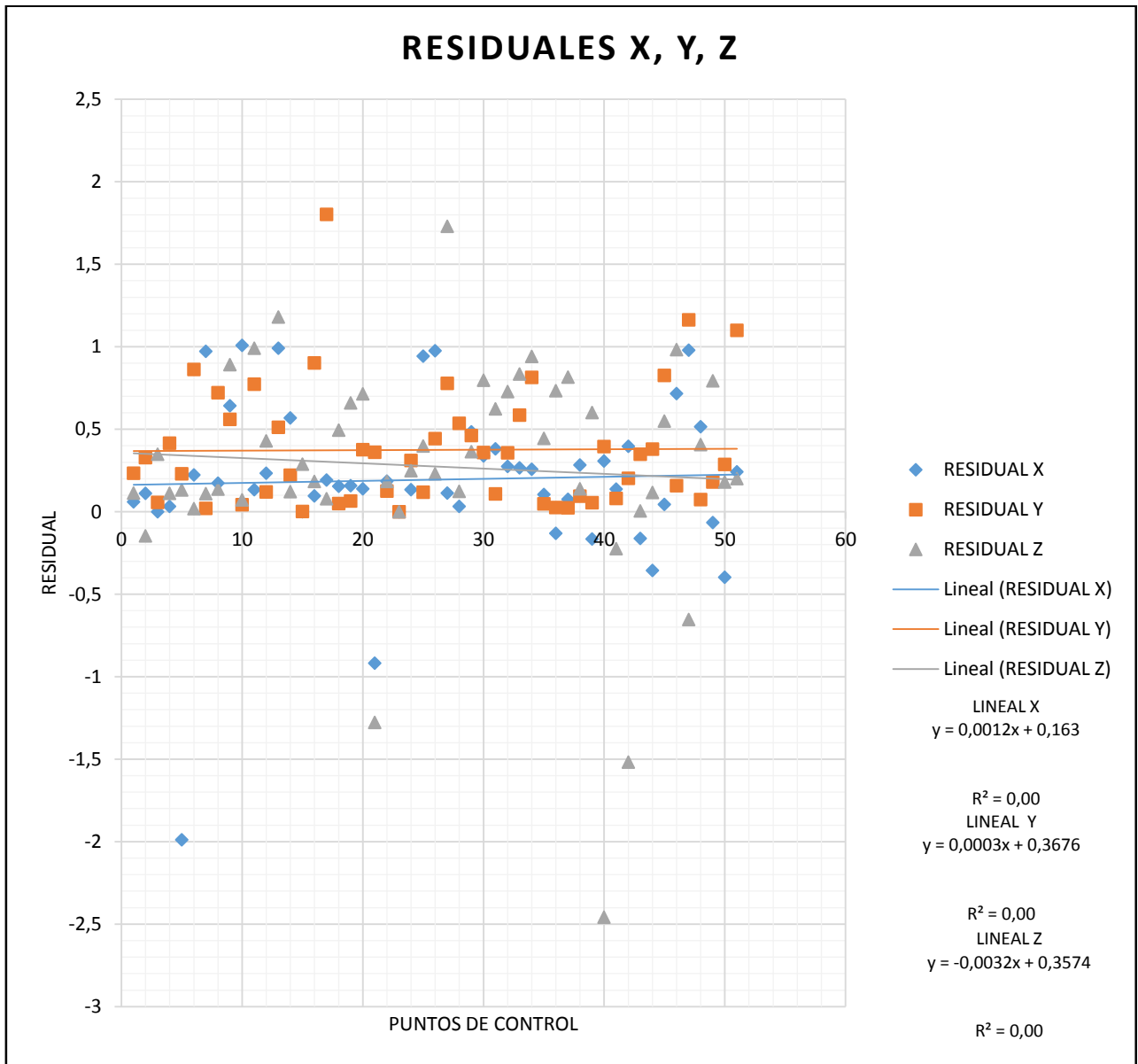
Tabla 6. Valores residuales del proceso de aerotriangulación

ID	RXY	RX	RY	RZ
11103	0,564732	0,059857	0,234574	0,112765
11161	0,834921	0,11248	0,327781	-0,14529
11168	0,384923	0,000342	0,056778	0,348745
12913	0,268912	0,032324	0,415378	0,11239
10785	0,26734	-1,98873	0,231113	0,132122
11000	0,001923	0,223211	0,863101	0,018504
12828	0,104309	0,973322	0,021342	0,110923
12841	0,390116	0,173202	0,721901	0,137289
12842	0,18242	0,643291	0,559913	0,892101
12843	0,110831	1,009231	0,043192	0,07239
12848	0,024532	0,134219	0,773803	0,992319
12850	0,183421	0,233216	0,120934	0,428999
12851	0,362289	0,992312	0,512902	1,181182
12855	1,52335	0,568743	0,22212	0,12131
12862	0,47477	0,00073	0,001029	0,288931
12863	0,19833	0,096382	0,902343	0,183742
12874	0,162617	0,154949	0,049343	0,49494
12903	0,171821	0,159035	0,065041	0,660733
12904	0,401028	0,139541	0,375968	0,715813
12910	7,706343	6,931843	-3,802604	8,082264
12911	0,985675	-0,916897	0,36174	-1,277432
12912	0,285077	0,186277	0,12580	0,183503
12918	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
12927	0,339131	0,134416	0,311356	0,249624
12928	0,95158	0,944172	0,118509	0,398929
12929	0,0722443	0,976117	0,444217	0,22974
12933	0,7865	0,114013	0,778192	1,730649

12936	0,537391	0,032059	0,536434	0,123677
12939	0,671076	0,485562	0,46322	0,364809
12940	0,494188	0,339358	0,359246	0,797706
12941	0,397151	0,382024	0,108565	0,623227
12943	0,450971	0,274534	0,357779	0,728229
12944	0,643769	0,266299	0,586109	0,834939
13098	0,116394	0,105757	0,048611	0,44526
13110	0,076281	0,076027	0,023384	0,816438
13111	0,298791	0,283331	0,094866	0,139082
13115	0,173184	-0,164427	0,054372	0,602191
13122	3,409113	0,30758	0,39521	-2,456806
13134	0,159936	0,138243	0,080427	-0,222548
13145	0,384964	-0,16195	0,349128	0,005025
13154	0,828357	0,044216	0,827176	0,550216
13171	0,734361	0,717096	0,1583	0,983473
13172	0,114073	0,979858	1,163942	-0,652937
13387	0,191725	-0,065034	0,180358	0,794032
13390	0,490642	-0,397699	0,287342	0,1808829
13391	1,126604	0,243126	1,100057	0,201494

Los valores residuales son las distancias entre los puntos de control original y las nuevas coordenadas estimadas de los puntos de control, y por tanto es posible utilizarlos como base para corregir esa diferencia y así disminuirla, es de las mejores maneras de comprobar la bondad de la aerotriangulación a través de los residuos de los puntos. Esto es realmente lo que nos proporciona la “precisión” de la aerotriangulación. En la tabla 6 se exponen los residuales finales, la columna ID indica la descripción de la fotografía aérea, El RXY resulta de las componentes X y Y mostrando el vector de error planimétrico; RX, RY y RZ representan los valores residuales en coordenadas este, norte y altura respectivamente. El valor mínimo tanto en las componentes X, Y y Z son -0.916, 0.001 y -0.652 respectivamente; los residuos máximos obtenidos en igual orden son 1.009, 1.803 y 1.730. La línea de tendencia, nos permite observar que el comportamiento de los residuos está entre 0.1 y 0.4 (ver figura 21).

Figura 21. Comportamiento de los Residuales en X, Y y Z



De la misma manera se obtiene el comportamiento de las desviaciones estándar de los puntos principales de control. El SXY muestra el vector de desviación estándar planimétrica, La separación mínima de los datos (SX, SY y SZ) es de -1.076 en X, 0.002 en Y y 0.011 en Z. la desviación máxima de las componentes es 0.928, 0.821 y 1.393.

Tabla 7. Desviaciones estándar obtenidas del proceso de aerotriangulación

ID	SXY	SX	SY	SZ
11103	0,896744	0,2489292	0,002381	0,283342

**MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA PILOTO:
UN SECTOR DEL BARRIO INGENIO**

11161	0,112439	0,2224281	0,452138	0,087123
11168	0,3339	0,175567	0,293012	0,56594
12913	0,121349	0,128232	0,139012	0,13892
10785	0,834023	0,627361	0,270003	0,25236
11000	0,398111	-1,076001	0,111446	0,578902
12828	0,275339	0,320981	0,280321	0,036142
12841	0,77231	0,928111	0,111921	0,311302
12842	0,024344	-1,009341	0,469902	0,021332
12843	0,655391	0,124234	0,216671	0,011231
12848	0,390932	0,669301	0,15665	0,038213
12850	0,982211	0,738921	0,457124	0,873112
12851	0,123448	0,834112	0,224432	0,837131
12855	0,56819	0,755213	0,187455	0,313211
12862	0,931342	0,104022	0,821005	0,184212
12863	0,093432	0,093421	0,118311	0,192394
12874	0,61048	0,450818	0,411641	0,303527
12903	0,403018	0,276236	0,293457	0,874761
12904	0,381029	0,268454	0,270399	0,834761
12910	0,607582	0,473064	0,38127	1,23272
12911	0,505409	0,383812	0,328825	1,144315
12912	0,362475	0,265846	0,246402	0,767883
12918	0,000000	0,242235	0,298449	0,780703
12927	0,392791	0,268696	0,286508	0,780703
12928	0,493188	0,36001	0,337086	1,013694
12929	0,690725	0,536735	0,434761	0,471635
12933	0,451549	0,267686	0,363649	0,884918
12936	0,562875	0,385503	0,410141	1,205544
12939	0,53965	0,292926	0,453229	0,984974
12940	0,50639	0,278973	0,422617	0,9113114
12941	0,499539	0,279263	0,414187	0,906421
12943	0,652675	0,43198	0,489262	1,24807
12944	0,733312	0,521958	0,515078	0,365022
13098	0,739052	0,509715	0,535152	1,374154
13110	0,424905	0,296136	0,304709	0,9157
13111	0,388664	0,271687	0,277932	0,895155
13115	0,708143	0,510375	0,4909	1,3774494
13122	0,478058	0,284653	0,384073	0,999888
13134	0,360649	0,259006	0,250965	0,798943
13145	0,429667	0,302862	0,304777	0,91344
13154	0,394778	0,256949	0,299712	868748

13171	0,61992	0,351153	0,510874	1,064848
13172	0,626791	0,370953	0,505233	1,092099
13387	0,744894	0,474841	0,57392	1,392901
13390	0,345194	0,247617	0,24051	0,766343

8.3 Modelo Digital de Elevación y de Superficies

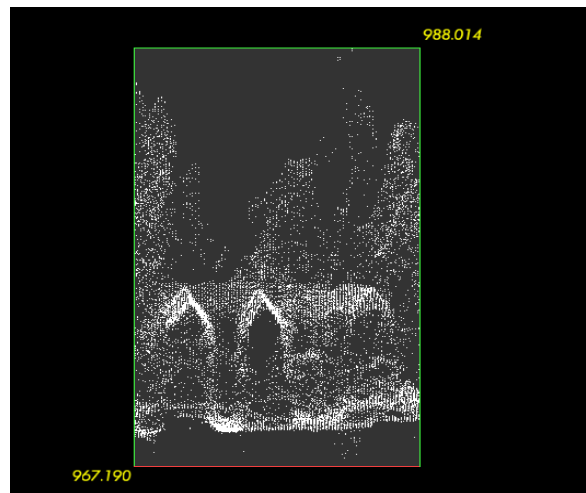
El Modelo Digital de Elevación generado mediante la implementación de los procesos planteados haciendo uso de la triangulación Delaunay (Ecuación 21), permite el análisis de las cotas para la ubicación de las estructuras o edificios en el terreno.

El Modelo Digital de superficies se obtiene mediante la técnica de correspondencia o “matching”, después del proceso de aerotriangulación en el que se fijaron los puntos de control y los puntos de paso generados; el software dispone de una herramienta gráfica para analizar el bloque de una forma exhaustiva obteniendo imágenes monoscópicas y estereos, las que indican de manera visual la calidad del MDS y el éxito del proceso de aerotriangulación.

- **Imagen monoscópica**

Es una proyección de una escena tridimensional en un plano, la siguiente imagen es una nube de puntos, que genera un perfil de un área deseada del proyecto para visualizar el respectivo modelamiento, como se visualiza en la Figura 22.

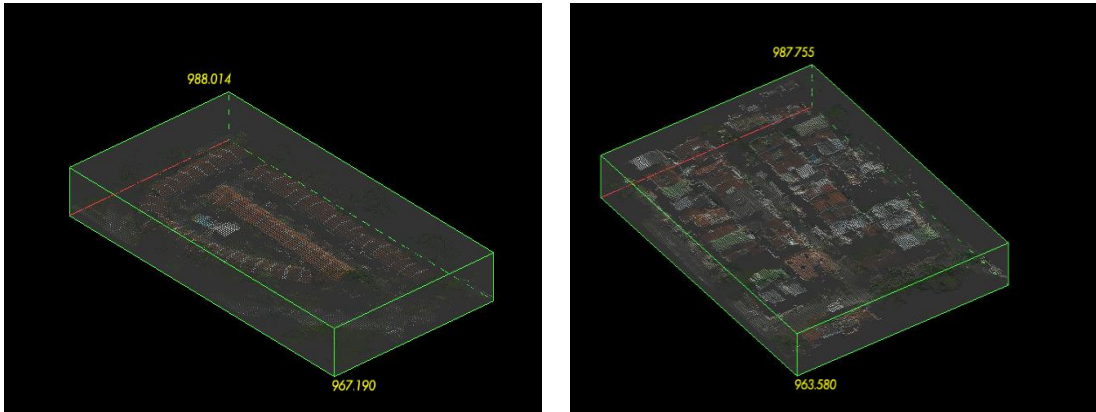
Figura 22. Imagen Monoscópica



- **Imagen estéreo**

La visualización estéreo proporciona más profundidad y realismo a las vistas 3D, la Figura 23 presenta de manera tridimensional la nube de puntos que se obtuvo con el proceso de aerotriangulación y que dieron lugar al MDS:

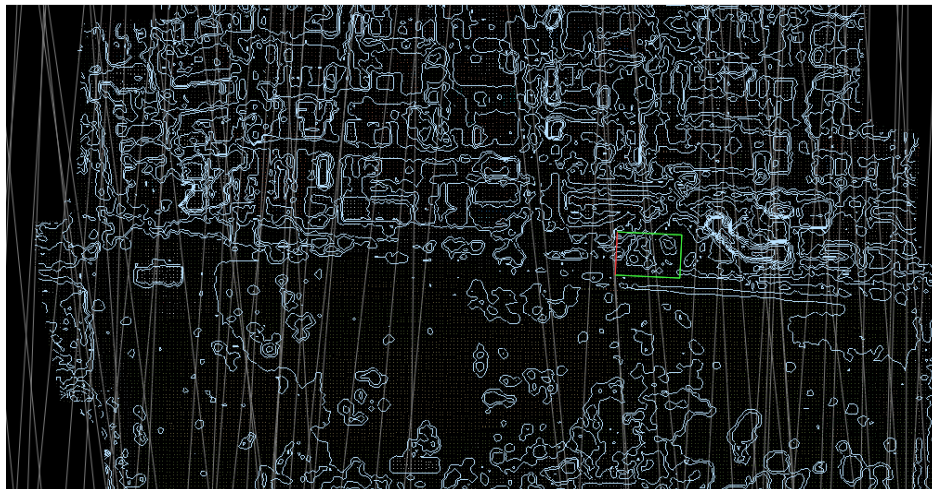
Figura 23: Imágenes Estéreo.



En la Figura 23 se muestra la cota mínima y máxima del área esta herramienta gráfica permite una interpretación del terreno, este procedimiento se realizó en varias partes del proyecto para verificar los cambios de altura que habían y si coincidían con la realidad.

Igualmente se generaron curvas de nivel cada 5 metros, con el fin evaluar la presencia de errores antes de generar el modelo como se presenta en la Figura 24.

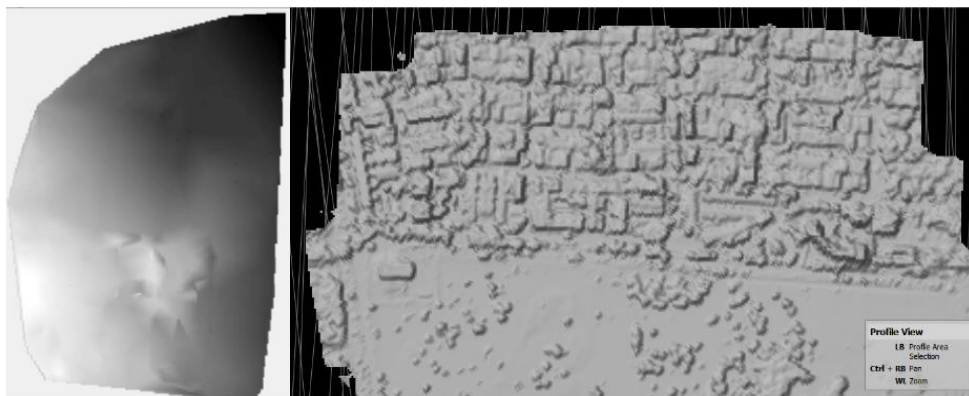
Figura 24: Curvas de nivel cada 5 m del proyecto



Finalmente se genero una nube de puntos de forma totalmente automática; mediante Tecnicas CBM (Cost-Based Matching). Este procedimiento se inicia con la cual se selección de un detalle en la una imagen y este se identifica en la foto homologa, una vez obtenidas las coordenadas en el sistema foto mediante la ecuacion de colinealidad (Ecuacion 22), se interceptan los rayos y finalmente se obtiene la z en el terreno, en el ámbito de la fotogrametría se utiliza el término “Matching” para expresar la correlación entre diversos conjuntos de datos, es decir es una tecnica pixel a pixel, para cada pixel de una imagen correponde un pixel de la segunda y asi sucesivamente generando una densidad de puntos que finalmente genera el Modelo Digital de Superficies, tambien se utiliza algoritmos de clasificación que permiten separar automáticamente puntos del terreno y puntos de edificaciones o vegetación para dar una correcta modelacion a la superficie.

El Modelo Digital de Superficies es elaborado mediante tecnicas de correlación automática (Ecuacion 22), generando un bloque de puntos con sus alturas verdaderas sobre el terreno. La generación está basada en la comparación de zonas de las fotos usando un algoritmo iterativo de cálculo de correlaciones que es capaz de encontrar puntos similares en las fotos, dando como resultado la superficie que se presenta en la Figura 25.

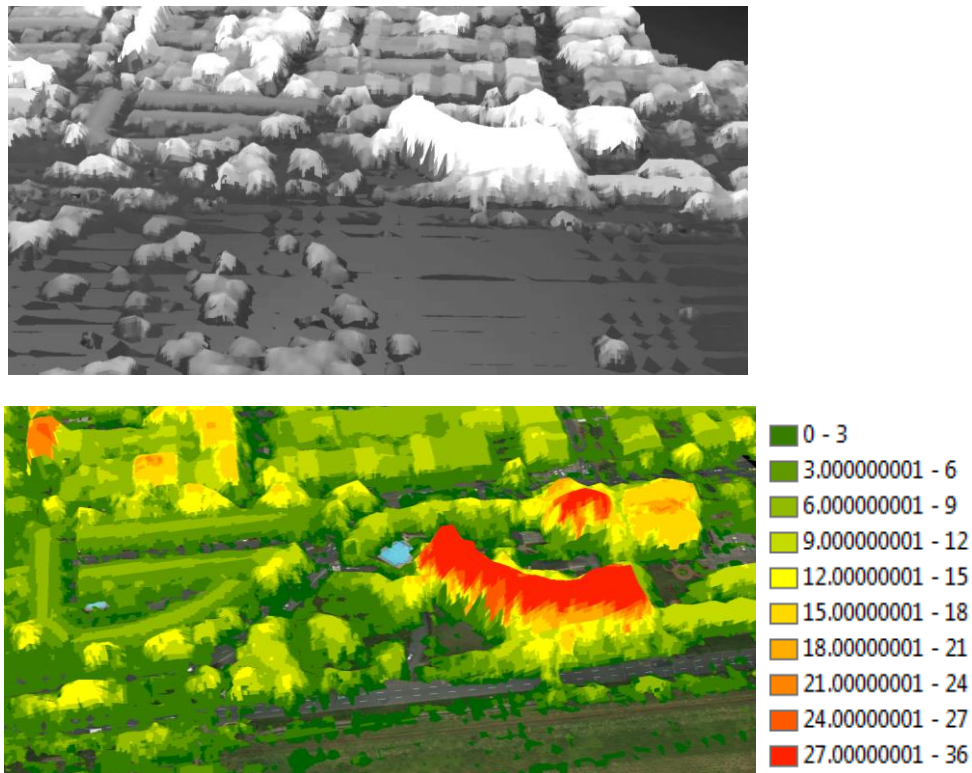
Figura 25. Modelo Digital de Elevación y de Superficies del proyecto



Las ventajas en los procesos de ésta evolución han sido la sustitución de los componentes ópticos mecánicos y electrónica por software y la posibilidad de la utilización de procesos automáticos en la identificación de puntos homólogos en imágenes consecutivas que permite la generación de modelos digitales mediante la aplicación de técnicas de correlación de imágenes (Ackermann, 1996).

Con el método planteado para la estimación de las alturas de los edificios, se obtienen alturas máximas de 36,95 m para los objetos más altos en el área de estudio. Además, en la indagación en campo sobre los edificios presentes en la zona, se logra identificar que las estructuras más altas tienen de 8 a 10 pisos, y las de menor altura muestran como mínimo hasta 2 pisos de altura. También se logra indagar en campo sobre la altura media de cada piso y se estimó que esta corresponde a 3 m o 3,2 m como máximo.

Figura 26: MDO: Altura media de objetos



Con la altura media de los elementos y la respectiva identificación de los elementos que corresponde a edificios, se construye las geometrías que los caracteriza, y mediante el método de extrusión se representa en 3D los objetos mencionados. El proceso busca que además se puedan identificar piso a piso las estructuras en la edificación.

Figura 27: Geometrías identificadas correspondientes a edificios



El método de extrusión permitió obtener la visualización 3D no texturizada ya que los modelos con niveles de textura consumen un volumen importante de memoria y la visualización se hace muy lenta lo que atenta contra la utilidad en una aplicación catastral.

La incorporación de la información catastral se realizó teniendo en cuenta los parámetros suministrados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Este modelo de datos contemplo características de uso de suelo, código de lote, Numero de pisos.

8.4 Ortofotomosaico

Luego de realizar el proceso de la Aerotriangulación y de generar el MDS, se procede a la generación del ortofotomosaico (ver en Anexo pág. 65).

El ortomosaico se realizó a partir del modelo digital de superficies debido a que se necesita información acerca de la altura en cada posición del suelo para colocar el pixel en la posición correcta con un tamaño de pixel de 0.1 metros, lo que genera una imagen con las propiedades geográficas de latitud y longitud, como se presenta en la Figura 28.

Figura 28: Ortofotomosaico del Proyecto



Para este proyecto se trabajó con una zona piloto de la ciudad de Santiago de Cali, que se utilizó para crear el modelo tridimensional con información catastral, como se indica en el recuadro rojo de la Figura 29.

Figura 29: Área del modelo 3D aplicado al catastro a partir del ortofotomosaico



8.6 Validación

Como resultado de la validación y la comprobación de las coordenadas calculadas mediante los procesos fotogramétricos planteados, se dispuso de información de la ciudad de Santiago de Cali. La ortofoto suministrada por la Oficina de Catastro Municipal, representa un insumo muy importante en el proceso de validación.

Los puntos que se consideraron para la comparación de coordenadas en el terreno, fueron calculados en el ortofotomosaico obtenido en la metodología propuesta y comparado con su homólogo en la ortofoto de la Oficina de Catastro Municipal. La información básica de la Ortofoto utilizada para el proceso de validación se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Información de Ortofoto para Validación.

Información Raster	Ortofoto
Fuente	Catastro Cali
Tamaño Imagen (filas*columnas)	10010 x 6683
Tamaño Pixel	0,075 x 0,075
Proyección	WGS 84 UTM Zona 18 N

Mediante la búsqueda de coordenadas con una distribución homogénea en el área de estudio, se toma una muestra de 35 puntos para su análisis y comparación. Las coordenadas tomadas se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Muestra tomada para la comparación de coordenadas para validación

	SISTEMA DE REFERENCIA: WGS 84 ZONA 18 N				DIFERENCIAS	
	COORDENADA ORTOFOTO CATASTRO		COORDENADA METODO DE RECTIFICACION			
PTO	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	Dif-E	Dif-N
1	329711,6	373800,014	329711,692	373800,071	-0,0920000	-0,0570000
2	329387,568	373771,472	329386,88	373771,779	0,6880000	-0,3070000

**MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA PILOTO:
UN SECTOR DEL BARRIO INGENIO**

	SISTEMA DE REFERENCIA: WGS 84 ZONA 18 N				DIFERENCIAS	
3	329926,486	373759,846	329926,575	373759,438	-0,0890000	0,4080000
4	329624,195	373762,111	329624,446	373762,495	-0,2510000	-0,3840000
5	329608,151	373888,151	329607,337	373888,332	0,8140000	-0,1810000
6	329443,372	373755,821	329442,753	373755,98	0,6190000	-0,1590000
7	329.849,803	373.777,886	329.849,967	373.777,953	-0,1640000	-0,0670000
8	329.871,573	373.785,155	329.871,500	373.785,345	0,0730000	-0,1900000
9	329.918,594	373.776,569	329.918,066	373.776,946	0,5280000	-0,3770000
10	329.865,150	373.710,879	329.865,044	373.710,998	0,1060000	-0,1190000
11	329.727,173	373.777,018	329.727,160	373.777,030	0,0130000	-0,0120000
12	329.722,325	373.793,695	329.722,300	373.793,690	0,0250000	0,0050000
13	329.712,575	373.800,008	329.712,570	373.800,020	0,0050000	-0,0120000
14	329.717,454	373.857,613	329.717,470	373.857,600	-0,0160000	0,0130000
15	329.739,044	373.879,415	329.739,080	373.879,400	-0,0360000	0,0150000
16	329.445,169	373.846,282	329.445,074	373.846,612	0,0950000	-0,3300000
17	329.367,571	373.843,975	329.368,153	373.843,875	-0,5820000	0,1000000
18	329.483,247	373.852,380	329.483,665	373.852,777	-0,4180000	-0,3970000
19	329.536,983	373.845,324	329.536,156	373.845,588	0,8270000	-0,2640000
20	329.498,546	373.761,940	329.498,520	373.761,900	0,0260000	0,0400000
21	329.453,725	373.842,109	329.453,720	373.842,100	0,0050000	0,0090000
22	329.507,383	373.849,014	329.507,380	373.849,020	0,0030000	-0,0060000
23	329.505,875	373.841,236	329.505,870	373.841,230	0,0050000	0,0060000
24	329.614,619	373.847,189	329.614,600	373.847,090	0,0190000	0,0990000
25	329.762,786	373.781,519	329.762,800	373.781,648	-0,0140000	-0,1290000
26	329.693,782	373.817,291	329.693,567	373.817,578	0,2150000	-0,2870000
27	329.641,395	373.756,860	329.641,567	373.756,678	-0,1720000	0,1820000
28	329.627,319	373.767,020	329.627,100	373.767,100	0,2190000	-0,0800000

	SISTEMA DE REFERENCIA: WGS 84 ZONA 18 N				DIFERENCIAS	
29	329.624,144	373.762,257	329.624,124	373.762,267	0,0200000	-0,0100000
30	329.607,951	373.771,571	329.607,761	373.771,989	0,1900000	-0,4180000
31	329.606,787	373.784,059	329.606,465	373.784,154	0,3220000	-0,0950000
32	329.563,713	373.806,496	329.563,700	373.806,490	0,0130000	0,0060000
33	329.540,64	373.809,25	329.540,57	373.809,26	0,0730000	-0,0120000
34	329.437,14	373.783,53	329.437,20	373.783,46	-0,0640000	0,0740000
35	329.437,35	373.793,06	329.437,30	373.793,12	0,0470000	-0,0670000
				$\bar{X}$	0,0872000	-0,0858000

Con respecto a los resultados obtenidos en la tabla anterior, se puede apreciar que el error medio en coordenadas este y norte es de -0,087 m y -0,086 m respectivamente. Se considera que los errores obedecen a errores sistemáticos de las coordenadas de origen, pues es debido mencionar, la información suministrada por las entidades Emcali y Catastro Municipal manejan sistemas de proyección diferentes. En la metodología propuesta, se buscó que estos sistemas coincidieran, y por métodos de reproyección se lograron transformar estas coordenadas.

La información tomada directamente en campo, es indispensable para reducir los errores generados en los procesos fotogramétricos. En el caso de esta investigación, los puntos suministrados y ortofotos son insumos que han sido procesados y proyectados en sistemas de referencia distintos. La estimación de la altura de las edificaciones permite que el método de extrusión de las estructuras modele tridimensionalmente la construcción. Sin embargo, se estima que el proceso generó buenos resultados.

9 DISCUSIÓN

En el presente proyecto se realizó un modelamiento 3D aplicado al catastro de una zona del barrio Ingenio de la ciudad de Santiago de Cali, Colombia.

Los resultados obtenidos en el proceso de aerotriangulación, como lo son residuos y desviaciones permitieron valorar la precisión de los puntos de control. El procesamiento en el sistema Inpho, de forma automática y mediante reducción de errores estimo los valores presentados en la aerotriangulación (Sección Resultados), y que debido a las restricciones en el uso de la licencia, no se logró generar un reporte de mayor detalle para su correspondiente análisis. Respecto a los datos estimados (Figura 21), las medidas de tendencia indican que el comportamiento residual varía entre 0.1 y 0.4 m, este error se reconoce como aceptable dado que el tamaño de pixel de las fotografías es de 0.11 m. Adicionalmente es necesario considerar que debido a la re- proyección de las coordenadas suministradas por Emcali se generaron desplazamientos con respecto a las posiciones verdaderas (ver Tabla 11); donde se estiman desplazamientos del orden de los -0.08 y 0.03 m.

Tabla 11: Muestra tomada para la comparación de coordenadas EMCALI y Ortofoto Obtenida

PTO	COORDENADAS EMCALI		COORDENADAS ORTOFOTO OBTENIDA		DIFERENCIAS	
	ESTE	NORTE	ESTE	NORTE	DIF ESTE	DIF NORTE
1	329711,565	373800,421	329711,662	373800,382	-0,097	0,039
2	329873,669	373705,711	329873,745	373705,685	-0,076	0,026
$\bar{X}$					-0,0865	0,0325

Las ortotofotos y ortofotomosaico permitieron la construcción de las geometrías que describen los techos de los edificios, y por el método de extrusión se logra modelar en 3D las estructuras, teniendo como base el modelo digital de objetos. El modelo tridimensional, es finalmente complementado con información básica de las características prediales del bloque, logrando modelarlo piso a piso.

La validación del producto final, se realiza mediante la estimación de coordenadas teniendo como base la ortotofoto de la ciudad de Santiago de Cali, suministrada por la Oficina de Catastro Municipal, logrando establecer errores de -0.087 m y -0.086 m en las proyecciones este y norte respectivamente. Se debe de mencionar que el nivel de resolución espacial de una ortofoto a otra, tanto de las obtenidas en este proyecto como las suministradas por Catastro, varían en 0.035 m y que los resultados producto de la comparación están por dentro de lo permitido.

En la actualidad la Subdirección de catastro Cali y el Instituto geográfico Agustín Codazzi (territorial Valle) autoridad catastral nacional y entidad encargada de producir la

cartografía básica de Colombia, adelanta procesos de actualización catastral. Tal renovación del censo o inventario de los predios públicos y privados del municipio es donde se registran los cambios en la información jurídica (propietarios y/o tenedores), física (cambio de área, anexos, conservación) y económica (avalúo catastral) de los predios, la metodología que se empleó no está lejos a la que estas oficinas realizan, ya que también se referencian de una ortofoto para digitalizar los predios y se crea una base de datos con la información catastral, solo que en este proyecto se integraron datos del catastro en una imagen tridimensional de la zona de estudio. Éste proyecto puede ser considerado como una forma de implementación al catastro 3D en Colombia, mostrándolo como una campo emergente en la ciencia de la información geográfica. La utilidad y versatilidad de sus aplicaciones parecen apuntar a que el siguiente salto en el desarrollo de la cartografía urbana es la conquista de la tercera dimensión (Rodríguez, 2012).

De acuerdo a la literatura consultada (Rodríguez, 2012. Suárez et al, 2011. Pineda, 2011) existen diversos métodos para generar un catastro en 3D. En este proyecto a pesar de la poca información catastral con que se contaba para la realización del estudio se lograron obtener buenos resultados sin importar que no se pudo obtener información real de la zona de estudio debido a que es información confidencial de la oficina de catastro que solo se entrega a los propietarios del predio, ofreciendo en el modelo muy pocos datos en relación con la cantidad de datos que se pueden ofrecer.

Es importante resaltar que el enfoque metodológico propuesto adoptó recursos físicos de bajo costo (cámara Digital no métrica y vuelos aéreos no tripulados) para la generación de la ortoimagen, diferente al que se desarrolla tradicionalmente como lo realizó Escobar, S. (2012). Se obtuvo información actualizada de la zona, gran detalle y precisión debido a la altura del vuelo y se redujo el plazo de ejecución del vuelo permitiendo una salida instantánea de las imágenes a procesar, aunque el vuelo fue realizado por una empresa ajena al proyecto se hace necesario destacar la importancia de estos Vuelo Aéreos no Tripulados con costos muy inferiores a otros sistemas y con una mayor autonomía de las empresas.

Finalmente como trabajos futuros y siguiendo con este mismo enfoque metodológico propuesto y desarrollado, se puede ofrecer más información a través de la descripción de pisos, lo que posibilita un abanico de posibilidades para el desarrollo de posibles aplicaciones en los lugares que se pretendan estudiar.

10 CONCLUSION

El método implementado para la construcción de los modelos de elevación y de superficie permitió un análisis de la zona de estudio, aunque la extracción de la información que permite una descripción de los edificios a partir de las imágenes y el MDS de la zona no es una tarea sencilla. Para ello es importante que el sistema sea capaz de discriminar entre lo útil y no útil, además se debe restringir la zona de estudio a la zona que contienen edificios para reducir el enorme volumen de información.

Para un modelamiento 3D del catastro no se necesita de modelos 3D con texturas, se necesita algo simple, ligero y que funcione, se puede comenzar con un modelo 3D relativamente sencillo para posteriormente enriquecerlo; aumentando su valor para que vaya adoptando todas las características de la infraestructura.

Los resultados en los procesos para modelar tridimensionalmente en el sistema Inpho, tiene mayor detalle al estructurar las superficies (Modelos Digitales de Superficie) de la zona de estudio. Su capacidad se extiende al nivel de los sensores Lidar, logrando identificar las alturas de los objetos.

Para el suministro de la información catastral de los modelos 3D de edificios, es importante contar con información coherente de las características físicas de las construcciones.

11 RECOMENDACIONES

Los AUVs son una herramienta que aún está en proceso de desarrollo, y que por su bajo costo en la implementación de estudios como el que se llevó a cabo en esta tesis, se debe tener en cuenta para futuras investigaciones. Además, la resolución espacial que se logra obtener en las fotografías capturadas mediante este sistema permitirá seguir avanzando en el desarrollo de temas de planificación, ordenamiento y catastro.

Es importante señalar que las ortofotos son de vital importancia en el proceso de obtención de modelos tridimensionales de edificios, puesto que la geometría superior de la estructura del objeto es quien lo define. Sin embargo, se recomienda que para posteriores estudios se implemente una metodología que permita partir de ortofotos verdaderas, ya que en ellas por procesos de rectificación se reduce el fenómeno de

oclusión generado por el desplazamiento de la posición correcta de la estructura estudiada.

Se deben utilizar datos más confiables para el proceso de toma de puntos de control. Estos pueden obtenerse con visitas a lugares previamente definidos y así conseguir una ubicación con GPS más precisa de esos puntos. Es decir, el objetivo sería recopilar datos que aseguren puntos de control de mejor calidad.

La cartografía catastral, posee en su base de datos graficas una información que puede ser modelada en 3D, implementando para trabajos posteriores un SIG urbano en 3D, aunque no es un proceso sencillo, será un enfoque que paulatinamente va ir creciendo y que aportara grandes beneficios.

12 BIBLIOGRAFIA

B. Yoo and S. Han, "Representation of urban buildings using modified relief mapping" *Journal of Computer Science and Technology*, vol. 21, pp. 204-208, Mar 2006.

Chunsun Zhang, (2011), *An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses*. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 27, 118–129.

Collaguazo, E., Domínguez, M., (2011), "Diseño e implementación de un sistema fotogramétrico Digital de corto alcance 3D", (Tesis de pregrado). Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Escuela Politécnica del Ejército, Salgolqui, Ecuador.

Consejería del Medio Ambiente y del Territorio, (2012). "Qué es y cómo se hace una Ortofoto" <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/porta/web/> [consulta: 9 de Mayo de 2013].

Departamento de Geografía de la Universidad de Calgary (2010). "Vehículos aéreos no tripulados para Estudios Glaciológicos" <http://www.cartografia.cl/beta/index.php/home/percepcion/558-vehiculos-aereos-no-tripulados-para-estudios-glaciologicos>. [Consulta: 3 de febrero de 2014]

Escobar, S., (2012) "MODELAMIENTO 3D DEL ENTORNO URBANO", (Tesis de Pregado). Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle.

Espin, P. M., Guano, R. F., (2013) "Diseño de un ambiente virtual mediante el empleo de procesos fotogramétricos terrestres de corto alcance, del conjunto arquitectónico de la ciudad de Conocoto", (Tesis de Pregrado). Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Escuela Politécnica del Ejército, Salgolqui, Ecuador.

Fallas, J. 2004. "Ortorectificación de fotos aéreas con ILWIS". Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. (UNA) Universidad Nacional. EDECA. 5, 12-22 p.

Felicesimo, (1994) "Modelos digitales de terreno, introducción y aplicación a las ciencias ambientales". Pentalfa Editores, Oviedo, España.

Flamanc, D., Maillet, G., Jibrini, H. (2003). "Modelos de Ciudad 3D: Un enfoque operacional usando Imágenes Aéreas y Mapas Catastrales". Instituto Nacional de Geografía, Saint-Mandé. Francia.

García O. J., (2007) *“Autocalibración y sincronización de múltiples cámaras PTZ”*, Universidad Autónoma de Madrid, Mayo de 2007

Gonzales López, S., (2012), *“Estudio y Análisis geométrico de la cámara Barredora ADS40 en los procesos fotogramétricos”*, (Tesis Doctoral). Departamento de Ingeniera Cartográfica y del Terreno. Universidad de Salamanca.

González G., S., Almeida Martínez, I., Díaz Rodríguez, B., Álvarez García, B., (2009). *“Estudio altimétrico de los entornos urbanos”*. Mapping, (131): 46-50, 9 Ref.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, *“Análisis Geográficos: Gestión catastral: proyectos especiales de Catastro; el Catastro, herramienta para el Ordenamiento Territorial”*. Estadísticas catastrales 2000-2012

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (2011) *“INSTRUCTIVO PARA LA DIGITALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA CATASTRAL”*, Grupo Interno de Trabajo Cartografía Catastral Digital – Subdirección de Catastro.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2010) *“IMÁGENES DIGITALES ORTO-RECTIFICADAS FOTOGRAMETRICAMENTE”*
http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/15-%20imagenes_digitales_ortorectificadas_fotogrametricamente.pdf [consulta: 12 de enero de 2014]

Jauregui, L., (2009) *“INTRODUCCIÓN A LA FOTOGRAMETRÍA”*.
http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/CAPITULO_1.pdf. [Consulta: 12 de agosto 2013]

Ledoux, H., Martijn, M. (2010). *“Modelos de ciudades en 3D Topológicamente consistentes obtenidos por extrusión”*. International Journal of Geographical Information Science.

Lemmen, C., Van Der Molen, P., Van Oosterom, P., Ploeger, H., Wilko Quak, Stoter, J., Zevenbergen, J., (2004) *“Un modelo estándar para el ámbito catastral”*. CT Catastro.

Martín, J., Arias, B., González, D., Gómez, J. (2010). *“Procesamiento avanzado de imágenes digitales”*. Universidad de Salamanca. <http://gredos.usal.es/jspui/handle/10366/83443>. (Consulta: 12 de agosto 2013).

Martínez-Casasnovas, J.A., (1999). *“Modelos digitales de terreno: Estructuras de datos y aplicaciones en el análisis de formas del terreno y en Edafología”*. QUADERNS DMACS Núm. 25, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida, Lleida.

Mora Fernández de Córdoba, R., (2010), *“Producción de productos cartográficos: MDT y ortofoto a partir de imágenes Capturadas por un vehículo UAV”*, (Tesis de Maestría). Master en Geotecnologías Cartográficas en Ingeniería y Arquitectura..

Pérez Martin, E., Herrero Tejedor, T., Gómez, M., (2008) *“Valoración de la precisión en MDEs generados mediante correlación automática”*. [http://oa.upm.es/4601/2/INVE MEM 2008 61760.pdf](http://oa.upm.es/4601/2/INVE_MEM_2008_61760.pdf) [consulta: 12 de Noviembre de 2013)

Pineda Marín, F., (2011), *“SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA CATASTRAL MODELO SIG 3D PARA EL CATASTRO, Aplicación en el Municipio de Medellín – Colombia”*. IV reunión anual del comité permanente sobre el catastro en Iberoamérica CPCI y II Asamblea General del CPCI.

Polanco Puerta, M., (2005), *“Fotointerpretación y Mapificación”*, Universidad Nacional abierta y a Distancia (UNAD). <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201722/201722quia.pdf>. [consulta: 12 de Diciembre de 2013]

Rodríguez, B. (2012) *“Integración del Catastro 3D en una plataforma de simulación 3D”*. Master en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Oviedo.

Sánchez Sobrino, J., (2006-2007), *“Introducción a la Fotogrametría”*, Cátedra de Topografía. <ftp://ftp.unsj.edu.ar/agrimensura/Fotogrametria/Unidad6/Introduccion a la Fotogrametria.pdf> [consulta: 7 de abril de 2014]

Sánchez Martin, N., Arias Pérez, B., Gonzales Aguilera, D., Gómez Lahoz, J., (2004), *“análisis aplicados de métodos de calibración para usos fotogramétricos”*, área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogramétrica. Departamento de de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Universidad de Salamanca.

Sugihara, K., Hayashi, Y. (2001). *“Sistemas CG y GIS integrados para la generación de modelos urbanos 3D”*. Journal of Civil Engineering Information Processing System.

Soler Alemán, E., (2013), *“Levantamiento Fotogramétrico y Modelización Tridimensional del Santuario de nuestra señora de la Fuensanta”*, (Tesis). Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación. Universidad Politécnica de Cartagena.

Suárez Quirós, J., Fuentes García, C., Alonso Fernández, A., (2010) *“Modelización tridimensional semiautomática de entornos urbanos a partir de datos LIDAR combinados con información catastral”* Universidad de Oviedo- Seresco.

Valenzuela Salvatierra, P., (2009), *“Implementación de una biblioteca de triangulación de polígonos basada en el algoritmo Lepp Delaunay”*, (Tesis de pregrado). Ingeniería Civil en Computación, Universidad de Chile; Dpto. de ciencia de la computación. http://tesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103727/cf-valenzuela_ps.pdf?sequence=3 [consulta: 3 de enero de 2014].

Vozmediano Montoya, D., Valle Melón, J., (2006), *“Fotogrametría Digital Aplicada a la obtención de ortofotos y modelos digitales de entidades patrimoniales”*, (Tesis de pregrado). Ingeniería Técnica en Topografía, Escuela de Ingeniería de Victoria-Gasteiz.

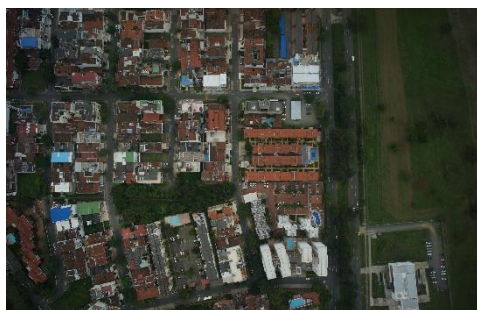
Zambuni, R., Fredericque, B., (2010), *“Hacia Ciudades Inteligentes con las Iniciativas de los Sig Urbanos en 3D”*. Bentley Geo Web Publisher y Bentley Geospatial, sustaining. ftp://ftp2.bentley.com/dist/collateral/docs/white_papers/wh_3d-city-gis_ES.pdf [consulta: 20 de Diciembre de 2012]

13 ANEXOS

Figura 31. Fotografías Aéreas del Proyecto, vuelo UX5



DSC02285



DSC02286



DSC02287



DSC02288



DSC02289



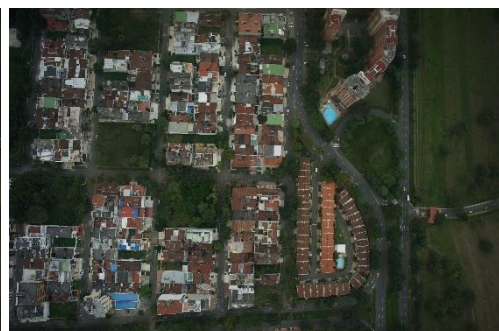
DSC02290



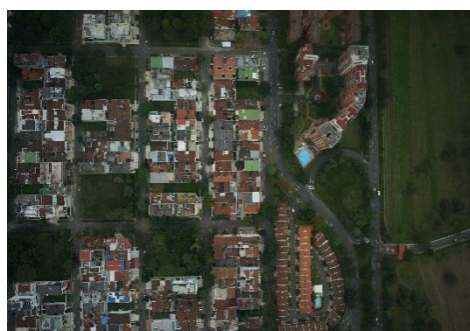
DSC02291



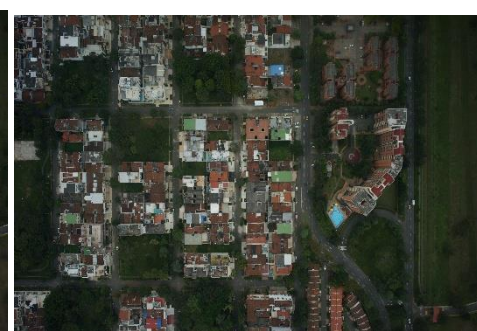
DSC02292



DSC02293



DSC02294



DSC02295



DSC02296

MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA PILOTO:
UN SECTOR DEL BARRIO INGENIO



DSC02297



DSC02298



DSC02299



DSC02300



DSC02301



DSC02302



DSC02303



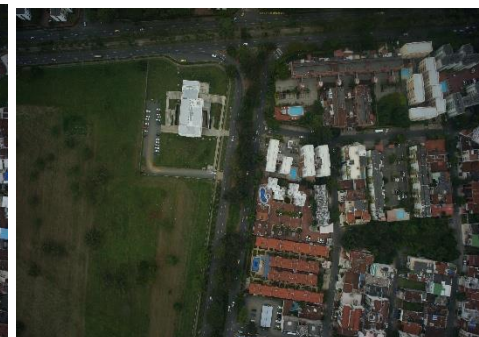
DSC02304



DSC02305



DSC02306



DSC02307



DSC02308

MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA PILOTO:
UN SECTOR DEL BARRIO INGENIO



DSC02309



DSC02310



DSC02311



DSC02312



DSC02313



DSC02314



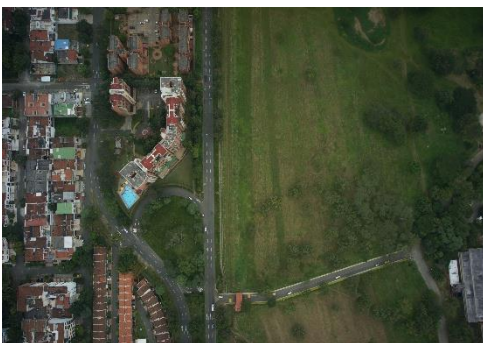
DSC02315



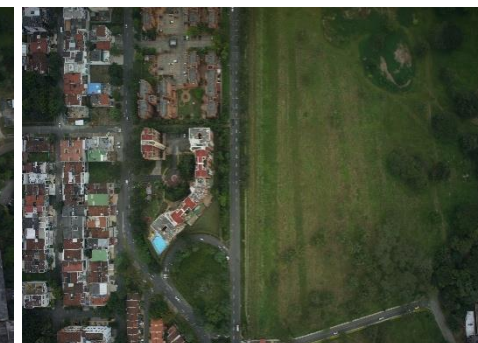
DSC02316



DSC02317



DSC02318



DSC02319



DSC02320

MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA PILOTO:
UN SECTOR DEL BARRIO INGENIO



DSC02321



DSC02322



DSC02323



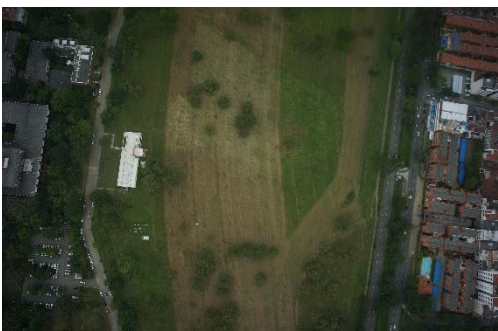
DSC02324



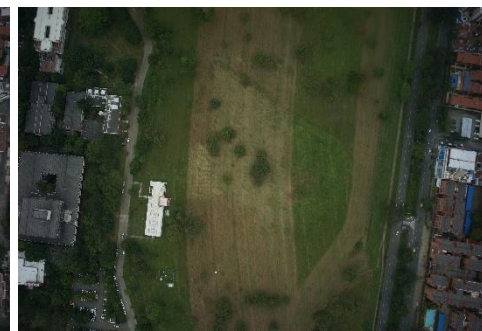
DSC02325



DSC02326



DSC02327



DSC02328



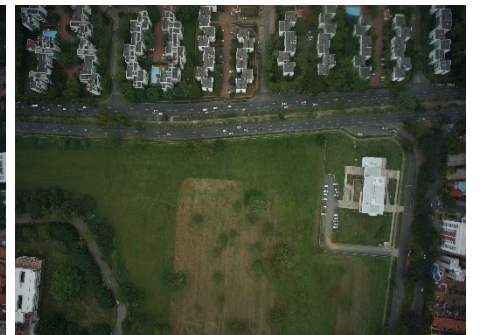
DSC02329



DSC02330



DSC02331



DSC02332

MODELACIÓN 3D DE LA CIUDAD SANTIAGO DE CALI APLICADO AL CATASTRO URBANO ZONA PILOTO:
UN SECTOR DEL BARRIO INGENIO



DSC02333



DSC02334



DSC02335



DSC02336



DSC02337



DSC02338



DSC02339



DSC02340



DSC02341



DSC02342



DSC02343



DSC02344

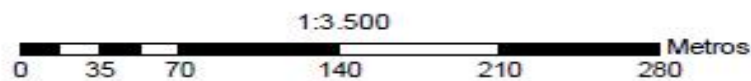
13.1 Calibración del Vuelo y Cámara

La calibración de la cámara para la toma de las fotografías genero el siguiente certificado o informe, del cual se toman los parámetros relevantes para la configuración del proceso implementado en este estudio.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<JOBFile jobName="UNIVALLE_Vuelo1.jxl" version="5.6" product="gatewing" productVersion="1965"
TimeStamp="2014-03-05T11:21:31" xsi:schemaLocation="http://www.trimble.com/schema/JobXML/5_6
http://www.trimble.com/schema/JobXML/5_6/JobXMLSchema-5.6.xsd"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <FieldBook>
    <PhotoInstrumentRecord ID="00000001" TimeStamp="2014-03-05T11:21:31">
      <Type>Aerial</Type>
      <Model>Trimble UX5</Model>
      <Serial>0000-0000</Serial>
      <FirmwareVersion>v0.00</FirmwareVersion>
      <UserDefinedName>Prototype</UserDefinedName>
    </PhotoInstrumentRecord>
    <CameraDesignRecord ID="00000002" TimeStamp="2014-03-05T11:21:31">
      <Type>SONY_NEX-5R</Type>
      <HeightPixels>3264</HeightPixels>
      <WidthPixels>4912</WidthPixels>
      <PixelSize>4.74999999999941E-06</PixelSize>
      <LensModel>Rectilinear</LensModel>
      <NominalFocalLength>0.015517161</NominalFocalLength>
    </CameraDesignRecord>
    <CameraRecord2 ID="00000153" TimeStamp="2014-03-05T11:21:31">
      <CameraDesignID>00000002</CameraDesignID>
      <CameraPosition>01</CameraPosition>
      <Optics>
        <IdealAngularMagnification>1.0</IdealAngularMagnification>
        <AngleSymmetricDistortion>
          <Order3>0.0499851943332909</Order3>
          <Order5>0.0471725425089201</Order5>
          <Order7>0.00330164380262107</Order7>
          <Order9>0</Order9>
        </AngleSymmetricDistortion>
        <AngleDecenteringDistortion>
          <Column>0.000698709633197124</Column>
          <Row>0.000393933183710839</Row>
        </AngleDecenteringDistortion>
      </Optics>
    </CameraRecord2>
  </FieldBook>
</JOBFile>
```

```
<Geometry>
<PerspectiveCenterPixels>
<PrincipalPointColumn>-2451.43984904757</PrincipalPointColumn>
<PrincipalPointRow>-1622.8232927352</PrincipalPointRow>
<PrincipalDistance>-3266.77073684251</PrincipalDistance>
</PerspectiveCenterPixels>
<VectorOffset>
<X>0</X>
<Y>0</Y>
<Z>0</Z>
</VectorOffset>
<BiVectorAngle>
<XX>0</XX>
<YY>0</YY>
<ZZ>-1.5707963267948966</ZZ>
</BiVectorAngle>
</Geometry>
```

ORTOFOTOMOSAICO DE UN SECTOR DEL BARRIO EL INGENIO, SANTIAGO DE CALI



SISTEMA DE REFERENCIA
WGS 1984 UTM ZONA18N

Ortofotomosaico de un sector
del Barrio El Ingenio, para la
creación de un modelo
tridimensional de edificios
aplicado al Catastro Urbano

Leyenda

 Area_de_estudio3D

