METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS DE ALTA DENSIDAD UTILIZANDO SENSORES RGB-DEPTH

Presentado por:

Katherin Lorena Huertas Zapata

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Proyecto Curricular de Ingeniería Topográfica
Bogotá D.C 2016

METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS DE ALTA DENSIDAD UTILIZANDO SENSORES RGB-DEPTH

Presentado por:

Katherin Lorena Huertas Zapata

Trabajo de grado en la modalidad de Monografía para optar el título de:
Ingeniero Topográfico

Director:
Ing. Msc William Barragán Zaque

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Proyecto Curricular de Ingeniería Topográfica
Bogotá D.C 2016

La vida es una obra de teatro que no permite ensayos; por eso canta, ríe, baila, llora y vive intensamente cada momento de tu vida antes que el telón baje y la obra termine sin aplausos.

Charles Chaplin

Agradecimientos

El primer agradecimiento es para los funcionarios del Museo Nacional de Colombia que me brindaron su ayuda y colaboración para la captura de los datos, en especial a la señora Catalina Plazas quien me dio la oportunidad y el aval para realizar la investigación.

A los docentes de ingeniería topográfica de la universidad Distrital que me orientaron, explicaron y ayudaron en el desarrollo de la investigación.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Director

_____

Jurado

Resumen

A nivel mundial en las ciencias de la Tierra, utilizan herramientas de gran precisión para la recopilación de información, como la tecnología de escáner Laser Terrestre. En este documento se describe cómo se desarrolló una metodología para la obtención de nubes de puntos, aplicada en la documentación y modelación de un monumento del patrimonio mueble colombiano, el resultado final fue la representación y visualización en un modelo tridimensional.

El proyecto se realizó mediante cuatro fases: La primera fue la recopilación de la información que se llevó a cabo mediante la tecnología Lidar[1] y por medio de los sensores RGB-D[2]. La segunda fase fue la captura de las nubes de puntos compuesta por el trabajo de oficina y de campo. En la tercera el procesamiento de las nubes de puntos, mediante el postproceso se preparó la información para el modelamiento y la visualización en tercera dimensión. La última fase es la comparación de resultados de las nubes de puntos obtenidas.

Palabras clave: Modelo Virtual 3D[3], Kinect[4], Láser Escáner Terrestre, nube de puntos.

[1] Lidar: acrónimo ingles de Light Detection and Ranging
[2] Sensor RGB-D: Acrónimo del inglés *Red* Green Blue Depth, son sensores de color y profundidad.
[3] 3D: Abreviatura de tercera Dimensión.
[4] Kinect: Sensor de color, proximidad y movimiento.

Tabla de Contenidos

Introducción 1
Capítulo 1: Descripción del proyecto 5
1.1 Planteamiento del problema. 5
1.2 Justificación del Proyecto. 6
1.3 Objetivos 9
1.3.1 General 9
1.3.2 Específicos 9
Capítulo 2: Revisión de literatura 10
2.1 Espacio RGB 10
2.2 Sistemas de coordenadas para transformaciones en las cámaras 11
2.3 Sensores de Visión y Profundidad 12
2.3.1 Componentes del sensor Kinect. 12
2.3.2 Funcionamiento del sensor 13
2.4 ¿Qué es Lidar terrestre? 17
2.4.1 Funcionamiento del escáner laser terrestre. 17
2.5 Precios de diferentes tipos de escáner para obtener información 3D 18
2.6 Lenguaje VRML (Virtual Reality Modelling Language) 19
2.7 Rango para la determinación de nubes de puntos con small footprint 20
2.8 Registro de imágenes 20
2.9 Superficie de Poisson 22
2.10 Distancia de Hausdorff ($\boldsymbol{dH}$). 23
2.11 Escultura El Silencio 24
Capítulo 3: Metodología 27
3.1 Primera fase: recopilación de la información 29
3.2 Segunda fase: captura de las nubes de puntos 29
3.2.1 Trabajo de oficina: 29
3.2.2 Trabajo en campo 33
3.3 Tercera fase: procesamiento de las nubes de puntos 37
3.3.1 Postproceso nube de puntos escultura_laser: 38
3.3.2 Postproceso nube de puntos escultura_kinect: 44

3.4 Comparación de los resultados 48
3.4.1 Escalar la nube de puntos 49
3.4.2 Alineación y registro 50
3.4.3 Comparación de las nubes de puntos 51
Capítulo 4: Resultados 52
4.1 Reporte generado por el Software Scene de la superposición de las escenas 53
4.2 Resultados estadísticos 53
4.3 Análisis de la nube de puntos escultura_kinect. 55
4.4 Análisis zona de la cabeza de la escultura. 57
4.5 Análisis zona de la espalda de la escultura. 59
4.6 Análisis zona del frente de la escultura 61
4.7 Análisis general de los resultados estadísticos 64
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones 66
5.1 Conclusiones 66
5.1.1 Limitaciones del Kinect Frente al escáner Faro Focus s120 3D 68
5.2 Recomendaciones 69
Anexo A. Configuración de los parámetros del escáner terrestre Faro Focus 3D S120 71
Anexo B. Pruebas realizadas de la superficie de Poisson 72
Referencias 73

Lista de tablas

Tabla 1: Precios de escáner RGB-D 18

Tabla 2:Precios de escáner laser terrestre 19

Tabla 3: Resultados generales superposición 53

Tabla 4: Resultados obtenidos en la integración de las escenas 53

Tabla 5: Resultados estadísticos de la comparación. 54

Tabla 6: Comparación cualitativa zona de la cabeza de la escultura 58

Tabla 7: Comparación cualitativa zona de la espalda de la escultura 60

Tabla 8: Comparación cualitativa zona del frente de la escultura 62

Tabla 9: Pruebas Poisson 72

Lista de figuras

Figura 1: Escultura El Silencio de Marco Tobón Mejía 8

Figura 2: Representación del espacio RGB 10

Figura 3: Principales partes que componen el sensor Kinect 12

Figura 4: Descripción del Kinect 14

Figura 5: Esquema de funcionamiento del detector de profundidad 15

Figura 6: Visualización Kinect 15

Figura 7: Visualización de la generación tridimensional del Kinect 16

Figura 8: Representación sistema de coordenadas..... 21

Figura 9: Escultura El Silencio de Marco Tobón Mejía 25

Figura 10: Metodología..... 28

Figura 11: Verificación de los requerimientos del sistema para sensor RGB-D 31

Figura 12: Verificación del reconocimiento del sensor Kinect por el computador. 32

Figura 13: Escaneo de la escultura con el sensor Kinect. 34

Figura 14: Modelo de la escultura generado con el sensor Kinect 34

Figura 15: Distribución de esferas para empalmar el levantamiento. 35

Figura 16: Radiación con el escáner Laser 3D 36

Figura 17: Radiación con el escáner Laser 3D desde diferentes posiciones..... 37

Figura 18: Diagrama postproceso nube de puntos escultura_laser 38

Figura 19: Registro manual de las escenas 39

Figura 20: Eliminación del ruido, escultura_laser 40

Figura 21: Reconstrucción del modelo mediante la superficie de Poisson..... 42

Figura 22: Composición de la nube de puntos escultura_kinect..... 44

Figura 23: Diagrama del postproceso de la nube de puntos escultura_kinect 45

Figura 24: Comparación modelo antes y después del postproceso..... 46

Figura 25: Reconstrucción superficie de Poisson con color 47

Figura 26: Asignación de la cantidad de puntos a generar 48

Figura 27: Medición de distancia entre dos puntos 49

Figura 28: Ubicación puntos de referencia para alinear las nubes de puntos 50

Figura 29: Reporte del registro 51

Figura 30: Resultado del modelo completo apartir de la nube de puntos escultura_kinect..... 56

Figura 31: Diferencias en distancias zona de la cabeza de la escultura..... 59

Figura 32: Diferencias en distancias zona de la espalda. 61

Figura 33: Diferencia en distancias zona del frente de la escultura. 63

Figura 34: Zonas con sombra en la escultura..... 63

Introducción

Mundialmente el uso de equipos LASER como el LIDAR aéreo y terrestre, sirven para generar información geográfica, compuesta por coordenadas que conforman las nubes de puntos, que son la base para realizar la reconstrucción de las superficies o de elementos escaneados (Porraz, Caceres, & Gallo, 2014). Es una herramienta útil para representar objetos y escenarios de interés en: diseño, automatización, arquitectura, comercio, ingeniería, videojuegos y entornos industriales. Además, es empleada en disciplinas como la topografía, geología y geodesia, donde su aplicación sirve para la medición y representación de la superficie terrestre. En arqueología se utiliza para la reconstrucción y preservación de patrimonios históricos.

Un lugar en Colombia dedicado a la conservación y divulgación de objetos culturalmente importantes es el Museo Nacional, el más antiguo del país y uno de los más viejos del continente, fue constituido en 1823. Cuando se construyó el edificio su funcionamiento estaba destinado para una cárcel que recibía el nombre de Panóptico funcionó con este fin de 1874 hasta 1946. A partir de 1948 se adaptó para funcionar como Museo, durante los años 1989 y 2001 tuvo un proceso de restauración. Su arquitectura de fortaleza, está edificada con piedra y ladrillo. (Museo Nacional, 2011)

La relación que existe entre las personas y sus legados ancestrales es decir con la historia y sus orígenes, permite la transmisión de los valores socioculturales de cada

comunidad, diferenciando, preservando y expresando su historia. En el momento en que una persona es consciente de sus orígenes empieza a apropiarse de su identidad, en caso del país, empieza a comprender la trascendencia, el valor de la cultura y la sociedad colombiana.

Estos legados son conocidos como patrimonio cultural, según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) es "*el cual representa lo que tenemos derecho a heredar de nuestros predecesores y nuestra obligación de conservarlo a su vez para las generaciones futuras".*

También plantea que "El patrimonio basa su importancia en ser el conducto para vincular a la gente con su historia. Encarna el valor simbólico de identidades culturales y es la clave para entender a los otros pueblos. Contribuye a un ininterrumpido dialogo entre civilizaciones y culturas, además de establecer y mantener la paz entre las naciones".

Para la UNESCO son considerados patrimonio cultural los monumentos, conjuntos de construcciones y sitios con valor histórico, estético, arqueológico, científico, etnológico y antropológico. (CINU, 2002)

En la actualidad y gracias a los avances tecnológicos y racionales, el individuo logra expresar su realidad y su entorno por medio de los modelos tridimensionales, la realidad virtual y la visualización digital. La base o el insumo principal para la realización de estos proyectos son las nubes de puntos, con las cuales es posible modelar objetos, escenarios, ambientes o la superficie terrestre resultando útil para diversas ciencias de la tierra e Ingenierías.

En este proyecto se llevó a cabo el desarrollo de una metodología, para la obtención de nubes de puntos con sensores RGB-D, documentando y representando un monumento del patrimonio humano y cultural mueble colombiano, contribuyendo en la conservación, preservación y divulgación de los bienes patrimoniales permitiendo que el monumento representado mantenga una vigencia en el tiempo.

Uno los objetivos del proyecto fue brindar una posible alternativa para la obtención de nubes de puntos con una tecnología de bajo costo, su aplicación sirvió para contribuir a la preservación y conservación del patrimonio mueble colombiano.

La metodología que se usó fue basada en los métodos experimental e inductivo, realizando pruebas, consultas, observaciones, hasta llegar a un lenguaje VMRL[5], para posteriormente producir el modelamiento tridimensional del monumento, con los cálculos se realizaron comparaciones de los datos.

El producto final fue la generación de un modelo virtual tridimensional alusivo a la conservación del objeto, permitiendo un acceso a la manipulación del monumento, sin alterar su estado material resultando accesible para personas que no necesitan tener un conocimiento alusivo a manipulación de obras monumentales. (Barragán , Campos , & Martínez, 2009)

[5] Lenguaje VRML: Acrónimo del Inglés Virtual Reality Modeling Language, Lenguaje para modelado de Realidad Virtual.

Capítulo 1: Descripción del proyecto

Actualmente el modelamiento en tercera dimensión se utiliza mucho en áreas como: arquitectura, planeación, diseño, arqueología, ingeniería y videojuegos, en los que se representan personas, objetos y ciudades en algunos casos generando realidades virtuales. Para la realización de estos proyectos es necesario la obtención de las nubes de puntos que son el elemento base para realizar la representación tridimensional.

1.1 Planteamiento del problema.

Un caso específico en la aplicación de las nubes de puntos es la conservación del patrimonio cultural y humano de una sociedad, el cual contribuye para la transmisión de valores socioculturales de diferentes eventos que han ocurrido en un lapso de tiempo determinado y representa un hecho con interés particular.

La problemática abordada en este proyecto fue la de documentar el patrimonio de los bienes humanos y culturales muebles, para que exista un registro en caso de restauración y/o reconstrucción. Por medio de los sensores RGD-D, es posible contribuir para la conservación y visualización de los bienes culturales de manera sencilla, económica y confiable.

1.2 Justificación del Proyecto.

El campo de la topografía actualmente tiene acceso a herramientas de gran precisión agilizando los procesos para capturar y recolectar datos, obteniendo resultados que permiten una representación cada vez más semejante al objeto. (Mañana, 2008)

Mundialmente el uso de sistemas basados en visión artificial constituye un campo amplio de investigación y desarrollo de los Sistemas Inteligentes como: transporte, representación de objetos y de entornos en tercera dimensión, el funcionamiento de estos sistemas es basado en ondas de radio, LASER y ultrasonidos.

Un principio básico para el desarrollo de este proyecto fue la odometría visual, es un procedimiento que determina la orientación y la posición de una cámara o de un sistema de cámaras analizando una secuencia de imágenes capturadas, sin necesidad de tener un previo conocimiento del entorno. (García , 2007)

Actualmente la odometría visual se enfrenta a nuevos retos, cambiando el concepto convencional de los métodos basados en medición con imágenes, debido a los sensores RGB-DEPH o RGB-D, dotados con un sistema de visión que pueden medir la profundidad a la cual están los objetos de la imagen. (Bueno, 2012)

Según el Museo Nacional de Colombia "*Hoy en día las colecciones del Museo Nacional de Colombia fruto de investigaciones antropológicas, donaciones y*

adquisiciones, ascienden a más de 20 mil piezas, símbolo de la historia y el patrimonio nacional, que ha permitido a los colombianos estar en contacto con importantes muestras de historia, arte y arqueología nacionales e internacionales".

La motivación de este proyecto fue implementar una tecnología innovadora, que permitiera la obtención de nubes de puntos de alta densidad, con una información confiable, por medio de una herramienta de sencilla manipulación y bajo costo, para posteriormente realizar el modelamiento de las nubes de puntos hacia un entorno tridimensional por medio de lenguaje VMRL, representando objetos o diferentes escenarios interiores.

En el momento en que las personas conocen más a fondo sobre sus orígenes como cuando van de visita a un museo y visualizan diversos objetos que son una herencia patrimonial llevando una gran trayectoria en el tiempo, esta experiencia les aporta información que les sirve para apropiarse de su identidad, comprendiendo el valor de la cultura y la sociedad colombiana. Por esa razón se determinó representar la escultura El Silencio del maestro Marco Tobón Mejía, ubicada en el Museo Nacional, se muestra en la Figura 1.

Figura 1: Escultura El Silencio de Marco Tobón Mejía



Fuente: *Fotografía tomada por el autor.*

Los objetos que se encuentran en un museo solo pueden ser manipulados por profesionales en el tema, al realizar el modelamiento en tercera dimensión de dicho objeto se puede acceder a su visualización de una forma práctica permitiendo su manipulación y a su vez conservando y protegiendo el bien cultural mueble. El levantamiento con el escáner permite la creación de un modelo tridimensional en un formato digital construido a partir de las nubes de puntos, la visualización permite el acceso a esta información para cualquier usuario facilitando tomar medidas de segmentos o coordenadas particulares, contribuyendo para la investigación de profesionales de aéreas afines, como arqueólogos y antropólogos. Siendo útil para la divulgación del patrimonio material mueble colombiano.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Generar una Metodología para la obtención de nubes de puntos de alta densidad utilizando sensores RGB-D.

1.3.2 Específicos

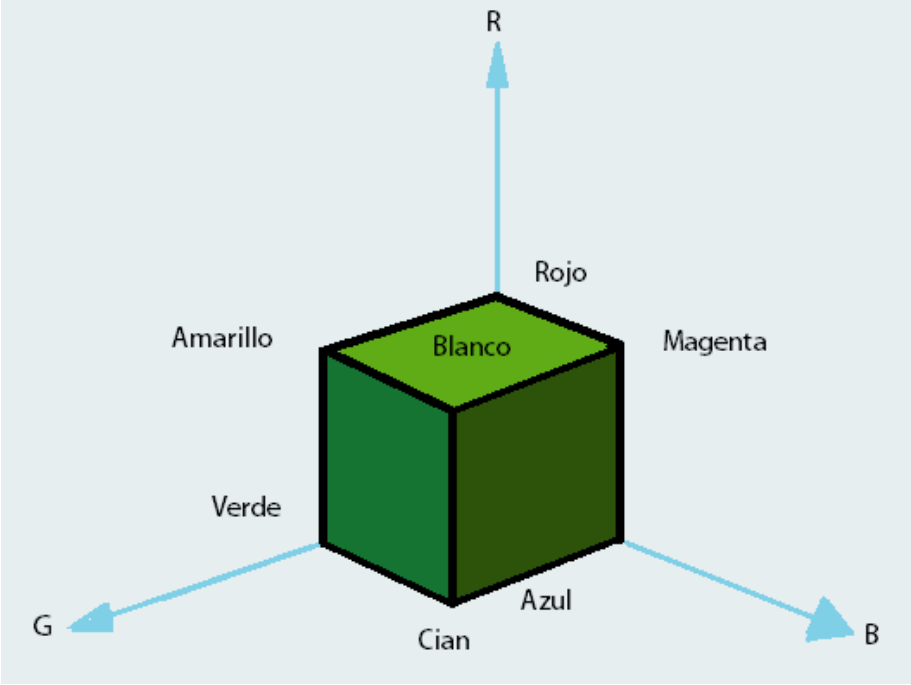
- Crear modelos tridimensionales con lenguaje VRML (lenguaje de modelamiento virtual), mediante el procesamiento de datos obtenidos con el sensor RGB.
- Realizar la comparación entre los resultados de las nubes de puntos obtenidas mediante el sensor RGB y tecnología Lidar.
- Brindar una posible alternativa para la obtención de nubes de puntos con una tecnología de bajo costo, aplicada en la documentación del patrimonio humano y cultural mueble colombiano.

Capítulo 2: Revisión de literatura

2.1 Espacio RGB

Es el espacio de color más extendido y que utilizan la gran mayoría de cámaras de video y fotográficas para construir una imagen de color. El espacio RGB se representa en la Figura 2 como un cubo dónde un color bien definido por la mezcla de valores de intensidad de tres colores primarios, rojo, verde y azul. Un color viene descrito por la tupla de tres coordenadas en el cubo. El color negro se representa por (r=0, g=0, b=0) y el blanco por (r=255, g=255, b=255). La gama acromática de escala de grises está representada por la diagonal del cubo. (Gil, Torres, & Ortiz, 2004)

Figura 2: Representación del espacio RGB



Fuente: adaptado por el autor de (Gil, Torres, & Ortiz, 2004).

2.2 Sistemas de coordenadas para transformaciones en las cámaras

Los conceptos nombrados a continuación son definidos por (Montenegro & Peixoto, 2005) como:

a. Sistema de coordenadas del mundo (SCM).

"*Es un sistema de referencia tridimensional, para representar objetos o puntos del mundo real. Tiene un origen en un punto 0 y se denota con (Xm, Ym, Zm)".*

b. Sistema de coordenadas de la cámara (SCC).

"*Es un sistema tridimensional con origen en el centro óptico de la cámara. Los ejes X, Y, son paralelos a la imagen formada sobre el plano de proyección, mientras el tercer eje es perpendicular a aquel plano. Se denota como f a la distancia del plano de proyección, llamado distancia focal de la cámara, π es el centro óptico. El plano de proyección es* $Z = f$. *Se representa con (Xc, Yc, Zc)*".

c. Sistema de coordenadas de la imagen (SCP).

"*Es un sistema de referencia bidimensional, situado en un plano de proyección. Su origen es el punto C, obtenido por medio de la proyección ortogonal del centro óptico O sobre el plano de proyección se denotan las coordenadas como (x,y)*".

d. Sistema de coordenadas en pixel.

"*Es un sistema bidimensional, con coordenadas expresadas en pixeles, que definen la posición de un punto en la imagen. Se denota al sistema de coordenadas con (u,v)".*

2.3 Sensores de Visión y Profundidad

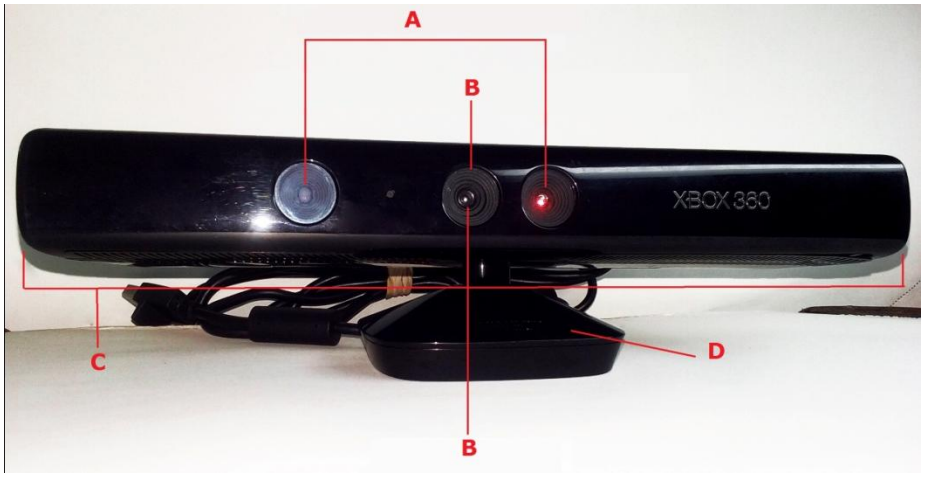
Los sensores de profundidad se componen de cámaras que capturan imágenes y además registran la información de distancia entre el objeto y el sensor. (Langmann, Hartman, & Loffeld, 2012)

Para la captura de nubes de puntos tridimensionales se utilizó un sensor RGB-D, es decir de visión y profundidad. Las nubes de puntos contienen la información específica en cuanto a posición o el color. En el caso de estudio se implementó el sensor Kinect de Xbox 360.

2.3.1 Componentes del sensor Kinect.

En la Figura 3 se muestran las partes que componen el sensor según (Xbox, 2015).

Figura 3: Principales partes que componen el sensor Kinect



Fuente: adaptado por el autor de (Xbox, 2015).

a. Sensores de profundidad 3-D

"*Los sensores tridimensionales hacen un seguimiento de cuerpo dentro del área de estudio".*

b. Cámara RGB

"*Una cámara RGB (rojo, verde, azul) ayuda a identificar y capta imágenes y videos del entorno observado"*.

c. Varios micrófonos

"Se usa un conjunto de micrófonos en el borde frontal inferior del sensor Kinect para reconocimiento de voz y charla".

d. Inclinación motorizada

"*Un impulso mecánico en la base del sensor Kinect inclina de manera automática el sensor hacia arriba o abajo según sea necesario".*

2.3.2 Funcionamiento del sensor

Para la captura de nubes de puntos tridimensionales por medio del sensor el proceso comienza en la cámara RGB que toma las imágenes de color RGB como una cámara clásica. En la Figura 4 el sensor de profundidad utiliza un captor semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) el cual detecta la luz y un emisor de infrarrojos.

Figura 4: Descripción del Kinect



Fuente: *adaptado por el autor de (Pierre, Murillo, & Mosteo, 2013).*

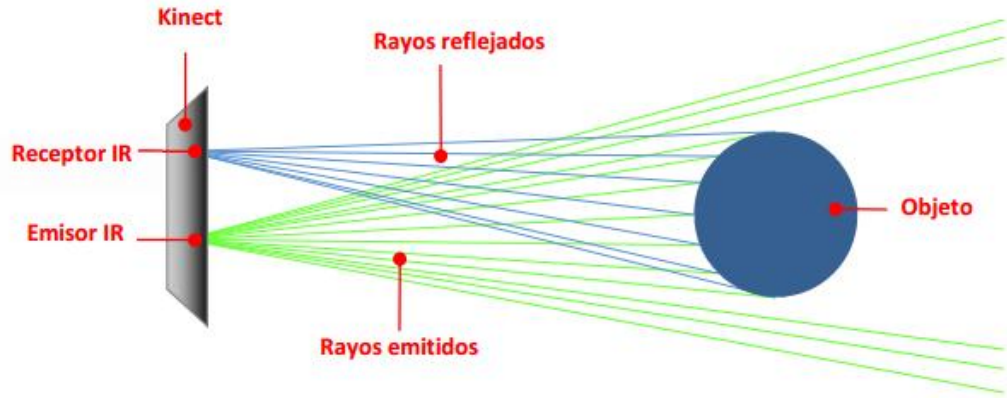
El sensor CMOS de infrarrojos permite obtener una imagen que representa la radiación térmica emitida por el objeto observado. Entonces, las informaciones captadas representan un mapeo de las emisiones térmicas, emitidas por el objeto radiado u observado.

El emisor de infrarrojos bombardea su entorno con rayos infrarrojos. Una parte de estos rayos va a ser reflejada por el conjunto de las superficies tocadas. Así, cuanto más cercano esté un objeto, mayor será la cantidad de radiación reflejada. Por lo tanto, la cámara infrarroja, gracias a estos datos de cantidad de radiación recibida, puede medir la distancia entre la cámara y el objeto.

La información de las coordenadas más los datos de la cámara RGB forman las nubes de puntos. (Pierre, Murillo, & Mosteo, 2013).

La Figura 5 explica de manera gráfica el funcionamiento del detector de profundidad del Kinect.

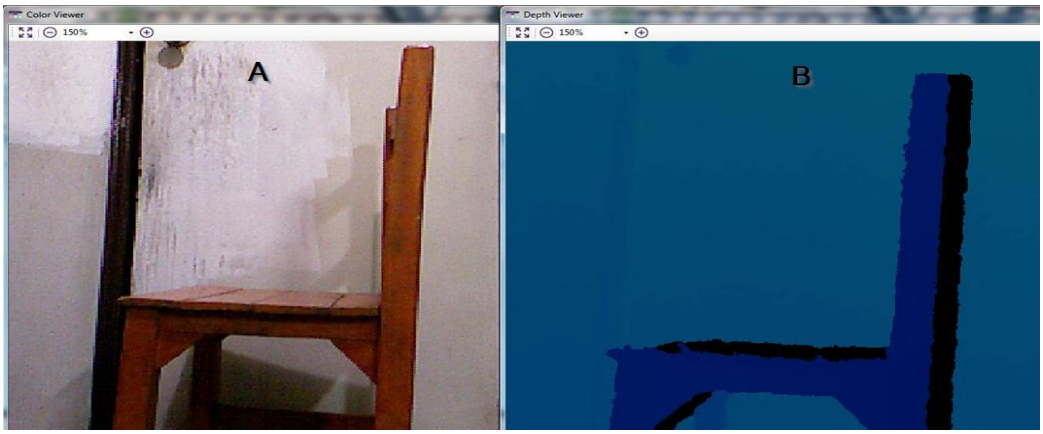
Figura 5: Esquema de funcionamiento del detector de profundidad



Fuente: *adaptado por el autor de (Pierre, Murillo, & Mosteo, 2013).*

En la Figura 6 el lado izquierdo muestra la información que captura la cámara RGB y en la parte derecha se puede evidenciar la visión tridimensional, la silla de color azul oscuro y el sombreado negro corresponden a los sensores tridimensionales emisor y captor.

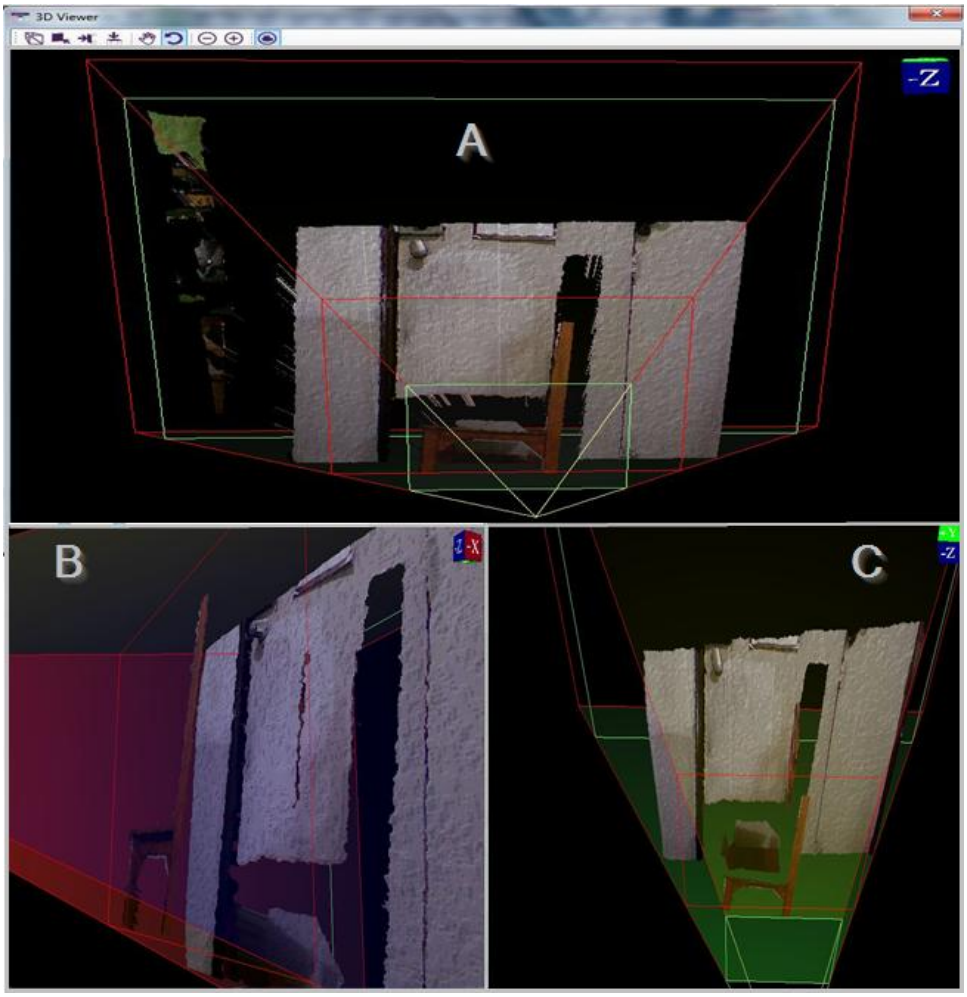
Figura 6: Visualización Kinect



Fuente: *Imagen tomada por el autor desde kinect visual studio.*

La integración de las vistas de los sensores tridimensionales se observa en la Figura 7, para visualizar mejor se muestra la ventana tridimensional desde tres perspectivas diferentes, la vista A desde el plano Z, en la parte B está ubicada la imagen en el plano ZX, la última perspectiva C muestra el plano YZ.

Figura 7: Visualización de la generación tridimensional del Kinect



Fuente: *Imagen tomada por el autor desde kinect visual studio*.

2.4 ¿Qué es Lidar terrestre?

LIDAR proviene de Light Detection and Ranging, es una tecnología que por medio de una pulsación laser se pueden medir distancias variables, desde un emisor láser hasta un objeto o superficie, Estos pulsos de luz combinados con otros datos que registra el sistema generan información precisa sobre las tres dimensiones sobre la forma de la tierra, sus características superficiales o los objetos que la conforman. (Ruiz, Garro, & Soto, 2014)

2.4.1 Funcionamiento del escáner laser terrestre.

Funciona por medio de un sistema de medición de impulsos, a través de un haz láser realizando un barrido de la superficie capturando miles de puntos por segundo, el resultado es una nube de puntos. Posteriormente al barrido Laser se toman las fotografías con la cámara digital, se usan para brindarle texturas a las nubes de puntos. Todos los pulsos de retorno registrados son almacenados generalmente en una memoria SD del escáner y se calcula la distancia entre el instrumento y el objeto donde se reflejó el rayo láser. Usando principios de física y óptica, el escáner puede obtener la posición de cada punto a partir del haz refractado, que es almacenado como una coordenada con componentes x, y, z. Gracias a varios servomotores, este conjunto emisor / receptor gira sobre su eje horizontal, mientras que el escáner gira sobre su eje vertical, con lo que le da capacidad de realizar un levantamiento de 360° de horizonte, con una apertura de bóveda de 270°. (Ruiz, Garro, & Soto, 2014) (Mañana & Blanco , 2009)

2.5 Precios de diferentes tipos de escáner para obtener información 3D

La Tabla 1 muestra diferentes tipos de escáner RGB-D, la Tabla 2 presenta los precios de los diversos tipos de escáner laser terrestre. Ambas tecnologías son para obtener información tridimensional, las cifras son del mes y al cambio de noviembre de 2016, despreciando el costo de envió. Consultados en las páginas de Amazon y Ebay.

Tabla 1: Precios de escáner RGB-D

Escaner	Fabricante	Peso CO	Dólar USD
Kinect para Xbox 360	Xbox	$ 174.166,38	$ 55,00
Kinect para Windows	Microsoft	$ 626.814,85	$ 194,99
Asus Xtion Pro USB	Asus	$ 763.107,15	$ 240,98
Handheld 3D	XYZpriting	$ 779.482,63	$ 242,48
PrimeSense Carmine	Apple	$ 839.165,28	$ 245,00
Isense/Structure Sensor	Occipital	$ 1.200.204,72	$ 379,00
Kinect para Windows V2	Microsoft	$ 1.269.767,00	$ 395,00
Sense 3D Scanner	3D System	$ 1.270.956,40	$ 395,37
Fuel 3D Scanify	Scanify	$ 5.381.492,06	$ 1.695,71
Anyprint UN 3DSC LAH	Anyprint	$ 4.146.834,00	$ 1.290,00
Pocket Scan	Mantis Vision	$ 9.871.177,47	$ 3.070,73
Einscan-Pro	Shining 3d	$ 13.581.378,65	$ 4.224,90
Freestyle 3D	Faro	$ 15.590.810,00	$ 4.850,00
Arctec Eva 3D	Artec	$ 16.362.314,00	$ 5.090,00
Arctec Spider 3D	Artec	$ 25.041.734,00	$ 7.790,00
Creaform Go! scan50	Creaform	$ 36.967.900,00	$ 11.500,00
Thor 3d	Thor 3d	$ 42.888.564,17	$ 13.341,80
F5-SR	Mantis Vision	$ 93.223.400,00	$ 29.000,00
Handyscan 700	Creaform	222,393,500.00	$ 70.000,00

Fuente: *Datos consultados en las páginas* (Amazon, 2016) *y* (Ebay, 2016)

Tabla 2:Precios de escáner laser terrestre

Escaner	Fabricante	Peso CO	Dólar USD
Faro LS 880 3D	Faro	$ 15.108.620,00	$ 4.700,00
Topcon GLS 1000	Topcon	$ 28.609.940,00	$ 8.900,00
Trimble CX 3D	Trimble	$ 28.931,40	$ 9.000,00
Faro Focus 3D S120	Faro	$ 37.128.630,00	$ 11.550,00
Faro Focus 3D X 130	Faro	$ 45.808.050,00	$ 14.250,00
Faro Focus 3D X 330	Faro	$ 58.987.910,00	$ 18.350,00
Topcon GLS 1500	Topcon	$ 95.795.080,00	$ 29.800,00
Trimble TX5	Trimble	$ 137.906.340,00	$ 42.900,00
Trimble FX	Trimble	$ 227.915.140,00	$ 70.900,00
Leica P30	Leica	$ 365.079.365,08	$ 113.569,14

Fuente: *Datos consultados en las páginas* (Amazon, 2016) *y* (Ebay, 2016)

2.6 Lenguaje VRML (Virtual Reality Modelling Language)

El lenguaje VRML (Virtual Reality Modelling Language) permite la construcción, visualización y manejo de estructuras en tres dimensiones de forma muy sencilla y compacta, ya que el lenguaje de programación es un lenguaje de texto y se interpreta mediante un visor que se puede instalar como una extensión de los navegadores más habituales. (Lobo & Gómez Goñi, 2001)

Es un universo interactivo el lenguaje de modelado de realidad virtual (VRML) orientado a Internet, interactuando y dando soporte a aplicaciones multimedios, como imágenes, sonidos, videos y animaciones, en dónde las páginas web adquieren una tercera dimensión facilitando que al usuario moverse dentro de mundos virtuales explorando su contenido. (Stolfi Rosso & Gálvez Rojas, 1997)

Una gran ventaja de implementar el lenguaje VRML, es la facilidad para comprender mejor el relieve de un objeto sin necesidad de manipularlo físicamente. (Candeias & Tavares, 2001)

2.7 Rango para la determinación de nubes de puntos con small footprint

La forma de las Ondas en las pulsaciones laser que emiten los Lidar se pueden definir con la ecuación 1 y se categoriza en dos tipos: sistemas de largo y corto alcance

$$G(x_i) = h_i \, exp\left[-\frac{(x_i - \alpha_i)^2}{w_i^2}\right] \qquad (1)$$

Donde $G(x_i)$ es el componente de la función Gaussiana, x_i , $\alpha_{i,}$, w_i^2 , son los parámetros de amplitud, posición y anchura respectivamente. En la ecuación 2, $G(x)$ proviene de la suma de todos los k componentes.

$$G(x) = \sum_{i=1}^{k} G(x_i) \qquad (2)$$

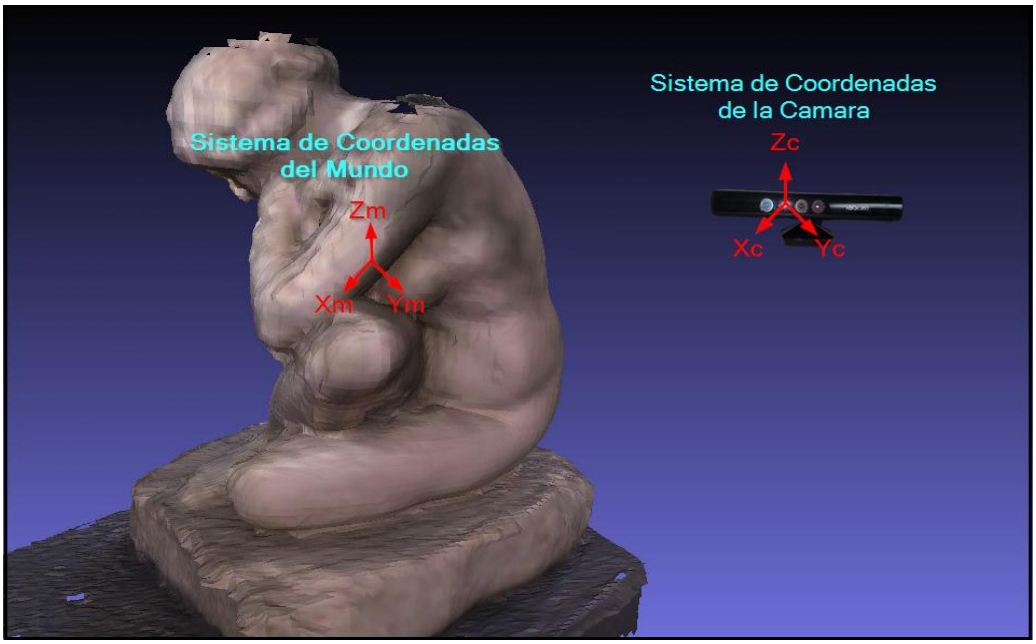
Los desafíos de la descomposición de la forma de la onda son la identificación del número de componentes Gaussianas y la estimación de los parámetros iniciales.

El escáner laser terrestre implementado en la investigación funciona por medio de ondas de corto alcance. (Yuchu, Tuong, & Yifang, 2010)

2.8 Registro de imágenes

Para realizar la comparación de las dos nubes de puntos es necesario remitirlas al mismo sistema de coordenadas, por esa razón se realizó el registro de imágenes es el proceso de encontrar el alineamiento para correlacionar los puntos de una imagen de un objeto con los puntos correspondientes en otra imagen. Esta técnica permite el mapeo y transformación de dos imágenes distintas para un único sistema de coordenadas. (Pedrini, 2007).

Figura 8: Representación sistema de coordenadas



Fuente: *Imagen elaborada por el autor desde meshlab*.

La Figura 8 muestra que el objeto representado, posee su propio sistema de referencia en coordenadas del mundo (SCM), cuando el sensor captura la imagen, tiene su propio sistema de coordenadas de la cámara (SCC), que proviene del pixel (*ud, vd),* son los puntos de la imagen de profundidad. Representado por la ecuación 3.

$$Zm = depth(ud, vd)$$
$$Xm = (ud, u_0) * Zm/\alpha_x \qquad (3)$$
$$Ym = (vd, v_0) * Zm/\alpha_y$$

Donde, $\alpha_x,\ \alpha_y, u_0,\ v_0$, son los parámetros intrínsecos de la cámara de profundidad. Y $depth(ud, vd)$, son los valores de profundidad de las coordenadas (ud, vd). (Alves, 2014).

2.9 Superficie de Poisson

El algoritmo de reconstrucción de la superficie de Poisson produce mallas triangulares a partir de vértices obtenidos por interpolación, permitiendo oobtener superficies continuas, y suavizadas. Para poder reconstruir la superficie de Poissson es necesario que las normales de los puntos hayan sido calculadas. Por medio de la ecuación 4:

$$\nabla^2 \varphi = \sigma \qquad (4)$$

∇^2=representa el operador Laplaciano, $\varphi\ y\ \sigma$ y son la función real. (Alves, 2014)

El operador Laplaciano, es la segunda derivada de una función teniendo en cuenta todas las direcciones. (Elizondo, 2002). Matemáticamente se expresa en la ecuación 5:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial f^2}{\partial x^2} + \frac{\partial f^2}{\partial x^2} \qquad (5)$$

La aplicación de la reconstrucción de la superficie, mediante el algoritmo de Poisson, se debe a que existe una relación entre la muestra de los puntos normalizados de un vector $\vec{V}$ y la función indicadora de un modelo M. La ecuación 6 es la variación de una magnitud también llamado gradiente, de la función indicadora ∇_m, representa la distribución espacial con valor igual a la normal ($\vec{V}$), en dirección al interior de la superficie. Adaptado de (Alves, 2014).

$$\nabla_m = \vec{V} \qquad (6)$$

Solucionando el problema de Poisson, resulta la ecuación 7 que es variación de una ecuación de Poisson normalizada.

$$\Delta M = \nabla * \vec{V} \qquad (7)$$

2.10 Distancia de Hausdorff (d_H).

Se usa para calcular la distancia entre dos redes de triángulos que forman superficies de modelos geométricos, muchos métodos aplicados a los modelos 3D, implican un cambio de topología, además de distorsiones geométricas, que justifican la opción implementar la distancia de Hausdorff, para realizar medidas sobre este tipo de datos, en vez de simplemente medir vértice a vértice. (Klein & Liebich, 1996)

Es una de las medidas más exacta del error entre dos superficies, ya que el cómputo de un error "unilateral" puede conducir a valores de distancia considerablemente subestimados. (Aspert & Santa-Cruz, 2002)

La aproximación al error entre dos redes está definida por la distancia correspondiente entre dos secciones de las redes. Considerando un punto *p* y una superficie *S*, se define la distancia entre el punto *p* y la superficie *S* como la ecuación 8:

$$e(p,S) = \min_{p' \in S} d(p,p') \qquad (8)$$

Donde *d()* es la distancia Euclideana entre dos puntos en el espacio E^3. La distancia unidireccional entre las dos superficies es la ecuación 9:

$$E(S_1,S_2) = \max_{p \in s_1} e(p,s_2) \qquad (9)$$

Con las ecuaciones anteriores se puede definir la distancia de Hausdorff con la ecuación 10:

$$d_H(S_1,S_2) = \max[d(S_1,S_2,d(S_2,S_1))] \qquad (10)$$

La distancia media entre dos superficies está definida como la integral de la distancia dividida por el área. Según la ecuación 11: (Cignoni, Rocchini, & Scopigno, 1998)

$$E_m(S_1, S_2) = \frac{1}{|S_1|} \iint_{S_1} e(p, S_2) ds \qquad (11)$$

Donde $|A|$ es el área de la superficie.

En la metodología implementada por medio de la distancia de Hausdorff se determina cual es la distancia que se encuentra respecto a cada punto entre las dos nubes de puntos.

2.11 Escultura El Silencio

La aplicación que se implementa en la metodología se orientada para representar la escultura El Silencio del maestro Marco Tobon Mejia, ubicada en el Museo Nacional de Colombia.

Según el archivo del Museo Nacional de Colombia "*A finales del siglo XIX las artes colombianas seguían los parámetros del neoclasicismo, estilo que rescataba lo racional y la solemnidad del arte clásico griego. Los gobiernos revolucionarios de fines de 1700 promocionaron su uso en el arte oficial de las nacientes repúblicas.*

A partir del contacto con Auguste Rodin (1840-1917), y los movimientos del art noveau y el simbolismo, Tobón Mejía incorporó a las formas rígidas del neoclásico su expresión personal".

La Figura 9, ilustra la escultura El Silencio elaborada en mármol con dimensiones: 1026cm x 76.5cm x 88.8cm. En la cual el artista busca representar un estado anímico o emocional a través del cuerpo femenino. Esta tendencia a indagar sobre lo irracional, las angustias, fantasías y ensoñaciones fue desarrollada, principalmente en Francia, a partir de 1885 hasta principios del siglo XX.

Figura 9: Escultura El Silencio de Marco Tobón Mejía



Fuente: *Fotografía tomada por el autor, en el Museo Nacional, 2016.*

"En 1948, con motivo de la IX Conferencia Panamericana, Laureano Gómez, ministro de relaciones exteriores, pidió esta obra en préstamo al Museo Nacional para ser exhibida temporalmente en la recién inaugurada Avenida de las Américas con calle 23. En la misma avenida fueron instaladas el Monumento a la diosa del agua de María Teresa Zerda y el Monumento a banderas de Alonso Neira que aún se encuentran allí. La instalación de estas obras causó controversia por tratarse de desnudos, y recibió una fuerte crítica de la Iglesia, en el periódico El Catolicismo.

Debido a la situación de violencia generada después del asesinato de Jorge Eliécer Gaitán el 9 de abril de ese año, la devolución de la obra fue postergada por dos años. En 1950 el alcalde de Bogotá, Santiago Trujillo Gómez, solicita a la directora del Museo, Teresa Cuervo, dejar la escultura en aquel sitio. La solicitud no fue aprobada por la directora quien argumentó que la obra había sido adquirida con destino al Museo en 1929 y que no estaba hecha para permanecer al aire libre por motivos de conservación". (Museo Nacional, 1987)

Capítulo 3: Metodología

La metodología abordada en el proyecto se dividió en cuatro fases, explicadas en La Figura 10. Se desarrolló experimentalmente realizando pruebas y ensayos. También se tuvo en cuenta el método inductivo, partiendo de la observación de los hechos se realizó el registro, luego el análisis y la comparación de las nubes de puntos, para tener como resultado final el modelamiento y la visualización tridimensional de la escultura El Silencio.

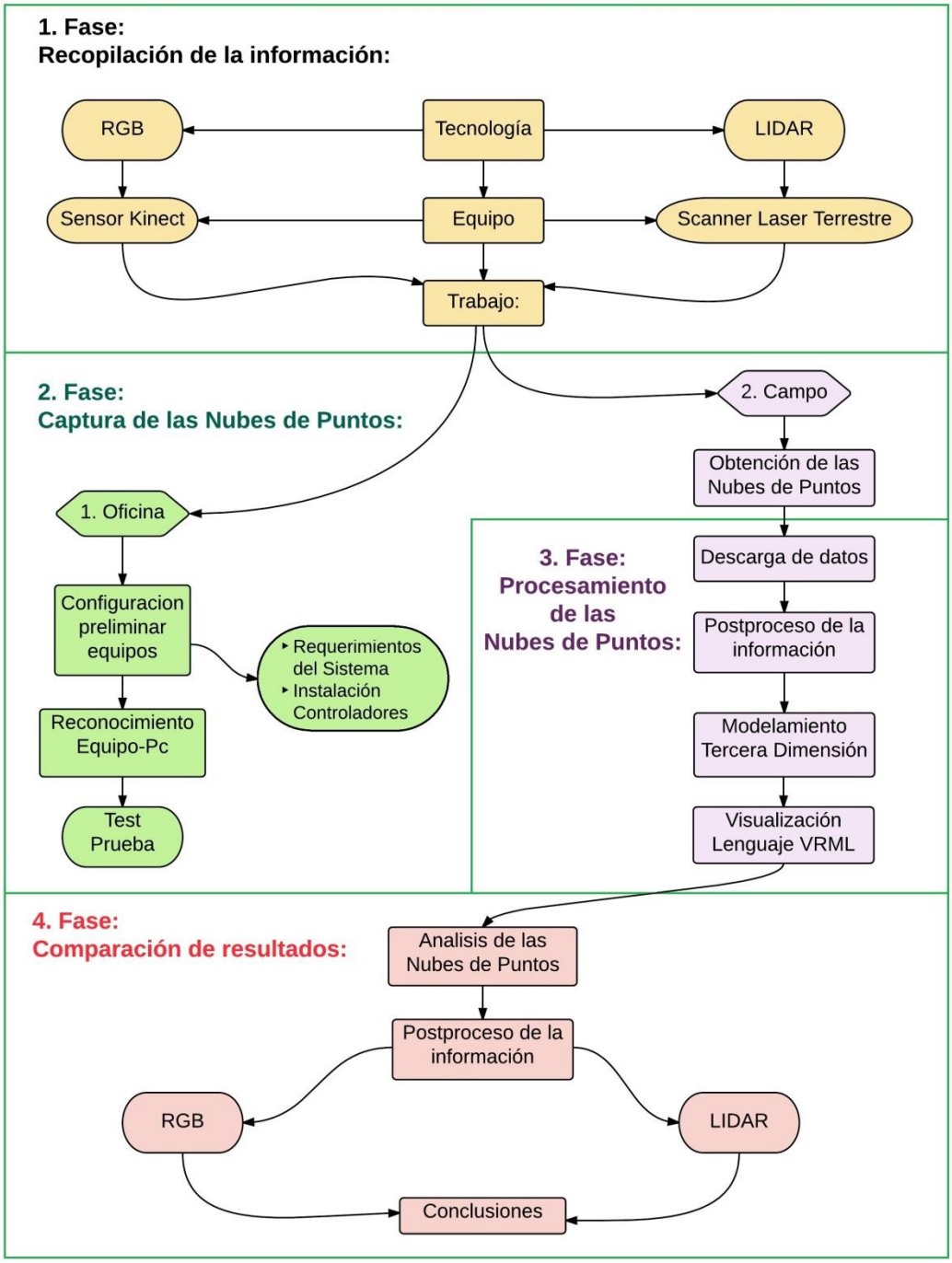
La primera fase consiste en la recopilación de la información, en la cual se menciona con que tecnologías se desarrolló el proyecto y que equipos que se usaron.

Para desarrollar la segunda fase, que es la captura de las nubes de puntos, se llevaron a cabo dos etapas, la primera fue el trabajo de oficina, se configuraron los equipos para poder tomar los datos. La etapa número dos, fue el trabajo en campo, donde se obtuvo la información de la escultura ubicada en el Museo Nacional de Colombia.

La tercera fase es el procesamiento de las nubes de puntos, comenzando con la descarga de datos de los equipos, luego se efectúo el debido postproceso de la información, para hacer el modelamiento en tercera dimensión se tuvo como resultado la visualización en lenguaje para modelado de Realidad Virtual.

En la última fase se realizó la comparación de los resultados obtenidos.

Figura 10: Metodología



Fuente: *Elaboración propia.*

3.1 Primera fase: recopilación de la información

Se llevó a cabo mediante dos tecnologías, la primera fue Lidar, el equipo empleado fue un escáner laser terrestre FARO FOCUS 3D S120 y la segunda se implementó por medio del sensor RGB-D se utilizó un Kinect Xbox 360. La información capturada, fue de la escultura *El Silencio*, de Marco Tobón Mejía, ubicada en la sala cinco del Museo Nacional de Colombia.

3.2 Segunda fase: captura de las nubes de puntos

En esta fase se llevaron a cabo dos etapas, la primera fue trabajo de oficina, en el cual se configuraron los equipos para poder tomar los datos. La segunda, fue el trabajo en campo, por medio del escáner laser terrestre y el sensor RGB-D, se obtuvo la información de la escultura.

3.2.1 Trabajo de oficina:

Se empezó con una configuración preliminar de los equipos donde se verificó en el computador los requerimientos del sistema, para el sensor Kinect, se instalaron los controladores. Cumpliendo con los requerimientos del sistema, se realizaron varias pruebas y ensayos, para conocer como es el funcionamiento de los equipos y su adecuado uso. A su vez, el trabajo de oficina está compuesto por:

a) Configuración preliminar.
b) Reconocimiento equipo-Pc.
c) Test de prueba.

a) Configuración preliminar. Actualmente se han desarrollado varias aplicaciones que utilizan los sensores Kinect para generar modelos tridimensionales entre las más comunes están Reconstrucme, Skanect, Scenect, kscan3d y el arctec estudio. En este proyecto utilizó el software Reconstructme, porque es gratuito y de código abierto. Para poder usar el programa se debe tener una configuración preliminar que está compuesta por los requerimientos del sistema e instalación de controladores.

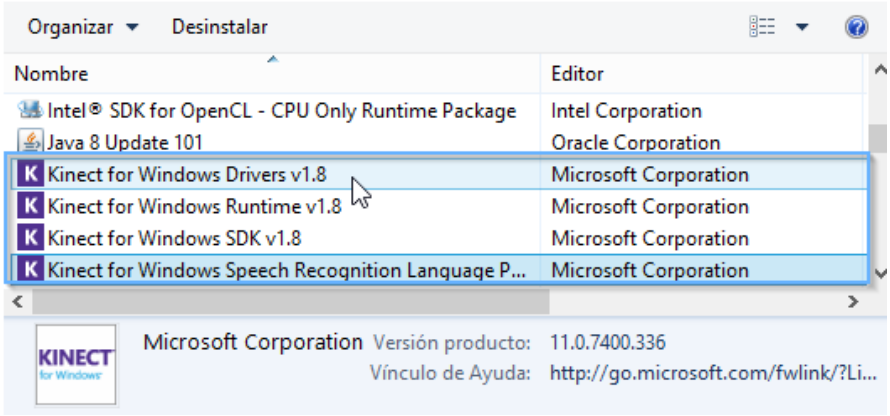
i. *Requerimientos del sistema*: En el caso de estudio la obtención de la información con el Kinect es mediante el software reconstructme y para el escáner Laser Faro Focus es por medio del programa Scene, los requerimientos del sistema para ejecutar estos programas son:

- ✓ Procesador de doble núcleo de 64-bit.
- ✓ Tarjeta gráfica compatible con OpenGL 2.0, con memoria 512MB o superior
- ✓ Se recomienda un sistema operativo Windows 7, 8, de 64-bit con 8GB de RAM y tarjeta gráfica con al menos 512MB o superior que soporte OpenGL 2.0. (Faro, 2016)

ii. *Instalación de Controladores*: para asegurar que el computador reconozca el sensor RGB-D, se recomienda actualizar los drivers de la tarjeta gráfica y java en su última versión. Adicionalmente es necesario instalar Kinect SDK para Windows y Kinect para Windows. Para verificar que fue correcta la instalación, en el panel de control en la opción Programas y características deben aparecer como en la Figura 11.

.

Figura 11: Verificación de los requerimientos del sistema para sensor RGB-D

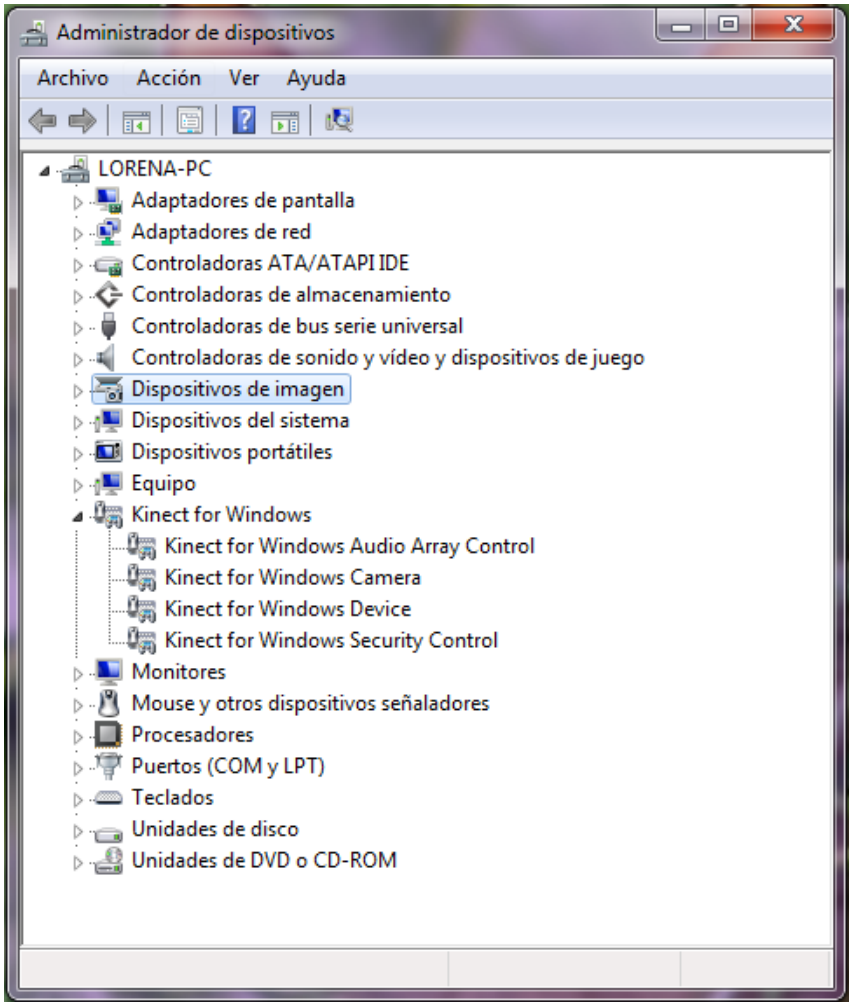


Fuente: *Imagen tomada por el autor, desde el panel de control de Windows.*

Una vez instalados los controladores y requerimientos del sistema, se descargaron e instalaron los software Scene y Reconstructme.

b) Reconocimiento Equipo-PC: Para verificar que el computador reconoce el sensor RGB-D, se conecta el dispositivo a una alimentación de corriente continua y luego a un puerto USB del computador, automáticamente empieza a reconocer el sensor con los controladores instalados anteriormente. Al ingresar al panel de control en administrador de dispositivos debe aparecer la opción Kinect para Windows como se muestra en la Figura 12.

Figura 12: Verificación del reconocimiento del sensor Kinect por el computador.



Fuente: *Imagen tomada por el autor, desde el panel de control de Windows.*

c) Test de prueba: Posteriormente de Instalar los controladores y los programas, se realizaron varios levantamientos con el sensor Kinect y el Laser escáner Faro Focus terrestre, para verificar su adecuado funcionamiento, explorar y familiarizarse con los equipos. En el caso del escáner Laser, los datos se descargan directamente con la tarjeta SD, por medio del software Scene.

3.2.2 Trabajo en campo

El lugar empleado fue el Museo Nacional de Colombia, seleccionando la sala cinco, donde se encuentra ubicada la escultura El Silencio, de la cual se obtuvieron las nubes de puntos, la primera se realizó con el sensor Kinect y la segunda mediante el escáner laser terrestre FARO FOCUS 3D S120. Los dos procedimientos se explican por separado empezando por el sensor Kinect.

3.2.2.1 Procedimiento en campo con el Sensor Kinect

1. Conectar el Sensor a una fuente de energía y luego al Computador.
2. Iniciar el programa Reconstructme.
3. Se eligen los parámetros dependiendo del tipo de levantamiento que se quiera realizar, el software tiene la opción de trasladar el sensor alrededor del objeto o la opción de rotar el objeto enfrente del sensor. Para el caso de estudio se eligió la primera.
4. Para comenzar a escanear, se realizó la radiación trasladando de posición el sensor alrededor de toda la escultura como se observa en la Figura 13. Se debe evitar realizar movimientos bruscos y rápidos porque produce que se desoriente el equipo causando que se detenga la captura de la información.

Figura 13: Escaneo de la escultura con el sensor Kinect.



Fuente: *Fotografía tomada por el autor, en el Museo Nacional, 2016.*

5. Una vez finalizó de escanear, se puede observar el modelo como en la Figura 14, luego se exportó con el nombre *escultura_kinect_original*, escogiendo el formato Standford Polygon(.ply) debido a que guarda información de color y posición además es compatible con varios programas de edición, el software Reconstructme tiene la opción de generar diversos formatos 3d (.ply, .mtl, .obj, .off y .stl.).

Figura 14: Modelo de la escultura generado con el sensor Kinect



Fuente: *imagen tomada por el autor desde el software Reconstructme*

3.2.2.2 Procedimiento en campo con el escáner laser terrestre Faro Focus

1. Hacer una inspección para identificar sitios estratégicos en donde ubicar las esferas de tal forma que se puedan observar en los diferentes ángulos para poner el escáner.
2. Sacar y ubicar las esferas en lugares donde se tenga visual para empalmar el levantamiento, se distribuyeron sobre las columnas que se encuentran alrededor de la escultura como se muestra en la Figura 15.

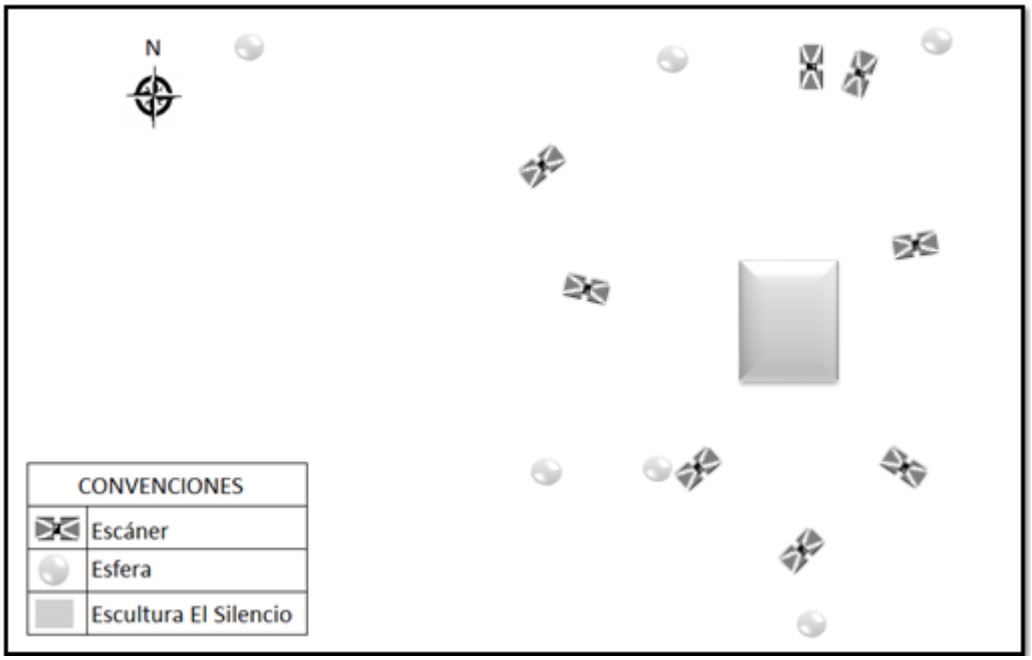
Figura 15: Distribución de esferas para empalmar el levantamiento.



Fuente: *fotografía tomada por el autor en el Museo Nacional, 2016.*

3. Armar el trípode, colocar encima el escáner y nivelarlo.
4. Hay que seleccionar el perfil adecuado para el tipo de levantamiento, en el caso de estudio se determinó el perfil interior a partir de 10m, porque es un lugar cerrado y la escultura estaba a una distancia menor a 10 metros del escáner, los demás parámetros se pueden consultar en el anexo A.
5. Se creó un proyecto nuevo llamado Museo. La Figura 16 ilustra cual fue la distribución de las esferas y en que posiciones se ubicó el escáner laser Faro.

Figura 16: Radiación con el escáner Laser 3D



Fuente: *esquema elaborado por el autor.*

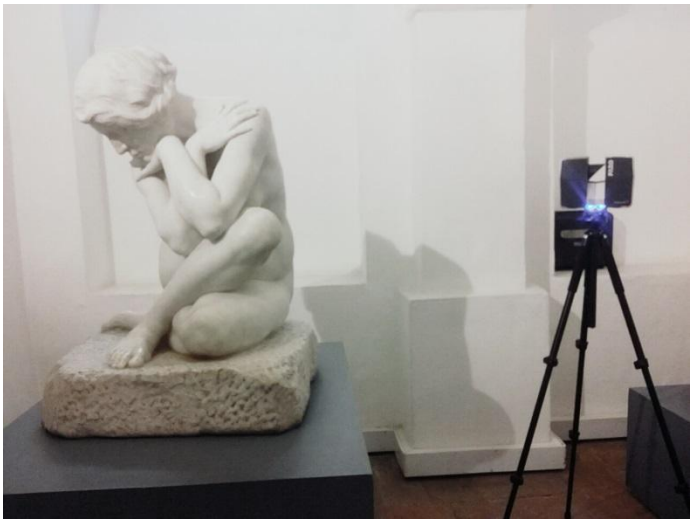
6. Luego de crear el proyecto se empezó a escanear, al finalizar se trasladó el equipo a la siguiente posición, este paso se debe realizar las veces que sea necesario para recubrir la totalidad del área que se desea levantar.

   Para la escultura El Silencio, se realizaron 8 levantamientos es decir se capturó información desde 8 posiciones diferentes, los archivos fueron nombrados: esc000, esc001, esc002, esc003, esc004, esc005, esc006 y esc007.

   Cuando se realice el levantamiento se recomienda que no pasen objetos o personas en la escena, para que no aparezcan en el escaneo.

La Figura 17 muestra una de las ubicaciones que tuvo el escáner laser terrestre con respecto a la posición de la escultura El Silencio.

Figura 17: Radiación con el escáner Laser 3D desde diferentes posiciones.



Fuente: *fotografía tomada por el autor en el Museo Nacional, 2016.*

3.3 Tercera fase: procesamiento de las nubes de puntos

Luego de obtener las nubes de puntos en el Museo Nacional, se realizó la descarga de datos del escáner Faro mediante el software Scene, posteriormente se desarrolló el postproceso, después de tener la información normalizada se comenzó el modelamiento en tercera dimensión, se generaron dos modelos, para diferenciarlos se llamaron: escultura_kinect en el caso de los datos del sensor y escultura_lidar que contiene la información obtenida mediante el escáner laser terrestre.

La etapa final de esta fase es la visualización de un lenguaje VRML, facilitando que sea una plataforma interactiva, la cual permite a los usuarios manipular el modelo

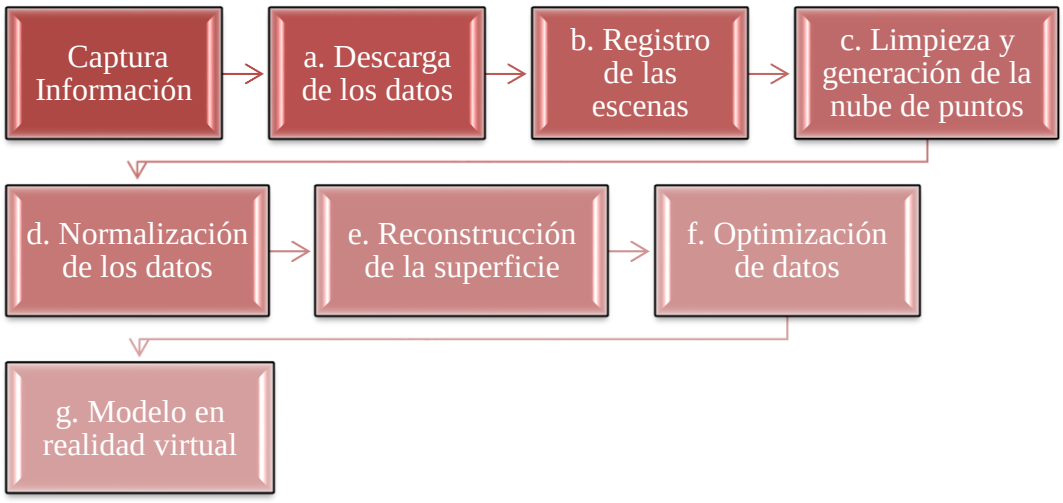
tridimensional teniendo la posibilidad de observar la representación virtual de la escultura desde diferentes perspectivas.

El Postproceso se realizó de manera independiente para cada nube de puntos, los procedimientos son diferentes, se explican por separado empezando con los datos tomados con escáner laser terrestre.

3.3.1 Postproceso nube de puntos escultura_laser:

Se empleó el software Scene Lt, para realizar el postproceso, a continuación, en la Figura 18 se explica el esquema que se implementó.

Figura 18: Diagrama postproceso nube de puntos escultura_laser



Fuente: *diagrama elaborado por el autor.*

a. Descarga de los datos

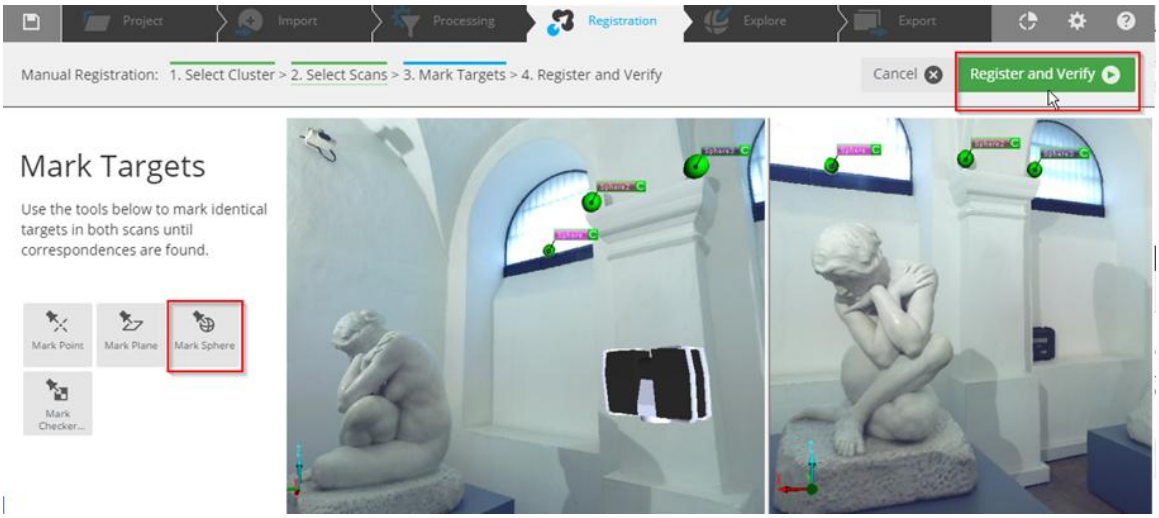
Es importante configurar las unidades en las que se va a importar la información, se configuró en metros mediante el software Scene, directamente desde la tarjeta SD se importó la información.

b. Registro de las escenas

Se configuran los valores para realizar el procesamiento y el reporte del traslapo de las escenas. Se le asignó un método de registro de nube a nube.

Para que se pueda tener más control sobre el traslapo de las escenas se determinó hacer un registro manual como ilustra la Figura 19, consiste en elegir dos escaneos donde se visualicen las mismas esferas, para marcar de forma manual cada una y poder realizar una superposición con la correspondencia de las esferas. El reporte resultado de la superposición se muestra en los resultados.

Figura 19: Registro manual de las escenas



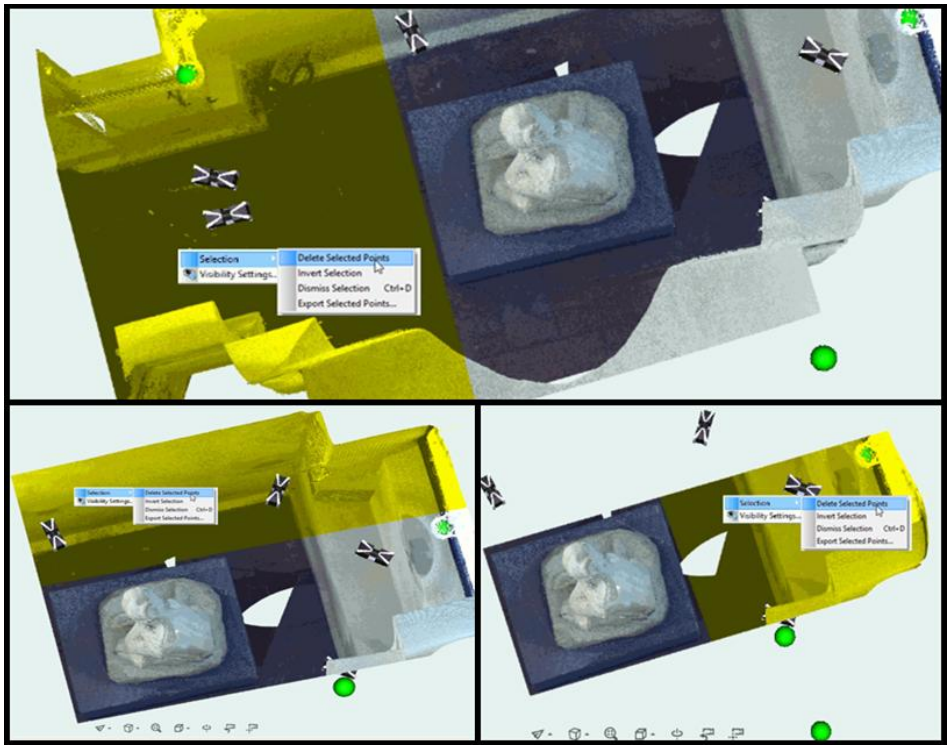
Fuente: *imagen tomada por el autor desde el software Scene*

c. Limpieza y generación de la nube de puntos

Al realizar el levantamiento con el escáner laser se recrearon las zonas alrededor de la escultura El Silencio de la sala cinco del Museo Nacional, para la investigación es necesario quitar la información que no corresponde a la escultura, este proceso se ejecutó de forma manual identificando los puntos que no son de interés mediante el software Scene en la Figura 20 se muestra un ejemplo.

Al terminar quitar el ruido quedaron únicamente los datos de la escultura, es decir, se eliminaron las paredes, el suelo, las columnas y la base de la escultura.

Figura 20: Eliminación del ruido, escultura_laser



Fuente: *imagen tomada por el autor desde el software Scene*

Luego de tener la información optimizada y sin ruido es posible generar la nube de puntos, este proceso también se realizó en el software Scene, con el parámetro de

eliminar los puntos duplicados, una vez finalizó se exportó la nube de puntos en formato VRML, con el nombre escultura_laser_original.

d. Normalización de los datos

Cuando se tomaron los datos en campo el escáner se ubicó en varias posiciones, hay zonas donde se cuenta con mayor o menor densidad de información, después de tener la nube de puntos sin ruido es necesario realizar el cálculo de las normales para determinar un conjunto de planos tangentes, mediante el software Meshlab, para estimar un plano tangente en cada punto y la orientación de la superficie. (Sánchez, 2013)

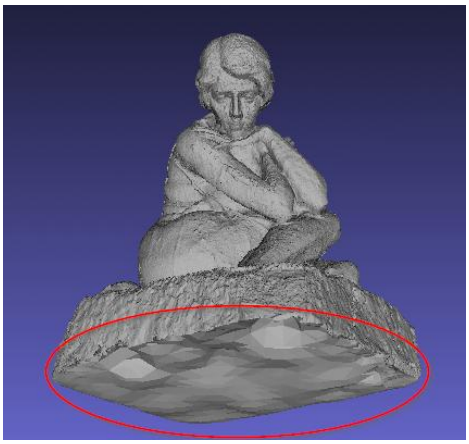
De esa manera se logró tener la información más homogénea, con aproximadamente la misma cantidad de información en todas las zonas.

e. Reconstrucción de la superficie

Luego de tener las normales calculadas en la nube de puntos, se puede realizar la reconstrucción de la superficie implementando el algoritmo de Poisson, los datos de entrada son los puntos que conforman la nube y los vectores normales calculados en el paso anterior. Se debe modificar el parámetro de octantes y división, según el autor Horus recomienda poner un valor entre 6 y 12, entre más alto el valor aumenta la precisión del modelo final, también recomienda dejar los demás valores por defecto. (HORUS, 2015)

Por tal razón con el fin de obtener el mejor resultado se eligió el valor 12 en octantes y 12 en división. Cuando finaliza la reconstrucción es posible que se aparezca información que no es necesaria para el estudio se debe verificar el resultado y eliminar datos que no afecten la topología original de la nube de puntos.

Figura 21: Reconstrucción del modelo mediante la superficie de Poisson



Fuente: *imagen tomada por el autor desde el software Meshlab*

Al generar la superficie la zona de la base como se ilustra la Figura 21, en la delimitación roja se observa que hay una reconstrucción cerrando y uniendo los límites de la base, como esa información no hace parte del modelo original fue eliminada.

f. Optimización de los datos

El archivo generado con el escáner laser representa una gran densidad de información, por esta razón es necesario realizar un remuestreo de la nube de puntos para reducir los datos y adicionalmente generar un archivo más liviano, preservando la topología de la información requiriendo menos hadware facilitando la manipulación y optimizando el desarrollo de los procesos.

La nube de puntos original está compuesta por 24,093,242 puntos, a través del software Meshlab se hizó el Remuestreo mediante una optimización incremental este proceso realiza una unión parcial de las aristas, se ejecutó tres veces dando como resultado un modelo con 288,756 puntos y 575,779 caras. El resultado es una reducción

de los datos facilitando realizar los procesos de forma más óptima en el rendimiento del computador, preservando la topología de los datos. (Sánchez, 2013)

g. Creación del modelo 3D en realidad virtual

Posteriormente a la normalización la reconstrucción y la optimización de la nube de puntos por medio del software Meshlab se utilizó un filtro para transferir los atributos de color de la nube de puntos original a la resultante.

Finalmente se guardó el modelo con formato Standford Polygon en codificación binaria, con el nombre de *escultura_laser.ply*, se escogió ese tipo de formato porque se puede abrir en varios programas de edición adicionalmente guarda información de posición y color.

Para poderlo visualizar en realidad virtual se exportó en formato VRML, permitiendo representar un espacio 3D en un computador o directamente en páginas web. Al descargar el complemento Cortona, es posible visualizar en el navegador internet explorer el modelo tridimensional de la escultura El Silencio.

3.3.2 Postproceso nube de puntos escultura_kinect:

Las fases que se desarrollaron son similares al postproceso de la nube de puntos obtenida mediante el escáner Laser terrestre, se explican los datos que se modificaron.

Después de haber capturado la información en campo por medio del software Reconstructme, se generó un archivo Standfor Polygon es decir es una malla triangular, como se evidencia en la Figura 22, la primera línea muestra que es un archivo tipo ply, guardado en formato ASCII, con un total de 36.401 vértices y 70.518 caras.

Figura 22: Composición de la nube de puntos escultura_kinect

Escultura_kinect.ply

```
1  ply
2  format ascii 1.0
3  element vertex 36401
4  property float x
5  property float y
6  property float z
7  property uchar red
8  property uchar green
9  property uchar blue
10 property float nx
11 property float ny
12 property float nz
13 element face 70518
14 property list uchar int vertex_indices
15 end_header
16 -1056.16 1171.88 671.875 164 141 141 0.548098 0.818393 -0.172688
17 -1054.69 1171.88 680.854 164 141 141 0.488544 0.853839 -0.179677
18 -1054.69 1168.99 671.875 164 141 140 0.899132 0.436949 -0.0252341
19 -1059.72 1171.88 703.125 164 143 140 0.393684 0.913071 0.106364
20 -1054.69 1166.05 703.125 162 142 139 0.554333 0.821942 0.130864
21 -1054.69 1171.88 692.464 164 141 141 0.674398 0.594469 0.437942
```

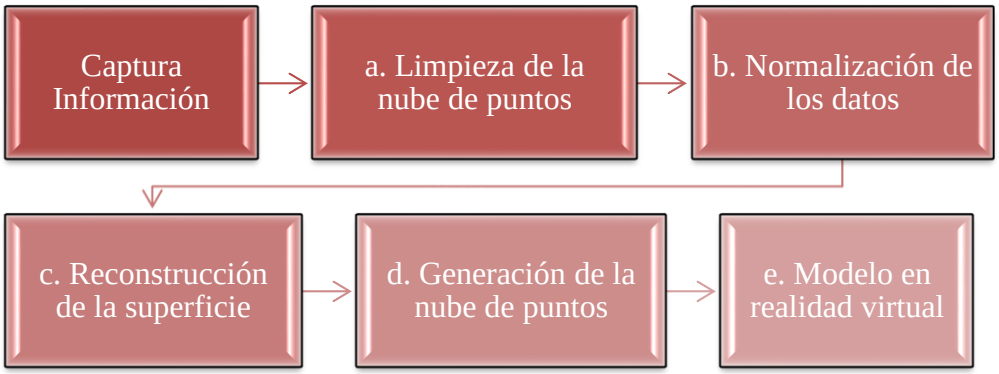
Fuente: *imagen tomada por el autor desde el software Notepad++*

El contenido de los puntos generados, por ejemplo en la línea 16 corresponde: los tres primeros valores equivalen a las coordenadas x,y,z *(-1056.16, 1171.88, 671.875)* de los vértices, los caracteres del cuarto al sexto son la información de color rojo, verde y azul

(*164,141,141),* los últimos datos corresponden a las normales *(0.548098 0.818393 - 0.172688).*

Para explicar el postproceso realizado se plasma en el diagrama de la Figura 23.

Figura 23: : Diagrama del postproceso de la nube de puntos escultura_kinect



Fuente: *diagrama elaborado por el autor.*

a. Limpieza de la nube de puntos

Como se mencionó anteriormente en ocasiones la información capturada puede tener puntos que no hacen parte del modelo o que no son de interés, también llamados ruido, es necesario realizar esa limpieza, en el caso de estudio se utilizó el software libre Meshlab.

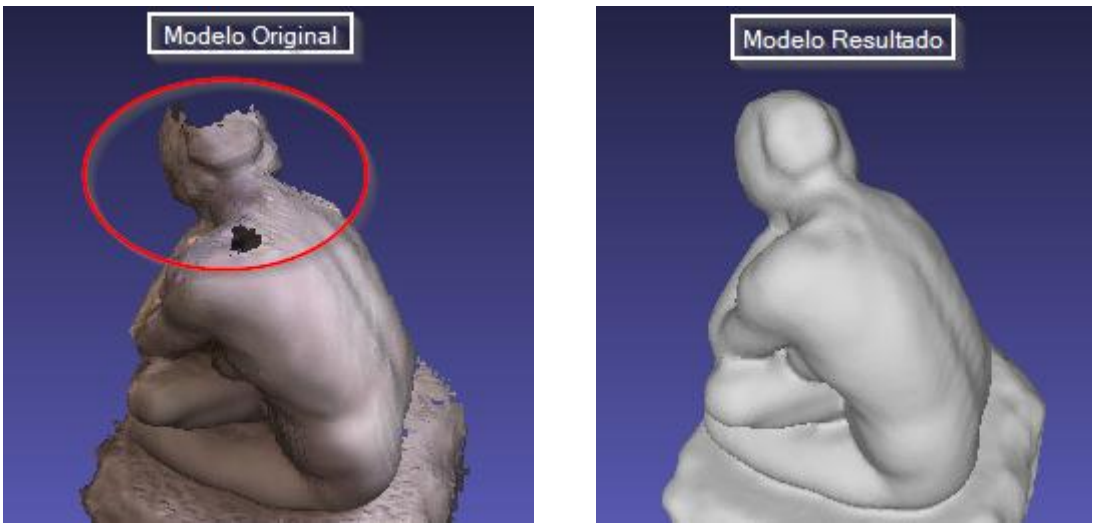
b. Normalización de los datos

Igual que en el postproceso de los datos obtenidos con el escáner Faro se utilizó el software Meshlab con la diferencia que en el parámetro del vecino más cercano se estableció el valor número 5 ver anexo B, la razón es porque permite observar más detalles en relación al modelo original.

c. Reconstrucción de la superficie

Luego de tener las normales calculadas en la nube de puntos escultura_kinect, se puede realizar la reconstrucción de la superficie implementando el algoritmo de Poisson, con el fin de obtener el mejor resultado se elige el valor 12 en octantes y 12 en división.

Figura 24:Comparación modelo antes y después del postproceso



Fuente: *imagen tomada desde el software Meshlab y adaptada por el Autor*.

En la Figura 24 al lado izquierdo se puede observar que hacen falta datos como se señala con el círculo rojo, la razón es porque en el momento de realizar el levantamiento de la información con el Kinect no se logró tener acceso a esa parte porque la escultura El Silencio se encuentra encima de una base elevando su altura.

Por eso es necesario generar la reconstrucción de la superficie de Poisson, el resultado del algoritmo se muestra en la figura del lado derecho, donde se visualiza el modelo completo.

Adicionalmente se aplicó un algoritmo para transferir los atributos de color teniendo como referencia la información RGB de los vértices del modelo original, aplicado al modelo generado con la reconstrucción de la superficie de Poisson, el resultado se ilustra en la Figura 25.

Figura 25: Reconstrucción superficie de Poisson con color



Fuente: *imagen tomada desde el software Meshlab.*

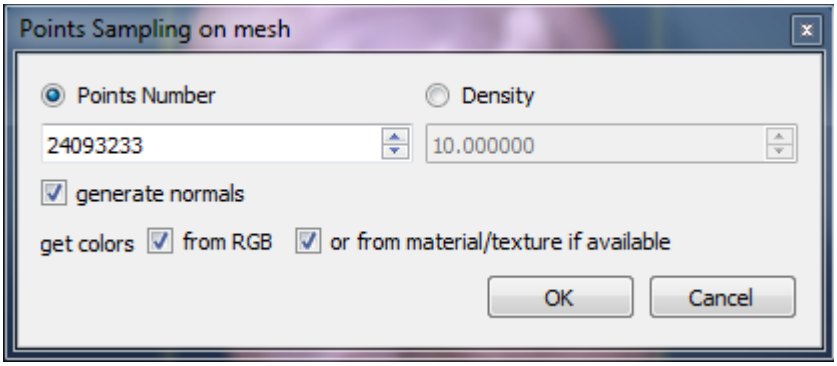
Para terminar el proceso en el software Meshlab se exportó el archivo con el nombre escultura_kinect, en formato .ply.

d. Generación de la nube de puntos

Para generar la nube de puntos se abre el modelo en el software CloudCompare el archivo es una superficie que está compuesta por una malla triangular es necesario convertirla a una nube de puntos, se debe asignar cual es el valor que se desea de puntos en total que conformaran la nube.

Se recomienda un valor aproximado a el número total de puntos generados con el escáner laser terrestre, en el caso de estudio la nube *escultura_laser*, tiene un total de 24,093,242 puntos, la Figura 26 muestra que se asignó 24,093,233, que es el valor que más se aproxima, ya que dio como resultado 24,093,409 puntos.

Figura 26: Asignación de la cantidad de puntos a generar



Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

Se utilizó el valor total de puntos de la nube escultura_laser, para saber cuál es el comportamiento de los datos.

e. Modelo en Realidad Virtual

Para terminar se exporta el archivo con el nombre escultura_kinect, en formato .ply. y en formato vrml, el mismo proceso que se realizó con la nube de puntos tomada con Lidar, desde el software CloudCompare.

3.4 Comparación de los resultados

Se empleó el programa CloudCompare, porque es un software libre que permite abrir archivos de varias extensiones como Standford Polygon y VRML que son el tipo de formato que tienen las nubes de puntos.

Para realizar la comparación de las dos nubes de puntos, el proceso que se desarrolló se nombra a continuación:

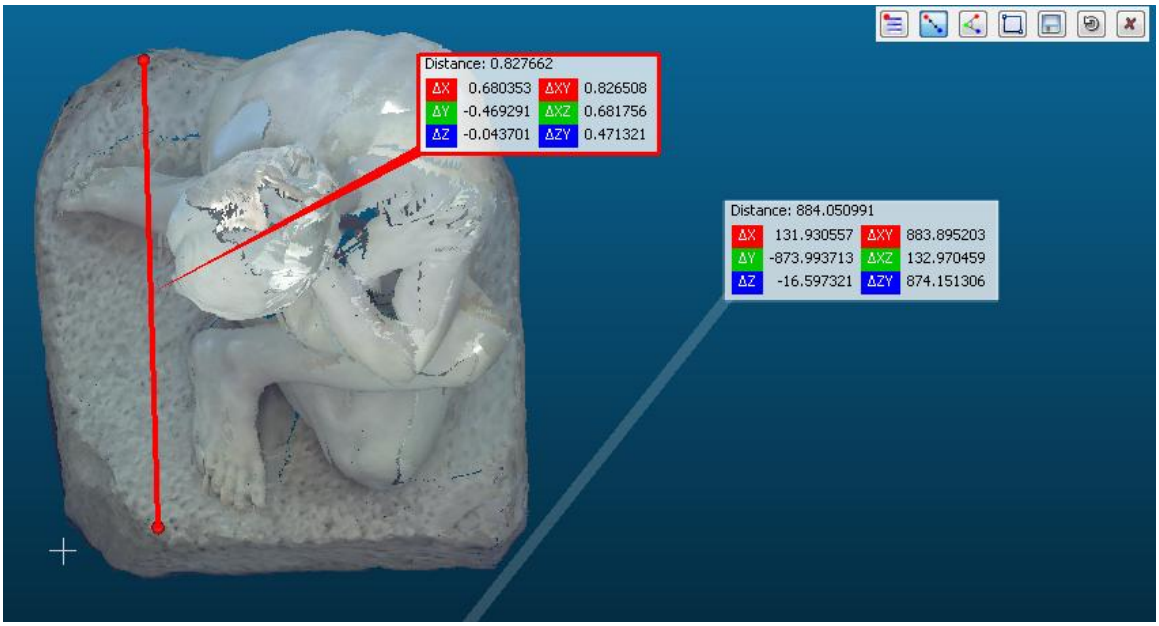
3.4.1 Escalar la nube de puntos

El sensor RGB-D tiene asignado en su sistema de medida el milímetro y el escáner Faro el metro.

Es necesario escalar las dos nubes de puntos ya que tienen diferente sistema de unidades, para esto es necesario calcular el factor de escala.

Se buscaron dos puntos en común que sean visibles en las dos nubes, luego como se observa en la Figura 27 se midió la distancia entre los dos puntos para cada modelo.

Figura 27: Medición de distancia entre dos puntos



Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

Al saber la distancia se halla el factor de escala, por medio de la ecuación $Fe = \frac{\text{Dmax}}{Dmin}$, donde se divide la diferencia mayor (Dmax) sobre la diferencia menor (Dmin).

En escultura_kinect dio una distancia de 884 y en escultura_laser fue 0.883

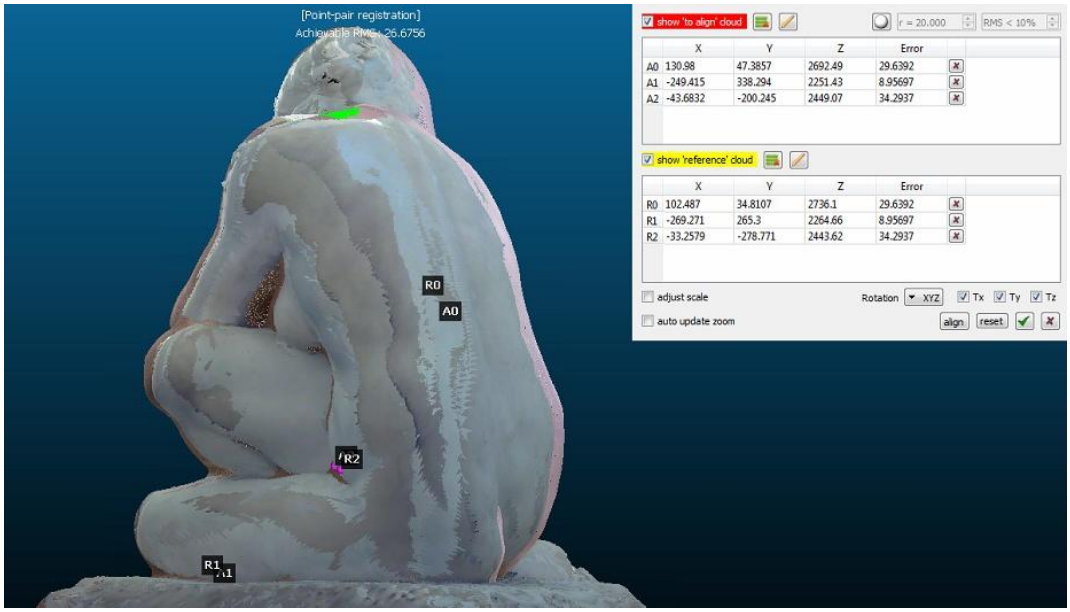
$$Fe = \frac{884}{0.883} = 1001$$

Quiere decir que el factor de escala es aproximadamente 1000, se selecciona el modelo más pequeño al que se va a escalar, en el caso de estudio se eligió a escultura_laser, porque se trabajó en unidades milimétricas para poder observar mejor el comportamiento de los datos para tener mayor cantidad de decimales.

3.4.2 Alineación y registro

Luego de tener las nubes de puntos en el mismo sistema de unidades, es necesario que tengan el mismo sistema de coordenadas para eso se debe realizar el proceso de alineación y registró. Como el láser tiene un sistema de coordenadas reales se tomó como referencia y se alineó la nube de puntos *escultura_kinect*.

Figura 28: Ubicación puntos de referencia para alinear las nubes de puntos

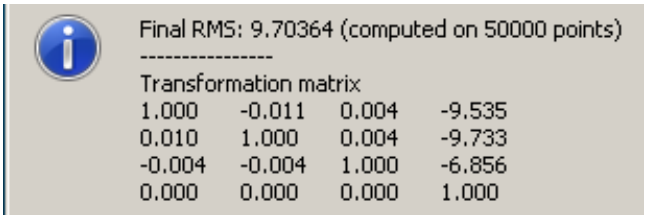


Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

El software Cloud Compare tiene la opción de alineación de nubes, por medio de tres puntos de control o tres puntos en común que sean equivalentes en las dos nubes de puntos, como ilustra la Figura 28 .

Una vez seleccionados los seis puntos se elige alinear y aceptar. Para que valide la información es necesario registrar las nubes de puntos. Cuando finalizó generó un reporte como en la Figura 29, es una matriz donde aparece la información correspondiente a las coordenadas provenientes del pixel y las translaciones que realizó.

Figura 29: Reporte del registro



Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

3.4.3 Comparación de las nubes de puntos

CloudCompare cuenta con una herramienta llamada computar nube consiste en medir la distancia de Hausdorff de las dos nubes de puntos, seleccionando como referencia *escultura_laser* y comparando *escultura_kinect*.

Los resultados se presentan en el capítulo 4.

Capítulo 4: Resultados

Los resultados obtenidos fueron:

- La nube de puntos generada con el escáner laser terrestre se denominó: *escultura_laser,* compuesta por un total de 24,093,242 puntos
- La nube de puntos obtenida mediante el sensor RGB-D, se llamó: *escultura_kinect,* con un total de 24,093,409 puntos.
- Los dos modelos tridimensionales obtenidos a partir de las nubes de puntos en un formato VRML, se nombraron como: *modelo_escultura_kinect*, *modelo_ escultura_laser.*
- También se crearon dos modelos a partir de los vrml, en formato de impresión 3d, en Standford Polygon(.ply), son llamados *superficie_kinect* y *superficie_laser.*
- Adicionalmente se generó el modelo de las diferencias de la nube de puntos *escultura_kinect_diferencias.*
- Para visualizar los modelos en cualquier dispositivo portátil, se generaron dos videos donde se renderizaron los modelos en formato de impresión, porque son los archivos menos densos, se realizó mediante el software blender, fueron llamados: *render_kinect* y *render_laser*.

4.1 Reporte generado por el Software Scene de la superposición de las escenas

En las Tabla 3 y 4 se muestran los resultados de la superposición que generó el software Scene al registrar las escenas tomadas con el escáner Faro Focus 3D s120.

Tabla 3: Resultados generales superposición

Escaner	Fabricante
Error del punto máximo	1.mm
Error del punto medio	0.8 mm
Superposición mínima	60.8%

Fuente: Elaborada por el autor, a partir de los resultados del software Scene

Tabla 4: Resultados obtenidos en la integración de las escenas

Escaneo	Error del punto medio (mm)	Máximo error del punto (mm)	Mínima superposición
Esc000	0.9	1.0	70.2%
Esc001	1.2	1.4	60.8%
Esc002	1.2	1.3	61.7%
Esc003	1.2	1.4	64.8%
Esc004	1	1	74.5%
Esc005	0.8	0.8	84.3%
Esc006	1	1	77.4%
Esc007	1.1	1.1	60.8%

Fuente: Elaborada por el autor, a partir de los resultados del software Scene

4.2 Resultados estadísticos

Los resultados estadísticos se presentan en la Tabla 5, las unidades están expresadas en milímetros para poder tener más cantidad de decimales y mostrar con más detalle las diferencias numéricas entre las dos nubes de puntos.

Hay dos columnas: nube de Puntos registrada, correspondiente a la implementada en la metodología, adicionalmente se agrega la columna nube de puntos sin registrar, para

que el lector note la diferencia del registro. Para lograr tener información con más detalle se divide la escultura en tres zonas de interés, la cabeza, la espalda y el frente.

Tabla 5: Resultados estadísticos de la comparación.

Parámetro	**Nube de puntos registrada**	**Nube de puntos original**
Modelo Completo		
RMS (50000 PUNTOS)	9.613	9.805
Distancia mínima	0	0
Distancia máxima	46.996	45.169
Media aritmética	3.431	3.201
Desviación estándar	5.334	5.178
Error Máximo de estimación	4.608	4.517
Cabeza		
RMS (50000 PUNTOS)	8.927	7.979
Distancia mínima	0	0
Distancia máxima	23.125	26.472
Media aritmética	5.827	4.981
Desviación estándar	4.429	4.679
Error Máximo de estimación	1.588	1.518
Espalda		
RMS (50000 PUNTOS)	5.817	5.182
Distancia mínima	0	0
Distancia máxima	26.618	23.523
Media aritmética	1.871	1.425
Desviación estándar	3.345	3.025
Error Máximo de estimación	3.137	3.262
Frente		
RMS (50000 PUNTOS)	9.412	9.855
Distancia mínima	0	0
Distancia máxima	45.367	43.288
Media aritmética	3.797	4.178
Desviación estándar	5.67	5.601
Error Máximo de estimación	4.365	4.165

Fuente: Elaborada por el autor, a partir de los resultados del software CloudCompare.

Se analizaron la totalidad de los puntos y en distancia mínima se observa que hay puntos que corresponden o se superponen por lo tanto la distancia es cero.

La media aritmética se refiere al promedio de las distancias. La desviación estándar indica la distancia en la que están dispersos los datos respecto a la media.

El error máximo de estimación, corresponde a un parámetro que se refiere a los posibles errores que se generan al obtener la información. Es un valor que utiliza internamente el software para ajustar los parámetros, teniendo en cuenta que los sistemas de coordenadas tienen un error sistemático que se relaciona con el método que se utiliza para realizar la georreferenciación de las dos nubes de puntos, también se puede caracterizar con el instrumento que se usó para adquirir la información. (Lague, Brodu & Leroux, 2013)

4.3 Análisis de la nube de puntos escultura_kinect.

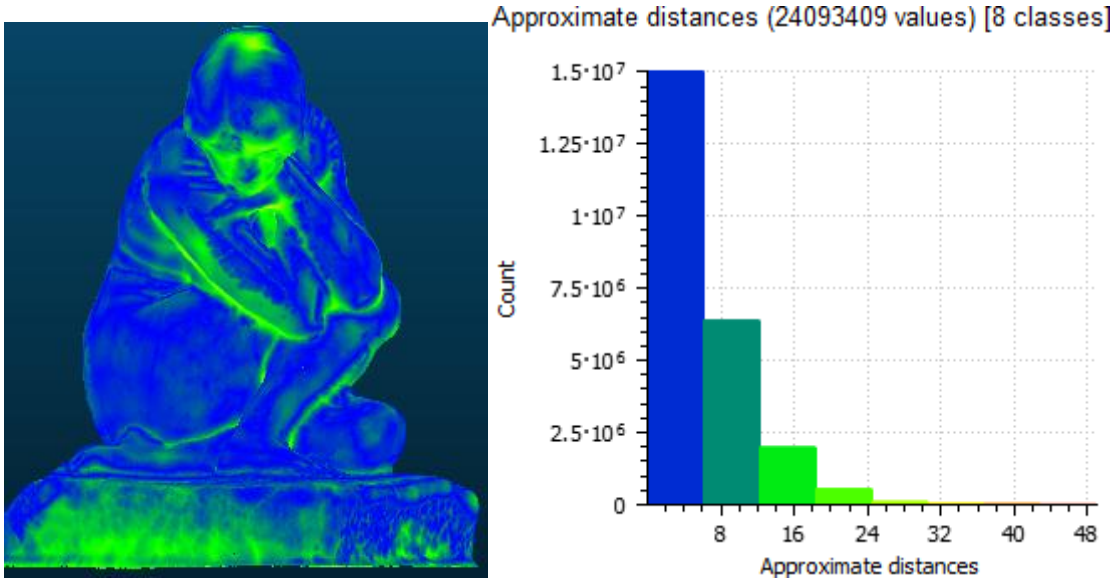
La nube de puntos *escultura_kinect*, está compuesta con un total de 24,093,409 puntos, como referencia se tomó la nube de puntos obtenida con el equipo de mayor precisión, es decir, *escultura_laser,* conformada por 24,093,242 puntos.

Como se observa en la Figura 30, la zona de color azul representa la mayoría de los puntos con el 62.356% del modelo completo, están entre 0 y 6.126 milímetros.

El siguiente intervalo de clase está entre 6.127 y 12.250 milímetros de distancia con el 26,492% de la muestra, quiere decir que el 97.085% de los datos tiene menos de 18.373 milímetros de distancia y el 0.67% tiene distancias con intervalo de clase entre 24.497 y

30.621 milímetros. Es decir, que es una nube de puntos muy similar a la obtenida con la tecnología LIDAR.

Figura 30: Resultado del modelo completo apartir de la nube de puntos escultura_kinect



Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

Los resultados estadísticos muestran que la distancia promedio de diferencia entre la nube de puntos *escultura_kinect* teniendo como referencia *escultura_laser*, es de 3.4 milímetros. El resultado, quiere decir que se puede tener una precisión de aproximadamente 4 milímetros en los componentes X,Y,Z.

La distancia máxima registrada entre las dos nubes de puntos es de aproximadamente 47 milímetros que representan menos del 0.257% de la muestra. La distancia mínima es cero, es decir que hay zonas donde los datos son correspondientes no hay diferencia entre las distancias.

El promedio de la diferencia en las distancias entre las dos nubes de puntos es de 3.430 milímetros, con una tendencia a variar en 5.334milímetros. Estos resultados

cumplen los objetivos de la investigación debido a que la tendencia de los resultados obtenidos con el sensor de profundidad es muy buena porque son diferencias en distancias en las tres coordenadas inferiores a un centímetro.

4.4 Análisis zona de la cabeza

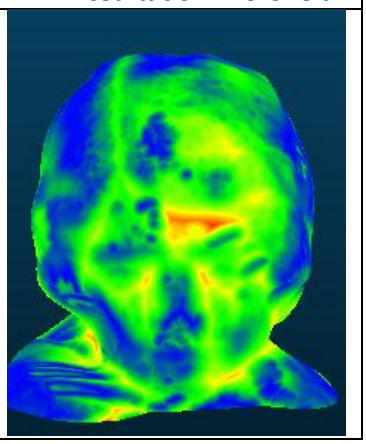
Para diferenciar la zonificación se asignaron diferentes nombres a las partes de la escultura, la decisión de analizar la cabeza, fue porque en este lugar se encuentran muchas sombras y variaciones en la superficie, además debido a que no se tenía información en la parte de la coronilla de la escultura se realizó la reconstrucción mediante el algoritmo de Poisson, como se nombró en la revisión literaria se implementó porque produce mallas triangulares a partir de vértices obtenidos por interpolación, permitiendo obtener superficies continuas, y suavizadas.

Una visualización de la cabeza en la nube de puntos obtenida con el sensor de profundidad corresponde a la primera columna de la Tabla 6, la segunda vista representa los datos obtenidos con el escáner Faro y la última visualización muestra las diferencias entre las distancias de las dos nubes de puntos.

Con los resultados de la Tabla 6 se puede inferir que el Kinect en comparación con el escáner laser Faro tiene limitaciones para reconstruir elementos o estructuras milimétricas como se observa en la delimitación de los ojos, nariz, boca y el relieve del cabello.

En la zona de la cabeza se evidencian más variaciones como se muestran en la Figura 31, quiere decir que el comportamiento de los datos tiene diferencias más notorias.

Tabla 6: Comparación cualitativa zona de la cabeza

Datos originales Kinect	Datos originales Laser	Resultado Diferencia
		

***Fuente: tabla** elaborada por el autor con datos tomados desde el software CloudCompare.*

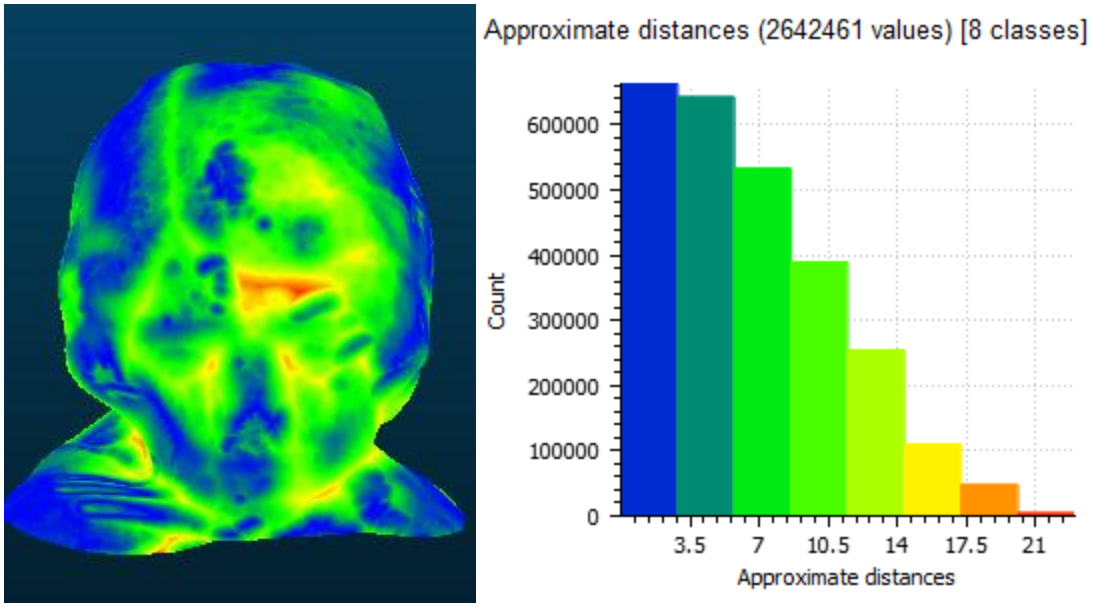
También influye que la zona de la cabeza tiene presencia de sombras se puede inferir que la ausencia de luz afecta para que el sensor Kinect no logre tener unos resultados similares a los obtenidos con el escáner laser terrestre.

Según la Figura 31 se observa que las zonas de color azul están entre 0 y 2.878 milímetros de distancia y que representan la mayoría de los datos con el 25.070% de la muestra.

Sin embargo, el 24.308% son los puntos que están entre 2.879 y 5.749 milímetros, es decir que la diferencia es de tan solo 0.72% entre los dos intervalos de clase, un 49.378% casi la mitad de los puntos están con una distancia menor a 5.749 milímetros.

La distancia minina registrada es 0 y la máxima registrada es de aproximadamente 23 milímetros que representan menos del 1.165 % de la muestra.

Figura 31: Diferencias en distancias zona de la cabeza



Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

El promedio de la diferencia en las distancias es de 5.827 milímetros, con una tendencia a variar 4.429 milímetros. Lo anterior significa el Kinect a pesar de no tener las mejores condiciones de luz, en promedio los datos pueden tener aproximadamente hasta 2 centímetros de diferencia respecto al escáner laser terrestre.

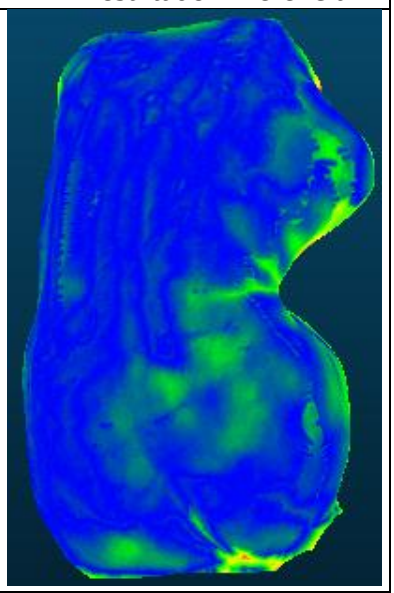
4.5 Análisis zona de la espalda

Se eligió la división de la espalda para verificar como es el comportamiento de las diferencias con unas condiciones de luz óptima, es decir la presencia de sombras es mínima o no presenta.

En la Tabla 7 se plasma la división que se realizó de la espalda, en la primer vista están los datos del Kinect, se le asignó el nombre de *espalda_escultura_kinect*, se analizó

teniendo como referencia la zona llamada *espalda_escultura_laser*, por último se tiene el resultado que se obtuvo de las diferencias entre las dos superficies.

Tabla 7: Comparación cualitativa zona de la espalda

Datos originales Kinect	Datos originales Laser	Resultado Diferencia
		

Fuente: tabla *elaborada por el autor con datos tomados desde el software CloudCompare.*

.

El resultado en la zona de la espalda es el que más se asemeja a la nube de puntos de referencia como se observa en la Figura 32, el color predominante es el azul, representa más de la mitad de la muestra con el 75.921% y distancias entre 0 y 4.309 milímetros, los demás colores apenas se alcanzan a percibir.

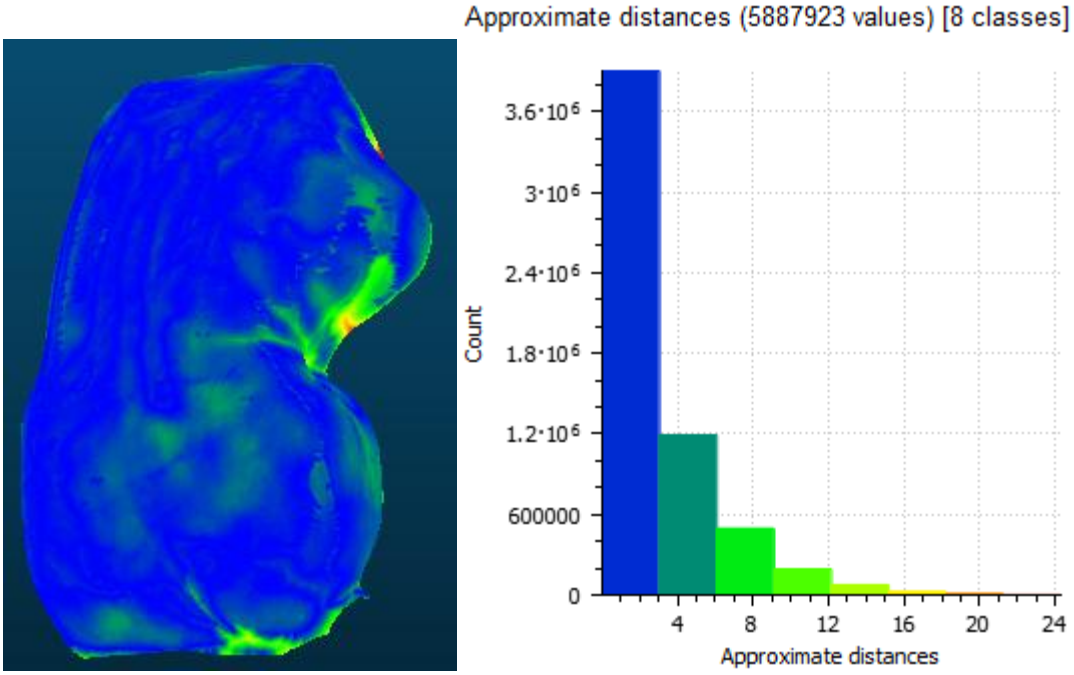
El 93.681% de los puntos están en una distancia menor a 8.614 milímetros. El 5.858% de los datos tiene una diferencia con un intervalo de clase de 8.615 hasta 17.223 milímetros.

Como aparece en la Figura 32 las zonas que no son de color azul, representan aquellos lugares donde no llega suficiente luz, como en la parte derecha de la cintura.

La distancia minina registrada es 0 y la máxima es 32.584 milímetros que representan menos del 0.461% de la muestra.

El promedio de la diferencia en las distancias es de 2.016 milímetros, con una tendencia a variar 5.833 milímetros. Los resultados obtenidos demuestran que el sensor Kinect es una herramienta con muy buena precisión en comparación con el escáner laser Faro Focus.

Figura 32: Diferencias en distancias zona de la espalda.



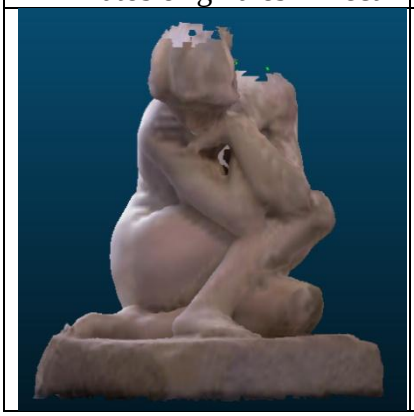
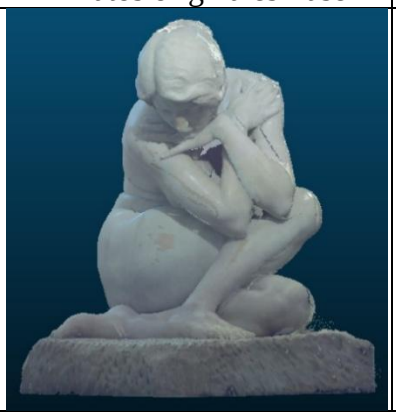
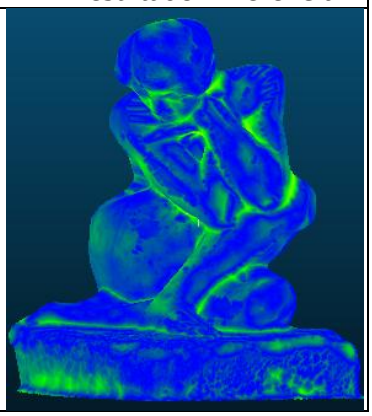
Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

4.6 Análisis zona del frente

La justificación de la división del frente de la escultura, es porque esta zona tiene más detalles de interés, están los brazos, la cara y las piernas.

La división de las zonas se muestra en la Tabla 8, la primer visualización corresponde a la zona llamada *frente_escultura_Kinect*, compuesta por 15,153,597 puntos, teniendo como referencia *frente_escultura_laser* con un total de 13,351,837 puntos, por último se muestran los resultados de las diferencias entre ambas nubes.

Tabla 8: Comparación cualitativa zona del frente de la escultura

Datos originales Kinect	Datos originales Laser	Resultado Diferencia
		

Fuente: tabla *elaborada por el autor con datos tomados desde el software CloudCompare.*

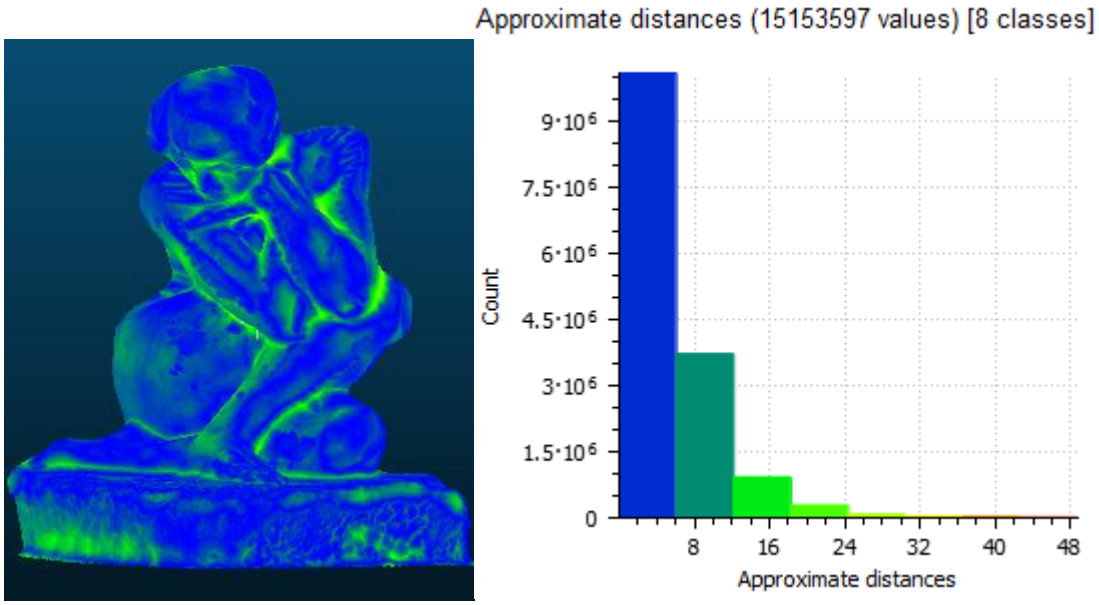
En la tabla 8, se observa que en las regiones donde se delimitan los diferentes componentes de la escultura como brazos, manos y cuello, los datos tienen variaciones se torna a color verde, es decir se presenta una mayor diferencia en las distancias con respecto a las zonas donde la superficie es más homogénea o uniforme.

Como se evidencia en la Figura 33 la zona de color azul son los puntos que están entre 0 y 6.100 milímetros de distancia, más de la mitad de los datos con 66.651% de la muestra.

Menos del 91.186% de los puntos están entre 0 y 12.198 milímetros. La distancia minina registrada es 0 y la máxima registrada es de aproximadamente 43 milímetros que

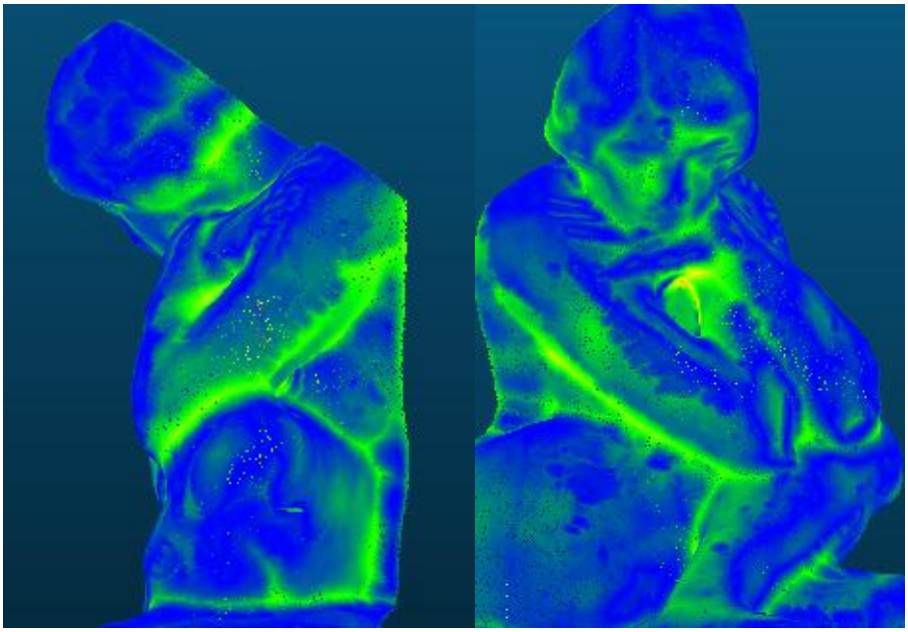
representan menos del 0.051% de la muestra. El promedio de la diferencia en las distancias es de 3.797 milímetros, con una tendencia a variar 5.670 milímetros.

Figura 33: Diferencia en distancias zona del frente de la escultura.



Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

Figura 34: Zonas con sombra en la escultura.



Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

En las zonas donde se presentan sombras o hay carencia de iluminación, el sensor no logra tomar esa información, como se plasma en la Figura 34 las zonas de color verde son aquellas que tiene sombra. La diferencia es de 12.198 y 24.396 milímetros con el 32.455%, de la muestra, las últimas tres series de datos más alejados equivalen al 1.13%.

Afirmando una vez más que la luz influye para que el sensor Kinect tenga una mejor precisión o pueda capturar esa información.

4.7 Análisis general de los resultados estadísticos.

En comparación del error medio residual las tres zonas, resultado del registro en orden descendente se organizarían como *frente_escultura_kinect*, con 9.412 milímetros, seguido de *cabeza_escultura_kinect*, con 8.927 milímetros y por último se tiene *espalda_escultura_kinect* con un residual de 5.817 milímetros. Esto significa que para los objetivos del proyecto las diferencias son mínimas y la precisión obtenida es satisfactoria, con algunas limitantes.

La carencia de luz o la presencia de sombras influyen para que el sensor RGB-D, no logre capturar información en esos lugares, como por ejemplo en la zona del frente y la cabeza, donde presenta una desviación estándar mayor en los ejes x,y,z, con valores de 4.429 y 5.670 milímetros respectivamente. Eso quiere decir que la ausencia de luz produce una mayor variación de las distancias del modelo a evaluar respecto al de referencia.

Por su parte, en la zona de la espalda, donde hay una mejor iluminación, la variación en la distancia promedio es 2 milímetros aproximadamente y la desviación estándar es de

3.521 milímetros. En esta zona hay presencia de sombra en la parte inferior de la escultura y es precisamente en ese lugar donde se encuentra la mayor variación de las distancias, lo cual reafirma la inferencia anterior respecto a la disolución de la precisión ante la carencia o disminución de luz en el objeto escaneado.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Este trabajo logró desarrollar satisfactoriamente la metodología práctica y precisa para la obtención de nubes de puntos con sensores RGB-D aplicado a la documentación del patrimonio humano y cultural mueble colombiano, contribuyendo en la conservación y divulgación de los bienes patrimoniales permitiendo que el monumento representado mantenga una vigencia en el tiempo.

Al divisar el modelo tridimensional se visualizan puntos y líneas extraídas de la realidad que representan un modelo matemático compuesto por coordenadas en el espacio que contiene toda la información métrica. (Camara & Latorre, 2003)

En el desarrolló del documento se demostró que implementando la metodología propuesta se puede modelar el objeto tridimensionalmente y visualizarlo en un lenguaje de Realidad Virtual, permitiendo el acceso y la manipulación de la escultura El Silencio, sin generar ningún impacto o deterioro físico en la obra.

Al llevar a cabo la comparación de los resultados obtenidos se demostró con pruebas cualitativas y cuantitativas que el sensor Kinect es una herramienta con muy buena precisión, en especial si el objeto a escanear no tiene detalles muy pequeños menores a aproximadamente 5 milímetros y adicionalmente cuenta con una buena fuente de

iluminación que permita que no se presenten sombras en el objeto, la superficie o el modelo queda muy semejante en comparación con el modelo generado a partir de la información obtenida con el escáner laser Faro Focus 3D.

El procesamiento de los datos del sensor de profundidad, en comparación con los del escáner laser terrestre, es más práctico y consume menos recursos de hadware esto hace que se reduzcan costos y tiempo en labores relacionadas con el modelamiento tridimensional y la captura de datos.

El uso de los sensores RGB-D contribuye en el área de documentación, conservación y restauración del bien cultural Mueble Colombiano, porque al obtener y procesar la nube de puntos, en condiciones óptimas de luz, la precisión obtenida esta entre los 0 y 4 milímetros.

Por medio de la nube de puntos obtenida se puede imprimir un prototipo a escala con aproximadamente 4 milímetros de precisión, permitiendo que cualquier tipo de público pueda acceder a la escultura de manera física, la pueda tocar y manipular. Esto genera una inclusión de la población con discapacidad visual, lo que les permite palpar y sentir el prototipo y de esta manera llevarse una idea o imaginarse cómo es la escultura físicamente a escala real.

5.1.1 Limitaciones del Kinect Frente al escáner Faro Focus s120 3D

En la comparación cualitativa también se puede inferir que el sensor de profundidad tiene limitaciones para reconstruir los detalles milimétricos (inferiores a aproximadamente 5mm) con respecto al escáner laser terrestre como por ejemplo las marcas del cabello, en este sentido es más preciso para reconstruir detalles la tecnología LIDAR.

Afirmando una vez más las conclusiones, para obtener unos resultados con mayor precisión, es necesario que se le suministre la suficiente iluminación al objeto a escanear para que no se generen sombras en el momento de capturar la información.

Adicionalmente como el Kinect no cuenta con un sistema de energía propia, en el instante de la toma de los datos es obligatorio dotar con una fuente de energía eléctrica al sensor y también es indispensable tener un computador para poder realizar el levantamiento de la información. En este sentido no se pueden hacer levantamientos al aire libre excepto en el caso donde se tenga acceso a una fuente de energía eléctrica.

El sensor Kinect tiene un rango menor de alcance para la captura de información en comparación con el Faro Focus[6], los rangos son de 0.8 a 4 metros y 0.6 a 120 metros respectivamente. (Miles, 2012) y (FARO, 2010)

5.2 Recomendaciones

Es fundamental realizar una inspección previa en campo antes de ir a tomar la información con los equipos, para tener una percepción de los lugares donde va a ubicar el escáner Laser Terrestre, para lograr escanear la totalidad de la escultura o el objeto que se desea representar en tercera dimensión.

En el lugar donde se capture la información con el sensor RGB-D, debe tener una iluminación suficiente para que no se vean sombras en el objeto que se desea levantar, la carencia de luz, hace que se omita información, el sensor no captura esos datos.

En la escultura El Silencio no era posible colocar ningún objeto encima de ella ya que puede generar deterioros o algún impacto por esta razón se recomienda poner puntos de control, es decir marcas o puntos de referencia, en lugares cercanos a la escultura, por

[6] Depende de la luz ambiental, que puede actuar como una fuente de ruido. La luz brillante ambiental (p.ej. la luz del sol) puede acortar la gama real del escáner a menor distancias. En la luz baja ambiental, la gama puede ser más que 120m para la incidencia normal sobre la superficie

ejemplo, en la base debajo del objeto que se va a modelar. Los puntos de control son fundamentales ya que permiten que la alineación de los modelos sea más precisa.

También se recomienda que la persona que realice el levantamiento, en especial con el sensor RGB-D, tenga en cuenta las dimensiones del objeto que va a representar para tenga alcance a la totalidad del objeto. En la escultura El Silencio, en la parte del superior donde se encuentra el cabello recogido, no se pudo tomar esa información, porque no se alcanzaba a escanear esa zona debido a su altura.

Para realizar el levantamiento con el Kinect, es útil utilizar una base móvil para trasladar el sensor, en el caso de realizarlo con la mano, puede ocasionar una fuente de error experimental.

Anexo A. Configuración de los parámetros del escáner terrestre Faro Focus 3D S120

Es fundamental seleccionar el perfil adecuado para el levantamiento, en el caso de estudio se eligió el perfil interior a partir de 10m. Porque la sala cinco del Museo Nacional es un lugar cerrado, allí se encuentra la Escultura El Silencio y como el escáner Faro Focus 3D s120 estuvo ubicado a menos de 10 metros de la escultura.

1. En la ventana de parámetros de escaneo interno se eligieron los que recomienda el manual para escaneos en interiores:

   -Resolución: 1/5
   -Calidad: 4x
   -Duración del escaneo 5:00 minutos
   -Los demás se dejan por defecto

2. Luego de elegir el perfil, se creó un nuevo proyecto de escaneo. En la ruta Administrar, proyecto, seleccionar el icono **+.**

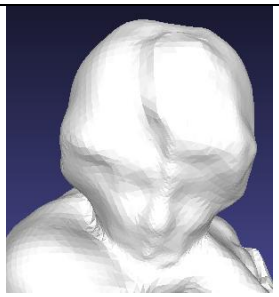
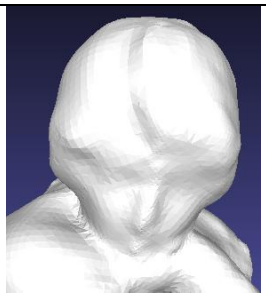
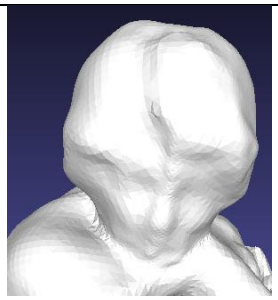
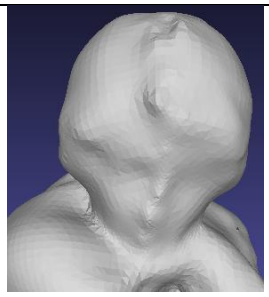
3. Los parámetros que se determinaron fueron:

   -Nombre del proyecto: Museo
   -Proyecto principal: No hay proyecto principal.
   -Cliente: UD.
   -Nombre base del archivo: Esc.
   -Nº de escaneo inicial: 0

Anexo B. Pruebas realizadas de la superficie de Poisson

A continuación, se muestra las pruebas y ensayos que se realizaron cambiando valores en la reconstrucción de la superficie de Poisson.

Tabla 9: Pruebas Poisson

Poisson1		
Vecinos	5	
División de octantes	12	
División de la solución	12	
Poisson2		
Vecinos	7	
División de octantes	12	
División de la solución	12	
Poisson3		
Vecinos	10	
División de octantes	12	
División de la solución	12	
Poisson4		
Vecinos	13	
División de octantes	12	
División de la solución	12	

Fuente: *imagen tomada desde el software CloudCompare.*

Referencias

Alves, F. (2014). Para Reconstrução Tridimensional Da Geometria Da Mama Utilizando Dois Sensores De Profundidade. (U. F. Fluminense, Ed.) Rio de Janeiro, Niterói, Brasil.

Amazon. (25 de noviembre de 2016). *Amazon Colombia*. Obtenido de https://www.amazon.co.uk/

Aspert, N., & Santa-Cruz, D. (26-29 de Agosto de 2002). Mesh: Measuring Errors Between surfaces using the Hausdorff distance. Switzerland, Laussanne: (ICME), of the IEEE International Conference in Multimedia and Expo. doi:10.1109 / ICME.2002.1035879

Barragán , W., Campos , A., & Martínez, J. (2009). HISTORICAL DOCUMENTATION IN SAN AGUSTIN (HUILA), COLOMBIA, WORLD HISTORICAL HERITAGE USING CLOSE. *Taking the benefits of geographic information Technologies.* Stuttgart University of Applied Sciences, Stuttgart, Alemania. Recuperado el 16 de julio de 2015, de https://www.researchgate.net/profile/Jagath_Gunatilake/publication/309443092_Identification_and_mapping_of_spatial_distribution_of_Floating_aquatic_plants_in_tanks_using_remote_sensing_and_GIS/links/5810e3c208aef2ef97b2cfdf.pdf#page=113

Bueno, D. (2012). *Reconocimiento de Objetos en 3D utilizando sensores de visión y Profundidad de Bajo Coste.* Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de

Zaragoza, Zaragoza, España. Recuperado el 23 de junio de 2015, de http://invenio2.unizar.es/record/7131/files/TAZ-PFC-2012-183.pdf

Candeias, A. L., & Tavares, J. R. (2001). Realidad Virtual en la visualización de modelos Topográficos. Brasil: Informatica, Centro de Cartografia, Departamento de ingenieria. Recuperado el 22 de abril de 2016, de http://www.aet.org.es/congresos/ix/Lleida44.pdf

Cignoni, P., Rocchini, C., & Scopigno, R. (1998). Metro: measuring error on simplified surfaces. Pisa, Italia: Ricerche, Istituto per l'Elaborazione dell'Informazione - Consiglio Nazionale delle. Recuperado el 15 de abril de 2016, de http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1467-8659.00236/full

CINU. (22 de Agosto de 2002). *Centro de Información de las Naciones Unidas.* Recuperado el 25 de agosto de 2015, de http://www.cinu.org.mx/eventos/cultura2002/importa.htm

Ebay. (22 de noviembre de 2016). *Ebay*. Obtenido de http://www.ebay.com/

Elizondo, J. J. (noviembre de 2002). Fundamentos de Procesamiento de Imágenes. Madero, Tijuana: California, Universidad Autónoma de Baja. Recuperado el 15 de marzo de 2016, de http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/39190415/FundamentosDeProcesamientoDeImagenes.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1488406699&Signature=kWIeDrn90dgWAUvG%2FcbBB6tLwiw%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DFundamen

FARO. (octubre de 2010). Laser Scanner Focus 3D. FARO Technologies Inc. Recuperado el 12 de agosto de 2015

Faro. (Abril de 2016). SCENE LT 6.0 User manual. Estados Unidos.

García , R. (2007). *Sistema de Odometría Visual para la Mejora del Posicionamiento Global de un Vehículo.* Escuela Politécnica Superior Universidad de Alcalá, Alcalá, España. Recuperado el 15 de julio de 2015, de https://www.researchgate.net/profile/MA_Sotelo/publication/237674176_DETECCION_Y_RECONOCIMIENTO_DE_PANELES_DE_TRAFICO_MEDIANTE_TECNICAS_DE_PROCESADO_DE_IMAGEN/links/55d1b8ec08ae3dc86a4f2c56.pdf

Gil, P., Torres, F., & Ortiz, Z. (8 al 10 de Septiembre de 2004). Detección de objetos por segmentación multinivel combinada de espacios de color. *XXV Jornadas de Automática*. (F. I. Automática, Ed.) Ciudad Real, España. Recuperado el 2016 de julio de 16, de http://hdl.handle.net/10045/2179

HORUS. (02 de 2015). GUÍA DE POST-PROCESADO DE LA NUBE DE PUNTOS. 3D Scanning for everyone. Recuperado el 25 de 08 de 2016, de https://storage.googleapis.com/bqcom15.statics.bq.com/prod/resources/manual/Guia_post-procesado_nube_puntos-1475833494.pdf

Klein, R., & Liebich, G. (28-29 de octubre de 1996). Mesh Reduction with Error Control. (Press., IEEE Computer Society). Germania: Universidad Tubingen. Obtenido de http://dl.acm.org/citation.cfm?id=245624

Langmann, B., Hartman, K., & Loffeld, O. (2012). *Depth camera technology comparison.* ZESS – Center for Sensor Systems, University of Siegen, Siegen, Germania. Recuperado el 2015 de julio de 18, de http://ai2-s2-pdfs.s3.amazonaws.com/c5f9/34f1db5122fe10ed93b4b70baea1f449321c.pdf

Lobo, P., & Gómez Goñi, J. (2001). Aplicaciones del lenguaje VRML (Virtual reality modelling lenguage) a la ciencia de Materiales. (E. d. Telecomunicacion, Ed.) Madrid, España.

Mañana, P. (Enero - diciembre de 2008). *Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio.*

Mañana, P., & Blanco , R. (2009). *la documentación geométrica de elementos patrimoniales con láser escáner terrestre, 56, No 122*. España: Cuadernos de Estudios Gallegos. doi:http://dx.doi.org/10.3989/ceg.2009.v56.i122.55

Miles, R. (2012). Start Here, Learn the Kinect API. Sebastopol, California, Estados Unidos de America: Microsoft Corporation . Recuperado el 23 de 10 de 2015, de www.finebook.ir

Montenegro, & Peixoto. (3 de abril de 2005). Fotografia 3D. (L. Velho, & P. Carvalho, Edits.) Rio de Janeiro, Brasil. doi:p.21

Museo Nacional. (1987). El Silencio. archivo Museo Nacional. Recuperado el 16 de junio de 2015

Museo Nacional. (07 de julio de 2011). *Museo Nacional*. Recuperado el 14 de julio de 2015, de http://www.museonacional.gov.co/el-museo/Paginas/default.aspx

Pedrini, H. (2007). Schwartz, W. R. Análise de Imagens Digitais: Princípios, Algoritmos e Aplicações.

Pierre, H., Murillo, A., & Mosteo, A. (17 de febrero de 2013). Brazo robotizado controlado mediante sensores de visión integrado sobre un robot móvil. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza. Recuperado el 2 de agosto de 2015, de https://www.mysciencework.com/publication/show/ce2547effc9b7e710cc75190cf04f764

Porraz, H., Caceres, J., & Gallo, E. (Julio - septiembre de 2014). Modelos urbanos tridimensionales generados a partir de nubes de puntos de un escáner láser terrestre. *Scielo, 18*(41).

Ruiz, P., Garro, J., & Soto, G. (10 de junio de 2014). El Uso de Imágenes Lídar en Costa Rica: Casos de Estudio Aplicados en Geología, Ingeniería y Arqueología. *Revista Geológica de América Central*. San Pedro de Montes. Recuperado el 15 de agosto de 2015, de http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242014000200001

Sánchez, I. (12 de 2013). METODOLOGÍA PARA LA GESTIÓN Y EXPLOTACIÓN DE DATOS ESPACIALES OBTENIDOS CON SISTEMAS DE CAPTURA MASIVA DE PUNTOS. Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona. Recuperado el 23 de marzo de 2016, de http://hdl.handle.net/2099.1/20931

Stolfi Rosso, D. H., & Gálvez Rojas, S. (1997). Mundos virtules 3D con VRML. (U. d. Malaga, Ed.) Malaga, España.

Xbox. (2015). *Soporte tecnico de Xbox.* Recuperado el 24 de agosto de 2015, de https://support.xbox.com/es-CO/xbox-360/kinect/kinect-sensor-components

Yuchu, Q., Tuong, T., & Yifang, B. (2010). Range determination for regenerating point clouds from airbone small footprint LIDAR waveforms. Beijing, China.