

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios que me dio fuerza y fe para creer lo que me parecía imposible de terminar. A mi familia por estar a mi lado en cada momento de mi vida.

Al director de tesis Ing. Francisco Hernández por su apoyo, su persistencia, su comprensión y su paciencia.

A mi esposa, su ayuda en impulsarme a terminar este proyecto.

PRODUCCIÓN SEMI-AUTOMÁTICA DE UNA ORTOIMAGEN VERDADERA A
PARTIR DE UNA IMAGEN SATELITAL QUICKBIRD.

LUIS JORGE MONCADA SOSA
0130132

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Topográfico

Director: FRANCISCO LUIS HERNÁNDEZ TORRES

SANTIAGO DE CALI
UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
2014

RESUMEN

El presente proyecto de grado describe el desarrollo e implementación de un procedimiento para la generación de ortoimágenes verdaderas a partir de una imagen satelital Quickbird, teniendo como apoyo varias fotos aéreas y un modelo digital de superficie. También se pretende dar a conocer la teoría para la generación de ortofotos con el objetivo de mostrar los problemas que se generan en la producción de las ortoimágenes tradicionales y su ineficacia para que sean utilizadas en la elaboración de cartografía catastral.

El desarrollo del documento está compuesto por, el marco metodológico; en él se encontrará los criterios teóricos básicos utilizados para el diseño de la producción de la ortoimagen verdadera. Para validar el procedimiento se implementa una prueba piloto en el área de la Universidad del Valle donde se obtiene una ortoimagen verdadera con resolución de 0.6 metros, la cual se le aplico la prueba NSSDA de calidad cartográfica dando como resultado una exactitud horizontal de 0.624 m al 95% de nivel de confianza.

Por último en este documento se citan las diferentes referencias bibliográficas utilizadas para la documentación y desarrollo del proyecto, así como algunas conclusiones y recomendaciones de acuerdo a las necesidades y dificultades encontradas durante la elaboración de este proyecto.

Palabras clave: *Ortofotos, Ortorectificación, Modelo Digital de Superficie, Análisis de Visibilidad, Mosaicado, Ortoimagen Verdadera.*

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	9
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. GENERAL.....	12
2.2. ESPECÍFICOS	12
3. JUSTIFICACIÓN.....	13
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1. FOTOGRAMETRÍA.....	14
4.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE IMÁGENES	15
4.2.1. Orientación interna	16
4.2.2. Orientación externa	19
4.2.3. Toma de puntos de apoyo fotogramétrico.....	27
4.3. DESPLAZAMIENTO DEL RELIEVE	28
4.4. ORTOFOTO	29
4.5. ORTORECTIFICACIÓN	30
4.5.1. Reproyección.....	33
4.6. MODELOS DE ELEVACIÓN.....	35
4.6.1. Modelos Digitales del Terreno	35
4.6.2. Modelo Digital de Elevación.....	36
4.6.3. Modelo Digital de Ciudad.....	38
4.6.4. Representación de la Superficie	39
4.6.4.1. Modelo TIN.....	39
4.6.4.2. Modelo GRID.....	41
4.7. MOSAICADO	43

5. MARCO REFERENCIAL	44
6. METODOLOGÍA	50
6.1. MATERIALES	52
6.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE LAS IMÁGENES	53
6.2.1. Orientación interna	53
6.2.2. Orientación externa	53
6.3. MODELOS DE ELEVACIÓN.....	56
6.3.1. Modelo Digital de Elevación.....	56
6.3.2. Modelo Digital de Ciudad (MDC).....	57
6.3.3. Modelo Digital de Superficies (MDS)	58
6.4. ORTORECTIFICACIÓN CON MDS.....	59
6.5. ANÁLISIS DE VISIBILIDAD.....	60
6.6. SELECCIÓN DE LA MEJOR IMAGEN PARA CADA ZONA OCULTA	62
6.6.1. Proximidad al punto nadir	63
6.6.2. La distancia desde una zona oculta	65
6.7. MOSAICADO	67
6.7.1. Coincidencia de colores.....	68
7. RESULTADOS	71
7.1. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA	71
7.1.1. Orientación interna	71
7.1.2. Orientación externa	75
7.2. MODELOS DE ELEVACIÓN.....	76
7.2.1. Modelo Digital de Elevación.....	76
7.2.2. Modelo Digital de Ciudad	78
7.2.3. Modelo Digital de Superficies.....	79
7.3. ORTORECTIFICACIÓN CON MDS.....	81
7.4. ANÁLISIS DE VISIBILIDAD.....	82
7.5. ORTOIMAGEN VERDADERA	83

8. CONCLUSIONES	89
9. RECOMENDACIONES.....	94
10. BIBLIOGRAFÍA	96

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VARIABLES ASOCIADAS CON LA GEOMETRÍA INTERNA DE UNA IMAGEN CAPTURADA DESDE UNA CÁMARA AÉREA.....	17
FIGURA 2 - ELEMENTOS DE LA ORIENTACIÓN EXTERIOR	21
FIGURA 3 - RELACIÓN GEOMÉTRICA PARA ENCONTRAR EL DESPLAZAMIENTO DEL RELIEVE.....	28
FIGURA 4 - DESPLAZAMIENTO DEL RELIEVE DEBIDO A LA PROYECCIÓN CENTRAL	29
FIGURA 5 - GEOMETRÍA BÁSICA EN LA FORMACIÓN DE UNA ORTOIMAGEN.....	32
FIGURA 6 - ORTOIMAGEN ESTÁNDAR.....	33
FIGURA 7 - FORMAS DE PROYECCIÓN PARA RECTIFICAR UNA ORTOFOTO.....	35
FIGURA 8 - MODELO EN FORMATO TIN.....	40
FIGURA 9 - REPRESENTACIÓN DEL MODELO GRID.....	42
FIGURA 10 - PROCESO METODOLÓGICO PARA EL DESARROLLO DE UNA ORTOIMAGEN VERDADERA.....	51
FIGURA 11 - EFECTO FANTASMA EN UNA ORTORECTIFICACIÓN SIN DETECCIÓN DE ZONAS OCULTAS.	59
FIGURA 12 - IMÁGENES DONDE EXISTEN REDUNDANCIA DE INFORMACIÓN	63
FIGURA 13 - IMAGEN CON MAYOR DISTANCIA DE UNA ZONA OCULTA AL PUNTO NADIR.	64
FIGURA 14 - IMAGEN CON MENOR DISTANCIA DE UNA ZONA OCULTA AL PUNTO NADIR.	65
FIGURA 15 - LA DISTANCIA DESDE UNA ZONA OCULTA.	66
FIGURA 16 - DIFERENCIAS DE TONALIDAD ENTRE IMÁGENES	68
FIGURA 17 - DIFERENCIA RADIOMÉTRICA LOCAL.....	69
FIGURA 18 - FOTOS AÉREAS UTILIZADAS EN EL PROYECTO.	71
FIGURA 19 - ESQUEMA UBICACIÓN DE MARCAS FIDUCIALES EN LAS FOTOS AÉREAS	72
FIGURA 20 - ERROR MEDIO CUADRÁTICO OBTENIDO EN LA ORIENTACIÓN INTERNA.	73

FIGURA 21 - IMAGEN SATELITAL QUICKBIRD UTILIZADA EN EL PROYECTO	74
FIGURA 22 - UBICACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL EN LAS IMÁGENES	75
FIGURA 23 - INCONSISTENCIAS EN EL MODELO DIGITAL DEL TERRENO	77
FIGURA 24 - MODELO DIGITAL DEL TERRENO CORREGIDO CON PUNTOS DE CONTROL	77
FIGURA 25 - VISTA SECCIONAL DE UN EDIFICIO.....	78
FIGURA 26 - MODELO DIGITAL DE CIUDAD (MDC)	79
FIGURA 27 - MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE EN FORMATO TIN	80
FIGURA 28 - MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE EN FORMATO GRID	80
FIGURA 29 - DUPLICACIÓN DE ESTRUCTURAS EN LA ORTOIMAGEN.....	81
FIGURA 30 - MAPA DE VISIBILIDAD DE LA ZONAS OCULTAS POR LAS EDIFICACIONES	82
FIGURA 31 - ORTOIMAGEN VERDADERA	86
FIGURA 32 - ESTRUCTURAS NO MODELADAS EN EL MDC.....	90
FIGURA 33 - ERROR PRODUCIDO EN LA ORTOIMAGEN VERDADERA POR IMPRECISIONES EN EL MDS.	91
FIGURA 34 - ACERCAMIENTO DE LA IMAGEN SATELITAL SIN ORTORECTIFICAR.....	92
FIGURA 35 - ACERCAMIENTO DE LA ORTOIMAGEN VERDADERA	93

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 – DISTANCIA DEL PUNTO NADIR A LA ZONA OCULTA.	84
TABLA 2 – DISTANCIA DE LA ZONA OCULTA A UN PUNTO OCULTO EN LA IMAGEN.....	84
TABLA 3 – SUMA DE PUNTAJES PARA ESCOGER LA MEJOR IMAGEN A REEMPLAZAR.	85
TABLA 4 – APLICACIÓN DE LA PRUEBA NSSDA.	88
TABLA 5 – RESULTADOS EN METROS DE LA PRUEBA NSSDA.	88

LISTA DE ABREVIATURAS

MDT	Modelo Digital del Terreno
MDE	Modelo Digital de Elevación
MDC	Modelo Digital de Ciudad
MDS	Modelo Digital de Superficie
SIG	Sistemas de Información Geográfica
TIN	Red Irregular Triangular
ECM	Error Medio Cuadrático
GCP	Puntos de Control (<i>Ground Control Point</i>)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GSD	Tamaño del Pixel Proyectado sobre el Terreno (<i>Ground Sample Distance</i>)

INTRODUCCIÓN

La incorporación al mercado de la teledetección de técnicas fotogramétricas, gracias a la fotogrametría digital, y de nuevos sensores digitales de alta resolución, abre la puerta a la generación de nuevos productos y el perfeccionamiento de otros ya existentes, como las ortoimágenes. La ortoimagen convencional es un producto cartográfico ampliamente utilizado, tanto como elemento complementario de la cartografía tradicional, cuando ésta no está suficientemente actualizada, como para permitir extraer información distinta a la que es usual encontrar en un mapa topográfico.

Con los desarrollos de hoy en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y procesamiento digital, las ortoimágenes convencionales se han vuelto una parte muy importante en la elaboración general de mapas y en la adquisición y visualización de datos SIG. Pero la demanda de mayor detalle y resolución en las imágenes está aumentando, creando al mismo tiempo una creciente demanda para mayor calidad y precisión en las ortoimágenes. La “ortoimagen verdadera” es un buen ejemplo de ello. Se trata de un producto que resuelve las deficiencias de la ortoimagen convencional, proporcionando mayor calidad y cantidad de información espacial junto con nuevas posibilidades de análisis, control de calidad, visualización y gestión de territorio no disponible hasta el momento.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia la producción de ortoimágenes convencionales es limitada, principalmente con imágenes satelitales de alta resolución sobre áreas urbanas o que contengan estructuras de creación humana. Un problema general en la generación de una ortoimagen convencional es que no puede manejar rápidos cambios en la elevación. Los desplazamientos de relieve pueden ser tan grandes que van a oscurecer el terreno y los objetos próximos a ellos.

La producción tradicional de ortoimágenes es hecha en base de un modelo digital del terreno (MDT), los objetos como los edificios, puentes y vegetación de gran altura no son modelados en el MDT. Por lo tanto, estas características se presentan desplazadas (en dirección radial) de su verdadero lugar en la ortoimagen digital final (Lerma, 2002), mostrando edificios inclinados y puentes retorcidos. Sólo los objetos que se encuentran en nivel con el terreno se re proyectan correctamente.

En casos graves, los efectos de este desplazamiento puede afectar la utilidad de la ortoimagen final. Por ejemplo, un edificio alto puede "cubrir" más de una calle, y ocultar mucha información, tal como cámaras de alcantarillado, hidrantes y postes de energía o cuando se superponen datos vectoriales con la imagen, las líneas que representan los bordes de los edificios no concuerdan con la imagen que representa las cimas de los edificios y el vector de los bordes de carretera pareciera que atravesara los edificios, haciendo que sea difícil la adquisición y visualización de datos vectoriales SIG.

Estas limitantes pueden causar problemas en el uso diario para el usuario que es ajeno al tema, llevándolo a dar un manejo incorrecto de la ortoimagen tomándola como un mapa real y preciso. Por lo anterior y para resolver las deficiencias causadas por la ortoimagen estándar, se diseñara una metodología que genere ortoimágenes verdaderas de alta resolución en áreas urbanas.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

- Generar una ortoimagen verdadera a partir de una imagen satelital Quickbird de alta resolución, caso especial el área de la Universidad del Valle.

2.2. ESPECÍFICOS

- Reconocer el proceso metodológico necesario para la generación de ortoimágenes verdaderas.
- Implementar una metodología para la generación de ortoimágenes verdaderas.
- Cuantificar los errores derivados de la ortorectificación verdadera.
- Establecer los parámetros de las imágenes para la producción de ortoimágenes verdaderas.
- Realizar una prueba piloto del procedimiento de generación de ortoimágenes verdaderas en la zona de la Universidad del Valle.

3. JUSTIFICACIÓN

La búsqueda de un producto que sea utilizado para elaborar cartografía catastral urbana por medio de imágenes satelitales de alta resolución, con plenas garantías de capturar toda la información de interés para los fines del catastro (precisión planimétrica, volumetría de edificios, actualización rápida) y que no conlleve a errores de interpretación por parte del digitador u operador, ha generado el interés de estudiar la utilización de las llamadas Ortoimágenes Verdaderas o *True Orthoimagery* cuya captación, procesamiento y resultado se realiza de manera digital y automatizada consiguiendo así eliminar las deficiencias producidas por la ortoimagen convencional.

La elaboración de un producto libre de abatimientos y ocultaciones de información (Ortoimagen Verdadera), será de gran soporte para el análisis del desarrollo urbanístico permitiendo no solo la definición planimétrica de los predios si no el control y planificación de las alturas incorporando las tres dimensiones al Catastro.

Al disponer de proyección ortogonal en toda la imagen se integra perfectamente con las diferentes capas de información de los Sistemas de Información Geográfica aportando ventajas de control de calidad y actualización de la cartografía urbana. Así como sus aplicaciones en análisis de visibilidad mediante el Modelo Digital de Superficies (MDS) para determinar la cobertura de antenas de telefonía móvil y la realización de mapas solares para la valoración de viviendas, obteniendo análisis más fiables de la realidad.

Así mismo, es posible realizar un modelo completo 3D de la zona representada, mediante la integración de las ortoimágenes verdaderas y el MDS. Utilizando un motor gráfico 3D se genera un vuelo libre, con la posibilidad abierta de insertar datos vectoriales, alfanuméricos y otros datos multimedia. El resultado es un

modelo de la realidad por donde el usuario se puede desplazar libremente en cualquier dirección. Esto puede ser aplicado para la divulgación turística, callejeros virtuales de ciudades en 3D y realización de simulaciones.

Con la ortoimagen verdadera se obtiene un nuevo camino lleno de oportunidades para el análisis de la información territorial. Así mismo la nueva metodología a desarrollar supondrá una revolución que afectara al ámbito de la cartografía y abrirá un nuevo mundo de posibilidades al público en general.

4. MARCO TEÓRICO

4.1.FOTOGRAMETRÍA

La *American Society of Photogrammetry* (ASP) define la Fotogrametría como el arte, la ciencia y la tecnología orientados a obtener información relevante de los objetos físicos de la corteza terrestre y de su entorno, a través de procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas, así como de patrones de imágenes de radiancia electromagnética y otros fenómenos (Santamaría, 2001).

Se define a la Fotogrametría, como la ciencia de realizar mediciones reales de objetos a partir de fotografías del mismo (tanto terrestres como aéreas), a fin de determinar características métricas y geométricas de los objetos fotografiados. Para así poder elaborar mapas topográficos. La fotogrametría fue inventada en 1851 por Laussedat y ha continuado su desarrollo en los últimos 150 años. Con el transcurso del tiempo, el desarrollo de la fotogrametría ha pasado a través de las fases de fotogrametría de plancheta, fotogrametría análoga, fotogrametría

analítica y recientemente ha entrado en la fase de fotogrametría digital (Konecny, 1994).

La Fotogrametría digital es aplicada a imágenes digitales que son almacenadas y procesadas. Las imágenes digitales pueden ser escaneadas de fotografías convencionales, capturadas directamente mediante cámaras digitales u obtenidas por sensores satelitales. Una de las principales aplicaciones de la fotogrametría es la generación de DEM y ortofotos digitales, estas y otras tareas pueden ser automatizadas con la fotogrametría digital (Del Águila, 2009). Estos productos obtenidos al estar en formato digital, pueden ser fácilmente almacenados, administrados y aplicados por los usuarios, gracias a este desarrollo las técnicas fotogramétricas se pueden integrar más fácilmente con la teledetección y los SIG (Del Águila, 2009).

4.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE IMÁGENES

Las variaciones topográficas en la superficie de la tierra, la curvatura de la misma y la inclinación del satélite, sensor o plataforma aérea afectan la distancia con la que se muestran las características en la imagen satelital o aérea. Cuanto más topográficamente diverso sea el paisaje, tanto mayor será la distorsión creada en la imagen. Para poder eliminar estas distorsiones es necesario conocer la orientación, la posición y la geometría interna de la cámara para realizar los procesos de corrección geométrica de la imagen de modo que se pueda representar en una superficie plana, integrarse a otras imágenes y tener la integridad de un mapa (Leica Geosystems, 1998).

Normalmente las correcciones geométricas de las imágenes son divididas en dos tipos de procesos: la orientación interna y la orientación externa. Estos procesos fotogramétricos son usados individualmente en cada imagen, colocando cada elemento de la imagen o píxel en su posición geográfica correcta. Corresponde en esencia a transformar el sistema de proyección central de la imagen a una proyección ortogonal y remover los errores geométricos dentro de las imágenes (Leica Geosystems, 1998).

Las variables que contribuyen a los errores geométricos son:

- Orientación de la cámara y el sensor
- Errores sistemáticos asociados con la cámara y el sensor
- Desplazamiento debido al relieve
- Curvatura de la tierra

4.2.1. Orientación interna

Cuando se captura una imagen en una cámara pueden ocurrir diferentes distorsiones, debido a la lente, desviación del eje óptico. Para eliminar estas distorsiones, se debe conocer la orientación interior de la cámara la cual modela el haz de rayos que pasa a través de la lente al plano de la imagen realizando una transformación entre el sistema de coordenadas píxel (columnas, filas) y el sistema de coordenadas imagen (las dimensiones físicas reales de la imagen expresada en milímetros con origen en el centro de proyección de la cámara). Por lo tanto, se obtiene la geometría interna de la cámara o sensor tal como existía en el momento de la captura de los datos.

La orientación interna viene dada por un conjunto de parámetros específicos deducidos principalmente de las características de la cámara o el sensor y localizando y midiendo las marcas fiduciales de las imágenes, estos parámetros se determinan normalmente por el fabricante en el laboratorio o en pruebas de vuelo y se incluyen en el certificado de calibración. Los parámetros en fotos aéreas son la distancia focal de la cámara, la localización del punto principal, los valores de distorsión de la lente, la altura de vuelo y las marcas fiduciales (Figura 1). Mientras que en el sensor Quickbird las características ópticas y los parámetros del modelo geométrico de la cámara están disponibles en los llamados coeficientes polinómicos racionales (RPC); estos coeficientes, disponibles en un archivo (.RPB) incluido con la imagen, son calculados a partir del modelo físico del sensor siendo capaces de recuperar la geometría de la imagen en el momento de su captura por el Modelo Funcional Racional, modelo utilizado por el software LPS 9.2 de Leica Geosystems.

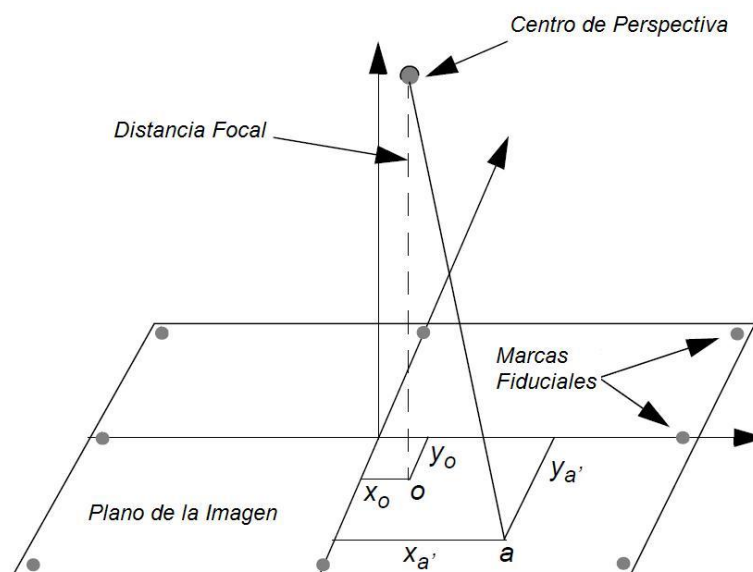


FIGURA 1 - MUESTRA LAS VARIABLES ASOCIADAS CON LA GEOMETRÍA INTERNA DE UNA IMAGEN CAPTURADA DESDE UNA CÁMARA AÉREA, DONDE O REPRESENTA EL PUNTO PRINCIPAL Y A REPRESENTA UN PUNTO SOBRE LA IMAGEN. (FUENTE: LEICA GEOSYSTEMS, 1998)

Para definir la relación entre el sistema de coordenadas pixel y el sistema de coordenadas imagen se usa habitualmente una transformación bidimensional afín, es aquella que no varía su verdadera forma después de la transformación (Pérez, 2001) y su coordenada Z o elevación de cada punto no se considera, conociendo las coordenadas de por lo menos tres puntos en ambos sistemas, se pueden determinar los coeficientes requeridos para transformar los sistemas con las siguientes ecuaciones [1], [2]:

$$x = a_1 + a_2X + a_3Y \quad [1]$$

$$y = b_1 + b_2X + b_3Y \quad [2]$$

Las coordenadas de imagen x y y de las marcas fiduciales calibradas y las coordenadas de píxel X y Y medidas en las marcas fiduciales, son usadas para establecer los seis coeficientes de la transformación afín. Estos coeficientes obtenidos, pueden ser utilizados para transformar cada conjunto de coordenadas de píxel de columna (X) y fila (Y) en coordenadas de la imagen (Leica Geosystems, 2006).

La calidad de la transformación bidimensional afín se demuestra por medio del índice estadístico, error medio cuadrático (RMSE) [3]. Este error RMSE indica el grado de correspondencia entre las coordenadas de las marcas fiduciales calibradas y sus respectivos valores medidos en las imágenes. Unos errores RMSE grandes indican una correspondencia muy pobre que puede atribuirse a distorsión en la película, un escaneo de baja calidad, datos de calibración desactualizados o una medición incorrecta de la imagen (Leica Geosystems, 1998).

$$RMSE = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(N_i - N_p)^2}{n} \quad [3]$$

Donde,

n = Número de observaciones

N_i = Valores de las coordenadas imagen.

N_p = Valores de las coordenadas píxel.

La corrección de la orientación interna es una parte muy importante en las cámaras analógicas y algunas cámaras digitales. Pero con los nuevos desarrollos y tecnologías, se han creado algoritmos y procedimientos implementados para solucionar las distorsiones provocadas por la cámara ofreciendo cámaras con una distorsión insignificante en su geometría interior y por lo tanto proporcionan unas imágenes en las que sólo la orientación exterior tiene que ser considerada.

En una cámara métrica digital se conocen: la distancia principal, la posición del punto principal y los parámetros de distorsión de las imágenes generadas, además, los parámetros de orientación son estables, por lo tanto, el proceso de orientación interna se reduce inicialmente a una traslación del sistema de coordenadas y, en determinadas ocasiones, a una simetría. Se puede decir que la calibración de cualquier cámara digital posibilita el paso de coordenadas píxel a coordenadas imagen, todo ello de forma analítica y sin modificaciones en la imagen original. Por el contrario, las cámaras analógicas generan fotografías que deben digitalizarse previamente a su tratamiento digital (Lerma, 2002).

4.2.2. Orientación externa

Para lograr la reconstrucción tridimensional de un objeto en el espacio es necesario el empleo de dos imágenes del objeto tomadas desde puntos de vista diferente. Pero para poder hacer la reconstrucción del objeto a partir de su perspectiva fotográfica se necesita conocer la posición y la orientación angular de

esas imágenes en el espacio estableciendo una relación entre el sistema de coordenadas de la imagen digital (x , y , z) y el Sistema de coordenadas del mundo real (X , Y y Z), esto es lo que hace la orientación exterior.

Como todo cuerpo en el espacio tiene seis grados de libertad, entonces, la cámara fotográfica y por ende su plano focal también tendrán seis grados de libertad. Tales grados de libertad se definen en 3 ángulos de rotación para así obtener la orientación angular. Ellos son omega (ω), phi (ϕ) y kappa (κ), (Figura 2). Omega es la rotación alrededor del eje fotográfico x , phi es la rotación alrededor del eje fotográfico y , y kappa es la rotación alrededor del eje fotográfico z , las cuales son definidas como positivas si ellas tienen una dirección contraria a las manecillas del reloj cuando se observan desde el extremo positivo de sus respectivos ejes (Leica Geosystems, 1998).

Usando los tres ángulos de rotación, se puede determinar la relación entre el sistema de coordenadas espaciales de la imagen (x , y , z) y el sistema de coordenadas espaciales del terreno (X , Y , Z o x' , y' , z'). Se utiliza una matriz de 3×3 que define la relación entre los dos sistemas. Ella es referida como la matriz de orientación o rotación, M . La matriz de rotación puede ser definida como (Leica Geosystems, 1998) [4]:

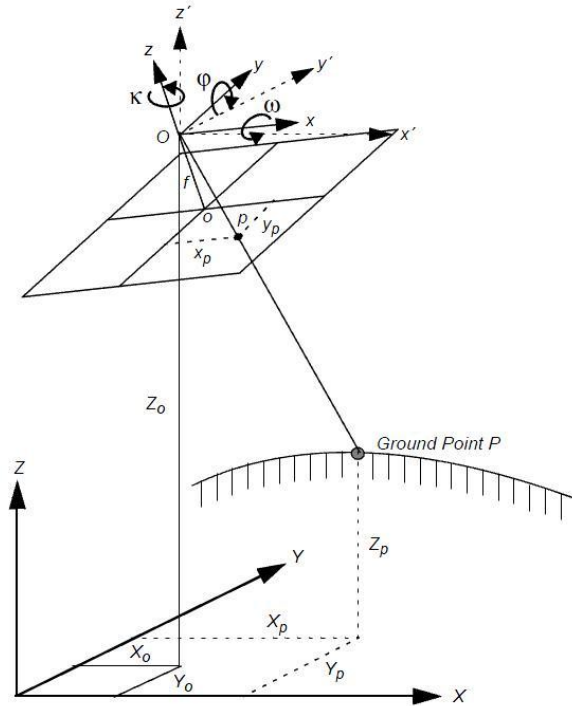


FIGURA 2 - ELEMENTOS DE LA ORIENTACIÓN EXTERIOR. (FUENTE: RAMÍREZ, 2006)

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad [4]$$

La matriz de rotación se deriva realizando la rotación secuencial de omega alrededor del eje x, phi alrededor del eje y y kappa alrededor del eje z (Leica Geosystems, 1998).

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna. Para lo cual es necesario realizar una georreferenciación para orientar la imagen capturada en un sistema de coordenadas estándar. Las correcciones necesarias para transformar en cada

punto de la imagen sus coordenadas arbitrarias (fila-columna) en coordenadas reales, se explican mediante un par de ecuaciones que hacen corresponder a cada pixel (f, c) una coordenada (X, Y) [5], [6].

$$X = f_1(f, c) \quad [5]$$

$$Y = f_2(f, c) \quad [6]$$

La forma y parámetros de estas funciones dependen fundamentalmente del tipo de método que se escoja para realizar la georreferenciación. Existen fundamentalmente dos métodos: El primero es la **corrección orbital**, que modela las fuentes de error y su influencia. Para ello es necesario conocer con precisión tanto las características de la órbita del satélite como las del sensor. El segundo es un enfoque empírico que modela la distribución de errores en la imagen utilizando **puntos de control**.

El primero es más automático conociendo la información necesaria y las ecuaciones de transformación, los satélites vienen equipados con un sistema de posicionamiento global el cual obtiene los coeficientes polinómicos racionales (RPC) los cuales hacen posible realizar una orientación directa del sensor relacionando las coordenadas píxel de la imagen y las coordenadas terreno. Aunque falla cuando aparecen errores aleatorios; estos coeficientes se suministran cuando la imagen se pide georreferenciada al proveedor.

El segundo es más simple en cuanto a su formulación y corrige mejor los errores aleatorios, su inconveniente es que es más trabajoso, al tener que ubicar manualmente cada punto de control en la imagen. El método de los puntos de control es un procedimiento de regresión, en los métodos de regresión se dispone del valor de dos variables, X e Y , a partir de ellas, se obtiene una ecuación que

permite estimar Y a partir de nuevos valores de X . A la variable X se le denomina independiente y a Y variable dependiente.

En el caso de la georreferenciación las variables independientes son c y f , es decir la columna y fila en que se ubica un pixel en la imagen original; mientras que las variables dependientes son X e Y , coordenadas correspondientes a un sistema real. Hay que definir cuál es el tipo de ecuaciones que se van a utilizar, Normalmente se trabaja con ecuaciones polinómicas que permiten modificar de forma flexible las coordenadas de la imagen. El orden del polinomio determina la flexibilidad del ajuste y de la transformación, normalmente se emplean transformaciones de tipo lineal (polinomio de grado 1), cuadrático (polinomio de grado 2) o cúbico (polinomio de grado 3). Los casos más habituales son la transformación lineal:

$$X = Ac + Bf + C \quad [7]$$

$$Y = Dc + Ef + F \quad [8]$$

y la transformación cuadrática

$$X = Ac + Bf + Cc^2 + Df^2 + Ecf + F \quad [9]$$

$$Y = Gc + Hf + Ic^2 + Jc^2 + Kcf + L \quad [10]$$

Es importante determinar cuál es el tipo de transformación más adecuada en función del tipo de distorsiones que se supone que aparecen en la imagen y de la cantidad y calidad de los puntos de control. Es necesario tener en cuenta que cuanto mayor sea el grado de los polinomios implicados, más sensible será la transformación a errores en la selección de los puntos de control.

Empleando el procedimiento de los mínimos cuadrados, se pueden calcular los valores de los coeficientes A, B, C,... a partir de las coordenadas de un conjunto de puntos de control. Se trata de puntos en los que se conoce tanto la fila y la columna como las coordenadas reales. Como regla general, el número de puntos de control debería ser mayor que el número de parámetros que se van a calcular, más de 6 en la transformación lineal, más de 12 en la cuadrática y más de 24 en la cúbica. La transformación lineal es la más sencilla, ya que asume que no hay distorsión en la imagen y simplemente se requiere la traslación, cambio de escala y rotación de la imagen.

Como los píxeles de la nueva imagen pueden no estar alineados con los píxeles de la imagen original, los píxeles deben ser remuestreados. El remuestreo es el proceso de extrapolar niveles digitales para los píxeles de la nueva imagen a partir de los valores de los píxeles originales (Leica Geosystems, 1998). Es necesario aplicar un procedimiento para transferir la información de los píxeles originales a los píxeles resultantes del proceso de transformación ya que con estas funciones de transformación va a crearse una nueva matriz correctamente posicionada, pero vacía. El llenado de esta matriz es, precisamente, el objetivo de la última fase de la transformación de coordenadas. El problema resulta más complejo de lo que pudiera pensarse a primera vista. Idealmente, cada píxel de la capa transformada debería corresponderse a un solo píxel en la original. Lo normal, sin embargo, es que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original (rotación), incluso puede variar el tamaño de los píxeles.

El traslado de valores de la capa original a la transformada puede abordarse por tres métodos dependiendo de la complejidad de la transformación realizada y del tipo de datos. Estos métodos son:

- Método del vecino más próximo. Sitúa en cada pixel de la imagen corregida el valor del pixel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los valores originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen. Es la más adecuada en caso de variables cualitativas, pero evidentemente, no en teledetección. Algebraicamente se puede expresar como [11]:

$$f(m, n) = \begin{cases} f(x, y) & \Delta x < 0,5 \Delta y < 0,5 \\ f(x + 1, y) & \Delta x \geq 0,5 \Delta y < 0,5 \\ f(x, y + 1) & \Delta x < 0,5 \Delta y \geq 0,5 \\ f(x + 1, y + 1) & \Delta x \geq 0,5 \Delta y \geq 0,5 \end{cases} \quad [11]$$

Donde:

$f(x, y)$ = ND de la imagen transformada (número real).

$f(m, n)$ = ND de la celda (n, m) en la imagen corregida.

$m = x + \Delta x, \quad 0 \leq \Delta x \leq 1$

$n = y + \Delta y, \quad 0 \leq \Delta y \leq 1$

Este procedimiento no altera los ND de la imagen original, sino solamente los traslada.

- Interpolación bilineal, supone promediar los valores de los cuatro píxeles más cercanos en la capa original. Este promedio se pondera según la distancia del pixel original al corregido, de este modo tienen una mayor influencia aquellos píxeles más cercanos en la capa inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales pero difumina los contrastes espaciales. Para ponderar los ND utilizamos el siguiente modelo [12]:

$$f(m,n) = c_1f(x,y) + c_2f(x+1,y) + c_3f(x,y+1) + c_4f(x+1,y+1) \quad [12]$$

donde c_i son los factores de ponderación asignados a los cuatro niveles digitales de entrada:

$$c_1 = (1 - \Delta x)(1 - \Delta y) \quad [13]$$

$$c_2 = \Delta x(1 - \Delta y) \quad [14]$$

$$c_3 = (1 - \Delta x)\Delta y \quad [15]$$

$$c_4 = \Delta x\Delta y \quad [16]$$

Este método produce resultados suavizados, pues las cuatro posiciones más próximas contribuyen al ND final y es muy apropiado cuando se trata de corregir imágenes con información cuantitativa.

- En la Convolución cúbica, se considera los valores de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es más correcto en caso de que se trabaje con imágenes de satélite o fotografías digitalizadas, sin embargo supone un volumen de cálculo mucho mayor. Muchas versiones de la ecuación de convolución cubica son usadas, teniendo diferentes efectos sobre los niveles digitales de salida. Según la guía de campo de Leica Geosystems en el 1998, algunas versiones pueden ser similares a un filtro de baja frecuencia (como la interpolación bilineal) ayudando a promediar y a suavizar los valores. Otras pueden tender a aumentar la nitidez de la imagen, de manera similar a un filtro de alta frecuencia.

4.2.3. Toma de puntos de apoyo fotogramétrico

El componente principal para el establecimiento de una relación entre las imágenes en un proyecto, el sensor o la cámara, y el terreno, son los puntos de apoyo (GCPs, por sus siglas en inglés). Los puntos de apoyo son objetos identificables de la superficie terrestre que tienen coordenadas de terreno conocidas X , Y y Z . Los diferentes objetos de la superficie terrestre que se pueden utilizar como puntos de apoyo son:

- Intersección de vías.
- Infraestructura de servicios públicos (hidrantes y tapas de pozos de inspección).
- Intersección de lotes de cultivos agrícolas.
- Mojones de levantamientos.

Dependiendo del tipo de proyecto de cartografía, los puntos de apoyo pueden ser obtenidos de las siguientes fuentes:

- Levantamiento con teodolito (de exactitud milimétrica o centimétrica).
- Levantamiento con estación total (de exactitud milimétrica o centimétrica).
- Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) terrestre (exactitud centimétrica a métrica).
- Mapas topográficos y planimétricos (la exactitud varía en función de la escala del mapa).
- Imágenes ortorectificadas digitales (las coordenadas X y Y pueden ser obtenidas con una exactitud que depende de la resolución de la imagen ortorectificada).
- DEMs (para la obtención de puntos de control verticales, su exactitud depende de la resolución del DEM).

4.3. DESPLAZAMIENTO DEL RELIEVE

La curvatura de la tierra en imágenes de satélite y la altura de vuelo en las imágenes aéreas son los causantes del desplazamiento del relieve debido a que las imágenes se obtienen con una proyección central (Figura 4). En el punto nadir de la imagen no se produce un desplazamiento de relieve, pero este desplazamiento aumenta cuando nos alejamos del punto nadir. Al realizar una ortofoto, los posibles errores localizados en el modelo de elevación resultaran en errores horizontales causados por un desplazamiento de relieve sin control. El error horizontal Δ_{hor} (desplazamiento del relieve) se puede encontrar a través de un análisis geométrico (Figura 3) donde Δ_{ver} es la altura de un objeto en la tierra (edificio), H es la altitud del vuelo sobre la base del objeto, r_t es la distancia al centro de la imagen, D distancia del objeto al punto nadir y f la constante de la cámara (Ramírez, 2006) [17], [18]:

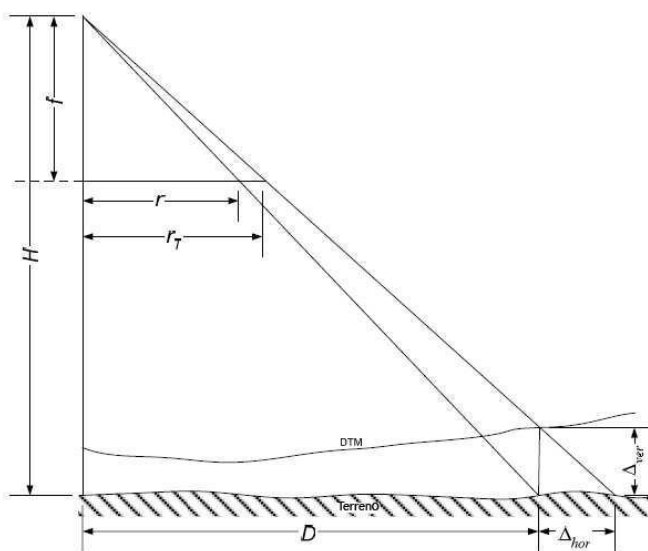


FIGURA 3- RELACIÓN GEOMÉTRICA PARA ENCONTRAR EL DESPLAZAMIENTO DEL RELIEVE. (FUENTE: RAMÍREZ, 2006).

$$\frac{f}{r_t} = \frac{H}{D + \Delta_{hor}} = \frac{H - \Delta_{ver}}{D} \quad [17]$$

Se despeja Δ_{hor} resultando en:

$$\Delta_{hor} = \frac{\Delta_{ver} \times r_t}{f} \quad [18]$$



FIGURA 4- DESPLAZAMIENTO DEL RELIEVE DEBIDO A LA PROYECCIÓN CENTRAL EN FOTOS AÉREAS, VISTA DESDE DIFERENTES POSICIONES DEL PUNTO NADIR.

4.4. ORTOFOTO

Una ortofoto se define como una fotografía que muestra las imágenes de los objetos en su posición ortográfica verdadera (Wolf, 1983), siendo geoméricamente parecidos a los planos, solo que los planos utilizan líneas y símbolos para representar a los objetos mientras que las ortofotos son imágenes de los objetos.

Entre los autores (Pérez, 2001; Lerma, 2002; Santos, 2005; Ettarid et al, 2005; y Ramírez, 2006) que han intentado definir el concepto de ortofoto se destaca la idea de que se trata de un producto cartográfico que se obtiene como consecuencia de una transformación de una imagen análoga o digital sobre la base de un modelado del terreno, eliminando las distorsiones provocadas por el relieve del terreno y la falta de verticalidad del eje de toma de la imagen. De este proceso se obtiene una imagen del terreno en proyección ortogonal, con la misma precisión planimétrica que pueda tener un mapa y sobre la que se pueden realizar medidas de distancias, ángulos y superficies, ya que mantiene una escala uniforme en toda su extensión.

4.5. ORTORECTIFICACIÓN

Al tomar una fotografía esta muestra una imagen del mundo con un efecto de perspectiva proyectada a través de un punto en el plano de la imagen (centro de perspectiva). Debido a esta llamada proyección central y el hecho de que las imágenes aéreas son normalmente tomadas verticalmente, los objetos en el mismo punto pero con diferentes alturas se colocan en diferentes posiciones en la fotografía. Como efecto de este desplazamiento de relieve, objetos colocados en una posición alta (por lo tanto cerca de la cámara) se parecen más grandes en la fotografía y ocultan los objetos a una altura inferior.

La ortorectificación es un proceso que trata de eliminar la proyección en perspectiva de la imagen, al transformarla en una proyección ortogonal donde las líneas proyectantes son perpendiculares al plano de proyección, lo opuesto a la proyección en perspectiva donde todas las líneas proyectantes pasan por un punto (centro de perspectiva). Como resultado de la ortorectificación se obtiene una ortofoto en la que todos los elementos tienen la misma escala y con una referencia

al sistema de coordenadas del mundo, por lo tanto puede usarse como un plano cartográfico, así que las mediciones que se hacen sobre una imagen ortorectificada representan las posiciones de los objetos como si ellas fueran hechas directamente sobre la superficie terrestre.

Sin este proceso no sería posible realizar funciones tales como realizar medidas precisas y directas de distancias, ángulos, posiciones y áreas, jugando un papel importante en la elaboración de mapas como en la adquisición y visualización de datos que puedan usarse para combinarlos con datos espaciales en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Las ortofotos contiguas pueden combinarse en una gran foto o mosaico para poder abarcar áreas enormes teniendo un bajo costo comparado con los mapas topográficos convencionales.

La algorítmica para la construcción de una ortoimagen estándar puede ser descrita de manera muy simple (Figura 5): a cada punto del plano de la ortoimagen se le hace corresponder el punto del plano de la imagen original que le corresponde según un modelo geométrico apropiado para el sensor. En la parte inferior de la figura se representa el plano de la ortoimagen, mientras que en la superior se encuentra el plano p correspondiente a la imagen captada con el sensor con todas sus distorsiones geométricas.

Se puede observar como la posición a corresponde a una singularidad, en el límite entre una región visible en la fotografía y una zona de sombra geométrica u ocultación. En cuanto a las posiciones b y b' se tiene que, a pesar de ser distintas en el plano de la ortoimagen, corresponden a una misma posición en la fotografía.

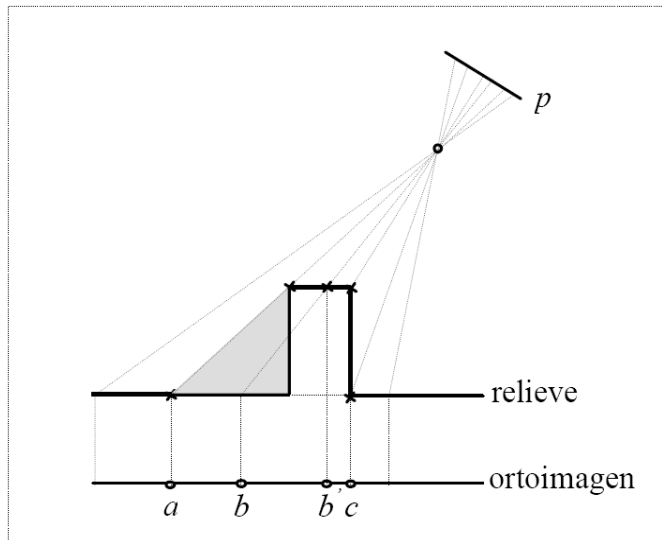


FIGURA 5 - GEOMETRÍA BÁSICA EN LA FORMACIÓN DE UNA ORTOIMAGEN. (FUENTE: PALÀ Y ARBIOL, 2002)

Sin tratamiento de partes ocultas se obtiene como resultado la duplicación de estructuras. Este hecho es perfectamente observable en la ortoimagen estándar combinada con un MDS donde los tejados de los edificios aparecen duplicados (Figura 6). Por otro lado, c corresponde a otro punto singular que, a diferencia de a , se encuentra en la frontera entre dos zonas visibles que están en planos diferentes. Estos dos planos están conectados por otro, la pared del edificio, visible en la imagen original y que no debe aparecer en la ortoimagen. Estos casos deben ser considerados al generar la ortofoto verdadera (Palà y Arbiol, 2002).



FIGURA 6 - IMAGEN ORTORECTIFICADA CON LOS PROCESOS EXISTENTES DE GENERACIÓN DE ORTOFOTOS. EL EDIFICIO ESTA RECTIFICADO EN SU CORRECTA POSICIÓN PERO UNA “IMAGEN FANTASMA” DEL EDIFICIO ESTÁ COLOCADA EN SU POSICIÓN DE ORIGEN.

4.5.1. Reproyección

La reproyección es el primer paso para la rectificación de la ortofoto, donde los rayos de la imagen son reprojectados sobre un modelo del terreno. Esta reproyección se puede hacer de dos formas: proyección hacia delante y hacia atrás. La proyección hacia adelante proyecta la imagen fuente sobre el terreno (Figura 7). El punto donde se cruzan el punto proyectado del terreno (X , Y , Z) se almacena en la ortofoto. Si la esquina de la ortoimagen se coloca en X_0 , Y_0 el pixel de coordenadas en la ortoimagen se encuentra con la siguiente fórmula [19]:

$$\begin{pmatrix} Columna \\ Fila \end{pmatrix} = \frac{1}{GSD} \times \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y_0 - Y \end{pmatrix} \quad [19]$$

Donde GSD es el *Ground Sample Distance*, que es la distancia entre cada pixel, es decir, el tamaño del pixel. Hay que tener en cuenta que la ecuación toma en el

sistema de coordenadas pixel el eje Y hacia abajo, y el sistema de coordenadas mundial tiene la coordenada Y hacia arriba, hacia el norte. La proyección hacia adelante proyecta los puntos regularmente espaciados en la imagen de origen a un conjunto de puntos a una distancia irregular, por lo que deben ser interpolados en una matriz regular de píxeles para que se puedan almacenar en una imagen digital.

Esta es la razón por la que la proyección hacia atrás es a menudo preferida. En una proyección hacia atrás, el píxel de la imagen de salida se proyecta de nuevo a la imagen de origen (Figura 7). En lugar de interpolar en la ortoimagen, la interpolación se realiza en la imagen de origen. Esto es más fácil de implementar, y la interpolación se puede hacer de inmediato para cada píxel de salida. Además, sólo los píxeles que se necesitan en la ortoimagen son reproyectados.

Cuando se utiliza la proyección hacia atrás, una coordenada de fila / columna de un píxel de la ortofoto se convierte en el sistema de coordenadas del mundo, y la coordenada Z se encuentra en este momento en el terreno. La transformación pixel-a-mundo está dada por [20]:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} + GSD \times \begin{pmatrix} Columna \\ -Fila \end{pmatrix} \quad [20]$$

La posición en la imagen de origen que corresponde a la encontrada en la coordenada X, Y, Z se puede encontrar mediante la corrección geométrica de la imagen.

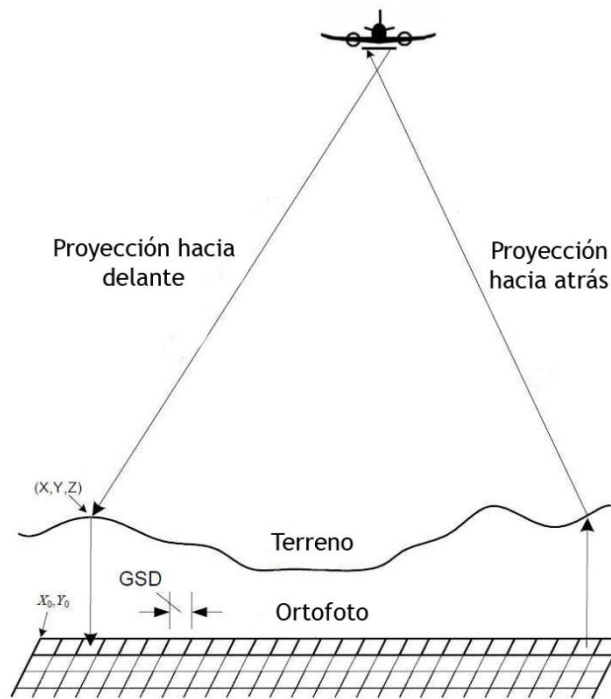


FIGURA 7 - PRINCIPIO DE LAS DOS DIFERENTES FORMAS DE PROYECCIÓN PARA RECTIFICAR UNA ORTOFOTO. (FUENTE: LEICA GEOSYSTEM, 1998)

4.6. MODELOS DE ELEVACIÓN

4.6.1. Modelos Digitales del Terreno

Los modelos digitales del terreno son estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1992) lo que define su uso a fenómenos geográficos como puede ser la temperatura, la altura o la presión atmosférica siendo muy usados en ciencias como cartografía, oceanografía y sistemas de información geográfica. En particular, cuando la variable a representar es la cota o altura del terreno se denomina Modelo Digital de Elevación (MDE).

4.6.2. Modelo Digital de Elevación

El modelo digital de elevación (MDE) es una representación matemática del terreno al nivel del suelo sin reflejar las estructuras existentes sobre el terreno, como las construcciones humanas y la vegetación. El MDE es la forma más utilizada de modelo de elevación el cual puede describirse de forma general como una función continua de dos variables (Felicísimo, 1992) [21]:

$$Z = F(X, Y) \quad [21]$$

Donde Z es la altitud del punto en función de la posición (x, y).

Los Modelos Digitales de Elevación (MDE), se generan a partir de la posición y altitud de un punto en el espacio, es decir de sus coordenadas (este, norte y elevación) que conforman la base de datos del modelo; mediante procesos de interpolación, utilizando isolíneas se simula aproximadamente la variación de la elevación en el relieve (Felicísimo, 1992). A partir de estos modelos, se obtiene información para la determinación y proyección de movimientos de tierra, generación de perfiles, secciones transversales superficies de excavación y terraplén entre otros.

El paso inicial en el proceso de elaboración de un MDE, es la captura de la información hipsométrica que incluye a su vez la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos (Felicísimo, 1992). Esta fase es de gran importancia porque de la calidad de los datos depende la calidad de la información a extraer mediante los análisis espaciales de la información. Es claro advertir que toda medida no está exenta de errores, aún los procesos de

modelización o transformación de la información presenta inexactitudes, los cuales deben ser minimizados.

Los métodos básicos para conseguir los datos de altitud son:

- **Métodos Directos:** Los datos se miden directamente en el terreno.
 - Altimetría Satelital: mediante altímetros localizados en los satélites se registra la altitud de la superficie.
 - Sistema Lidar: mediante un escaneo de la superficie de la tierra con un láser.
 - Sistema de Posicionamiento Global (G.P.S.): a través de un conjunto de satélites de referencia y mediante métodos de triangulación se obtienen valores de las coordenadas espaciales de un lugar concreto de la superficie terrestre.
 - Topografía: mediante la utilización de estaciones topográficas se registra y almacenan los resultados de las mediciones en formato digital.

- **Métodos Indirectos:** Los datos se obtienen de archivos previamente elaborados.
 - Restitución de fuentes digitales (imágenes por satélite), o por fuentes analógicas (cámaras métricas).
 - Digitalización automática por escáner o manual por mesa digitalizadora de fotos aéreas.
 - Mediante un par estereoscópico de imágenes usando el método de correlación de imágenes digitales

Actualmente es muy frecuente que se obtenga el MDE mediante sensores remotos en lugar de topografía convencional. Una técnica muy potente y común en países desarrollados es escanear la superficie de la tierra con un láser, esta técnica llamada sistema LIDAR consiste en un sensor laser transportado en avión que obtiene un modelo digital de elevación por telemetría laser, es decir, mide rápidamente y muy preciso distancias desde la posición del sensor hasta el suelo basado en el tiempo que se demora en ser reflejado el láser, logrando representar pequeños detalles de su superficie.

Alternativamente, pares estereoscópicos de imágenes pueden emplearse utilizando el método de correlación de imágenes digitales. Los pares estereoscópicos son dos imágenes ópticas adquiridas con ángulos diferentes tomadas desde la misma línea de vuelo de un aeroplano o desde un sensor satelital. Las imágenes capturadas con una cámara análoga suelen tener traslape lateral del 30 por ciento y el 60 por ciento de traslape frontal. Con las cámaras digitales se logra un traslape del 60 a 80 por ciento tanto en el lateral como el frontal, siendo muy común utilizar estas últimas para utilizar el método de correlación de imágenes.

Los métodos más antiguos para la generación de MDE a menudo implicaban la interpolación de mapas digitales de contorno que eran producidos por un levantamiento topográfico o un trazado manual con dos pares estéreos de imágenes aéreas (Restitución).

4.6.3. Modelo Digital de Ciudad

Los modelos digitales de ciudad (MDC), o *Digital Building Model* (DBM, por sus siglas en inglés) como normalmente se le encuentra en los textos, pretenden describir la superficie de los objetos creados por el hombre como edificios y

puentes, dependiendo el nivel de detalle que se desea obtener. En algunos MDC solo contienen los bordes del techo, tomando el techo como un plano horizontal y la altura de la edificación, pero no incluyen las diferentes construcciones que se encuentran en el techo como chimeneas o techos en forma irregular (Amhar, et al. 1998).

4.6.4. Representación de la Superficie

Para la representación de la superficie y el procesamiento de datos se utilizan los dos modelos más comunes para representaciones de la superficie: La Red Irregular de Triángulos (TIN) y las matrices regulares, Estos modelos se obtienen por medio de un método de interpolación que es el procedimiento mediante el cual se determinan puntos de igual altura entre una serie de puntos de coordenadas conocidas; este proceso es importante, porque dependiendo del método de interpolación, los resultados pueden ser los no esperados.

La construcción de un modelo de elevación matricial es básicamente un problema de interpolación; este define la localización de los puntos faltantes por intersecciones entre filas y columnas y se estima la altitud de cada uno de ellos en función de los datos del entorno existentes en el modelo vectorial a partir de los parámetros del algoritmo de interpolación; para la creación de estructuras TIN, en lugar de interpolar se realiza una selección de puntos descartando los que no aportan información relevante para la descripción de la altitud.

4.6.4.1. Modelo TIN

Los modelos de red irregular triangulada (TIN) consisten en una serie de mediciones de la altura, distribuidas irregularmente a lo largo de una superficie. Estos puntos son luego conectados mediante una red de triángulos que

representan aproximadamente la superficie (Figura 8). Esto significa que la altura en un lugar dado se encuentra por interpolación entre los vértices del triángulo que lo encierra. Usualmente se aplica la triangulación restringida de Delaunay (Palà y Arbiol, 2002), que garantiza la creación de un conjunto de triángulos lo más equiláteros posible, donde cada uno de ellos cumple que la circunferencia que lo circunscribe no contiene ningún otro punto del espacio a triangular.

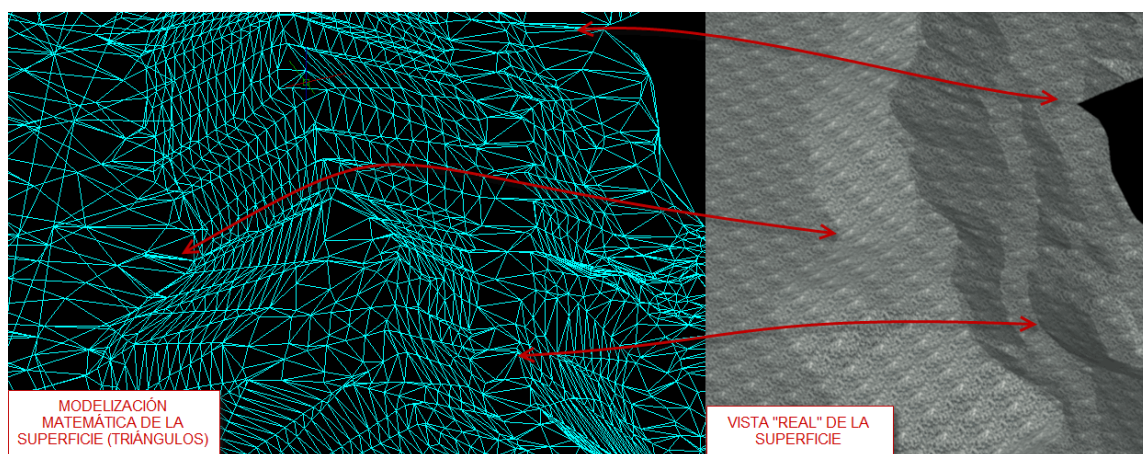


FIGURA 8 — VISTAS DE LA MISMA SUPERFICIE EN MODO DE FORMATO TIN Y EN VISTA “REAL” DE LA SUPERFICIE
(FUENTE: [HTTP://WWW.CIVIL3D.TUTORIALESALDIA.COM](http://www.civil3d.tutorialesaldia.com)).

Este método de interpolación requiere primero la creación de una red triangular. Una vez que los triángulos de Delaunay han sido contruidos, se describe la superficie interior del triángulo por una función lineal derivada de las altitudes de cada uno de los puntos de muestreo que constituyen los vértices del triángulo [22]. Esta función permite calcular la altitud en cada punto del triángulo de manera que el valor Z estimado pueda ser transcrito como un atributo en la base de datos de un programa que maneje las estructuras de datos vectoriales (Mesén R., 2001).

$$Z = a + bx + cy \quad [22]$$

Donde a , b , c son coeficientes a determinar mientras que x , y son las coordenadas cartesianas de abscisa y de ordenada.

La triangulación de Delaunay básica no puede manejar cambios abruptos en una superficie, como acantilados, sin tener una red de puntos muy densa. Otra limitante en los algoritmos de triangulación es que no pueden manejar los objetos verticales como los edificios, ya que esto requeriría más de un valor de altura en un mismo punto.

4.6.4.2. Modelo GRID

El modelo GRID es opuesto al TIN, se compone de puntos con espaciamiento regular, tanto en la dirección X y Y . El modelo GRID puede ser comparado a una matriz, donde cada celda representa el valor medio de la altura en ese punto (Figura 9). Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está determinada de forma implícita por su situación en la matriz, una vez definidos el origen y el valor del intervalo entre filas y columnas (Felicísimo, 1992).

Puede ser imposible medir todas las alturas en una cuadrícula regularmente espaciada, por lo que el modelo GRID se crea normalmente sobre la base de otros conjuntos de datos, como los modelos TIN o las curvas de nivel en mapas existentes. Si hay puntos faltantes en el GRID estos pueden ser interpolados por varios métodos, por ejemplo, la interpolación lineal o kriging.

El modelo GRID es la estructura más utilizada para construir los MDE. La razón es que se trata de una estructura de fácil manejo informático y simple de representar mediante estructuras lógicas como matrices de dos dimensiones o tratado como una imagen raster. Tiene limitaciones en la precisión ya que el nivel de detalle depende del tamaño de la cuadrícula, Por ejemplo, los cambios bruscos de elevación no pueden mostrarse si el tamaño de la cuadrícula es muy grande.

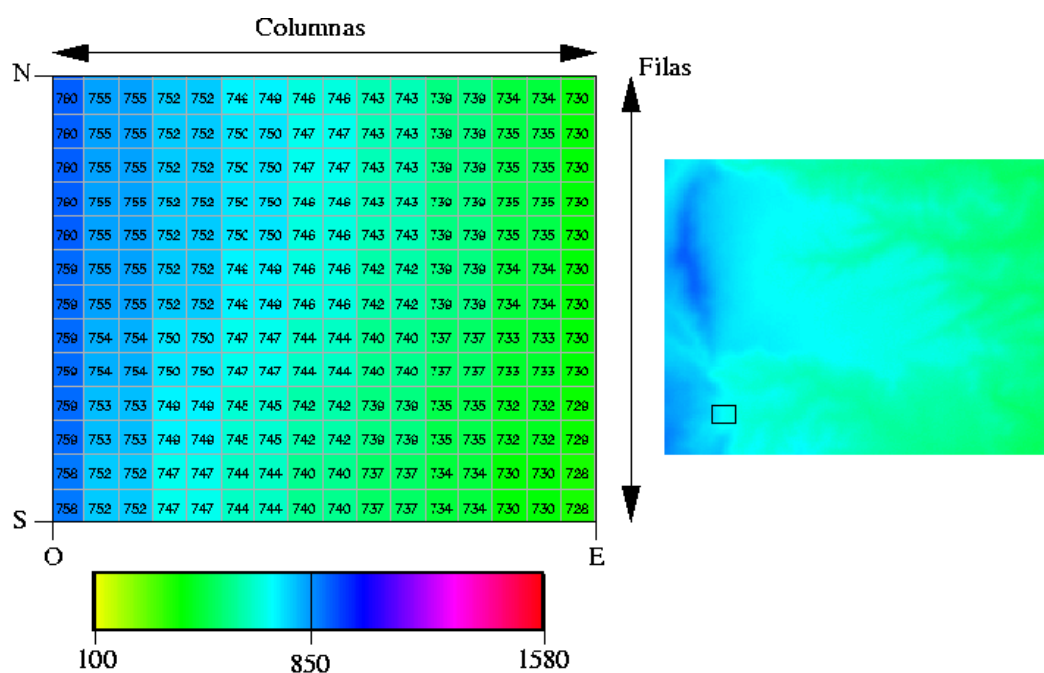


FIGURA 9 – REPRESENTACIÓN DE LA ALTURA DEL TERRENO CON EL MODELO GRID (FUENTE: [HTTP://JOSELUISSIG.BLOGSPOT.COM](http://JOSELUISSIG.BLOGSPOT.COM)).

4.7. MOSAICADO

El mosaicado es el proceso de ensamblaje de un conjunto de imágenes, balanceadas radiométricamente adquiridas desde diversos puntos de observación, mediante líneas de costura generadas manual o automáticamente y que, en conjunto, nos permiten reconstruir el espacio de representación de la ortoimagen en su totalidad, es decir, que cualquier punto de la ortoimagen sea visto desde, como mínimo, una de las imágenes que se captaron.

Durante el ensamblaje se deben resolver una serie de problemas: como la igualación radiométrica del conjunto de imágenes, especialmente dificultosa en las zonas de sombra solar; debido a que las sombras se desplazan en el tiempo que transcurre durante la captación de las imágenes. Así como los objetos no modelados; como árboles, contenedores, en general pequeñas estructuras y los objetos en movimiento como los automóviles.

El primer paso es eliminar o, al menos, reducir tanto como sea posible las diferencias radiométricas entre imágenes adyacentes. Estas diferencias se producen principalmente por las variaciones temporales y espaciales entre las tomas de las imágenes y en menor cuantía durante el proceso de digitalización. Para eliminar estas diferencias radiométricas en las imágenes se restringe el problema corrigiéndolas banda por banda. Desde este punto de vista, una corrección radiométrica se puede aplicar a la i -ésima toma cuya radiometría en cada pixel puede ser descrito como $F_i(x, y)$. Por lo tanto la corrección radiométrica de una imagen puede ser descrita de la siguiente forma [23] (Xandri, et al, 2005):

$$F'_i(x, y) = R(F_i(X, Y)) + G_i(X, Y) \quad [23]$$

Donde R es aplicado a los valores radiométricos de la imagen y G actúa sobre las coordenadas de los píxeles. R son las funciones que hacen referencia a las correcciones de contraste y estas corrigen las diferencias radiométricas entre puntos correspondientes en imágenes adyacentes que dependan del valor radiométrico del píxel, haciendo que los histogramas de las imágenes vecinas sean idénticos en las zonas de traslape. G son las funciones llamadas correcciones espaciales, estas corrigen el valor radiométrico de un píxel de acuerdo con la posición del píxel en la imagen y tienen como objetivo corregir los efectos como el viñeteado (reducción del brillo o de la saturación de una imagen en la periferia comparado con el centro de la imagen). Estas dos correcciones se aplican consecutivamente.

5. MARCO REFERENCIAL

En cuanto a Investigaciones defendidas en los últimos 15 años y relacionadas directamente con la temática de esta investigación, es preciso destacar doce de ellas:

- Eduardo Piatti y José Lerma publicaron en la revista *The Photogrammetric Record* en el 2014 el artículo “*Generation of True Ortho-images Based on Virtual Worlds: Learning Aspects*” donde describen el proceso de ortorectificación de imágenes tomadas con una cámara digital en entornos urbanos, por medio de una simulación fotogramétrica generada a partir de modelos digitales de elevación, modelos digitales de edificios y un modelo digital de superficie, así mismo describen los procesos internos que son necesarios para producir una ortoimagen verdadera, como el enmascaramiento y el análisis de visibilidad.

- Junfeng Xie y X. Wang en el 2012 por medio del documento “*A Method for True Orthophoto Generation Based on Projection and Iteration Strategy*” presentado en el XXII congreso de la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS) en Melbourne (Australia), presentan un nuevo método para detectar las zonas ocultas que producen la proyección en perspectiva de los edificios cuando se generan ortofotos verdaderas. Este método se basa en proyectar los polígonos de los techos y paredes a planos horizontales sobre el suelo y obtener las zonas ocultas por medio de un procedimiento matemático llamado estrategia de iteración, en este algoritmo el rayo de proyección se transfiere a una cantidad de líneas proyectadas y la zona oculta se compone de puntos de intersección de las líneas proyectadas y el suelo. Por lo tanto, conseguir el área de proyección de la pared y el techo de los edificios en el suelo es equivalente a la obtención de los puntos de intersección de las líneas de proyección y la superficie del terreno.

- José Eduardo Fuentes, Jiner Bolaños y Daniel Roza en el 2012, presentan el documento “*Modelo digital de superficie a partir de imágenes de satélite IKONOS para el análisis de áreas de inundación en Santa Marta, Colombia*”, donde se describe la capacidad de las imágenes estereoscópicas del sensor IKONOS de generar un Modelo Digital de Superficie (MDS) que permita analizar zonas con baja pendiente y ajustar el área de influencia por inundación trazada en un estudio anterior por el Invemar en el 2010. El MDS se realiza por medio de la simulación de los parámetros y la órbita del sensor para obtener los valores de Coeficientes Polinomiales Racionales (CPR) de la imagen por medio de la aplicación del algoritmo propuesto por Thierry Toutin, del Instituto Canadiense de Percepción Remota, para la generación simulada de los parámetros CPR.

- La tesis de doctorado *“Reconstrução de Edificações para Geração de Ortoimagens Verdadeiras com Emprego de Dados Lidar”* realizada por Marcis Gualberto Mendonça Júnior en el 2010, muestra una metodología para la generación de ortofotos verdaderas con base en modelos digitales del terreno y modelos digitales de superficie obtenidos a partir de un conjunto de puntos con origen en un levantamiento con LIDAR en un ambiente urbano. Para la detección de oclusiones fue desarrollado el procedimiento denominado Altura-Buffer (“H-Buffer”) que compara las alturas de dos píxeles con la misma coordenada donde el píxel más alto es el que oculta al píxel de menor altura.
- Thomas Hanusch en el 2010 describe en su tesis de doctorado *“Texture Mapping and True Orthophoto Generation of 3D Objects”* los algoritmos y el software, realizado con lenguaje de programación C, necesarios para crear un flujo de trabajo que genere ortofotos verdaderas partiendo desde la orientación de las imágenes hasta la realización de un modelo texturizado 3D foto realístico de las imágenes. De los diferentes algoritmos descritos en el documento se distinguen 2 grupos de algoritmos, el primer grupo se encarga de la geometría y el análisis de visibilidad de las imágenes y el segundo grupo de algoritmos se enfoca en las correcciones de color y brillo para poder combinar diferentes imágenes adquiridas bajo diferentes condiciones y así obtener la ortofoto verdadera sin líneas de costura visibles.
- *“Detección automática de edificios mediante imágenes de alta resolución y datos Lidar para la actualización de bases de datos cartográficas en entornos urbanos”*, este documento, realizado por Txomin Hermosilla, Luis Ángel Ruiz y J. A. Recio en el 2010, estudia la viabilidad de empleo de una metodología de detección de edificios para la determinación automática del

porcentaje de ocupación de edificios en polígonos de bases de datos geoespaciales de usos del suelo tales como el SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España). Esta metodología de detección de edificios combina información espectral proveniente de orto-fotografías de alta resolución con datos altimétricos obtenidos a partir de tecnología Lidar aerotransportado, el resultado del porcentaje de superficie edificada en la base de datos SIOSE se evaluó y analizo con datos de referencia obtenidos mediante digitalización de las edificaciones.

- Yahya Alshawabkeh, Norbert Haala y Dieter Fritsch en el 2010 presentan en el documento *“A New True Ortho-Photo Methodology for Complex Archaeological Application”* un enfoque para la producción automática de orto-mosaicos verdaderos para la documentación, preservación y restauración de objetos culturales, utilizando el escaneo laser para obtener una representación de la superficie en tres dimensiones con buena precisión y varias imágenes digitales que cubren por completo la zona de interés.
- K. I. Bang y A. F. Habib en el año 2007 presentan en la conferencia anual de la ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing) el documento *“Comparative analysis of alternative methodologies for true orthophoto generation from high resolution satellite imagery”* el cual muestra metodologías alternativas para la generación de ortofotos verdaderas centrándose en la propuesta de un nuevo algoritmo para la detección de zonas ocultas llamado método de trazado de rayos con base en la altura y el ángulo.

- “Urban Image True Orthorectification in the National Map Program”, este documento realizado por *Guoqing Zhou* y *W. Chen* en el año 2005 presenta un exhaustivo estudio sobre las teorías, algoritmos y métodos de generación de ortoimágenes urbanas de gran escala, muestra los problemas de generar una ortoimagen con los métodos tradicionales e incluye técnicas para generar ortofotos basadas en modelos del terreno y modelos digitales de ciudad y su unificación para obtener una ortoimagen verdadera.

- *Mohamed Ettarid, Ali AitM`hand y Redouane Aloui* en el 2005 implementaron un software (VOP Software) para la generación de ortofotos verdaderas digitales, donde sus módulos de computación fueron desarrollados en lenguaje C++ y la interfaz gráfica con lenguaje Visual Basic. Se validó el software desarrollado usando fotos aéreas de escala 1:7500 que sobrevuela una zona suburbana de la región de Meknes (Marruecos) y que presenta edificios con altura variable entre 4 y 8 metros, en este software se implementó el algoritmo Z-buffer que resulto muy eficaz en la detección de zonas ocultas. La ortofoto verdadera generada obtuvo un RMS de 0.15 m calculado a partir de las diferencias de las coordenadas de los puntos de control.

- “*True orthoimage generation in urban areas*”, cuyos autores son *Vicenç Palà y Roman Arbiol* directores del departamento de teledetección del Instituto Cartográfico de Cataluña. Esta investigación presentada en el tercer simposio internacional de sensores remotos de áreas urbanas en Estambul (Turquía) en el año 2002, analiza los aspectos generales concernientes a la generación de una ortoimagen verdadera y sus diferencias con una ortorectificación estándar, tratando con especial énfasis en la estructura y las características del MDT necesario para obtener la

ortoimagen verdadera, como también se describen los efectos en la imagen ortorectificada causados por las imprecisiones entre el MDT y la realidad.

- “Operational procedure for automatic true orthophoto generation”, escrita por *Wolfgang Schickler* y *Anthony Thorpe* en el año 1998, describe un procedimiento totalmente automatizado para crear ortofotos verdaderas, presentando un nuevo método de mosaicado que automáticamente elige la “mejor” imagen y optimiza las líneas de costura reduciendo su visibilidad en la ortofoto verdadera.

6. METODOLOGÍA

Los nuevos avances en procesamiento de imágenes digitales aumentan el interés en las ortofotos y dan a lugar en la obtención de una mejor calidad en las ortofotos. Sin embargo, las ocultaciones debido a terrenos muy accidentados o diferencias significativas en la elevación conducen a incoherencias en la precisión y la escala de la ortofoto. Las ortoimágenes verdaderas eliminan estas incoherencias, tratando de restaurar los objetos ocluidos en las imágenes capturadas desde un avión o sensor, mientras que al mismo tiempo, incluye tantos objetos como sea posible en un modelo de superficie.

El proceso completo para poder generar ortoimágenes verdaderas se puede dividir en estos cinco pasos generales:

- 1) Corrección geométrica de las imágenes (fotos aéreas e imagen Quickbird).
- 2) Creación del modelo digital de superficie, combinando el modelo digital de elevación con el modelo digital de ciudad.
- 3) Ortorectificación de la imagen Quickbird teniendo como base el modelo digital de superficie.
- 4) Localización de las áreas ocultas en la ortoimagen Quickbird, obtenida en el paso 3, por medio de un mapa de visibilidad.
- 5) Relleno de las áreas ocultas en la ortoimagen Quickbird, reemplazándolas con áreas visibles de fotos aéreas adyacentes, por medio del mosaicado.

Estos pasos se pueden visualizar en la figura 10, donde se muestra el proceso metodológico utilizado en el proyecto para el desarrollo de una ortoimagen verdadera.

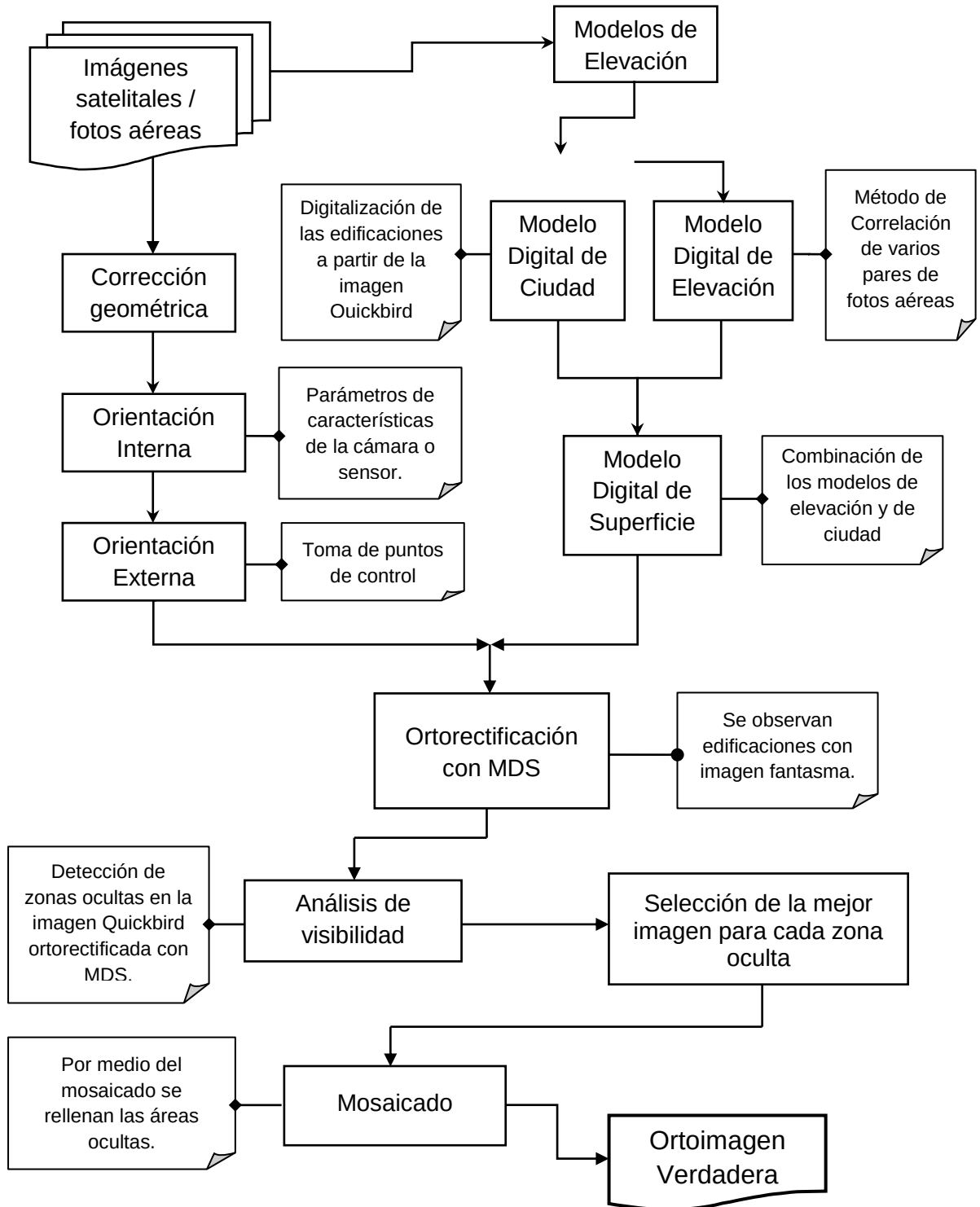


FIGURA 10 –PROCESO METODOLÓGICO UTILIZADO EN EL PROYECTO.

6.1. MATERIALES

Para este proyecto se utilizaron los siguientes materiales:

- 1 Imagen satelital del sensor Quickbird con una resolución espacial de 0,61 metros tomada en Octubre de 2008, con un área de cubrimiento de 4,9 km². Comprendiendo parte del sur de la ciudad de Cali, visualizando los barrios El Ingenio, El Caney, Valle del Lili y la zona de estudio correspondiente al campus de la Universidad del Valle, sede Meléndez.
- 9 fotos aéreas, con una resolución espacial de 1.0 metros, de tres líneas de vuelo diferentes cuyo traslape entre ellas muestran la zona de estudio.
- Programas especializados en digitalización, georreferenciación, tratamiento y análisis de imágenes digitales:
 - Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS) de Leica Geosystems.
 - Erdas Imagine 9.2 de Intergraph Geospatial.
 - Arcgis 9.2 de ESRI.
 - Autocad Raster Design 2010.
- Estación total TOPCON con precisión a los 5", para el levantamiento de los puntos de control repartidos a lo largo de la zona de estudio.

6.2. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA DE LAS IMÁGENES

6.2.1. Orientación interna

Según lo expuesto en el marco teórico en cuestión de orientación interna, Tras la captura y el proceso de digitalización de una imagen, se obtiene una imagen en forma de matriz con coordenadas pixel (columnas, filas). Por lo tanto, cada imagen capturada y digitalizada requiere una orientación interna particularizada que relacione matemáticamente las coordenadas pixel con las coordenadas imagen de las marcas fiduciales calibradas.

Para conocer la orientación interna de cada imagen se utilizó el software Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS) el cual obtiene automáticamente la orientación interna de las imágenes con la ayuda de unos parámetros específicos que requiere el software, estos parámetros se encuentran en el certificado de calibración dado por la empresa que realizó la toma de las imágenes.

Para garantizar la calidad de la transformación bidimensional afín en la orientación interna, es necesario que el error medio cuadrático (RMSE) de la orientación interna no sobrepase el valor de 0.5 píxeles o la mitad de la resolución de las imágenes escaneadas.

6.2.2. Orientación externa

Para establecer en las imágenes la relación matemática entre el sistema de coordenadas imagen, obtenidas en la orientación interna, y el sistema de coordenadas del mundo real; se debe disponer de un programa de tratamiento de imágenes digitales con un procedimiento que realice la transformación de coordenadas. Para el presente proyecto se utilizó el programa Leica

Photogrammetry Suite 9.2 (LPS), Este programa se basa en la siguiente serie de etapas básicas:

1. Se ubica una serie de puntos de control, en lugares muy destacados y visibles, y se obtienen las coordenadas de cada punto en los dos sistemas de coordenadas, (X, Y) y (f, c) . Teóricamente son necesarios por lo menos 3 puntos de control con coordenadas X, Y y Z para cada imagen, sin embargo para aumentar la exactitud del proyecto cartográfico, algunos autores recomiendan usar más puntos de control. Estos puntos deben ser objetos fácilmente reconocibles y preferentemente artificiales, por su poca movilidad, y estar debidamente repartidos en toda la imagen para evitar que las distorsiones locales se muestren en las ecuaciones finales.
2. Posteriormente se determina el tipo de transformación más conveniente según el tipo de datos de partida y del número de puntos de control que se pudieran haber encontrado en la primera etapa. Normalmente, para imágenes de satélite la opción preferible es una ecuación cuadrática.
3. Mediante mínimos cuadrados se obtienen los valores de los coeficientes de regresión $A, B, C, D, E, F, \dots$, estos coeficientes así calculados permiten realizar una modificación del sistema de coordenadas con el mínimo grado de error. Se obtiene además una estimación del error cuadrático medio (ECM) que sirve para determinar si es necesario aumentar el número de puntos de control. La ecuación del ECM es [24]:

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X' - X)^2 + (Y' - Y)^2}{n}} \quad [24]$$

Donde X' e Y' son las coordenadas estimadas por la transformación para cada punto de control y X e Y las coordenadas reales. Según Bedón y Pinto en el 2012, normalmente el ECM debería ser menor al tamaño del pixel. Así mismo, todos los puntos de control van a poseer su propio error cuadrático [25], este error permite comprobar si existe algún punto de control incorrecto o mal ubicado que sea necesario eliminar o corregir.

$$EC = \sqrt{(X' - X)^2 + (Y' - Y)^2} \quad [25]$$

4. Se aplican las ecuaciones [18] y [19], con los valores calculados de los coeficientes, a todas las coordenadas iniciales para obtener así sus nuevos valores en el sistema de referencia final. Las etapas 3 y 4 suelen llevarse a cabo automáticamente.
5. Por último se realiza el remuestreo, el cual el software Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS) de Erdas Imagine utiliza el modelo matemático de convolución cúbica como una combinación entre baja y alta frecuencia [26]:

$$\begin{aligned}
 &V_r \\
 &= \sum_{n=1}^4 V(i-1, j+n-2) \times f(d(i-1, j+n-2) + 1) \\
 &\quad + V(i, j+n-2) \times f(d(i, j+n-2)) + V(i+1, j+n-2) \\
 &\quad \times f(d(i+1, j+n-2) - 1) + V(i+2, j+n-2) \\
 &\quad \times f(d(i+2, j+n-2) - 2)
 \end{aligned} \quad [26]$$

Donde:

$I = \text{int}(x_r)$

$J = \text{int}(y_r)$

$d(i, j)$ = distancia entre un pixel con coordenadas (i, j) y (x_r, y_r)

$V(i, j)$ = el nivel digital del pixel (i, j)

V_r = el nivel digital de salida

6.3. MODELOS DE ELEVACIÓN

6.3.1. Modelo Digital de Elevación

En este proyecto se obtuvo el modelo digital de elevación por medio del método de correlación de varios pares estereoscópicos de fotos aéreas a escala 1:5000, con el software Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS) de la empresa Leica Geosystems, el cual extrae automáticamente el modelo digital de elevación después de realizar la corrección geométrica de las imágenes. Este software usa un algoritmo que compara dos imágenes y busca las posiciones donde características en común aparecen en las porciones de traslape de las imágenes y calcula la posición tridimensional de esas características. Este proceso se conoce como coincidencia de imágenes digitales y la determinación de las coordenadas tridimensionales.

La extracción del modelo digital de elevación por medio del método de correlación de imágenes con el Software Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS) tiene que ser cuidadoso ya que este método coloca en el MDE la vegetación y las edificaciones como si fueran puntos del terreno creando inconsistencia en el modelo. Como resultado de este proceso se genera un MDE en el cual se pueden elegir varios

tipos de formato de salida: DEM, ASCII, Terra Model TIN, 3D Shapefile y SOCET SET TIN.

Se escogió el formato DEM, que es un archivo de mapa de bits que puede utilizarse en diferentes programas de procesamiento de imágenes digitales, incluyendo ERDAS IMAGINE. Este MDE se muestra como un archivo de una sola banda espectral, visualizada en escala de grises donde las zonas más brillantes representan elevaciones altas y las zonas oscuras representan elevaciones bajas. Este formato es muy útil para ortorectificar imágenes, además de servir como entrada principal para los diferentes análisis en un sistema de información geográfica.

6.3.2. Modelo Digital de Ciudad (MDC)

Una ortoimagen es tan precisa como el modelo de elevación que se utilizó para crearla. Por lo tanto, si se quiere rectificar un edificio a su correcta posición vertical, se tendría que capturar los edificios como parte de la superficie a rectificar. La descripción de la superficie que contiene los edificios u otros objetos hechos por el hombre es llamado Modelo Digital de Ciudad (MDC).

Obtener el MDC es el aspecto más dispendioso y costoso del proceso de una ortoimagen verdadera porque dependiendo de la precisión requerida de la ortoimagen final, se necesitara capturar cada forma compleja que contienen los edificios como techos inclinados, techos en forma de cúpula, pirámide o aguja, terrazas, balcones, las cajas para los ascensores y el aire acondicionado. Para que cada una se rectifique a su posición correcta.

El modelo digital de ciudad para este proyecto se creó con un nivel de detalle en donde las edificaciones tendrían la forma parecida a una caja ocupando el espacio que les corresponde en la imagen. Se realizó utilizando la imagen Quickbird, ortorectificada con el modelo digital del terreno obtenido anteriormente, como fondo para la restitución de todos los edificios de la zona de la prueba piloto, con ayuda del software ArcGIS se digitaliza en un shape la base de las edificaciones asignándole el valor correspondiente de la altura real al nivel del terreno y posteriormente se crea un nuevo shape, con las mismas capas vectoriales del shape de la base de los edificios, pero asignándole el valor de la altura de cada edificación obtenida con topografía convencional, para así crear un modelo básico tridimensional de las construcciones, que combinado con el MDE se obtiene un modelo digital de superficie apto para el desarrollo de una ortoimagen verdadera.

6.3.3. Modelo Digital de Superficies (MDS)

La combinación entre dos modelos de elevación como el MDE y el MDC producen un modelo digital de superficies (MDS) que en teoría debe contener todos los objetos que se encuentran estáticos sobre el suelo, incluido el terreno, los edificios y la vegetación. Pero como la vegetación puede llegar a ser difícil de modelar entonces es común que un MDS solo posea el terreno y los edificios, este es el caso del MDS creado para desarrollar este proyecto.

Teniendo el modelo digital de superficie en formato TIN, se debe convertir a formato GRID puesto que el *software* Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS) utilizado para ortorectificar imágenes, solo acepta los modelos de elevación en formato GRID.

6.4. ORTORECTIFICACIÓN CON MDS

El siguiente proceso a seguir es transformar la imagen satelital Quickbird ya corregida geométricamente en una imagen ortorectificada con un Modelo Digital de Superficie. Esta Imagen ortorectificada tiene menos desplazamiento de relieve y errores geométricos que las imágenes convencionales georreferenciadas, y por lo tanto se considera más precisa.

Como se ilustra en el Capítulo 4 del presente documento, la imagen ortorectificada con un MDS muestra los objetos que no se encuentran a nivel del terreno, en este caso los edificios, en sus posiciones correctas, pero también incluye una “imagen fantasma” de los edificios en el terreno sobre las zonas que ocultaban. Según Schickler y Thorpe en 1998, el motivo de la “imagen fantasma” es que durante la reproyección, los rayos son reproyectados de vuelta al área oculta y los objetos ocultos, ya que se está rectificando sin detectar estos datos ocultos. Por lo tanto, los datos "incorrectos" de la imagen están rectificados en las áreas ocultas (Figura 11).



FIGURA 11 –EFECTO FANTASMA PRODUCIDO AL REALIZAR UNA ORTORECTIFICACIÓN SIN DETECCIÓN DE ZONAS OCULTAS.

6.5. ANÁLISIS DE VISIBILIDAD

Con el fin de superar el efecto fantasma que provoca la ortorectificación con un Modelo Digital de Superficie hay que detectar las áreas ocultas. Esto se hace realizando un análisis de visibilidad el cual registra todos los rayos que se "bloquean" por otros objetos en el MDS en su camino desde algún punto de la superficie hacia la cámara. Si éste se encuentra bloqueado, el punto en el MDS no es visible desde la cámara, y por lo tanto debe ser registrado como oculto. Un método comúnmente utilizado para realizar los análisis de visibilidad es el llamado algoritmo Z-buffer, donde se utiliza un buffer de profundidad para almacenar el valor de la coordenada Z de cada pixel y otro buffer para almacenar los valores de intensidad de color en cada posición.

Este algoritmo se clasifica en el grupo imagen-espacio, en el que la visibilidad de los objetos se decide punto por punto, determinando la profundidad de cada pixel sobre la superficie de cada polígono y proceder a dibujar solo los puntos que estén más cercanos con respecto al espectador. Al comienzo el buffer de profundidad y el buffer de intensidad se establecen con un valor mínimo (preferiblemente que sea 0).

Cada vez que se calcula la profundidad (valor de Z) en cada posición (X, Y) del píxel, la profundidad calculada se compara con el valor almacenado en forma previa en el buffer de profundidad de esa posición. Si la coordenada Z en el buffer es menor que la del nuevo punto, el nuevo píxel no se dibuja, ya que dicho punto estaría más lejos que el punto anterior y formaría parte de una superficie oculta.

Si la profundidad que se calcula es mayor que el valor que se almacena en el buffer con profundidad, se almacena el nuevo valor en el buffer reemplazando al anterior y después se determina la intensidad de la superficie en esa posición y se sitúa en la misma posición (X,Y) en el buffer de intensidad.

Aquí se muestra un ejemplo en pseudocódigo del Algoritmo de Z-buffer (Carranza y Florián, 2006):

```

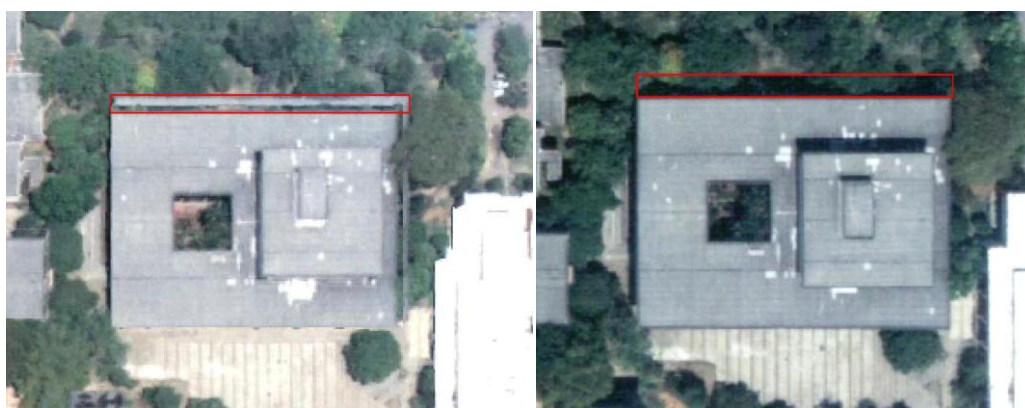
Void zBuffer(void)
{
    int x, y;
    for (y=0; y<YMAX; y++) { /*clear frame buffer and z-buffer*/
        for(x=0; x<XMAX; x++) {
            WritePixel(x, y, color)
            WriteZ(x, y, 0);
        }
    }
    For (cada polígono) {
        For(cada píxel en la proyección del polígono) {
            Doublepz = valor de la coordenada z del punto (x, y)
            If (pz>= Read(x,y)) {
                WriteZ(x, y, pz);
                WritePixel(x, y, color del píxel en coordenadas (x,y))
            }
        }
    }
}

```

6.6. SELECCIÓN DE LA MEJOR IMAGEN PARA CADA ZONA OCULTA

Para recuperar la información que se pierde en las zonas ocultas de la imagen ortorectificada Quickbird por culpa de los ocultamientos por desplazamiento de relieve, ocasionado por la proyección en perspectiva, se deben rellenar estas zonas ocultas con información de imágenes adyacentes que tengan visibilidad de estas zonas desde diferentes vistas (por ejemplo un bloque de imágenes satelitales o una línea de vuelo de fotos aéreas). Por lo tanto el área oculta debe ser visible en una imagen adyacente o incluso ser visible en varias imágenes para así llenar por completo esa zona oculta.

El siguiente paso es escoger “la mejor” imagen para cada pixel oculto de la ortoimagen Quickbird, pero como se tiene una considerable superposición entre imágenes adyacentes es necesario aplicar los siguientes principios para poder resolver la redundancia en la información disponible de las zonas ocultas y así obtener “la mejor” imagen a reemplazar en esas zonas ocultas (Figura 12).



(a)

(b)

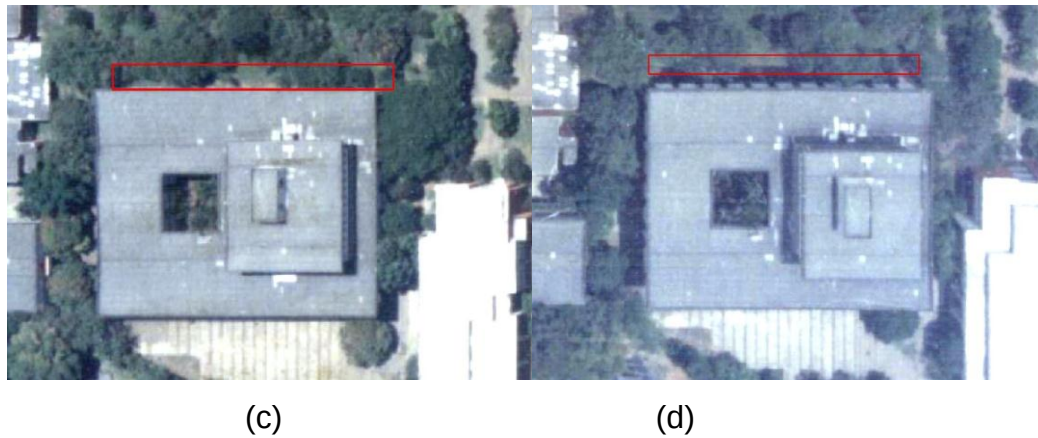


FIGURA 12—(A) IMAGEN SATELITAL EN DONDE SE MUESTRA LA ZONA OCULTA A REEMPLAZAR. (B), (C) Y (D) FOTOS AÉREAS DONDE EXISTEN REDUNDANCIA DE INFORMACIÓN A REEMPLAZAR EN (A).

6.6.1. Proximidad al punto nadir

Asignar el valor más alto a la imagen que tenga los píxeles, correspondientes a la zona oculta en la ortoimagen verdadera final, más cerca al punto del nadir de la imagen (Figura 13 y Figura 14). Si el píxel está cerca del punto nadir, los desplazamientos de relieve son más pequeños, minimizando la deformación de todas las características no modeladas: por ejemplo, árboles y coches. También es menos probable que se encuentren los pixeles en un punto ciego.



FIGURA 13— DISTANCIA DE UNA ZONA OCULTA AL PUNTO NADIR, A ESTA IMAGEN SE LE ASIGNA UN VALOR MENOR COMPARADO CON LA FIGURA 14, POR TENER MAYOR DISTANCIA AL PUNTO NADIR.



FIGURA 14—DISTANCIA DE UNA ZONA OCULTA AL PUNTO NADIR, A ESTA IMAGEN SE LE ASIGNA EL VALOR MÁS ALTO COMPARADO CON LA FIGURA 13, POR SER LA IMAGEN CON MENOR DISTANCIA DE LA ZONA OCULTA AL PUNTO NADIR.

6.6.2. La distancia desde una zona oculta

Se le asigna el valor más alto a la imagen en que los píxeles, correspondientes a la zona oculta en la ortoimagen verdadera final, estén alejados de las zonas ocultas de la misma imagen (Figura 15). Como las zonas ocultas están vacías de contenido en la imagen, al seleccionar un píxel cerca de estas zonas producirá una imagen “inarmónica” ya que faltara información, viéndose como recortada la imagen.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 15— (A) IMAGEN SATELITAL EN DONDE SE MUESTRA LA ZONA OCULTA A REEMPLAZAR. (B) FOTO AÉREA DONDE LOS PÍXELES SELECCIONADOS ESTÁN CERCA DE ZONAS OCULTAS PRODUCIENDO UNA IMAGEN “INARMÓNICA”. (C) FOTO AÉREA CON PÍXELES ALEJADOS DE LAS ZONAS OCULTAS, IDEAL PARA REEMPLAZAR EN (A).

Estos dos valores característicos se combinan en cada imagen adyacente y así se reduce la decisión sobre seleccionar la zona de la imagen que corresponde con la zona oculta en la ortoimagen verdadera final a simplemente escoger la imagen adyacente con el valor más alto para cada zona oculta.

Al seleccionar la mejor imagen para reemplazar en cada zona oculta, éstas deben ser fusionadas con la ortoimagen Quickbird para obtener la ortoimagen verdadera final, este proceso es ejecutado por medio del mosaicado.

Según Luis Santos en el 2005, este proceso debe ser muy cuidadoso ya que al utilizar varias imágenes, cada una con diferente radiometría (intensidad luminosa), estas se tienen que fusionar de forma que no sea posible ver que la ortofoto verdadera está formada por partes de otras imágenes. De otra forma el mosaico parecería un cuadro hecho de retazos. Para reducir las diferencias radiométricas, es mejor utilizar las imágenes adquiridas en una misma línea de vuelo debido a su similitud de las condiciones en la formación de las imágenes.

6.7.MOSAICADO

La ortoimagen verdadera final será en gran medida un mosaico debido al relleno de los pixeles ocultos por un conjunto de diferentes imágenes. En las ortofotos convencionales las líneas de costura se colocan a menudo a lo largo de los caminos o en terrenos planos donde no haya edificios u otros objetos, ya que serían visibles las líneas de costura por el desplazamiento de relieve, mientras que la ortoimagen verdadera elimina este desplazamiento por lo que no es necesario colocar las líneas de costura en los mismos sitios que la ortofoto convencional, sin embargo la colocación de las líneas de costura es más significativa en la ortoimagen verdadera debido a la gran cantidad de zonas ocultas dando por resultado considerablemente más líneas de costura. Así que si las imágenes procesadas tienen diferencias relativamente grandes en color y brillo, las líneas de costura serán visibles y el resultado final será muy pobre.

6.7.1. Coincidencia de colores

Las imágenes digitales que se utilizaron para desarrollar las ortofotos se crean a partir de tres pasos básicos; la exposición, el proceso de desarrollo y el escaneo digital. Todos los tres pasos pueden tener influencia en la calidad de la imagen final, y puede hacer que las imágenes se vean con diferentes tonalidades de color. Con la llegada de las cámaras fotogramétricas digitales, los dos últimos pasos se pueden descartar. Aunque son pocas las cámaras digitales que se utilizan en Colombia, pero sería muy razonable pensar que en un futuro próximo estas cámaras sustituirían a las cámaras analógicas.

Algunas de las imágenes disponibles en este proyecto cambian de tonalidad entre las líneas de vuelo e incluso entre las imágenes de la misma trayectoria de vuelo. Algunas tienen tonalidad amarilla y otras muy azulada (Figura 16). Un tono de color uniforme en toda la imagen como la de la figura es por lo general debido a errores en el escaneo digital, puede ocurrir también esa diferencia de color si las imágenes son de dos rollos diferentes de películas. Si se realiza un mosaico sin ningún tipo de corrección de color, las líneas de costura serían altamente visibles y el resultado general de la ortofoto sería muy pobre.



FIGURA 16- DIFERENCIAS DE TONALIDAD EN LAS LÍNEAS DE VUELO. FOTO AÉREA DE LA IZQUIERDA CON TONALIDAD AMARILLA, FOTO AÉREA DE LA DERECHA CON TONALIDAD AZULADA.

En una imagen ocurren también diferencias locales radiométricas. Dado que las imágenes se basan en la luz del sol, el ángulo con respecto al sol y las diferentes formas como se refleja la luz en las distintas superficies pueden tener gran influencia en estas diferencias. En una fotografía tomada verticalmente el sol ilumina solo una parte de los edificios, y por lo tanto, se observará la mitad del edificio que está frente al sol, y la otra mitad de los muros estarán ocultos en la sombra (Figura 17). Esto hará que la imagen se vea como si tuviera una gran diferencia en el brillo de las dos mitades, pero este efecto solo debe ser evidente en ortofotos ordinarias ya que las paredes no son visibles en una ortofoto verdadera.

La imagen también tiende a observarse más brillante en el centro donde la distancia del lente al suelo y los objetos es el más corto, viéndose afectados sobre todo los colores azules. La peor parte de esta distorsión radiométrica es corregida por las empresas de fotografía aérea con un filtro en la lente que es más oscuro en el centro de la imagen y por lo tanto reduce este efecto.

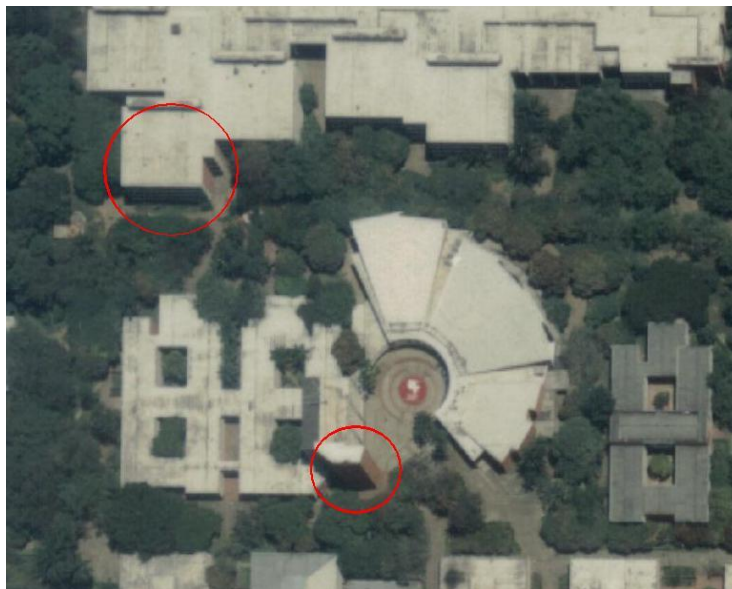


FIGURA 17- DIFERENCIA RADIOMÉTRICA LOCAL CAUSADA POR LA ILUMINACIÓN DEL SOL EN SOLO UNA PARTE DE LOS EDIFICIOS.

Al rellenar las áreas ocultas de la ortoimagen con las partes de esas áreas que sean visibles en otras imágenes, se puede utilizar un algoritmo de ajuste de histograma para cambiar la media y la varianza de las áreas ocultas para que concuerden con la media y la varianza de la imagen sin ocultaciones. El modelo matemático puede ser escrito como [27]:

$$Y = \frac{\sigma l}{\sigma s \times (X - \mu s)} + \mu l \quad [27]$$

Donde Y es la salida del píxel original X , en las áreas ocultas después del ajuste del histograma, σ y μ son la desviación estándar y media; y los subíndices l y s representan las áreas no-ocultas y ocultas, respectivamente (Zhou y Chen, 2005).

7. RESULTADOS

7.1. CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

7.1.1. Orientación interna

En la prueba piloto realizada en este proyecto se utilizaron 9 fotos aéreas (Figura 18), escaneadas digitalmente, de tres líneas de vuelos diferentes y una imagen satelital del sensor Quickbird (Figura 21). Los parámetros dados por el certificado de calibración para realizar la orientación interna de estas 10 imágenes fueron los siguientes:

Fotos aéreas

Tipo de cámara: RMK A

Longitud focal calibrada: 152.914 mm

Altura de vuelo: 750 m



FIGURA 18—FOTOS AÉREAS UTILIZADAS EN EL PROYECTO.

Marcas fiduciales:

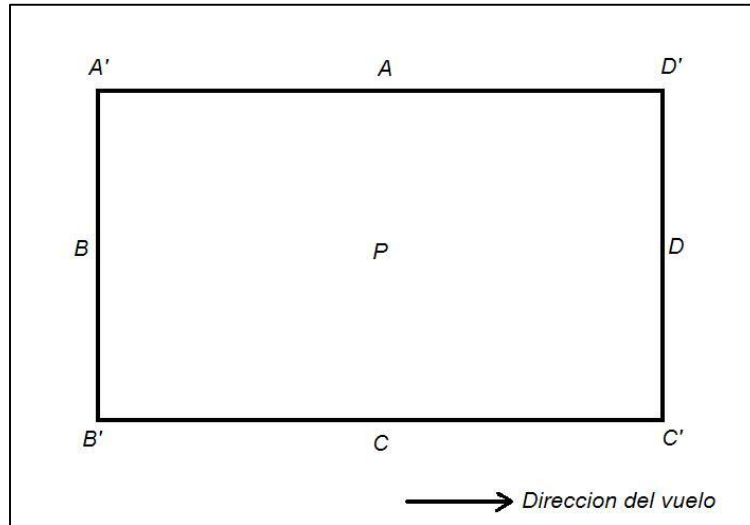


FIGURA 19—ESQUEMA UBICACIÓN DE MARCAS FIDUCIALES EN LAS FOTOS AÉREAS.

Distancia entre las marcas fiduciales.

A – C	225.923 mm
B – D	225.993 mm

Distancia entre las marcas fiduciales y el punto principal de autocolimación.

A – P	113.000 mm
B – P	112.987 mm
C – P	112.923 mm
D – P	113.006 mm

Posición de las marcas fiduciales (A', B', C' y D') y el punto principal en las fotos aéreas.

Pto	X(mm)	Y(mm)
P	0.000	0.000
A'	-112.987	113.000
B'	-112.987	112.923
C'	113.006	-112.923
D'	113.006	113.000

Distorsión del lente:

Campo de ángulo (grados)	5.6	11.3	16.9	22.5	28.1	33.7	39.4	42.2
Simetría radial (μm)	0	0	0	0	0	0	0	0
Descentramiento (μm)	0	0	0	0	0	1	2	3

Parámetros de distorsión de la simetría radial.

$$K0 = -0.1500e-04$$

$$K1 = 0.4579e-09$$

$$K2 = -0.1777e-14$$

$$K3 = 0.9279e-18$$

Parámetros de distorsión de descentramiento

$$P1 = -0.7184e-07$$

$$P2 = 0.9137e-07$$

$$P3 = 0.1438e-04$$

La calidad de la transformación bidimensional afín en la orientación interna de las fotos aéreas es aceptable, ya que el error medio cuadrático (RMSE) no sobrepasó el valor de 0.5 píxeles, como muestra la figura 20.

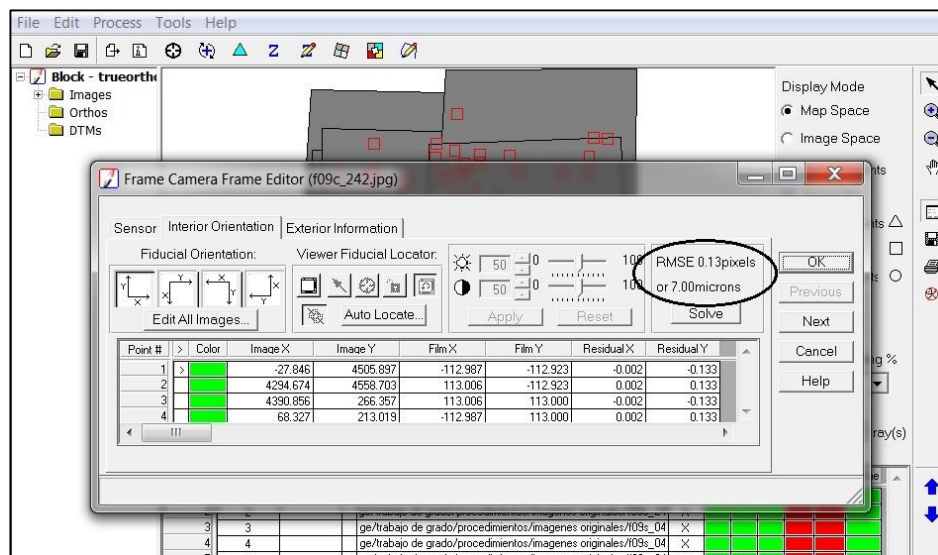


FIGURA 20—ERROR MEDIO CUADRÁTICO DE LAS FOTOS AÉREAS OBTENIDO EN LA ORIENTACIÓN INTERNA.

Imagen Satelital



FIGURA 21—IMAGEN SATELITAL QUICKBIRD UTILIZADA EN EL PROYECTO.

Parámetros Imagen Satelital:

Altitud de órbita:	450 km.
Inclinación de órbita:	97.2, sincronización solar.
Área de cubrimiento por imagen:	4,9 km x 4,9 km.
Resolución radiométrica:	16 bits
Resolución espacial: Multiespectral:	0.61m 4 bandas espectrales
Tiempo de orbita:	93.5 minutos
Distancia focal:	8836.202 mm
Tamaño detector:	0.0068 mm
Columnas del sensor:	27552

7.1.2. Orientación externa

Para poder realizar la orientación externa se utilizó la transformación cuadrática (polinomio de grado 2) y con 52 puntos de apoyo, obtenidos con topografía convencional por medio de una Estación Total, ubicados en lugares destacados y visibles en las imágenes y repartidos a lo largo de la zona de estudio como lo muestra la figura 22, de los cuales 30 puntos fueron de control y 22 puntos de chequeo. Posteriormente se realizó por medio de la ecuación [24] una estimación del error cuadrático medio (ECM) de la transformación dando como resultado un error de 0.547 m siendo aceptable al ser menor que el tamaño del pixel (1.0 m) de las imágenes utilizadas, por lo tanto no es necesario ampliar el número de puntos de control.



FIGURA 22— UBICACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL EN LAS IMÁGENES.

7.2. MODELOS DE ELEVACIÓN

7.2.1. Modelo Digital de Elevación

La extracción del modelo del terreno por medio del método de correlación de imágenes con el Software Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS) tiene que ser cuidadoso ya que este método coloca en el MDE la vegetación y las edificaciones como si fueran puntos del terreno creando inconsistencia en el modelo (Figura 23).

En la figura 23 se puede ver la ubicación de las edificaciones y los arboles de acuerdo a su máxima altura con los colores verde, amarillo y rojo pero se visualizan como crestas puntiagudas produciendo errores en la interpretación del modelo de elevación, por lo tanto hay que elegir las opciones más favorables que nos ofrece el software para extraer el modelo digital de elevación, de acuerdo a la forma del terreno del proyecto.

Como la zona donde se realizó el estudio presenta un terreno plano con mucha vegetación y edificaciones de baja y mediana altura, se escoge la opción *LowUrban* del módulo *RegionStrategy*, este parámetro regula y optimiza el proceso de extracción del MDE, y con la ayuda de los 52 puntos de control, obtenidos con Estación Total, se obtiene un modelo del terreno acorde a las necesidades del proyecto en formato .DEM con una resolución de 0.6 metros (Figura 24).

En este modelo se aprecia un terreno semiplano con pocos cambios abruptos de elevación donde la altura más baja es de 968 metros representado con el color púrpura y la altura más alta es de 980 metros mostrado con color verde teniendo una pendiente aproximada del 1.35%.

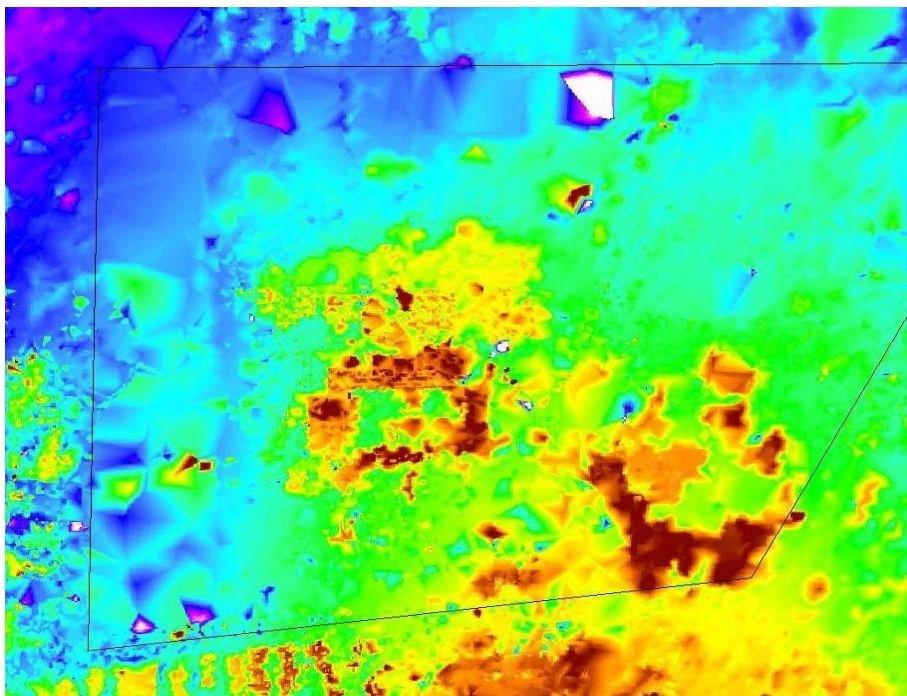


FIGURA 23— INCONSISTENCIAS EN EL MODELO DIGITAL DEL TERRENO AL REALIZAR EL MÉTODO DE CORRELACIÓN DE IMÁGENES, LOS COLORES VERDE, ROJO Y AMARILLO MUESTRA LAS EDIFICACIONES Y LA VEGETACIÓN.

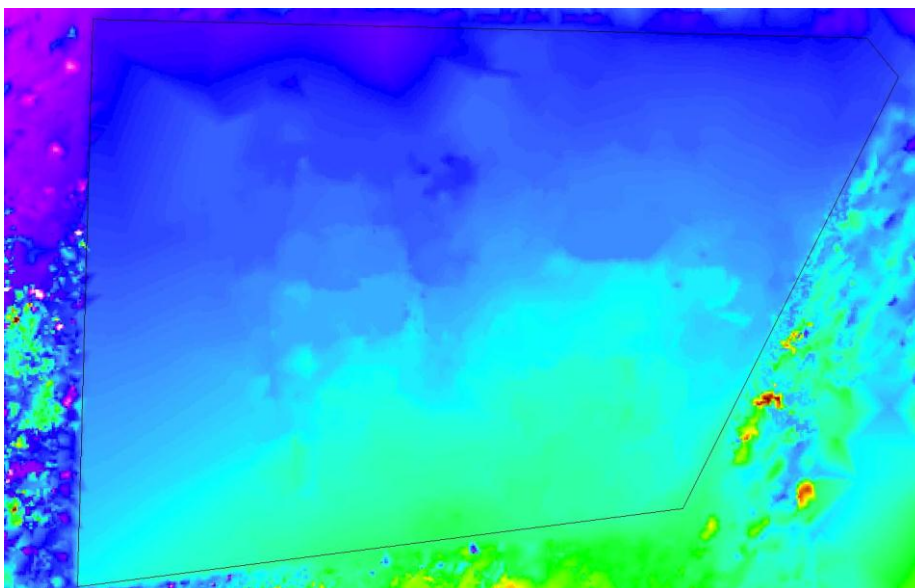


FIGURA 24— MODELO DIGITAL DEL TERRENO CORREGIDO CON PUNTOS DE CONTROL, EL POLÍGONO REPRESENTA EL ÁREA DE UNIVALLE, EN COLOR PURPURA SE MUESTRA LA COTA MÁS BAJA Y EN COLOR VERDE LA COTA MÁS ALTA.

7.2.2. Modelo Digital de Ciudad

Se realizó un modelo digital de ciudad (MDC) de los edificios existentes en la zona de estudio (Figura 26), digitalizando los edificios sobre la imagen Quickbird con el software ArcGIS y convirtiéndolo en un modelo TIN con la triangulación de Delaunay, este modelo plantea un problema para el MDC, donde las paredes y las superficies sobresalientes no pueden ser trianguladas correctamente ya que se requieren diferentes valores de altura en un mismo punto, Para poder obtener un modelo TIN de los edificios se realiza un pequeño cambio en el área de los techos de los edificios haciéndola más pequeña que en la base (Figura 25).

Este pequeño cambio al ser tan solo de 1cm. de diferencia entre las aristas de la base y el techo se vuelve imperceptible a la hora de realizar la ortoimagen verdadera ya que la resolución de la imagen es de 60 cms., obteniendo un error estimado por esta diferencia de tan solo 0.0166 pixeles según la fórmula [28].

$$Error = \frac{1 \text{ cm}}{60 \text{ cm}} \times 1 \text{ pixel} = 0.0166 \text{ pixeles} \quad [28]$$

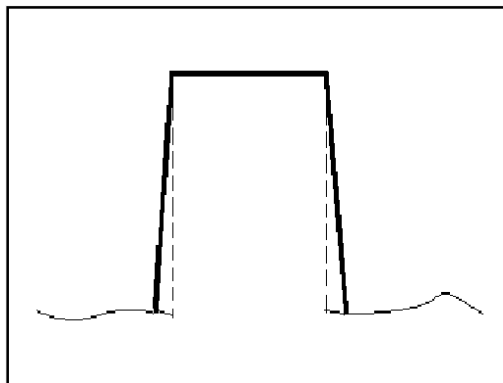


FIGURA 25- VISTA SECCIONAL DE UN EDIFICIO, DONDE SE PUEDE VER LOS DIFERENTES TAMAÑOS ENTRE LA BASE Y EL TECHO.

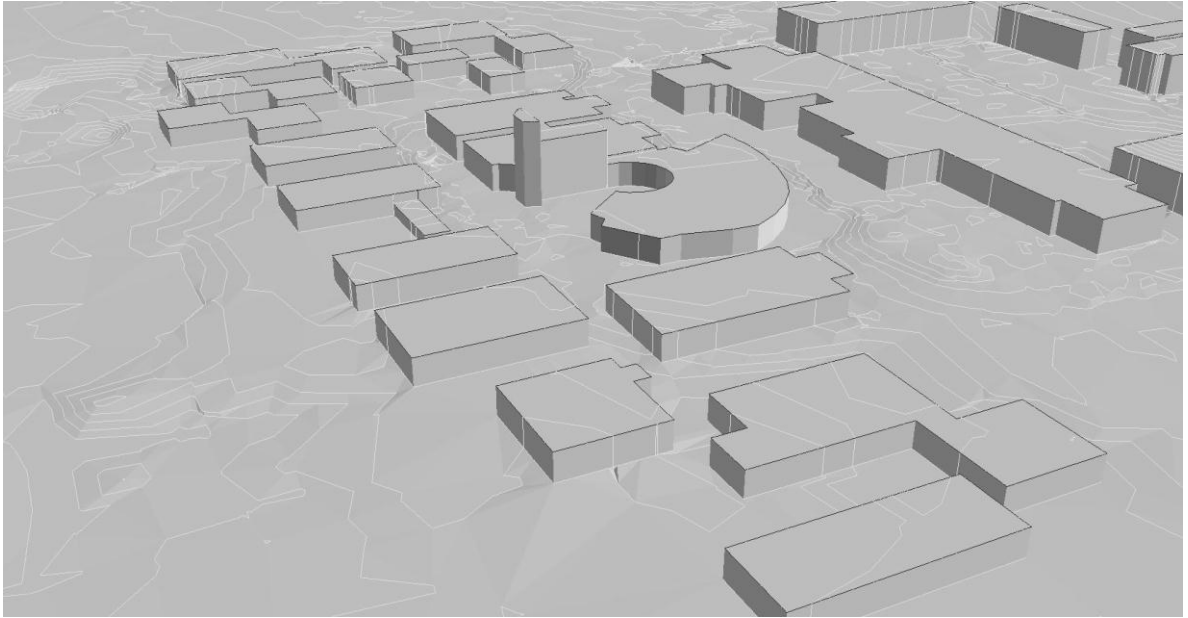


FIGURA 26– MODELO DIGITAL DE CIUDAD (MDC), SE MUESTRA EN LA IMAGEN LA ZONA CORRESPONDIENTE A LA FACULTAD DE INGENIERÍA.

7.2.3. Modelo Digital de Superficies

El resultado obtenido de la combinación del MDE y el MDC, es un modelo de elevación que incluye el terreno y las edificaciones presentes en la zona de estudio en formato TIN (Figura 27), posteriormente se convirtió en formato GRID (Figura 28) para poder trabajarlo en el *software* Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS)

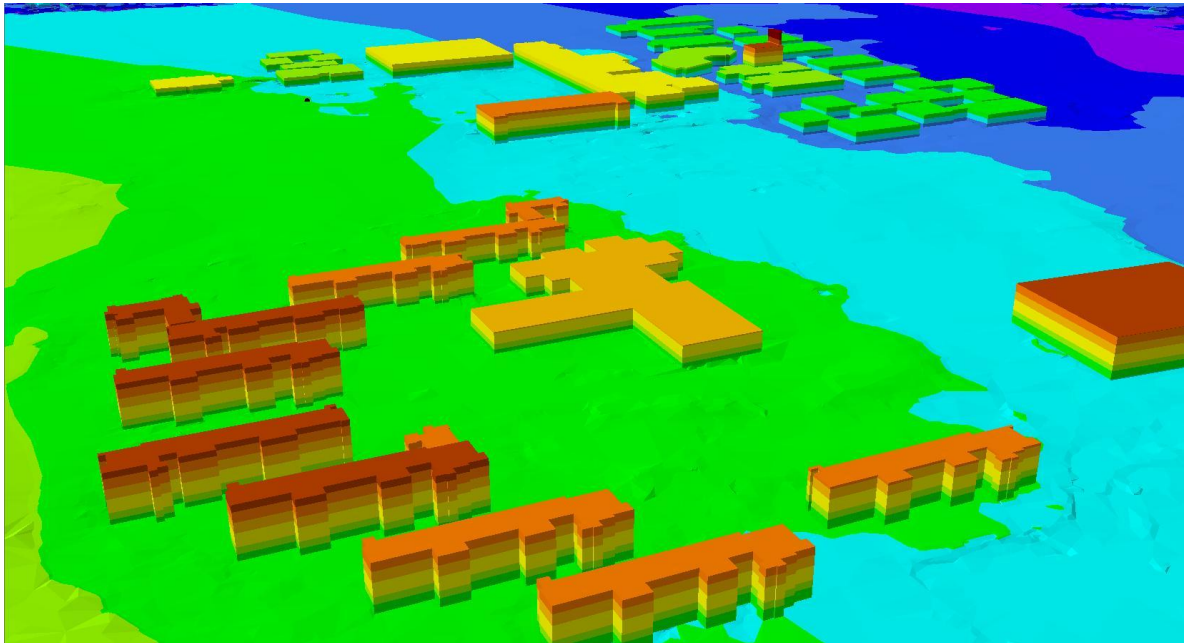


FIGURA 27 – MODELO DIGITAL DE SUPERFICIES OBTENIDO EN EL PROYECTO, FORMATO TIN.



FIGURA 28 – MODELO DIGITAL DE SUPERFICIES OBTENIDO EN EL PROYECTO, LOS DIFERENTES TONOS DE GRISES REPRESENTAN LAS ALTURAS DEL MODELO, ENTRE MÁS CLARO MAYOR ES LA ALTURA, FORMATO GRID.

7.3. ORTORECTIFICACIÓN CON MDS

Al ortorectificar con el modelo digital de superficies la imagen satelital, se obtuvo una ortoimagen con duplicación de estructuras (Figura 29) estas imágenes “fantasmas” aparecen por no realizar la detección de las áreas ocultas en la imagen Quickbird, por lo tanto es necesario realizar un análisis de visibilidad para ubicar estas áreas ocultas.

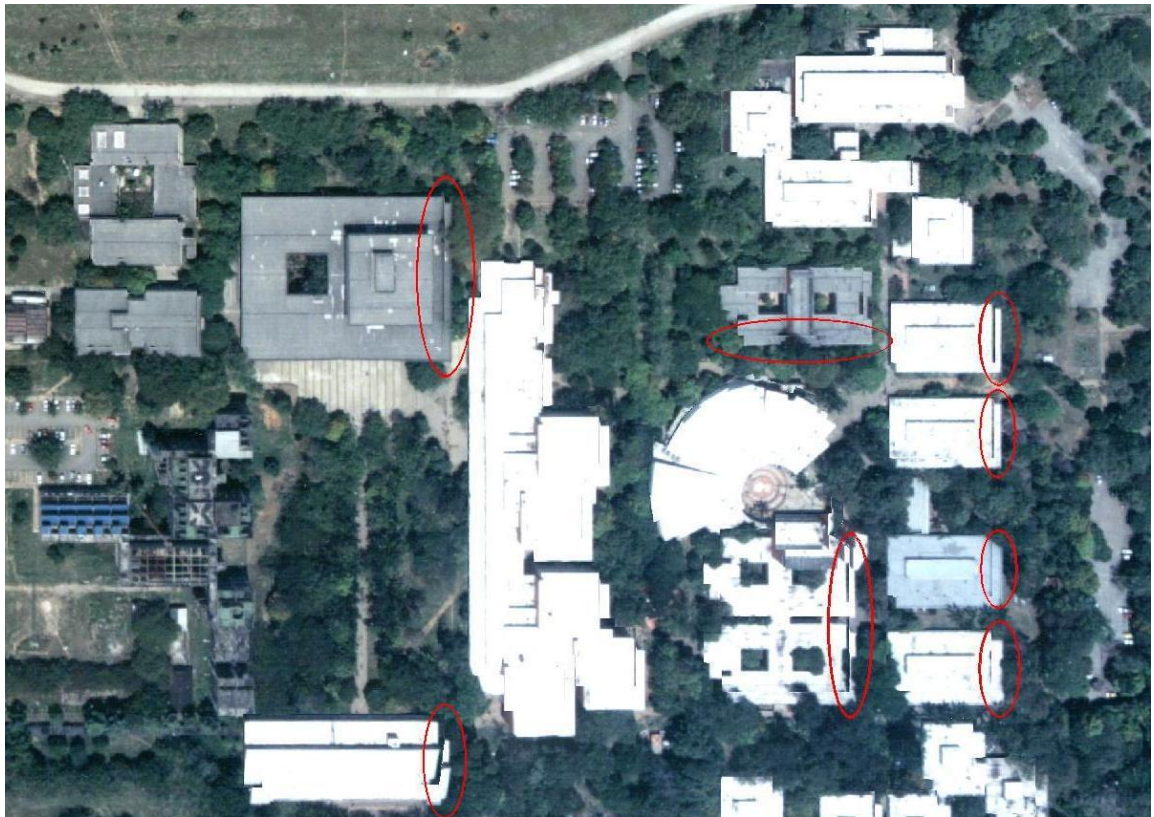


FIGURA 29— IMAGEN SATELITAL CON DUPLICACIÓN DE ESTRUCTURAS

7.4. ANÁLISIS DE VISIBILIDAD

Se realizó un análisis de visibilidad, para la imagen satelital Quickbird por medio del programa Erdas Imagine, donde se muestran las áreas, en color rojo, que se encuentran ocultas por las edificaciones debido al desplazamiento del relieve causado por la proyección en perspectiva de la toma de la imagen (Figura 30). Por lo tanto estas serían las zonas que se tendrían que rellenar con partes de otras imágenes donde esa zona oculta sea visible.



FIGURA 30— MAPA DE VISIBILIDAD DE LA ZONAS OCULTAS POR LAS EDIFICACIONES, EN ROJO LAS ZONAS OCULTAS POR LAS EDIFICACIONES POR LA PROYECCIÓN EN PERSPECTIVA.

7.5. ORTOIMAGEN VERDADERA

La ortoimagen verdadera final (Figura 31) se obtiene utilizando la imagen Quickbird como imagen principal y las fotos aéreas como imágenes secundarias utilizadas para el relleno de las zonas ocultas en la imagen Quickbird. Se realizó un exhaustivo ensamblaje el cual consiste en seleccionar las partes que se necesitan de las imágenes secundarias para reemplazarlas en las zonas ocultas de la imagen principal por medio del mosaicado, escogiendo “la mejor” imagen secundaria para cada zona oculta de la imagen principal. Siendo dispendioso de acuerdo a la cantidad de zonas ocultas encontradas en el análisis de visibilidad y en la cantidad de imágenes secundarias que se tengan.

En las siguientes tablas (Tabla 1 y Tabla 2) se puede ver como se le asignaron valores a cada imagen adyacente según los principios vistos en el capítulo 6.7, para escoger las mejores imágenes secundarias y reemplazarlas en las zonas ocultas del edificio 320 (facultad de ciencias). El edificio 320 tiene, según el análisis de visibilidad, 14 zonas ocultas y es visible en 6 de las 9 fotos aéreas, en la foto aérea F09C-242 es visible solo la mitad del edificio.

En la tabla 1 se muestra la distancia, medida en las fotos aéreas, del punto nadir a cada una de las zonas ocultas del edificio 320. Se le asigna el valor más alto (color azul) a la imagen con la zona a reemplazar que está más cerca del punto nadir. En la tabla 2 se muestra la distancia, medida en las fotos aéreas, desde la zona oculta hacia una zona con pixeles ocultos. Se le asigna el valor más alto (color azul) a la imagen con la zona a reemplazar que está más cerca del punto nadir.

Distancia del punto nadir a la zona oculta (metros)								
Valor Asignado	Edificio	Zona oculta	Fotos aéreas					
			F09C-242	F09C-243	F09S-046	F09S-047	F10AS-377	F10AS-378
9	320	1	673.995	429.244	386.808	443.249	476.427	547.582
	320	2	667.290	445.209	386.876	468.515	456.033	554.259
8	320	3	688.287	458.175	412.670	470.238	444.558	529.750
	320	4	695.693	461.923	417.519	467.116	442.929	519.756
7	320	5	709.604	462.459	428.892	449.288	454.610	510.027
	320	6	737.435	477.610	456.703	437.841	451.568	484.268
6	320	7	761.117	495.449	474.486	439.916	445.202	464.973
	320	8	780.777	497.935	489.214	415.741	463.628	453.007
5	320	9	X	480.907	485.200	385.018	487.009	460.720
	320	10	X	495.025	497.243	398.681	478.550	448.728
4	320	11	X	515.594	516.410	404.175	472.679	429.821
	320	12	X	521.595	527.049	406.199	471.817	416.904
3	320	13	X	539.979	548.959	405.331	473.340	401.361
	320	14	X	518.873	536.814	372.381	509.246	421.491

Tabla 1– Distancia del punto nadir a la zona oculta.

Distancia de la zona oculta a un punto oculto en la imagen (metros)								
Valor Asignado	Edificio	Zona oculta	Fotos aéreas					
			F09C-242	F09C-243	F09S-046	F09S-047	F10AS-377	F10AS-378
9	320	1	5.875	1.285	3.503	0.112	0	0
	320	2	6.063	1.281	3.262	0	0.556	0
8	320	3	0	0	0	0	5.565	3.295
	320	4	0	0	0	0	4.724	4.176
7	320	5	6.455	0.507	4.201	0	0.278	0
	320	6	0	0	0	0	4.481	4.474
6	320	7	0	0	0	0	4.732	4.484
	320	8	X	0	0	3.816	4.724	5.378
5	320	9	X	2.275	4.666	0	0.254	0
	320	10	X	0	0	0	6.675	4.438
4	320	11	X	0	0	0	5.565	0
	320	12	X	0.502	5.047	0	4.455	0
3	320	13	X	0	0	0	6.120	5.071
	320	14	X	0	0	0	0	5.075

Tabla 2– Distancia de la zona oculta a un punto oculto en la imagen.

En la tabla 3 encontramos los puntajes totales sumados de las tablas 1 y 2, la imagen con mayor puntaje es la elegida para reemplazar en la zona oculta correspondiente, en la tabla 3 se puede visualizar las imágenes que tienen mayor puntaje resaltadas con color verde, también se puede ver que en las zonas ocultas 9 y 10 el puntaje más alto se encuentra en dos imágenes diferentes, en estos casos, escogemos la imagen con menos distancia al nadir ya que tiene menos desplazamiento del relieve.

Puntaje total asignado a las imágenes							
Edificio	Zona oculta	Fotos aéreas					
		F09C-242	F09C-243	F09S-046	F09S-047	F10AS-377	F10AS-378
320	1	13	15	17	13	9	9
320	2	13	15	17	9	13	9
320	3	9	12	14	11	17	13
320	4	9	12	14	11	17	13
320	5	13	13	17	11	13	9
320	6	9	10	12	14	17	14
320	7	9	10	11	14	17	15
320	8	X	9	11	16	15	17
320	9	X	15*	15	13	12	12
320	10	X	11	10	14	16	16*
320	11	X	12	11	15	16	14
320	12	X	13	14	13	15	12
320	13	X	11	10	14	16	17
320	14	X	12	11	15	13	17
		Máximo puntaje en cada zona oculta					

Tabla 3– Suma de puntajes de las tablas 1 y 2 para escoger la mejor imagen a reemplazar en las zonas ocultas.



FIGURA 31— ORTOIMAGEN VERDADERA OBTENIDA, CAMPUS UNIVERSITARIO DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE.

Se validó la ortoimagen verdadera con base a una muestra de 21 puntos perfectamente definidos en la imagen y 21 puntos sobre una fuente de mayor exactitud, en este caso puntos con coordenadas posteriormente obtenidos con estación total, esta validación se obtuvo aplicando la prueba NSSDA¹ la cual nos muestra un índice de calidad de la imagen en unidades reales sobre el terreno.

Para la aplicación de la prueba NSSDA se procede calculando la diferencia entre coordenadas para cada punto como lo muestra la tabla 4 y el RMSE (error medio cuadrático) para cada una de las componentes (N, E) [31], así como el error medio cuadrático de la posición horizontal (RMSE_(E-N)) [32], con estos valores se puede obtener el coeficiente de exactitud, mostrado en la tabla 5, a un 95 % de confianza dependiendo de dos opciones:

a) en caso de que $RMSE_{(E)} = RMSE_{(N)}$, se emplea la ecuación [29]:

$$Exactitud_{E-N} = 1.7308 \times RMSE_{E-N} \quad [29]$$

b) en caso de que $RMSE_{(E)} \neq RMSE_{(N)}$, se emplea la ecuación [30]:

$$Exactitud_{E-N} = 1.22385 \times (RMSE_E + RMSE_N) \quad [30]$$

$$RMSE_N = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(N_i - N_{iobs})^2}{n} \quad y \quad RMSE_E = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(E_i - E_{iobs})^2}{n} \quad [31]$$

¹Test NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) del Federal Geographic Data Committee (FGDC)

$$RMSE_{(E-N)} = \sqrt{(RMSE_E)^2 + (RMSE_N)^2} \quad [32]$$

PTO.	COORDENADAS TOMADAS EN CAMPO		COORDENADAS TOMADAS EN LA ORTOIMAGEN		Diferencia entre coordenadas E	Diferencia entre coordenadas N
	E	N	E	N	E	N
JM 1	1060652.915	865249.908	1060652.644	865249.637	0.074	0.073
JM 2	1060686.313	865157.704	1060687.636	865158.184	1.749	0.230
JM 4	1060688.223	865004.122	1060688.333	865004.415	0.012	0.086
JM 5	1060580.233	864743.361	1060580.778	864743.927	0.297	0.321
JM 8	1060381.391	864668.520	1060381.282	864669.063	0.012	0.295
JM 9	1060387.427	864544.815	1060387.695	864544.291	0.072	0.274
JM 10	1060338.408	864485.983	1060338.204	864485.460	0.041	0.274
JM 12	1060459.889	864457.532	1060460.606	864457.299	0.515	0.054
JM 13	1060286.050	864647.773	1060285.507	864647.037	0.295	0.541
JM 14	1060217.760	864677.544	1060217.475	864677.289	0.081	0.065
JM 15	1060190.988	864588.036	1060190.708	864588.066	0.079	0.001
JM 17	1060238.045	864519.188	1060238.665	864518.640	0.384	0.300
JM 19	1060325.452	864582.376	1060325.797	864582.629	0.119	0.064
JM 20	1060342.534	864863.976	1060342.633	864863.439	0.010	0.288
JM 21	1060198.286	864816.401	1060198.635	864816.498	0.122	0.009
JM 24	1060086.815	864923.556	1060085.165	864923.085	2.724	0.222
JM 26	1060148.122	865091.570	1060147.635	865091.260	0.237	0.096
JM 27	1060259.817	865097.007	1060259.898	865097.287	0.007	0.079
JM 29	1060646.362	864460.148	1060646.577	864460.114	0.046	0.001
JM 33	1060408.265	865105.135	1060408.749	865105.372	0.234	0.056
JM 35	1060299.973	865242.862	1060300.250	865242.338	0.076	0.275

Tabla 4– Aplicación de la prueba NSSDA.

RMSE _(E)	0.339
RMSE _(N)	0.172
RMSE _(E-N)	0.380
Coeficiente de exactitud(m):	0.624

Tabla 5– Resultados en metros de la prueba NSSDA.

8. CONCLUSIONES

Se realizó una revisión de las teorías, algoritmos y métodos de generación de ortoimágenes verdaderas urbanas. Gracias a esto se llegó a implementar una metodología para producir semiautomáticamente este producto cartográfico, que consiste en obtener un MDT a partir del método de correlación de imágenes; digitalizar las edificaciones existentes en base a una imagen satelital Quickbird para su modelamiento en 3D y así obtener un MDC; posteriormente la generación de ortoimágenes por medio de un MDS, obtenido por la combinación del MDT y el MDC, y La detección y posterior relleno de las zonas ocultas por las edificaciones, utilizando un análisis de visibilidad y el mosaicado respectivamente. Para validar la aplicabilidad de la metodología propuesta se utilizó una imagen satelital del sensor Quickbird e imágenes aéreas que muestran la zona de la Universidad del Valle, sede Meléndez, en la ciudad de Cali, Colombia. Los resultados demostraron que:

- Los errores cuadráticos medios (ECMs) obtenidos de la transformación bidimensional afín, en la orientación interna; y de la transformación cuadrática, en la orientación externa; según Bedón y Pinto en el 2012, son aceptables ya que se encuentran en el rango permitido al estar por debajo del tamaño del pixel en la orientación externa y al no superar los 0.5 pixeles en la orientación interna.
- La creación del Modelo Digital de Elevación por medio del método de correlación de imágenes con el Software Leica Photogrammetry Suite 9.2 (LPS) debió ser apoyado con puntos de control tomados en campo, con Estación Total, para optimizar el resultado final, de lo contrario se obtenía un MDE que mostraba parte de la vegetación y edificaciones.

- Debido a lo dispendioso que resultaría modelar todas las diferentes formas complejas que contienen las edificaciones (balcones, aires acondicionados, ascensores, etc.), se tomó la decisión de modelar los edificios en el Modelo Digital de Ciudad en forma de una caja de zapatos, por lo tanto las estructuras que no se modelaron en el MDC no se encuentran en su correcta posición vertical mostrándose inclinados en la ortoimagen verdadera (Figura 32). Así mismo el techo en forma de pirámide del coliseo no se ortorectifica bien por el mal modelamiento de este al considerarlo como un cubo (Figura 33) y algunos edificios se ortorectifican con parte del terreno en los bordes debido a la mala digitalización de los edificios o la imprecisión en el valor de la altura del edificio.

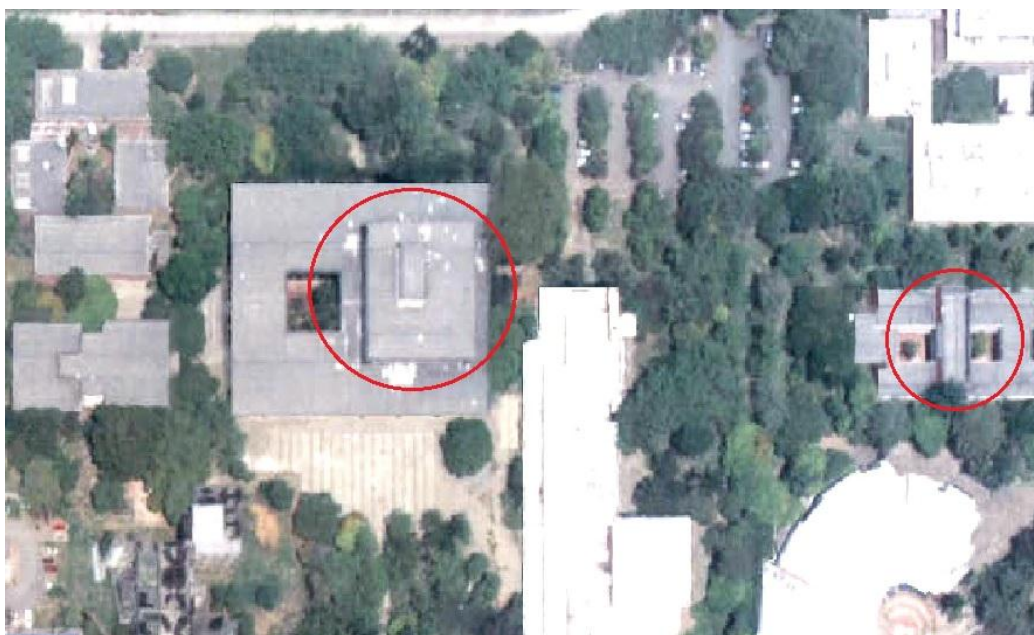


FIGURA 32— ESTRUCTURAS NO MODELADAS EN EL MDC POR LO TANTO SE VISUALIZAN COMO INCLINADAS EN LA ORTOIMAGEN VERDADERA.



FIGURA 33— ERROR PRODUCIDO EN LA ORTOIMAGEN VERDADERA POR IMPRECISIONES EN EL MDS.

- Los principios aplicados (proximidad al punto nadir y la distancia desde una zona oculta) han servido como un buen filtro para encontrar, entre las fotos aéreas que tiene visibilidad desde diferentes vistas de cada zona oculta en la imagen Quickbird, la “mejor” imagen a reemplazar en cada zona oculta escogiendo simplemente la imagen con el valor más alto para cada zona oculta.
- Podemos decir que el mayor tiempo de trabajo usado para producir la ortoimagen verdadera se establece principalmente por el esfuerzo de producir el modelo digital de superficie y también por la extensión de los traslapes necesarios para el relleno de las zonas ocultas, necesitando un buen número de imágenes capturadas desde diferentes posiciones que visualicen una misma zona para obtener un aceptable cubrimiento de las zonas ocultas.

- En la ortoimagen verdadera obtenida se puede observar como las edificaciones se colocan en una adecuada y exacta posición tanto vertical como planimétrica. Dando como resultado que las aceras y las vías sean totalmente visibles y las paredes de los edificios no se puedan ver. En la figura 34 se puede observar un acercamiento de la imagen satelital Quickbird antes de transformarla en una ortoimagen verdadera, en esta imagen se visualizan las paredes de los edificios; en la figura 35 podemos ver un acercamiento de la ortoimagen verdadera donde se puede apreciar que las paredes de los edificios desaparecen.



FIGURA 34— ACERCAMIENTO DE LA IMAGEN SATELITAL QUICKBIRD ANTES DE TRANSFORMARLA EN UNA ORTOIMAGEN VERDADERA.



FIGURA 35— ACERCAMIENTO DE LA ORTOIMAGEN VERDADERA OBTENIDA DE LA FIGURA 31.

- La aplicación de la prueba estadística NSSDA para la validación de la ortoimagen verdadera, dio como resultado 0.624 m, de exactitud horizontal al 95% de nivel de confianza. Este resultado significa que, en la ortoimagen verdadera generada, el 95% de las posiciones del conjunto de datos tendrá un error con respecto a la posición verdadera en el terreno igual o menor a 0.624 metros, este valor corresponde aproximadamente a la resolución espacial de la ortoimagen verdadera, que es de 0.61 metros.

- Según la tabla 5, *Resultados en metros de la prueba NSSDA*, se puede notar que los errores cuadráticos de la ortoimagen verdadera, tanto en el componente E, como en el componente N, no supera los 0.6 metros, o sea, son menores al tamaño del pixel de la imagen, esto demuestra que la ortoimagen verdadera nos ofrece una calidad posicional que nos garantiza errores mínimos en la toma de información y medidas de los elementos representados en este producto cartográfico.

9. RECOMENDACIONES

- Es necesario encontrar un algoritmo adecuado para la gran demanda de diferencias radiométricas encontradas en las imágenes, que son necesarias para el relleno de las áreas ocultas, para que la ortoimagen verdadera final no sea vea como un tapiz hecho de recortes provenientes de varias imágenes.
- Es preciso encontrar un procedimiento que automatice la obtención del modelo digital de ciudad (obteniendo la localización y la representación vectorial de la forma de los edificios) para evitar inconvenientes con la mala digitalización de las edificaciones y así eliminar las imprecisiones en el modelo.
- La ortoimagen verdadera obtenida puede ser utilizada como fondo de una cartografía vectorial, por lo que los edificios se encuentran en su correcta posición planimétrica. El modelo digital de ciudad puede usarse para estudios de propagación de Radio Frecuencia para la planificación de redes

de celular y la creación de modelos de realidad virtual que pueden ser utilizados para la divulgación turística, callejeros virtuales y realización de simulaciones en 3D.

- Llevar las ciudades reales a modelos virtuales, para crear catastro 3D o ciudades modelizadas, puede estar de sobra para muchos de los países latinoamericanos que tienen deficiencias en tareas básicas, pero el tema no debe desconocerse ya que muchas de las ciudades latinoamericanas pueden ser escenarios pilotos de algo que en países desarrollados de Europa y Norteamérica ven como una moda entretenida.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Alshawabkeh Y., Haala N. y Fritsch D., 2010. *A New True Ortho-Photo Methodology for Complex Archaeological Application*. Revista Archaeometry, volumen 52, paginas 517-530.
- Amhar F., Jansa J. y Ries C., 1998. *The Generation of True Orthophotos using a 3D Building Model in Conjunction with a Conventional DTM*. Revista IAPRS, volumen 32, parte 4 "GIS-Between Visions and Applications". Stuttgart, Alemania.
- Bang K. y Habib A., 2007. *Comparative Analysis of Alternative Methodologies for True Ortho-photo Generation from High Resolution Satellite Imagery*. ASPRS Annual Conference, Mayo 7-11. Florida, USA.
- Bedón F. y Pinto S., 2012. *Evaluación de técnicas de detección de cambios del uso de la tierra a través del análisis Multitemporal de imágenes satelitales en el cantón Daule*. Escuela Politécnica del Ejército, Enero 2012, Sangolquí, Ecuador.
- Carranza F. y Florián L., 2006. *Algoritmos de Sombreado y Ocultamiento de Líneas Visibles*. Escuela Académico Profesional de Informática, Universidad Nacional de Trujillo. Perú.
- Del Aguila, M., 2009. *Fotogrametría y Fotointerpretación Forestal*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana. Perú.

- Ettarid M., Míhand A. y Aloui R., 2005. *Digital True Orthophotos Generation*. Proceedings of the FIG Working Week, April 16-21, Cairo, Egypt.
- Felícíximo A., 1992. *Aplicaciones de los Modelos Digitales del Terreno en las Ciencias Ambientales*. Tesis Doctoral, Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT), Universidad de Oviedo. España.
- Fuentes J., Bolaños J. y Rozo D., 2012. *Modelo Digital de Superficie a partir de Imágenes de Satélite Ikonos para el Análisis de Áreas de Inundación en Santa Marta, Colombia*. Boletín Invemar Vol. 41, N° 2 Julio/Diciembre. Colombia.
- Hanusch T., 2010. *Texture Mapping and True Orthophoto Generation of 3D Objects*. Tesis Doctoral, ETH, Escuela Politécnica Federal de Zúrich. Suiza
- Hermosilla T., Ruiz L. y Recio J., 2010. *Detección automática de edificios mediante imágenes de alta resolución y datos Lidar para la actualización de bases de datos cartográficas en entornos urbanos*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Konecny G., 1994. *New Trends in Technology, and their Application – Photogrammetry and Remote Sensing – From Analogue to Digital*. 13th United Nations Cartographic Conference, May 9-18. Beijing, China.
- Leica Geosystems., 1998. *Conceptos Fotogramétricos*. Erdas field guide versión en español, Cap. 7, pp. 257-373.
- Leica Geosystems., 2006. *Leica Photogrammetry Suite Project Manager*, Estados Unidos.

- Lerma J., 2002. *Fotogrametría Moderna; Analítica y Digital*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Mendoza M., 2010. *Reconstrução de Edificações para Geração de Ortoimagens Verdadeiras con Emprego de Dados Lidar*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil.
- Mesén R., 2001. *Análisis Espacial: Interpolación Espacial*. Escuela de Geografía, Universidad de Costa Rica.
- Palà V. y Arbiol R., 2002. *True orthoimage generation in urban areas*. Proceedings of 3rd International Symposium Remote Sensing of Urban Areas, volume 1, pág. 309-314. Estambul, Turquía.
- Pérez A. Juan A., 2001. *Apuntes de fotogrametría II*. Centro Universitario de Mérida, Universidad de Extremadura.
- Piatti E. y Lerma J., 2014. *Generation of True Ortho-images Based on Virtual Worlds: Learning Aspects*. Revista The Photogrammetric Record N° 29 Marzo, pp. 49-67.
- Ramírez R., 2006. *Apuntes de fotogrametría básica*. Centro Universitario de Mérida, Universidad de Extremadura.
- Santamaría J., 2001. *Integración de ortofotografía digital en sistemas de información geográfica y su aplicación a la revisión de la superficie catastral rustica*, Universidad Pública de Navarra.

- Santos L., 2005. *Ortofoto verdadera (True-Ortho) y Lídár, el posible futuro de la cartografía catastral urbana*. Revista Catastro Nº 53 Abril, pp. 131-154. Madrid, España.
- Schickler W. y Thorpe A., 1998. *Operational Procedure for Automatic True Orthophoto Generation*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 32, Part 4, pp. 527-532. Stuttgart, Alemania.
- Wang X. y Xie J., 2012. A Method for True Orthophoto Generation Based on Projection and iteration Strategy. XXII ISPRS Congress, 25 Agosto al 01 de Septiembre. Melbourne, Australia.
- Wolf, P., 1983. *Elements of Photogrammetry with Air Photo Interpretation and Remote Sensing*. McGraw-Hill, 628 p. ISBN 0-07-292454-3. New York, USA.
- Xandri R., Pérez F., Palà V. y Arbiol R., 2005. *Automatic Generation of Seamless Mosaics over Extensive Areas from High Resolution Imagery*. World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI). Orlando, USA.
- Zhou G. y Chen W., 2005. *Urban Image True Orthorectification in the National Map Program*. Department of Civil Engineering and Technology, Old Dominion University.