



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA

DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA Y ESTRATEGIA DE
EXTRACCIÓN DE MATERIAL MINERO PARA UN LHD MINERO POR
MEDIO DE MEDICIONES LASER.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ANÍBAL ALEJANDRO MADRID CARRASCO

PROFESOR GUÍA
JAVIER RUIZ DEL SOLAR

PROFESOR CO-GUÍA
HECTOR AGUSTO ALEGRÍA

MIEMBRO DE LA COMISIÓN
SERGIO FUENTES SEPÚLVEDA

SANTIAGO DE CHILE
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: ANÍBAL ALEJANDRO MADRID
CARRASCO
FECHA:
PROF. GUÍA: JAVIER RUIZ DEL SOLAR

DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA Y ESTRATEGIA DE EXTRACCIÓN DE MATERIAL MINERO PARA UN LHD MINERO POR MEDIO DE MEDICIONES LASER.

La robótica y automatización han tenido un gran impacto en la industria en el país, aumentando sustancialmente la productividad de ésta a lo largo de los años. Uno de los procesos que se ha buscado automatizar en minería, es la extracción de mineral en minas subterráneas, el que se realiza por un Load Haul Dump. Este proceso ha sido parcialmente automatizado, quedando pendiente desarrollar de manera efectiva proceso de carguío para que sea autónomo. Este es difícil de automatizar debido a la variabilidad de la granulometría del material a cargar que se encuentra en el punto de extracción.

Esta memoria se enmarcó en el proyecto de automatización del proceso de carga de un LHD en el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile. El trabajo consistió en el diseño y desarrollo de un sistema de medición granulometría del mineral en un punto de extracción y la entrega de un punto en donde se recomienda iniciar la carga de este. En este trabajo se diseña y desarrolla una maqueta a escala del punto de extracción real, en la que utilizando un láser actuado por medio de un servo motor y el framework ROS, se obtiene una nube de puntos la que es procesada por un algoritmo que ocupa segmentación en tres dimensiones. De esta manera se obtiene una serie de clústeres representando cada una de las rocas. Además se implementa un filtro de manera que rocas detectadas con un volumen menor al impuesto por el usuario, no serán consideradas, y finalmente utilizando esta información se entrega una línea en la que se recomienda comenzar el carguío. Este sistema fue sujeto a una serie de pruebas con distintas rocas en diferentes configuraciones obteniendo un error promedio de 14,17 %. También fue sujeto a prueba en un ambiente húmedo, en el que el rendimiento se mantuvo constante y a pruebas en un ambiente con polvo, en donde el láser no fue capaz de atravesarlo por lo que no se obtuvieron resultados. Finalmente se encontró que el tiempo en el que se entrega una nube de puntos por el sistema es 12 segundos y se realizó un análisis teórico para concluir que estos resultados son representativos en un ambiente real.

Concluyendo, se desarrolló un sistema capaz de diferenciar las rocas relevantes del fino, obteniendo su granulometría utilizando el framework ROS y el hardware requerido. El trabajo realizado abre las puertas para el desarrollo y prueba de nuevas estrategias de carguío autónomo en el AMTC. Como trabajo futuro se propone caracterizar rigurosamente el desempeño del láser en ambientes con polvo y realizar pruebas con un LHD a escala para determinar la efectividad de la estrategia de carguío entregada en este trabajo, además de una serie de sugerencias para mejorar el desempeño del algoritmo desarrollado.

"

¿Quién soy yo?

Yo soy las manos de mi abuelo.

Soy las lágrimas de mi madre.

La fuerza de mi padre.

Las bromas de mis hermanos...

Soy el amor de quien me ha amado y la disciplina de mis maestros.

Soy la inspiración de muchos para seguir adelante y la gente que aplaudió mis éxitos.

Soy los consejos de cien hombres.

No soy sólo yo...

Soy la suma de todos.

El orgulloso resultado del trabajo de otros.

Aquellos que han tocado mi vida, de tantas maneras.

Llegó el momento. Es tiempo de dar.

"

Agradecimientos

En el cierre de esta etapa de mi vida, miro hacia atrás y me doy cuenta que es imposible solo con palabras, demostrar lo agradecido que estoy de la vida. De todas maneras lo intentaré.

Gracias Mamá, desde que tengo memoria me ayudaste a levantarme temprano, y cumplir con los terribles horarios escolares y universitarios, no sé cómo no te aburríste. Pero lo que más valoro es que me has enseñado lo importante que es llevar una vida sana y llena de alegrías, a amar y cuidar a quienes más amamos, gracias Mamá.

Gracias Papá, nunca olvidaré las mil y un veces que te pregunte algo y me hiciste razonar la respuesta, tú me enseñaste a pensar. Las mil veces en que me enseñaste a ser derecho y que los valores van antes que cualquier otra cosa, no solamente con palabras sino con actos. Me enseñaste a apuntar más lejos que el resto y es por eso que hoy voy por más, gracias Papá.

Gracias hermanos, Catalina y Antonio, como todos los hermanos hemos tenido millones de peleas, pero siempre han estado ahí para apoyarme y aunque no lo crean, he aprendido mucho de ustedes dos, gracias hermanos.

Jill, amor, gracias. Junto a ti he descubierto el verdadero significado del amor de pareja, una relación sana, alegre y llena de amor. Antes de conocerte no sabía que se pudiese ser tan feliz en esta vida. Te admiro mujer y no sabes lo agradecido que estoy de que me hayas acompañado en la recta final de esta etapa. Estoy muy feliz de saber que aún nos queda una larga y linda historia por escribir juntos. Gracias amor.

A lo largo de mi vida he tenido la suerte de hacer muchos de amigos. Ustedes saben quiénes son y lamentablemente no puedo nombrar a cada uno de ustedes, pero gracias por haber compartido esta etapa tan increíble conmigo y por los lindos recuerdos que me dejan. En especial gracias a quienes compartieron la etapa universitaria conmigo, desde mi primer amigo en la Universidad, mati, hasta los últimos, Nacho, Rana, Super, Hao y Chicharin, las ratas de Eléctrica.

Gracias a la comisión de este trabajo, el profesor Javier Ruiz del Solar quien me dio la oportunidad de realizar mi memoria en el AMTC y a Sergio Fuentes Sepúlveda, gran profesional de la minería quien ha tenido la inmensa voluntad de ayudarme a terminar esta etapa.

Muchas gracias a todas las personas que han compartido conmigo aunque sea una mirada en esta vida, hoy no soy más que la suma y resta de las experiencias en esta vida, y se las debo a ustedes.

Tabla de contenido

Capítulo 1	1
1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Hipótesis	3
1.4 Estructura del documento	3
Capítulo 2	4
2 Contextualización	4
2.1 El proceso minero.....	4
2.1.1 Load Haul Dump	4
2.1.2 Panel Caving Convencional con traspaso vía equipo LHD.....	5
2.2 Estado del arte de la Automatización de LHD en la minería	9
2.3 Proyecto de automatización LHD en AMTC	10
2.3.1 El AMTC	10
2.3.2 Automatización de LHD.....	11
2.3.3 El aporte de esta memoria en el proyecto.....	11
2.4 Plataforma de trabajo.....	11
2.4.1 Hardware	11
2.4.2 Software.....	13
2.5 Conceptos técnicos	16
2.5.1 Granulometría.....	16
2.5.2 Point Cloud.....	17
Capítulo 3	19
3 Metodología e implementación de sistema de medición de granulometría	19
3.1 Metodología.....	19
3.2 Implementación del sistema de medición de granulometría	19
3.2.1 Diseño y construcción de la maqueta de punto de extracción.....	19
3.2.2 Montaje y actuación del laser	23

3.2.3	Comunicación entre ROS y Láser	28
3.2.4	Creación de nube de puntos a partir de las mediciones láser	30
3.2.5	Filtrado de área de interés.....	35
3.2.6	Algoritmo de medición de granulometría y estrategia de carga.....	36
3.2.7	Línea de carguío recomendada.....	43
3.2.8	Sintonización de parámetros.....	44
Capítulo 4	46
4	Resultados y Análisis.....	46
4.1	Desempeño de la medición de rocas.....	46
4.1.1	Medida de desempeño	46
4.1.2	Pruebas	47
4.2	Comportamiento en distintos ambientes.....	62
4.2.1	Ambiente húmedo	62
4.2.2	Ambiente con polvo	63
4.2.3	Velocidad de obtención de la nube de puntos	65
4.2.4	Funcionamiento a escala real.....	67
Capítulo 5	69
5	Conclusiones.....	69
5.1	Trabajo futuro	70
Bibliografía.....	72
Anexos.....	74
Resultados pruebas	74

Índice de Figuras

FIGURA 1- LHD CAT DESDE DOS PERSPECTIVAS CARGANDO MINERAL.....	5
FIGURA 2- FOTO DE PUNTO DE EXTRACCIÓN	6
FIGURA 3- MARTILLO PICADOR UTILIZADO PARA REDUCIR ROCAS QUE QUEDEN ATRAPADAS EN LAS PARRILLAS	7
FIGURA 4- FIGURA ILUSTRATIVA DEL PROCESO PANEL CAVING CONVENCIONAL TÍPICO CON SISTEMA LHD.....	8
FIGURA 5- ROBOT CON LIDAR MONTADO GENERANDO MAPAS	12
FIGURA 6- ROBOT CON LIDAR MONTADO GENERANDO MAPAS	12
FIGURA 7- AUTOMÓVIL AUTÓNOMO DESARROLLADO EN LA UNIVERSITY OF TEXAS UTILIZANDO ROS	15
FIGURA 8- ROBOT HUMANOIDE NAO, TAMBIÉN UTILIZADO CON ROS.....	15
FIGURA 9- EJEMPLOS DE SEGMENTACIÓN DE OBJETOS SOBRE UNA MESA UTILIZANDO LA LIBRERÍA PCL.....	16
FIGURA 10- RECONSTRUCCIÓN DE UNA SUPERFICIE EN BASE A UNA NUBE DE DATOS UTILIZANDO ALGORITMOS DE PCL.....	16
FIGURA 11- HISTOGRAMA EJEMPLO DE GRANULOMETRÍA.....	17
FIGURA 12- REPRESENTACIÓN EN NUBE DE DATOS DE UN DRAGÓN Y UN CONEJO	18
FIGURA 13- LHD A ESCALA DEL AMTC	20
FIGURA 14- MODELO 3D MOSTRANDO LAS MEDIDAS NECESARIAS DE LA MAQUETA.....	20
FIGURA 15- MODELO 3D MOSTRANDO LAS MEDIDAS NECESARIAS DE LA MAQUETA	21
FIGURA 16- ESTRUCTURA METÁLICA DE LA MAQUETA.....	22
FIGURA 17- ESTRUCTURA METÁLICA CON LOS PANELES DE MADERA APERNADOS.....	22
FIGURA 18- MAQUETA DEL PUNTO DE EXTRACCIÓN TERMINADA.....	23
FIGURA 19- SISTEMA DE REFERENCIA GLOBAL DEL SISTEMA.....	24
FIGURA 20- SISTEMA DE REFERENCIA DEL LASER	24
FIGURA 21- PRIMERA CONFIGURACIÓN POSIBLE DEL LASER, GIRANDO SOBRE EL EJE Z	25
FIGURA 22- SEGUNDA CONFIGURACIÓN PARA MONTAR EL LÁSER, GIRANDO SOBRE EL EJE X	25
FIGURA 23- LASER MONTADO DE MANERA QUE GIRE SOBRE EL EJE Z.	26
FIGURA 24- LÍMITES DEL MOVIMIENTO DEL SERVO MOTOR DESTACADOS EN ROJO	27
FIGURA 25- DIAGRAMA DE FLUJO DE FUNCIONAMIENTO DE LASER_ASSEMBER	30
FIGURA 26- SERIE DE SISTEMAS DE REFERENCIA DE UN ROBOT DESCRITOS ENTRE ELLOS UTILIZANDO EL PACKAGE TF	32
FIGURA 27- SISTEMAS DE REFERENCIA E0, E1 Y E2.....	33
FIGURA 28- SISTEMAS DE REFERENCIA E1 Y E2	34
FIGURA 29- NUBE DE DATOS RESULTANTE DEL PUNTO DE EXTRACCIÓN.....	35
FIGURA 30- RESULTADO DE FILTRAR LA NUBE ORIGINAL DEL PUNTO DE EXTRACCIÓN	36
FIGURA 31- DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE GRANULOMETRÍA Y ESTRATEGIA DE CARGA.....	37
FIGURA 32- EJEMPLO DE DOWNSAMPLING SOBRE UNA NUBE DE PUNTOS REPRESENTANDO UNA MESA.....	37
FIGURA 33- EJEMPLO DE NORMALES CALCULADAS SOBRE NUBE DE PUNTOS	38
FIGURA 34- REPRESENTACIÓN VISUAL DE NORMALES EN EL EJE X DE LA NUBE DE PUNTOS	40
FIGURA 35- REPRESENTACIÓN VISUAL DE NORMALES EN EL EJE Y DE LA NUBE DE PUNTOS	40
FIGURA 36- REPRESENTACIÓN VISUAL DE NORMALES EN EL EJE Z SOBRE NUBE DE PUNTOS	40
FIGURA 37- REPRESENTACIÓN VISUAL DE CURVATURA DE LA NUBE DE PUNTOS	40
FIGURA 38- REPRESENTACIÓN VISUAL DE LAS INTENSIDADES DE LA NUBE DE PUNTOS	41
FIGURA 39- FOTO REAL DE LA MAQUETA DEL PUNTO DE EXTRACCIÓN	42
FIGURA 40- RESULTADO DE LA CONDITIONAL SEGMENTATION EN DONDE SE OBTIENEN LOS BORDES DE LAS ROCAS	42
FIGURA 41- OBTENCIÓN DE LOS VÉRTICES DE LA ZONA CONVEXA QUE CONTIENE LA ROCA	42
FIGURA 42- RESULTADO FINAL INCLUYENDO EN LA ROCA TODA LA ZONA CONVEXA QUE LA RODEA.....	42
FIGURA 43- A LA IZQUIERDA EL RESULTADO SIN FILTRO DE VOLUMEN Y AL A DERECHA CON UN MÍNIMO DE VOLUMEN IGUAL A 0.001	43
FIGURA 44- EJEMPLO DE LÍNEA DE CARGUÍO ENTREGADA POR EL ALGORITMO	44
FIGURA 45- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 1	47
FIGURA 46- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 1	48
FIGURA 47- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 2	49
FIGURA 48- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 2	49
FIGURA 49- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 3	50
FIGURA 50- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 3	50
FIGURA 51- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 4	51

FIGURA 52- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 4	52
FIGURA 53- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 5	53
FIGURA 54- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 5	53
FIGURA 55- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 6	54
FIGURA 56- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 6	55
FIGURA 57- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 7	56
FIGURA 58- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 7	56
FIGURA 59- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 8	57
FIGURA 60- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 8	58
FIGURA 61- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 9	59
FIGURA 62- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 9	59
FIGURA 63- VISTA SUPERIOR (IZQ) Y FRONTAL (DER) DEL EXPERIMENTO 10	60
FIGURA 64- VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO DEL ALGORITMO EN PRUEBA 10	61
FIGURA 65- MAQUETA CON ROCAS HÚMEDAS	62
FIGURA 66- INTENSIDADES MEDIDAS EN LA MAQUETA HÚMEDA (IZQ) Y SECA (DER).	63
FIGURA 67- EXPERIMENTO DE POLVO REALIZADO CUBRIENDO LA MAQUETA Y AGITANDO GRAVILLA DENTRO DE ESTA.	64
FIGURA 68- NUBE DE PUNTOS OBTENIDAS EN AMBIENTE CON POLVO, A LA IZQUIERDA PRIMER ECO Y A LA DERECHA ÚLTIMO ECO.	65
FIGURA 69- RESULTADO CON UN TIEMPO DE 20 SEGUNDOS	65
FIGURA 70- RESULTADO CON UN TIEMPO DE 15 SEGUNDOS	66
FIGURA 71- DOS RESULTADOS USANDO UN TIEMPO DE 8 SEGUNDOS	67
FIGURA 72- ZOOM SOBRE LA ROCA EN LA QUE FALLO EL ALGORITMO, DONDE SE MARCA CON ROJO LA CAUSA DE ESTA.	67
FIGURA 73- GEOMETRÍA PARA LA OBTENCIÓN DE NÚMERO DE PUNTOS POR EL LÁSER	68

Índice de tablas

TABLA 1- MEDIDAS LHD A ESCALA	20
TABLA 2-MEDIDAS FINALES DE LA MAQUETA DEL PUNTO DE EXTRACCIÓN	22
TABLA 3-PARÁMETROS DE LA RED ESTABLECIDA PARA COMUNICAR EL LÁSER Y EL COMPUTADOR	28
TABLA 4- ÁREA CORRESPONDIENTE A LAS ROCAS	46
TABLA 5- RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 1	48
TABLA 6- RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 2	49
TABLA 7- RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 3	51
TABLA 8- RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 4	52
TABLA 9- RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 5	54
TABLA 10- RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 6	55
TABLA 11-RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 7	57
TABLA 12- RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 8	58
TABLA 13- RESULTADOS NUMÉRICOS PRUEBA 9	60

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 Motivación

La industria minera en Chile fue responsable del 14,2 % del PIB chileno en el año 2012 [1], siendo el principal producto el Cobre [2]. Chile es el mayor productor de cobre en el mundo, satisfaciendo el 36 % del mercado mundial, y cuenta con el 28 % de las reservas mundiales de cobre [3].

La robótica y la automatización ha tenido un gran impacto en la industria de la minería en el país, aumentando sustancialmente la productividad como también retirando trabajadores de peligrosas tareas en faena y disminuyendo los accidentes mortales. Es por ello que hoy en día en Chile se invierten cantidades importantes de dinero para poder desarrollar nuevas y mejores soluciones automatizadas para los procesos mineros.

Uno de los procesos mineros importantes que se ha logrado automatizar parcialmente es el de extracción de mineral en minas subterráneas. Para la explotación de estas minas se utiliza el método de Block Caving, que consiste en básicamente generar túneles subterráneos que permitan acceder a rocas las que se perforan y dinamitan para poder transportarlas por medio de un vehículo llamado Load Haul Dump, desde ahora LHD, y llevarlo a donde sea necesario para su posterior procesamiento.

Los LHD en un principio fueron operados manualmente, por lo que el operario tenía que estar en faena en condiciones adversas para la salud debido a las altas temperaturas y a un elevado nivel de vibraciones lo que ha generado un incremento significativo de enfermedades

osteo-musculares que llegan a ser incluso limitantes y permanentes. Es por ello que el primer paso fue tele operar este equipo, es decir operar a distancia y retirar a los trabajadores de faena. Actualmente existen soluciones completamente autónomas, pero en Chile se ocupa un LHD semiautónomo debido a que las soluciones de carguío autónomo no son muy efectivas en geometrías de los puntos de extracción que caracterizan el método de explotación subterráneo que mueve el mayor volumen de material en Chile (Block/Panel Caving) [4]. Los LHD semiautónomos es capaz de navegar por los túneles de manera autónoma, pero al momento de realizar el carguío requiere de un operador a distancia que lo haga por él.

Esta memoria se enmarca en el proyecto de automatización del proceso de carga de un LHD en el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile. El trabajo a realizar consiste en diseñar y implementar un sistema de medición granulometría del mineral en un punto de extracción.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar y desarrollar un sistema de medición de granulometría de mineral, utilizando la plataforma de desarrollo ROS para el proyecto de automatización de LHD.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos que se tienen son:

- Diseñar y construir una maqueta a escala 1:5 de un punto de extracción.
- Montar un láser marca en la maqueta de punto de extracción y actuarlo por medio de un servo motor para obtener un modelo tridimensional del punto.
- Obtener una nube de puntos que represente el punto de extracción utilizando ROS, y las mediciones del láser.
- Desarrollar un algoritmo de segmentación capaz de diferenciar material fino de rocas considerables, medir estas rocas y entregar su posición.
- Caracterizar el desempeño de este algoritmo mediante pruebas.

- Entregar una recta en donde se recomiende iniciar el carguío del LHD
- Realizar pruebas con las rocas húmedas, con polvo en el ambiente y en estado normal para caracterizar el rendimiento del algoritmo en distintos ambientes.

1.3 Hipótesis

Es posible utilizando las nubes de punto obtenidas por las mediciones laser, desarrollar un algoritmo capaz de encontrar la granulometría de las rocas no consideradas fino en el punto de extracción.

1.4 Estructura del documento

El segundo capítulo busca contextualizar el proyecto y presentar la plataforma de trabajo en el que se desarrolla. En el tercer capítulo, se presenta la metodología a utilizar y se muestra la implementación del proyecto. El cuarto capítulo presenta los resultados y análisis de las pruebas realizadas al sistema. Finalmente en el quinto capítulo se exponen las conclusiones de este trabajo.

Capítulo 2

2 Contextualización

Este capítulo consiste en tres partes, la primera en donde se busca contextualizar al lector con respecto al proceso minero en el que se enmarca el proyecto, la segunda parte se describe la plataforma de trabajo utilizada para el desarrollo de este trabajo y la tercera consiste en una serie de conceptos técnicos que son necesarios saber para el entendimiento de este trabajo.

2.1 El proceso minero

En esta sección se explica el proceso minero en el que se enmarca esta memoria y todos los elementos que lo componen.

2.1.1 Load Haul Dump

El Load Haul Dump (LHD), en español Cargar Acarrear Descargar, es una máquina especializada de carga construida para la minería subterránea. Los LHD, tal como lo dicen su nombre son utilizados para cargar mineral, como carbón o cobre, con una pala, transportarlo por la mina subterránea y depositar el contenido en donde sea necesario para seguir el procesamiento del este.

Este aparato se encuentra presenta en más del 75% de las minas subterráneas alrededor del mundo, y existen en variados tamaños pudiendo ser ocupadas tanto en túneles subterráneos grandes o pequeños. Puede variar dependiendo del modelo y marca, pero en general consiste de una pala que puede rotar, un motor, un tubo de escape, ruedas y sistemas de ventilación. Además tiene una forma larga y angosta, esto debido a que los túneles en minas subterráneas son angostos. Un LHD marca CAT para minas subterráneas se puede ver en la Figura 1.

Dentro de la operación del LHD, hay cuatro maneras distintas:

- Automatizado: Toda la operación es realizada por un computador.
- Semiautónomo: El carguío es realizado por el operador a distancia, mientras que la ruta se hace de manera autónoma.

- Tele-comandado: Toda la operación del LHD es realizado desde una estación de control por un operario.
- Manual: Un operador dentro de la cabina del LHD realiza las labores



Figura 1- LHD CAT desde dos perspectivas cargando mineral

2.1.2 Panel Caving Convencional con traspaso vía equipo LHD

El panel caving convencional con traspaso vía equipo LHD es el nombre del método de explotación minera utilizado para la explotación de mineral en minas subterráneas, donde el transporte es realizado por medio de múltiples equipos tipo LHD. Es de vital importancia para comprender esta memoria conocer este proceso, es por ello que a continuación se explica.

Este método se separa en cuatro niveles distintos dependiendo de la tarea a realizarse, como se ve en la Figura 6, el nivel de hundimiento, de producción, de reducción y de transporte.

El primero, de hundimiento, es donde se realizan perforaciones con una geometría tal que permiten, vía su detonación una vez llenas éstas con explosivos, generar un corte basal suficientemente grande de un bloque de roca, que por acción gravitacional colapsa de manera controlada

El segundo, de producción es donde va decantando el material de la Batea. Para poder acceder se generan una serie de túneles, los que se llaman calles, y luego un último túnel que va directamente hacia donde está el material, estos son llamados zanjas. La batea colecta el mineral quebrado que cae por efecto de la gravedad, donde sus dos puntos extremos, los que pueden ser accedidos por las maquinas, son llamados puntos de extracción o puntos de carguío. Los LHD cargan el material en estos puntos y una vez cargado el material en el balde de la máquina, este es transportado hasta el punto de vaciado o de destino.



Figura 2- Foto de punto de extracción

El tercer nivel, de reducción, es el que recibe el material por los piques colectores del nivel anterior. En este nivel se tienen rejillas, llamadas parrillas, las que actúan como clasificadores de tamaño y no permiten pasar rocas sobre un cierto tamaño predefinido y reducirlas, en general, utilizando equipos electrohidráulicos de percusión (martillos picadores) u otros como chancadores. El objetivo de esta reducción es aumentar la eficiencia de los sistemas de manejo de materiales aguas abajo en el proceso.



Figura 3-Martillo picador utilizado para reducir rocas que quedan atrapadas en las parrillas

El cuarto y último nivel, es el de transporte. En este circula el ferrocarril en cuyos carros se carga el mineral, para ser transportado hacia la planta ubicada en la superficie. Este es el túnel de mayor tamaño en la mina y sus dimensiones son de 5m de ancho por 6m de alto.

El mineral se mantiene en los piques de traspaso los cuales se mantienen llenos, luego es vaciado a los carros mediante un sistema de cierre hidráulico que está ubicado en la parte inferior de dichos piques, conocido como buzón. El ferrocarril es cargado en movimiento de manera que la operación se realiza en forma continua y cada carro transporta aproximadamente 80 toneladas, siendo el tren completo capaz de transportar unas 1300 toneladas en cada viaje.

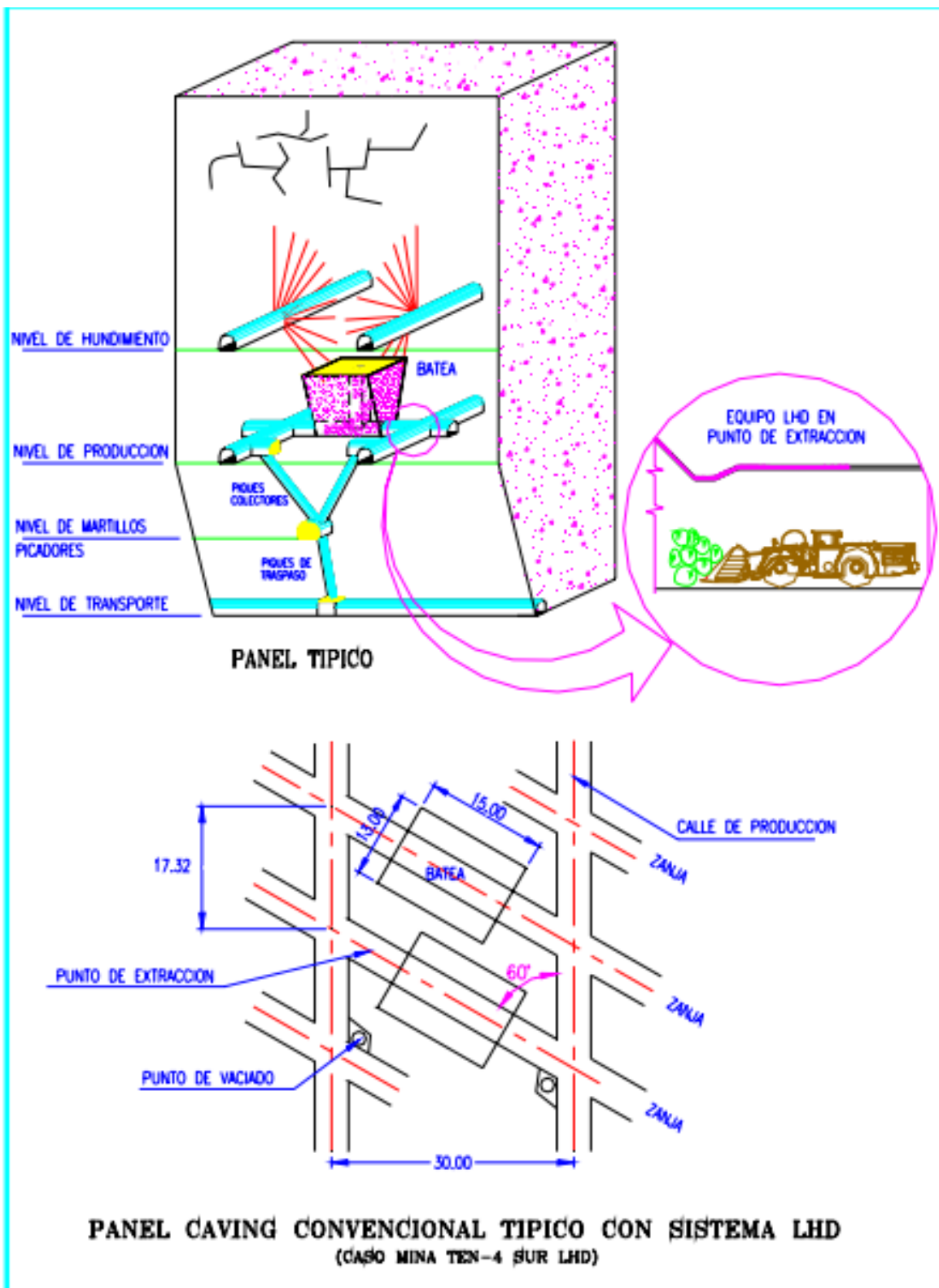


Figura 4- Figura ilustrativa del proceso Panel Caving convencional típico con sistema LHD

2.2 Estado del arte de la Automatización de LHD en la minería

De manera de ser competitivos a nivel mundial las distintas empresas mineras han invertido en la automatización dentro de los procesos mineros, reduciendo los costos de operación y retirando a sus trabajadores, buscando con esto aumentar la productividad, reducir los costos y evitar generar enfermos profesionales.

En la mina El Teniente, referente mundial en automatización en la minería, se ha optado por utilizar LHDs semiautónomos. Esto significa que la ruta es realizada de manera autónoma por un LHD, mientras que el proceso de carguío se realiza por medio de tele-operación por un operario. El proceso de carguío aún no se logra automatizar satisfactoriamente.

Dentro de las características de operar con equipos semiautónomo están las siguientes [5]:

- Un operador puede operar hasta tres LHDs distintos.
- El tiempo de ciclo puede alcanzar un 30% menos.
- El costo de adquisición de la automatización es de un 40% mayor que una manual.
- Se requiere mano de obra especializada; en el taller mecánico se necesita un ing. Eléctrico.
- Costos de servicio y piezas es menor en equipos semiautónomos.
- Desgaste de neumáticos es menor en equipos semiautónomos.
- Costos de cuchara/ consumo de combustible/ consumo de lubricantes y aceites igual que el equipo operado manualmente.
- Un operador puede aprender a manejar el equipo en días mientras, que en operación manual puede tomar meses.
- La zona en que trabaja el equipo se debe aislar por medio de puertas o sensores (sistema de tags).

- La máquina se apaga si encuentra un obstáculo, pero los sistemas actuales no pueden detectar personas a más allá de 20 metros.

El siguiente paso para lograr una completa automatización es realizar un carguío autónomo. Esta tarea resultaría trivial si la granulometría del material fuese uniforme y pequeña, pero en realidad debido al proceso de explotación block caving explicado anteriormente, se produce una granulometría muy variada con rocas lo suficientemente grandes para dificultar la automatización de este proceso.

2.3 Proyecto de automatización LHD en AMTC

Esta memoria se enmarca en el proyecto de automatización de un LHD en el Advanced Mining Technology Center de la Universidad de Chile. Primero se procederá a introducir la institución como tal, explicar el proyecto completo y explicar el papel de esta memoria en el proyecto.

2.3.1 El AMTC

El Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC por su sigla en inglés) fue creado en marzo de 2009, luego de ser seleccionado por el Programa de Investigación Asociativa de CONICYT en el marco del Programa de Financiamiento Basal para centros científicos y tecnológicos de excelencia.

El AMTC ha logrado consolidar e integrar las actividades de cinco grupos de investigación, con vasta experiencia en la formación de investigadores y profesionales de primer nivel, así como en el desarrollo de actividades científicas de excelencia. Éstos son: Exploración y Modelamiento de Yacimientos, Diseño y Planificación Minera, Procesamiento de Minerales y Metalurgia Extractiva, Automatización en Minería, Agua y Sustentabilidad Ambiental. Asimismo, el AMTC ha logrado establecer importantes acuerdos de cooperación e iniciativas conjuntas de investigación con centros científicos y tecnológicos de clase mundial.

Entre sus socios cuenta con la participación de Codelco y BHP Billiton Metales Base, cuyos representantes son miembros de su Directorio, y un grupo humano compuesto por 167 investigadores.

En la actualidad, el Centro posee un edificio institucional de cuatro plantas (1.232 m²), las cuales albergan las oficinas centrales, diez laboratorios de investigación y áreas de trabajo colaborativo.

2.3.2 Automatización de LHD

El proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de carguío autónomo para equipos LHD que operan cargando material de granulometría variable, como la que se encuentra presente en los puntos de extracción de la minería de block caving. El sistema será capaz de estimar continuamente la interacción que existe entre el equipo LHD, principalmente su pala, y el material a ser cargado; controlando de manera adaptiva la trayectoria óptima de movimiento de la pala con el fin de asegurar que se cumpla un mínimo aceptable para el tonelaje de material extraído, con un mínimo riesgo para la operación y un reducido impacto en la degradación de sus componentes. Para tales efectos, el sistema utilizará información medida en línea tanto acerca del estado (o condición) del equipo (por ejemplo, presión en los pistones hidráulicos), como del material a ser cargado (por ejemplo, su granulometría). El sistema de carguío será validado en una primera etapa en el equipo LHD a escala y en una segunda etapa en un equipo LHD real.

2.3.3 El aporte de esta memoria en el proyecto

Un punto de partida para la automatización del carguío es encontrar un punto en donde introducir la pala del LHD para comenzar el carguío. Es por ello que en esta memoria se busca calcular por medio de mediciones laser tridimensionales la granulometría del punto de extracción, y a partir del tamaño de las rocas y su configuración en el punto de extracción entregar una instrucción en donde comenzar el carguío.

2.4 Plataforma de trabajo

En esta sección se presentan los principales elementos de Hardware y Software utilizados en el desarrollo de esta memoria.

2.4.1 Hardware

En esta sección se introducen los principales elementos de Hardware que se utilizan en este trabajo.

Lidar

La captura de datos se logra utilizando sensores láser del tipo LIDAR (acrónimo del inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging). Esta tecnología permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser continuo, la distancia al objeto se determina midiendo la diferencia de fase entre la señal emitida y reflejada.

Esta tecnología es utilizada en variados rubros como lo son la Agricultura, Arqueología, vehículos autónomos, Biología, geología, ciencia de los suelos, Meteorología, desarrollo de equipo militar y más. En la Figura 9 y 10 se pueden ver un robot con un Lidar montado generando un mapa y un mapa de cosecha utilizado en agronomía.



Figura 5- Robot con Lidar montado generando mapas

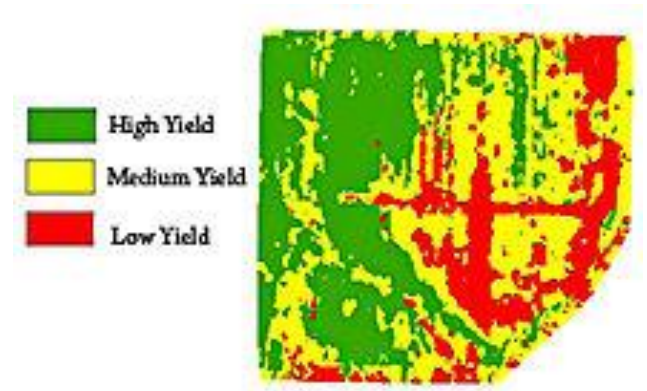


Figura 6- Robot con Lidar montado generando mapas

Debido a que este proyecto fue propuesto por el AMTC, es requisito utilizar el láser **Hokuyo UTM-30LX-EW¹** el que tiene las siguientes características:

- Detección Multi-Eco. El Multi-Eco es una característica que le permite al laser detectar multiples reflexiones de un mismo haz de luz, que por ejemplo pudo haber atravesado parcialmente una capa de polvo entregando una primera reflexión por este y una segunda por lo que haya detras del polvo obteniendo dos distancias.
- Rango de detección de 100 milímetros a 30 metros con una resolución de 1 milímetro.
- Ventana de escaneo de 270° con una resolución angular de 0,25°.
- Funcionamiento a 12V con un consumo de corriente de 700ma.
- Peso de 370 gramos(Sin incluir el peso del cable)
- Interfaz Ethernet
- IP67

¹ <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/products/utm-30lx-ew/>

Este láser entrega valores de distancia por cada uno de sus steps angulares, es decir para el ángulo 0 entregara una distancia, para el ángulo 0,25 otra distancia y así sucesivamente hasta llegar al ángulo 270.

Servo motor

Un servomotor es un motor capaz de ubicarse en una posición dada dentro de su rango de operación. El motor tiene circuitos de control y un potenciómetro (una resistencia variable), esta es conectada al eje central del servo motor. Este potenciómetro permite a la circuitería de control supervisar el ángulo actual del servo motor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor se mantiene en su lugar, si el circuito chequea que el ángulo no es el correcto, el motor girará en la dirección adecuada hasta llegar al ángulo correcto. Esta posición, junto con otros parámetros como la velocidad y torque, son entregados por medio de una señal digital.

Debido a que este proyecto fue propuesto por el AMTC, es requisito utilizar el servo motor **Dynamixel RX-28²** el que tiene las siguientes características:

- Holding torque de 28,3kg-cm a 12 Volts.
- Velocidad de 0,167 sec/60° a 12 Volts.
- Voltaje de operación entre 11 y 12 Volts, con 12 Volts recomendado.
- Angulo de operación de 300 °.
- Comunicación Serial Asíncrona RS485 (7343bps a 1Mbps).
- Feedback sobre la posición del eje, temperatura, Voltaje de entrada y Torque.

2.4.2 Software

En esta sección se introducen las principales herramientas de software que se utilizan en este trabajo.

Robotic Operating System (ROS)³

Robot Operating System (ROS) es un framework flexible utilizado para escribir software de robots. Es básicamente un compilado de herramientas, librerías y convenciones que apuntan a

² http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/rx_series/rx-28.htm

³ <http://www.ros.org/>

simplificar la tarea de crear conductas complejas para los robots, a través de distintas plataformas robóticas. ROS es compatible con C++ y Python.

Este framework fue creado para incentivar el desarrollo colaborativo de software para robótica. Por ejemplo puede haber un laboratorio con expertos en mapeo de interiores y este laboratorio podría contribuir al mundo con un sistema de clase mundial para producir mapas de interiores. Al mismo tiempo otro grupo podría tener expertos para navegar utilizando mapas, otro grupo puede haber descubierto algoritmos de visión para reconocer pequeños objetos en un desorden. Ros fue diseñado específicamente para grupos como este, para que colaboren y construyan en base al trabajo de otros.

Las tareas realizadas por robots utilizando este framework son tan variadas, como subir escaleras, retirar platos de lavavajillas, servir líquidos a visitas e incluso el desarrollo de automóviles autónomos, como el de la Universidad de Texas que se ve en la Figura 7. Otro de los robots famosos con los que se usa este framework es el NAO que se muestra en la Figura 6, este robot se utiliza en la World Cup donde juegan un torneo mundial de fútbol robótico.

De esta manera se procede a explicar los conceptos claves para comprender el funcionamiento de ROS:

Nodes: Son un proceso en el que se realiza el procesamiento. Ejecutan tareas y se comunican entre ellos gracias a la red de ROS. Se registran en la red por medio de un ID único y tienen una lista de tópicos y servicios que el nodo quiera usar para mandar mensajes y recibir mensajes.

Master: El maestro es un nodo especial que se inicia con la red. Este se ocupa del registro, suscripción y desconexión de cada nodo en la red y conecta los tópicos y servicios para que los mensajes puedan llegar a su destino. El maestro también guarda los parámetros relativos al servidor.

Messages: Es una estructura de datos simple que contiene campos de distinto tipo y se utiliza para enviar información. En ROS se pueden utilizar boolean, (un)signed int 8/16/32 bits, string, y dos tipos específicos de ROS, time y duration.

Topics: Los tópicos son un medio de transporte para los mensajes. Un nodo publica por medio de un tópico, y para poder escuchar se suscribe a otro tópico. No hay un límite de publicadores ni suscriptores a un tópico específico. Cabe destacar que aunque no haya nadie suscrito a un tópico este sigue publicando.

Services: Son una alternativa a los tópicos que no utiliza el sistema de publish/subscribe, pero utiliza el modelo request/response. Esto significa que un nodo que utiliza el servicio solo recibe la información en la respuesta cuando se hace la solicitud. Los servicios son ofrecidos por nodos y solamente pueden responder una solicitud al mismo tiempo.



Figura 7- Automóvil autónomo desarrollado en la University of Texas utilizando ROS



Figura 8- Robot humanoide Nao, también utilizado con ROS

Point Cloud Library (PCL)

En la implementación y desarrollo de esta memoria se ocupa la librería Point Cloud (PCL) [6]. PCL es una librería independiente de gran escala y abierta para procesamiento de Figura y nubes de punto tanto 2D como 3D. Está disponible para Linux, Windows y Apple Mac OS X. Esta librería contiene numerosos algoritmos incluyendo filtrado, estimación de características, reconstrucción de superficies, registración de nubes, ajuste de modelos y segmentación. Estos algoritmos pueden ser usados por ejemplo, para filtrar outliers de data ruidosa, juntar dos o más nubes de puntos tomadas en momentos distintas por sensores distintos, segmentar imágenes y nubes de puntos para reconocimiento de objetos y mucho más. Pcl está liberada bajo licencia BSD, por lo que es gratis para el uso comercial y de investigación.

En esta memoria se utilizara pcl en conjunto con ROS para el desarrollo del software, utilizando la documentación de pcl para la representación de las nubes de puntos y algoritmos de segmentación.

Un ejemplo de segmentación de objetos utilizando esta librería se muestra en la Figura 7. Otro ejemplo, esta vez de reconstrucción de superficie en base a point clouds se puede ver en la Figura 8.



Figura 9- Ejemplos de segmentación de objetos sobre una mesa utilizando la librería PCL



Figura 10- Reconstrucción de una superficie en base a una nube de datos utilizando algoritmos de pcl

2.5 Conceptos técnicos

En esta sección se explican conceptos técnicos importantes para el correcto entendimiento de esta memoria.

2.5.1 Granulometría

La granulometría es básicamente una medida del tamaño de las rocas dentro de un grupo. Existen variadas formas de medirla pero la más ampliamente utilizada en minería, es hacer pasar el mineral por variados filtros, y desarrollar un histograma como el de la Figura 11, dependiendo de la cantidad de rocas que quedan en el filtro.

Para esta memoria en particular, la definición de granulometría se utilizará como el tamaño de las rocas que conformen el material a ser recogido por el LHD y sus largos serán guardados como dato de entrada relevante en el carguío autónomo. Cabe destacar que para la memoria sólo es de interés aquellas rocas que puedan producirle problemas al LHD para la carga, por lo que rocas pequeñas serán ignoradas en el histograma de granulometría.

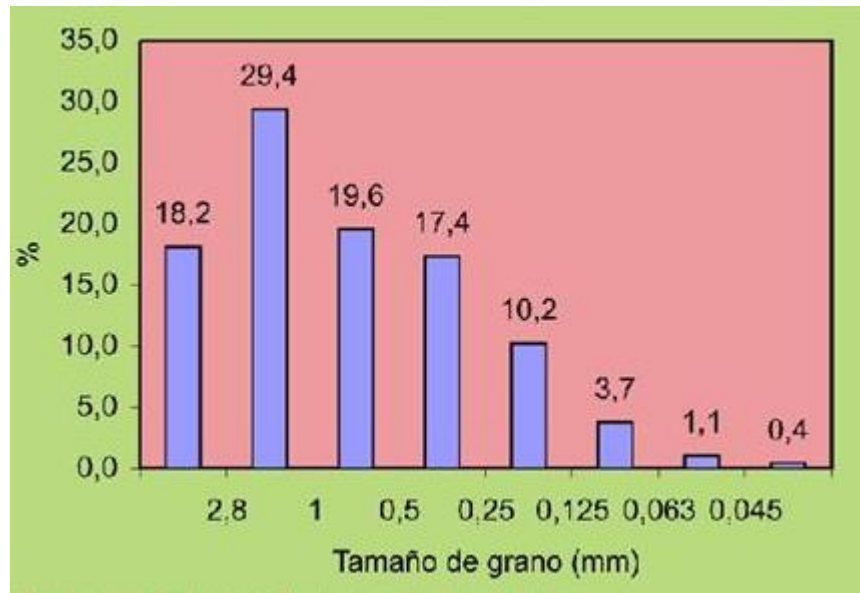


Figura 11- Histograma ejemplo de granulometría

2.5.2 Point Cloud

Un Point Cloud, nube de puntos en español, es una estructura de datos para representar un conjunto de puntos multi dimensionales, y por lo general representa data tridimensional. En una nube de datos de tres dimensiones, los puntos contienen al menos las coordenadas X, Y y Z en algún sistema de coordenadas específico. Cuando se quiere incluir cualquier característica extra de un punto como el color, intensidad, normales, etc. Se incluye y el point cloud aumenta si dimensionalidad.

Las nubes de datos pueden ser obtenidas de sensores tales como cámaras estéreo, escáner 3D, Laser Rangefinder o el Microsoft Kinect. Un ejemplo de nube de datos representando un dragón y un conejo, puede ser visto en la Figura 12.

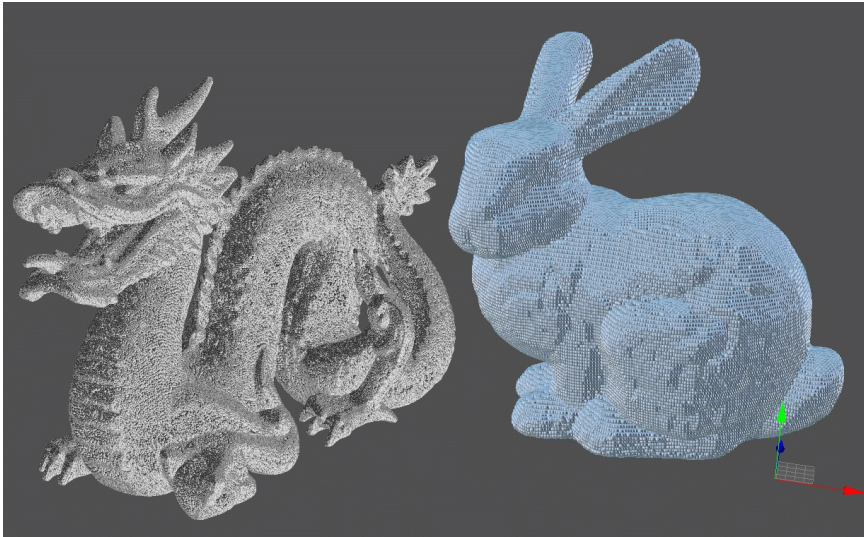


Figura 12- Representación en nube de datos de un dragón y un conejo

Capítulo 3

3 Metodología e implementación de sistema de medición de granulometría

3.1 Metodología

Para el desarrollo de este proyecto lo primero es construir una maqueta a escala 1:5 del punto de extracción, para esto se estudian documentos oficiales que contienen las dimensiones de puntos de extracción en Chile y se le consulta a expertos en minería sobre que material representativo se puede utilizar para el llenado de esta.

El siguiente paso es montar un láser y actuarlo por medio de un motor, para esto se debe encontrar la posición óptima que entregue la mayor cantidad de medidas en el menor tiempo posible, sin sacrificar calidad.

Para la implementación del algoritmo de determinación de granulometría se deben estudiar los distintos algoritmos de segmentación en tres dimensiones que existen, determinar cuál es el más apropiado para este trabajo, realizar pruebas para sintonizar los parámetros del algoritmo y hacer las mejoras posibles para disminuir el error en la detección y determinación del largo de las rocas.

Finalmente se debe comprender el proceso de carga del LHD, y entender sus dificultades, para elaborar una estrategia de carguío, a partir de los resultados anteriores.

3.2 Implementación del sistema de medición de granulometría

En esta sección se explica paso a paso como se implementó el sistema de adquisición de granulometría y la recomendación de punto de inicio de carga.

3.2.1 Diseño y construcción de la maqueta de punto de extracción

Determinación de dimensiones

Por requerimiento del proyecto se debe construir una maqueta a escala del punto de extracción 1:5, de manera de mantener la relación de escala con el equipo LHD que se tiene en el

Laboratorio de Robótica de campo del AMTC. El LHD a escala se puede ver en la Figura 13 y sus dimensiones son las que se indican en la tabla 1.



Figura 13- LHD a escala del AMTC

Tabla 1- Medidas LHD a escala

Medida	Largo [cm]
Ancho	51 [cm]
Alto	41 [cm]
Largo	103 [cm]

Las medidas a determinar para la construcción de esta maqueta son cinco, y se ven en la Figura 14 y 15.



Figura 14- Modelo 3D mostrando las medidas necesarias de la maqueta



Figura 15-Modelo 3D mostrando las medidas necesarias de la maqueta

Para determinar las medidas que debe tener esta maqueta se utilizaron las “Recomendaciones prácticas” de la clase Sistemas de Carguío [4]. En esta clase las recomendaciones de medidas nos entregan las ecuaciones número 1 y 2 para el ancho y alto de la maqueta:

$$(3.1) \quad \text{Ancho} = \text{ancho del LHD} + 1.5[m]$$

$$(3.2) \quad \text{Alto} = \text{Altura del LHD} + 1.3[m]$$

Estas ecuaciones se pueden escalar dividiéndolas por 5, quedando L5 igual a 81 [cm] y L3 igual a 67 [cm].

Para determinar L2, el largo del túnel, se asumió un ángulo de reposo del material de 37° , valor que se encuentra en el rango medio de 35 y 40° , valores utilizados en minería subterránea para diseñar este tipo de infraestructura [5], por lo que el largo abarcado por este material será de aproximadamente 90 [cm], y debido a que es requerimiento del proyecto que el LHD quede completamente dentro de la maqueta y tenga espacio para acelerar, por lo que se optó por construirla con un largo L2 igual a 205[cm].

Para la determinación de L1 no se encontraron indicaciones claras en la bibliografía, por lo que se tomó como referencia el largo de la pala del LHD de manera que si este llega hasta la entrada de la caída de material, no choque con el fondo. De esta manera L1 quedo con un largo de 45 [cm].

Finalmente es necesario determinar el alto de la batea, L4, que es donde se acumulara el material no visible. Para esto no se encontraron criterios claros, pero se espera poder palear al menos dos veces antes de que el punto necesite ser rellenado, por lo que considerando que el volumen de la pala es de aproximadamente 70 centímetros cúbicos y dado que el ancho ya está definido, se necesita un volumen aproximado de 140 centímetros cúbicos. Dado que el largo de esta sección en 45 [cm], da una altura de la batea de aproximadamente 30 [cm].

Las dimensiones finales luego de redondeos necesarios para aspectos constructivos, son los de la tabla 2.

Tabla 2-Medidas finales de la maqueta del punto de extracción

Medida	Largo [cm]
L1	46
L2	250
L3	67
L4	30
L5	83

Material del punto

Para determinar qué material utilizar para rellenar la maqueta, que sea representativo de la minería real y con una granulometría similar pero escalada, se consultó a expertos del laboratorio de Block Caving de la Universidad de Chile. El material que recomendaron usar tanto por su accesibilidad y representatividad de la mina, es grava normal. Además para representar rocas grandes dentro del punto, se recogieron rocas con simetría similar, es decir quebradas y no redondeadas como las rocas de río.

Para la construcción de la maqueta misma, se utilizaron perfiles de hierro cuadrados de 30[mm] pintados para evitar su oxidación, con los que se construyó la estructura exterior que se puede ver en la Figura 16. Luego se apernaron paneles de Terciado estructural de 9 [mm] como se ve en la Figura 17 y se pintaron de color plomo.



Figura 16- Estructura metálica de la maqueta



Figura 17- Estructura metálica con los paneles de madera apernados

La maqueta terminada se puede ver en la Figura 18.



Figura 18- Maqueta del punto de extracción terminada

3.2.2 Montaje y actuación del laser

A continuación se explican tanto el montaje como la actuación del láser en este trabajo.

Montaje

Primero es necesario definir un sistema de referencia global, en el que se representaran las mediciones tomadas por el láser, y ayudarán a entender el montaje de este. Se optó por poner este sistema de referencia en la entrada del punto y exactamente al medio de este, tal como se muestra en la Figura 19.

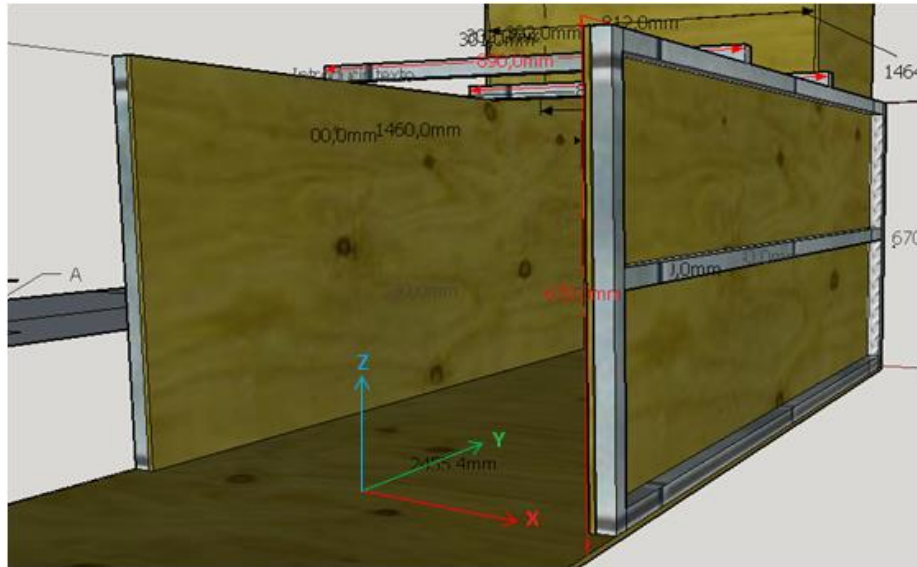


Figura 19- Sistema de referencia global del sistema

El segundo sistema de referencia que hay en el sistema es el del láser, el eje Y apunta exactamente hacia al frente de este y el Z hacia arriba. Se puede ver en la Figura 20.



Figura 20- Sistema de referencia del laser

Para obtener una representación tridimensional del punto de extracción es necesario obtener una serie de planos entregados por el láser, en distintas posiciones. Para ello se actuará el láser por medio de un servo motor. Debido a requerimientos del cliente, el láser debe estar fijado al techo de la mina, para eso se monta una barra horizontal en la entrada como se ve en la Figura 18.

El láser se puede actuar de dos maneras distintas para obtener los planos necesarios, montándolo con su eje longitudinal horizontal en 90 grados sobre su eje Y e haciéndolo girar sobre el eje Z global, como se ve en la Figura 21 o sin rotación y hacerlo girar sobre el eje X como se ve en la Figura 22.

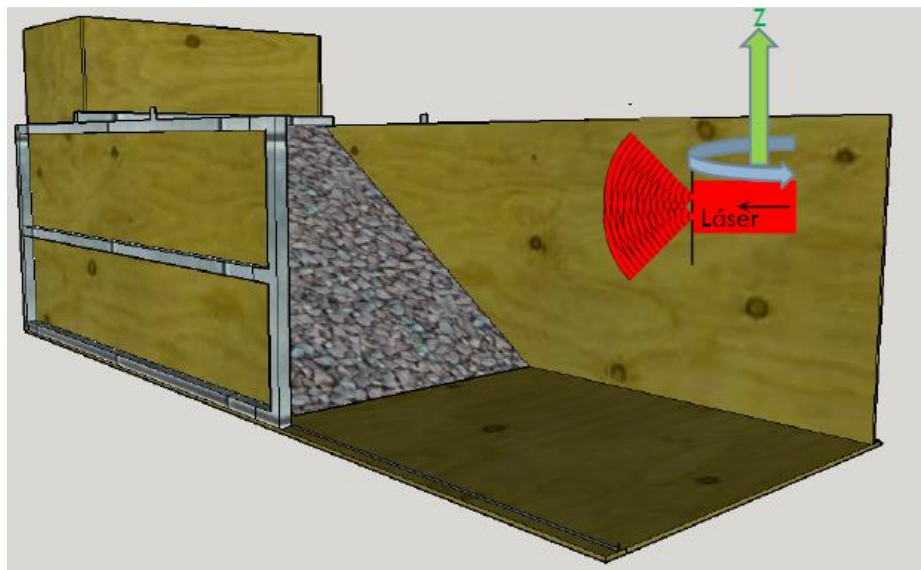


Figura 21- Primera configuración posible del láser, girando sobre el eje Z

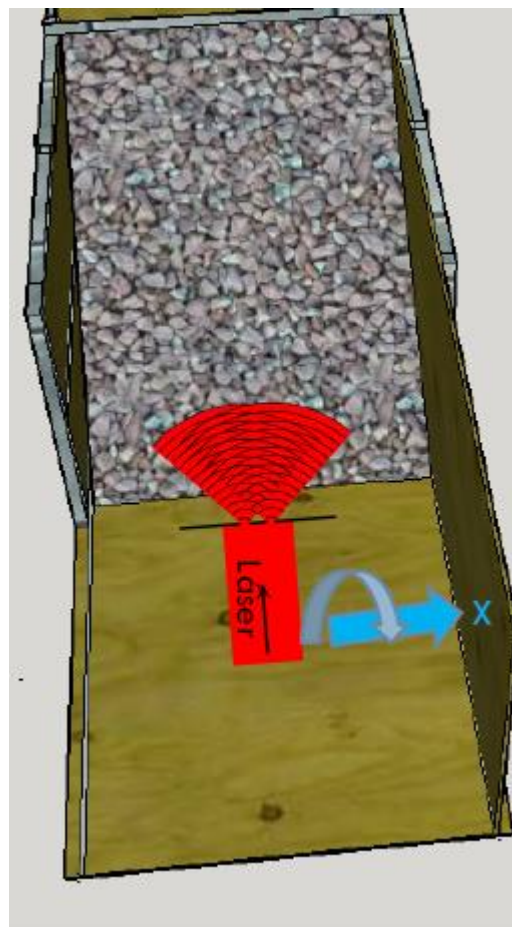


Figura 22- Segunda configuración para montar el láser, girando sobre el eje X

Recordar que el criterio principal a utilizar para definir aquella configuración es la que pueda generar la máxima cantidad de escaneos completos en la misma cantidad de tiempo. Dado que este tiempo está únicamente definido por la cantidad de grados que debe moverse el motor, es necesario calcular los grados que debe girar para generar un escaneo en cada configuración.

Dado que el láser se montara en la entrada y que el material tiene un ángulo de reposo de 37° , lo que lo hace llegar a aproximadamente 105 [cm] del láser, y el láser queda montado a 62[cm], si se actúa el láser girando sobre el eje X los motores deberán girar 59.4° para un escaneo completo. Si se actúa sobre el eje Z, considerando que el ancho de la maqueta es 83[cm], tendrán que girar 41.3° .

Dado estos resultados, se opta por hacerlo girar sobre el eje Z, el láser montado se puede ver en la Figura 23



Figura 23- Láser montado de manera que gire sobre el eje Z.

Notar que debido a indicaciones del fabricante, el láser debe montarse sobre una superficie de aluminio de $400[cm^2]$ como disipador de calor.

El láser además se conectó a una fuente de poder de 12[V] como se indica en el Datasheet.

Actuación del láser por medio de un servo motor

Para la actuación es necesario comunicarse con los servo motores con ROS, para ello se utiliza el Package *dynamixel_motor* [7].

Comunicación con el servo motor

Lo primero es generar la conexión con el bus del servo motor, para esto se sigue el tutorial “ConnectingToDynamixelBus” [8] y se obtiene la ID del servo motor, que en este caso es 101.

El segundo paso es crear un controlador del motor, para esto se sigue el tutorial “Creating a joint controller” [9], en donde dentro de los parámetros se debe poner la ID obtenida anteriormente, y la velocidad de giro requerida.

Desde ahora el servo motor “escuchará” la posición publicada en el tópico “/tilt_controller/command”, el que recibe un mensaje del tipo “std_messages/Float64” con el ángulo en radianes, y se moverá con la velocidad configurada anteriormente hasta este punto. Además, una serie de tópicos con información del servo motor se empiezan a publicar. Para este trabajo es importante el tópico “/tilt_controller/state” ya que publica variables relacionadas con el estado actual como el voltaje, temperatura, torque y posición del servo motor, por medio de un mensaje del tipo “dynamixel_msgs/JointState”.

Límites de giro del servo motor

El siguiente paso es determinar entre qué ángulos debe moverse el servo motor. Para esto, basta con definir visualmente límites en el punto de extracción, los que se indican con líneas rojas en la Figura 24.



Figura 24- Límites del movimiento del servo motor destacados en rojo

Calibración del servo motor

Una vez determinados los límites debiese bastar con indicarle al motor girar entre estos dos ángulos, pero primero se debe calibrar el motor. Para la calibración es necesario entender con qué desfase del sistema de referencia global están los motores. Para esto se hace girar al motor hasta un ángulo conocido, se lee la posición interna del motor a partir del tópico “/dynamixel_msgs/JointState” consultando el campo “current_pos”, y se compara con el ángulo correspondiente al sistema de referencia.

Creación del nodo para mover el servo motor

El último paso es crear un nodo, *move_servo_speed.cpp*, que constantemente haga girar el servo entre estos dos ángulos publicando valores en el tópico. Este nodo se suscribe al tópico “/tilt_controller/state” leyendo la posición actual del motor consultando el campo “current_pos” y publica el ángulo deseado en “/tilt_controller/command”. Al inicializar publica como ángulo deseado el ángulo inferior, luego constantemente revisa en que ángulo está el motor y cuando llega a la meta, publica como posición deseada el ángulo superior. De esta manera el motor oscila constantemente entre los límites deseados.

3.2.3 Comunicación entre ROS y Láser

La conexión entre el computador y el láser se hace por medio de un cable Ethernet. Por lo que lo primero antes de lograr la comunicación es crear una red interna entre el láser y computador. La red se creó con los parámetros de la tabla 3.

Tabla 3-Parámetros de la red establecida para comunicar el láser y el computador

Interface	Ethernet(eth1)
IP Address	192.168.0.1
Broadcast Address	192.168.0.255
Subnet Mask	255.255.255.0

Para comunicar ROS con el láser se utiliza el package “urg_node” [10], los aspectos de este package relevantes para esta memoria se explican a continuación.

Package urg_node

Este package se utiliza para comunicar cualquier láser SCIP 2.2 con un computador. A continuación se explican sus parámetros y funcionalidades.

3.2.3.1 Parámetros

Los parámetros relevantes para la memoria que se deben establecer en este nodo son:

ip_address: Ya que la comunicación es por medio Ethernet en una red, el láser debe tener una dirección IP asignada para la comunicación. El IP address que se utiliza por default para el láser Hokuyo es "192.168.0.10".

ip_port: El puerto IP utilizado para la comunicación. Se usa el default, 10940.

frame_id: El sistema de referencia en el que se devuelven las medidas. Se utiliza el default, láser.

Publish_multiecho: Determina si el láser transmite en modo mutieco. Toma valores "true" para que transmita en modo multieco, o "false" para lo contrario. Para este proyecto se ocupa en "true".

Publish_intensity: Determina si el láser transmite valores de intensidad por cada punto. Debe configurarse en "true" si se desea recibir la información o "false" si no. Para este proyecto se ocupa en "true".

min_ang: Es el ángulo mínimo en radianes del que se quiere recibir información por medio del láser. Sus valores dependen del láser en cuestión y considera que el ángulo cero es el centro del láser, por lo que toma tanto valores negativos como positivos. En este proyecto se configura de manera de obtener sólo mediciones del área de interés.

max_ang: Es el ángulo máximo en radianes del que se quiere recibir información por medio del láser. Sus valores dependen del láser en cuestión y considera que el ángulo cero es el centro del láser, por lo que toma tanto valores negativos como positivos. En este proyecto se configura de manera de obtener sólo mediciones del área de interés.

3.2.3..2 Tópicos publicados

Los tópicos relevantes al proyecto que publica este package son los siguientes.

First: Cuando se utiliza un láser multieco, como es el caso en este proyecto, se publica el primer rayo que retorna del láser, es decir, la distancia más corta que detecta el láser. Se publica en un mensaje del tipo "*sensor_msgs/LaserScans*".

Last: Es el contrario a First, en un láser multieco representa el último rayo que retorna al láser y por lo tanto la distancia más lejana que se midió. Se utiliza por lo general para evitar que el polvo u otras condiciones medio ambientales interfieran con la medición.

La forma en que estos tópicos transmiten la información, es por medio de un arreglo del largo de steps del láser, en este caso 1080 steps , y en cada espacio del arreglo está la distancia que el láser detecto en ese step angular. Para este proyecto se utiliza principalmente el tópico Last, ya que es el menos afectado por las condiciones del medio, pero también se utilizará first para comparar rendimientos.

3.2.4 Creación de nube de puntos a partir de las mediciones láser

En esta sección se explicara el proceso de obtención de la nube de datos a partir de las mediciones entregadas por el láser, la que finalmente es filtrada para trabajar sólo en el área de interés.

Package Laser_assembler

Laser_assembler [11] es un package de ROS capaz de transformar una serie de lecturas crudas de un láser, en una nube de puntos.

La manera en que funciona laser_assembler se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 25 y es la siguiente:

- Se recibe una medición del láser, "scan", que representa un plano y que contiene las distancias medidas, y en que ángulo se tomó respectivamente. Estas mediciones se proyectan sobre un plano obteniendo una serie de puntos en coordenadas (x,y) en el sistema de referencia del láser.
- Se recibe información del sistema de referencia del láser por medio de un objeto tf de ROS y se transforman los puntos al sistema de referencia global, obteniendo una nube de puntos en el sistema de referencia global.
- Se guarda la nube resultante en un buffer, el que tiene un límite de tamaño y una vez que se llena, se eliminan las mediciones más antiguas.
- Al momento de llamar el servicio "assemble_scans2", todas las mediciones del buffer se ensamblan en una sola nube y se publica una nube de puntos del tipo "PointCloud2".

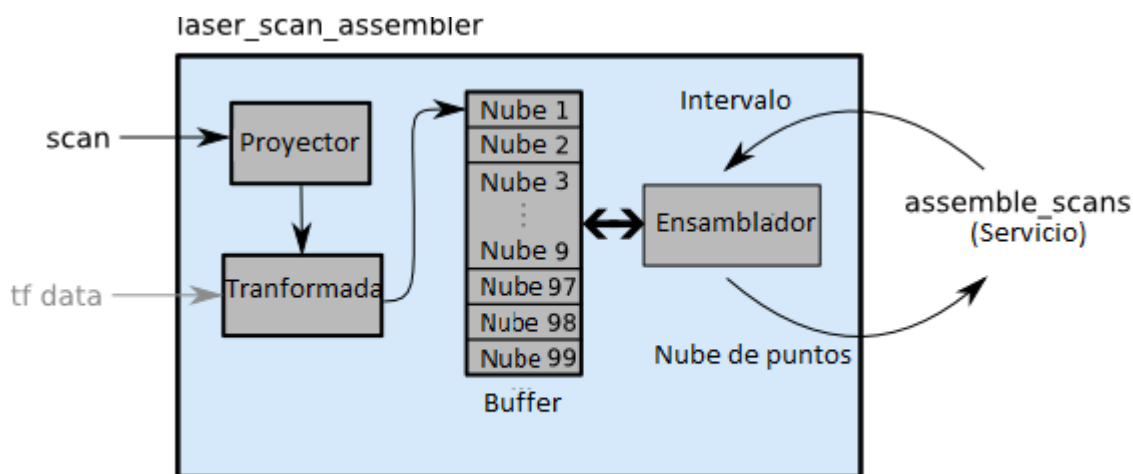


Figura 25-Diagrama de flujo de funcionamiento de laser_assembler

Este package necesita que se le configuren los siguientes parámetros:

fixed_frame: Un string, con el nombre del sistema de referencia al que se quieren transformar los escaneos del láser.

max_scans: Máximo número de escaneos que se permite guardar en el buffer, antes de empezar a eliminar los más antiguos.

ignore_laser_skew: Si es que es configurado a *“true”*, asume que todos los escaneos vienen de un mismo sistema de referencia inmóvil. En caso contrario, para cada escaneo se hace la transformación correspondiente al tf entregado en el momento. Es decir, si es que el láser está en movimiento, como es el caso de este proyecto, debe configurarse en *“false”*.

Los servicios de este package son:

assemble_scans: Cuando se llama este servicio, busca nubes que se hayan guardado en el buffer entre el intervalo solicitado (*“begin”* to *“end”*), estas nubes luego son ensambladas en una sola en el sistema de referencia especificado por el parámetro `fixed_frame`, y son retornadas al solicitante en la estructura de datos *“msg/PointCloud”*

assemble_scans2: Es igual a `assemble_scans`, solo que la nube es retornada en una estructura de datos *“msg/PointCloud2”*. Este es el servicio que finalmente se utiliza en esta memoria ya que el tipo de dato *“msg/PointCloud”* esta descontinuado.

A continuación se explica que es un objeto TF, necesario para realizar transformaciones de sistemas de referencia en ROS, y se encuentra la transformada entre los ejes de referencia necesaria.

3.2.4..1 Package tf

Tf es un package que permite al usuario describir múltiples sistemas de referencia a lo largo del tiempo. Para utilizarlo siempre se debe tener un al menos un sistema de referencia global, que en este proyecto es *“world”*. Luego se debe escribir un nodo en el que utilizando las funcionalidades de tf, describa la transformación entre el nuevo sistema de referencia, en nuestro caso *“laser”*, y el sistema global. En la Figura 26 se puede ver una serie de sistema de referencia descrito utilizando tf.

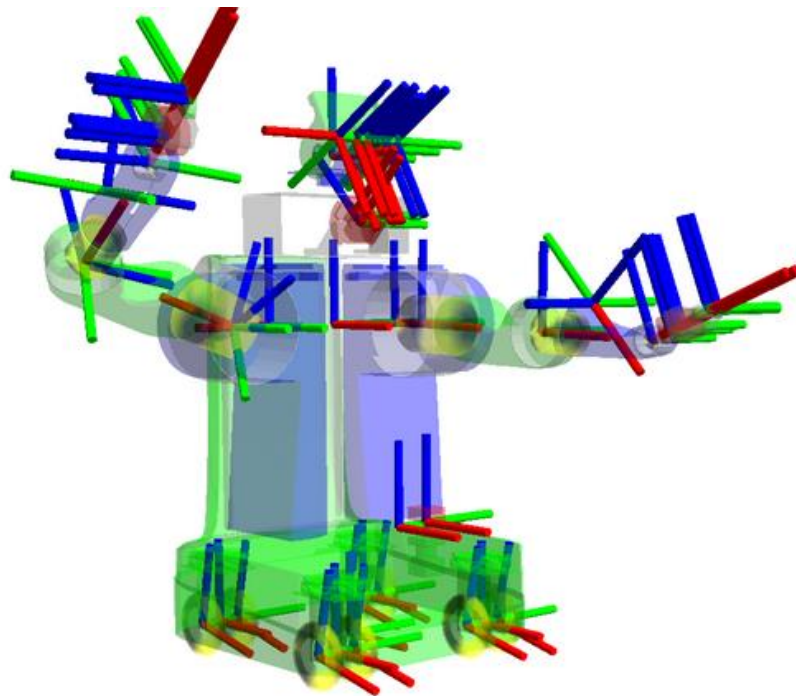


Figura 26- Serie de sistemas de referencia de un robot descritos entre ellos utilizando el package tf

3.2.4.2 Construcción del objeto tf del sistema de referencia del láser

Es fundamental para crear el objeto tf entre el láser y el sistema global, calcular las transformaciones correspondientes entre el sistema de referencia del láser, de donde se obtienen las mediciones, al sistema de referencia global. En la Figura 27 se pueden ver los tres sistemas de referencia necesarios para realizar esta transformación. E0 el sistema de referencia global, E1 es E0 trasladado en Z coincidiendo con el eje de rotación del servo motor y E2 el sistema de referencia del láser. La transformación se realizara pasando de E2 a E1 y de E1 a E0.

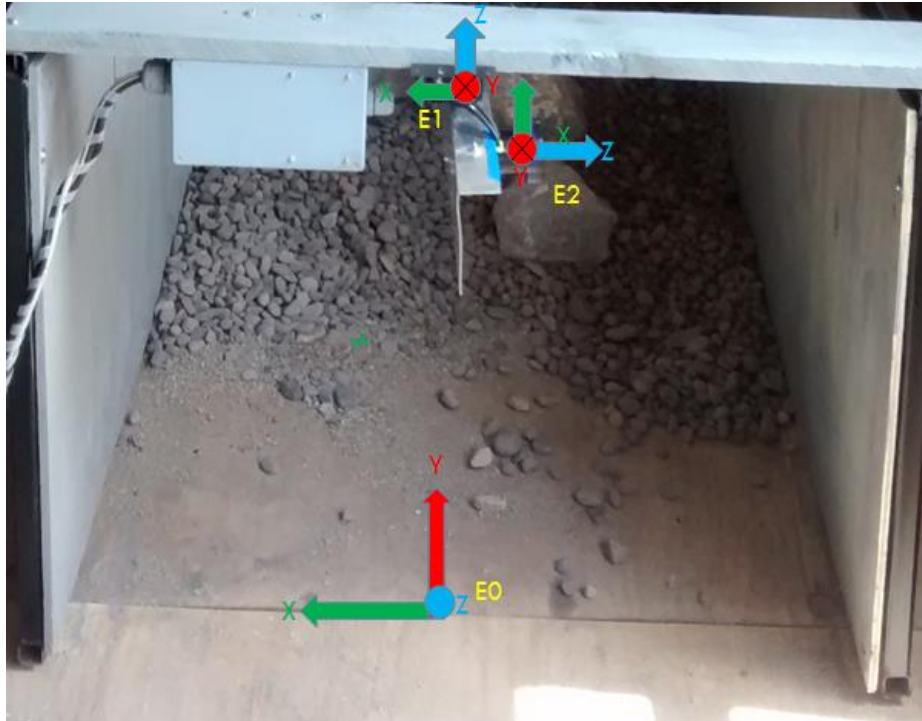


Figura 27- Sistemas de referencia E0, E1 y E2

Lo primero es encontrar la matriz de transformación entre los sistemas de referencia E2 a E1, esta es de la ecuación (3.3) y se puede ver en más detalle en la Figura 28:

$$(3.3) T_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.05 \cdot \cos(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 & 0.05 \cdot \text{sen}(\Theta) \\ -1 & 0 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Esta representa que hay un giro en 90 grados positivo sobre el eje Y, un desplazamiento constante en z igual a -0.5 y las coordenadas X y Z varían con el ángulo del servo motor generando una circunferencia, del radio de la distancia del centro del eje al centro del láser, alrededor del eje de rotación.

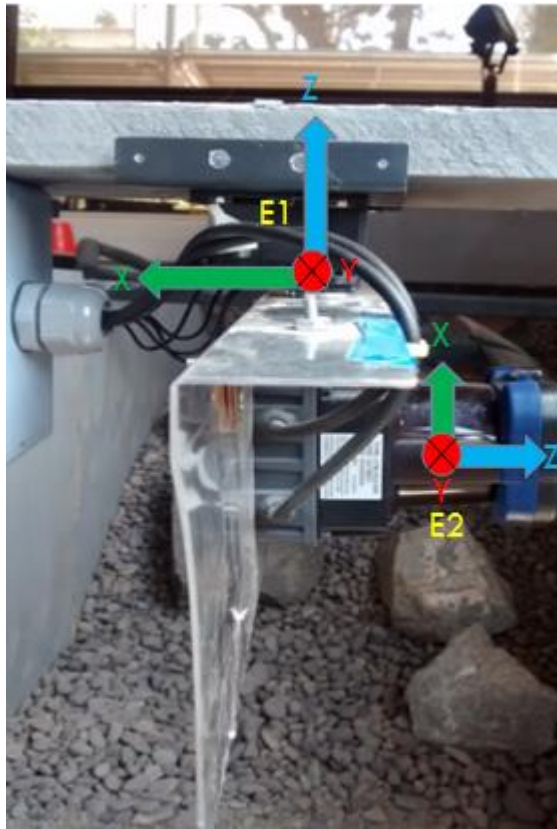


Figura 28- Sistemas de referencia E1 y E2

Lo siguiente es calcular la transformación de E1 a E0, dado que E1 y E0 están solamente trasladados en Z por 66[cm] es trivial y es la siguiente:

$$(3.4) \quad T_{10} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0.66 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Finalmente se deben combinar las dos para calcular la transformación T02, el resultado es el siguiente:

$$(3.5) \quad T_{02} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.05 \cdot \cos(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 & 0.05 \cdot \text{sen}(\Theta) \\ -1 & 0 & 0 & 0.61 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta manera se describe el sistema de referencia del láser respecto del sistema global, y se crea el nodo necesario para publicar el tf que necesita *laser_assembler*.

El nodo tf es *“laser_frame_speed.cpp”*, para poder computar la transformada se suscribe al t3pico *“/tilt_controller/state”* y consulta el par3metro *“current_pos”* que es el 3ngulo en ese momento del servo motor.

3.2.4.3 Obtenci3n de la nube de puntos

Es necesario crear un nodo que regularmente llame el servicio *“assemble_scans2”* y publique la nube de puntos resultante. Para esto se crea el nodo *“periodic_snapshotter.cpp”* el que b3asicamente crea temporizadores para llamar al servicio cada cierta cantidad de segundos, y publica el resultado, la nube de puntos, en el t3pico *“/assembled_cloud2_faster”*.

El resultado final, una nube de puntos de la maqueta, se puede ver en la Figura 29.

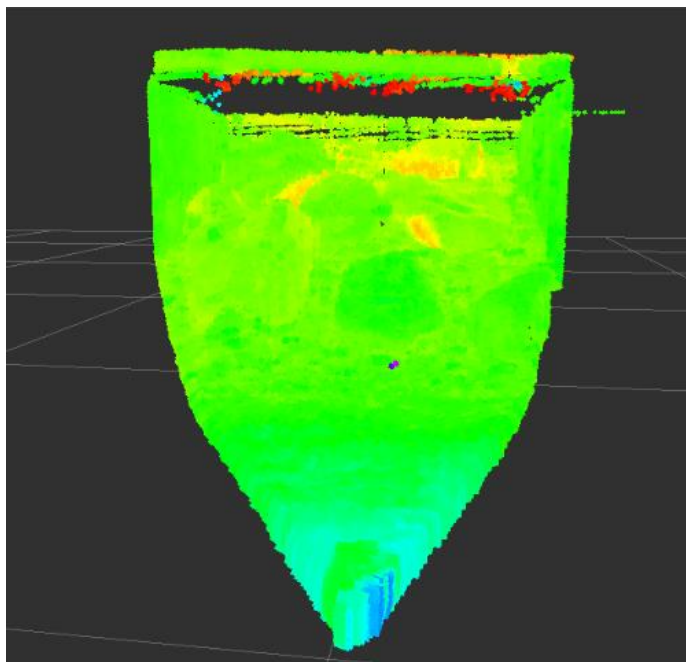


Figura 29- Nube de datos resultante del punto de extracci3n

3.2.5 Filtrado de 3rea de inter3s

La nube de puntos completa no solamente contiene las rocas, sino que tambi3n las paredes e incluso perfiles de hierro de la maqueta, partes que no son de inter3s y pueden ser un obst3culo para el desarrollo y pruebas del sistema. Es por ello que se opta por realizar un filtrado sobre esta nube de puntos, de manera de solo mantener las rocas dentro de esta. El filtrado se hace poniendo l3mites en X, Y y Z, y filtrando el 3rea de inter3s utilizando la clase *“PassThrough”* [12]. Estos l3mites se encontraron midiendo manualmente en la maqueta.

El resultado final se puede ver en la Figura 30, donde se aprecia que ya no hay elementos externos al mineral.

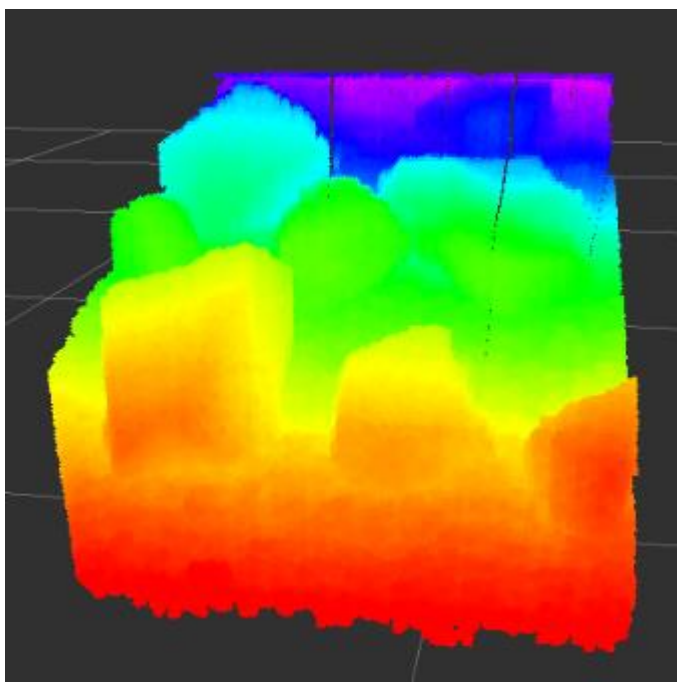


Figura 30- Resultado de filtrar la nube original del punto de extracción

3.2.6 Algoritmo de medición de granulometría y estrategia de carga

El siguiente paso es obtener de la nube de datos la granulometría de las rocas interesantes del punto de extracción, para ello se desarrolla un nodo, "*conditional_segmentacion.cpp*", basado en el diagrama de flujo de la Figura 31. A continuación se explica cada uno de los módulos.

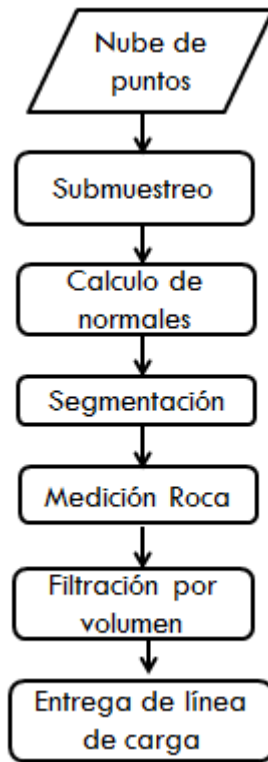


Figura 31- Diagrama de flujo del algoritmo de Granulometría y estrategia de carga

Submuestreo

El Submuestreo es la reducción del número de puntos de la nube. En este caso se utilizará la VoxelGrid utilizando una grilla de voxels. Básicamente la nube de datos completa se divide en grillas cúbicas regulares de un largo definido, y todos los puntos dentro de un cubo son aproximados por el centroide del conjunto de puntos. De esta manera se reduce enormemente la cantidad de puntos y en consecuencia el tiempo de procesamiento. Un ejemplo de submuestreo se puede ver en la Figura 32 en donde se reduce una nube de puntos representando una mesa.

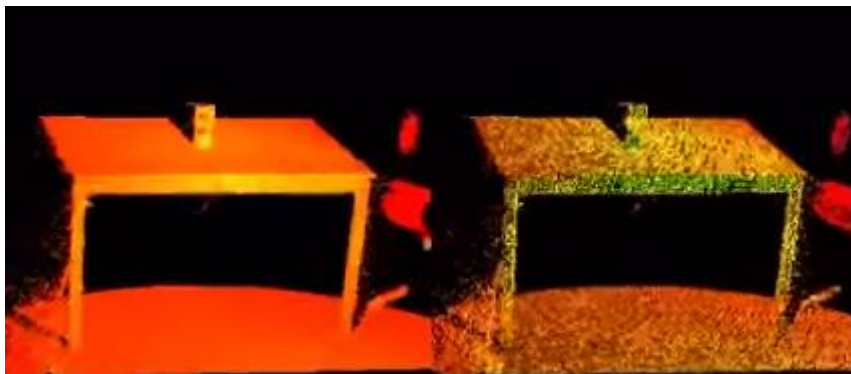


Figura 32- Ejemplo de submuestreo sobre una nube de puntos representando una mesa

Dado que en este proyecto el láser toma varias veces datos en el mismo lugar, existe información redundante y es por esto que se debe realizar un submuestreo en el desarrollo de este

algoritmo. El largo de los voxels se calculó para que sea similar a la resolución del láser, de esta manera se eliminan los puntos redundantes sin perder información.

Cálculo de normales de la nube de puntos

Las normales de un punto son el vector perpendicular al plano que lo contiene. Debido a que en una nube de puntos no se sabe cuál es el plano que contiene a cada punto, este se aproxima centrándose en el punto, tomando todos los puntos que estén en un radio r y buscando el plano que mejor aproxime ese conjunto de puntos.

Para el cómputo de normales se utilizó la clase `NormalEstimation` [13] de la librería `Point Cloud` con un radio R_n . Un ejemplo de cálculo de normales se puede ver en la Figura 33.

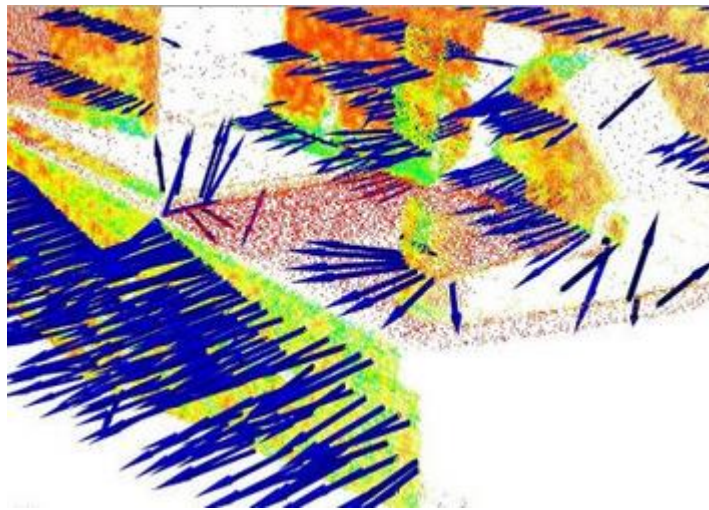


Figura 33- Ejemplo de normales calculadas sobre nube de puntos

Segmentación de rocas

Para la segmentación se utiliza la clase “*Conditional Euclidean Clustering*” [14] de la librería `Point Cloud`. Este funciona utilizando *región growing* [15] y la condición de clustering es totalmente customizable por el usuario. El pseudo código de este algoritmo es el que se muestra a continuación.

1. Creación de una representación de la nube de datos, P , por un kd-tree.
2. Se crea una lista vacía de Clústeres C y una cola de puntos que deben ser chequeados Q .
3. Para cada punto $p_i \in P$ se hace lo siguiente:
 - Agregar p_i a la cola Q .
 - Para cada p_i en Q hacer:
 - Se encuentra el set P_k^i de puntos dentro de una esfera centrada en p_i con un radio r_e .
 - Se itera por cada punto dentro de la esfera, se verifica que cumpla la función condicional de segmentación con el punto p_i , si es que la cumple se agrega a la cola Q .
 - Cuando la lista de puntos en Q ha sido totalmente procesada, se agrega Q como un nuevo clúster a C , se vacía Q y se vuelve a 3.
4. El algoritmo termina cuando todos los puntos p_i en P han sido procesados y son parte de algún clúster en C .
5. Finalmente se filtran todos los clústeres que tengan menos de N_{min} puntos o tengan más de N_{max} puntos.

Para la definición de la función de clustering en este trabajo, se exploraron las intensidades, curvatura y normales en los tres ejes de la nube de puntos. Estos se pueden ver en las imágenes 34, 35, 36, 37 y 38. Se puede apreciar que las normales son las que mejor resaltan las rocas grandes del resto del material.

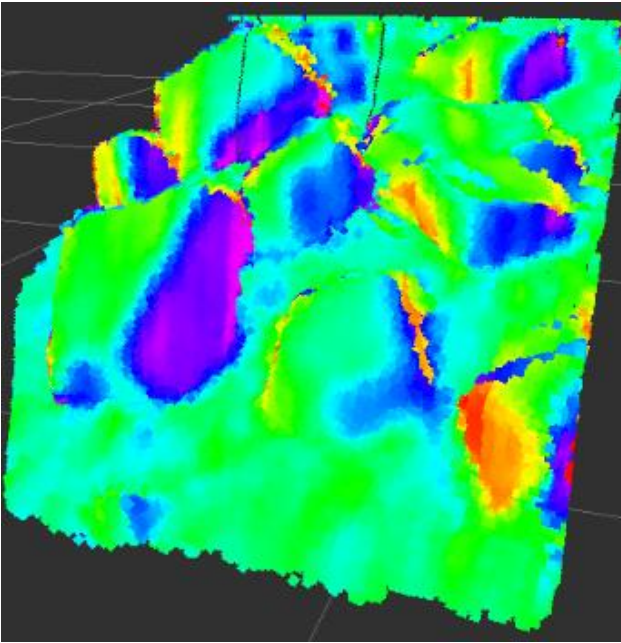


Figura 34- Representación visual de normales en el eje X de la nube de puntos

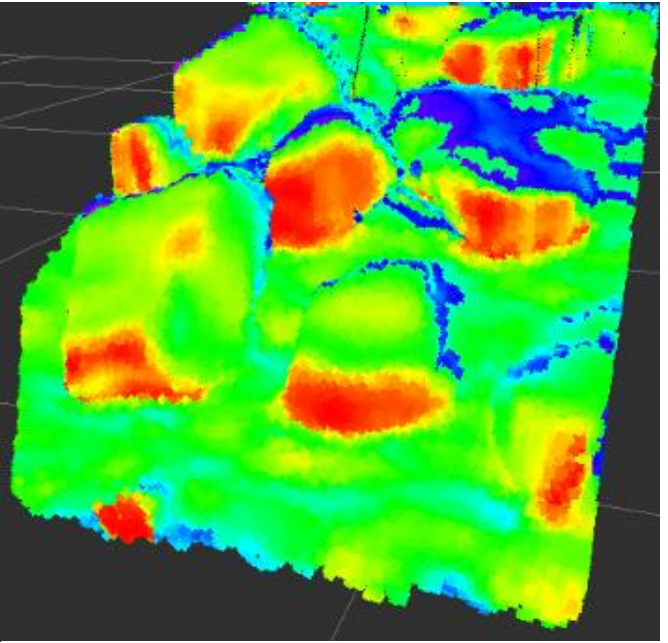


Figura 35- Representación visual de normales en el eje Y de la nube de puntos

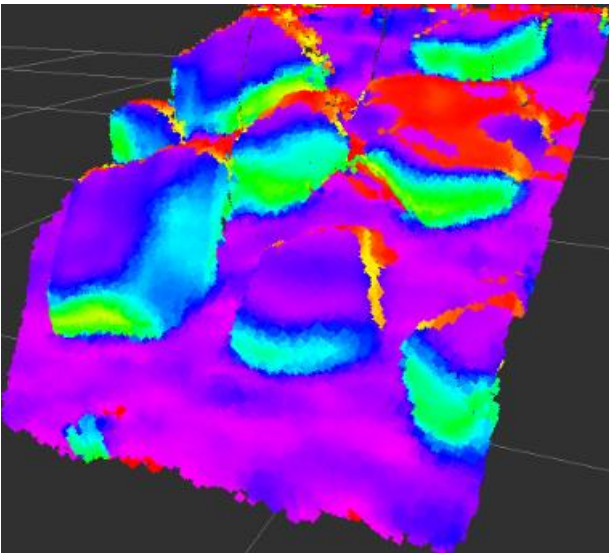


Figura 36- Representación visual de normales en el eje Z sobre nube de puntos

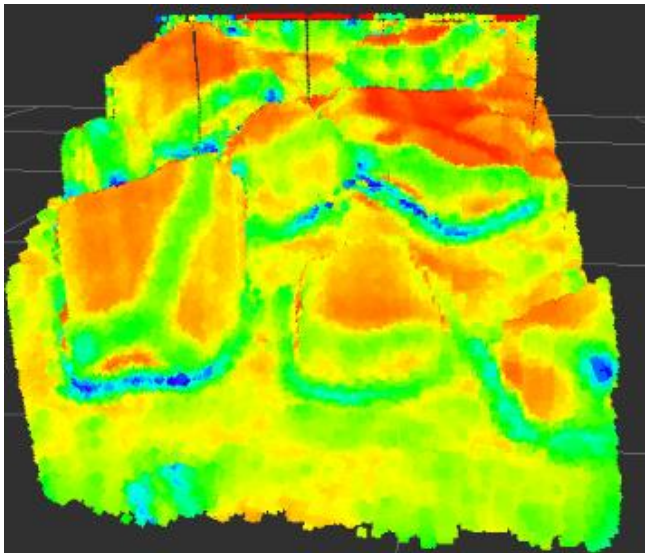


Figura 37- Representación visual de curvatura de la nube de puntos



Figura 38- Representación visual de las intensidades de la nube de puntos

Así es como se determina que la función óptima para la segmentación de las rocas es la descrita en la ecuación (3.6):

$$(3.6) \quad N_{ax} * N_{bx} + N_{ay} * N_{by} > T$$

Dónde:

N_{ax}: Componente x de la normal del punto a
N_{bx}: Componente x de la normal del punto b
N_{ay}: Componente y de la normal del punto a
N_{by}: Componente y de la normal del punto b
T: Threshold de la condición de segmentación

El resultado de esta segmentación se puede ver en la Figura 40 y se puede contrastar con la Figura 39.

Se ve que esta segmentación determina satisfactoriamente gran parte de los bordes de la roca, pero aún quedan partes no detectadas.

Para la corrección de esto se procede a obtener la envoltura convexa de la roca, la que se ve representada por los vértices blancos de la Figura 41, se buscan los vértices de esta envoltura convexa, y se procede a hacer un filtrado de manera que todo lo que este dentro de esta zona convexa ahora pertenece al clúster de la roca, como se ve en la Figura 42, en donde se puede ver que la mejora es importante.



Figura 39- Foto real de la maqueta del punto de extracción

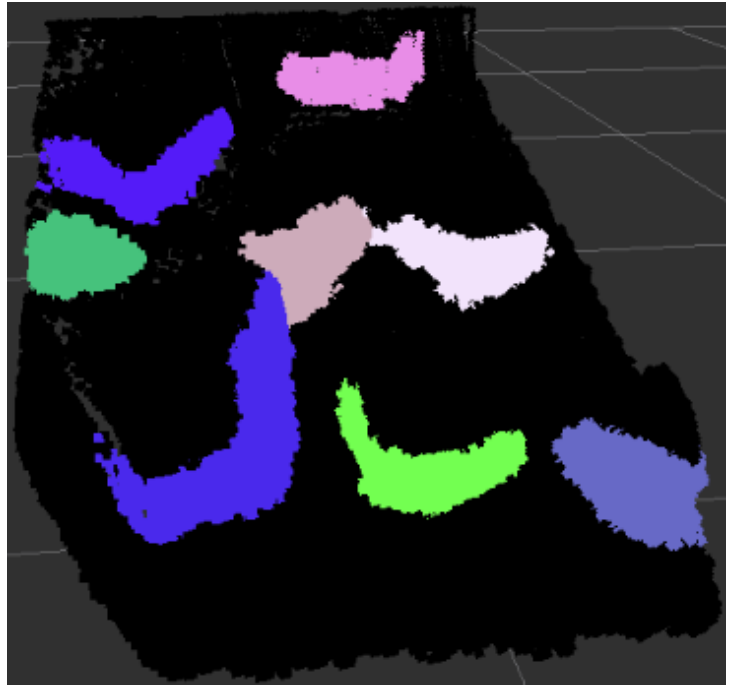


Figura 40- Resultado de la conditional segmentation en donde se obtienen los bordes de las rocas

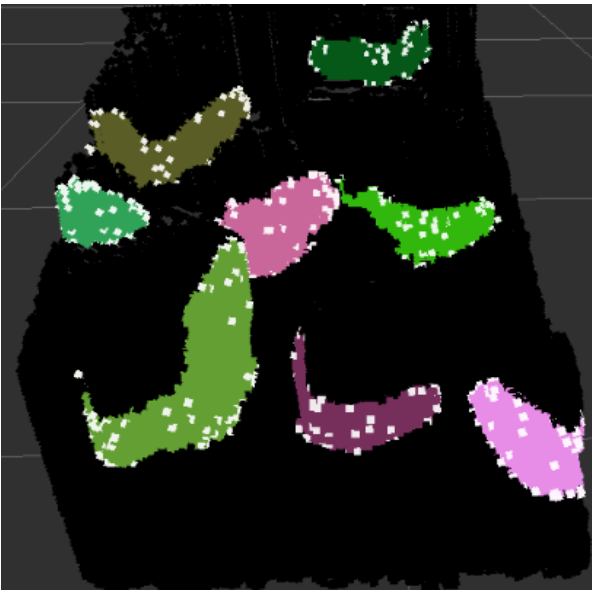


Figura 41- Obtención de los vértices de la zona convexa que contiene la roca

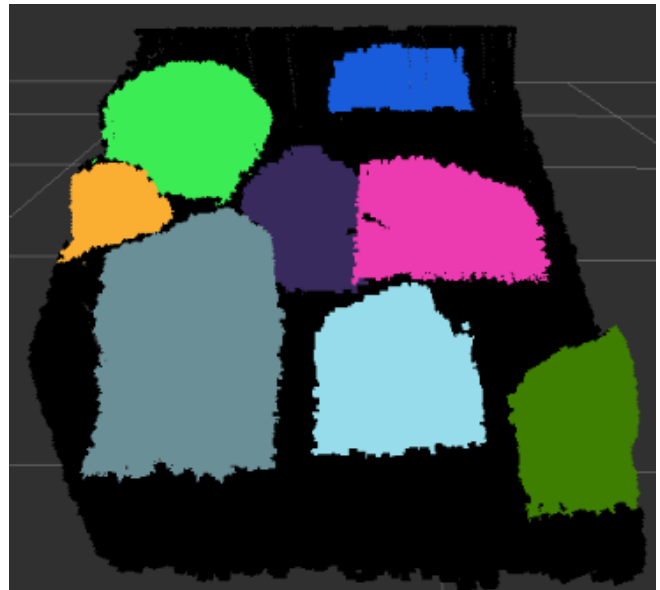


Figura 42- Resultado final incluyendo en la roca toda la zona convexa que la rodea

Características de la roca

De cada una de las rocas que detectó el algoritmo de segmentación, se extraen las siguientes características:

Centroide: Para computar el centroide de cada clúster se utiliza la función `compute3DCentroid` [16] de la librería Point Cloud.

Largo: Se define como la distancia más grande entre dos puntos cualesquiera de la roca. Se calcula extrayendo todos los vértices, luego se procede a calcular la distancia entre cada uno de ellos y la medición máxima que se obtenga es la que se utiliza como medida de largo.

Área: Esta característica se calcula encontrando la bounding box correspondiente a la roca y calculando el área correspondiente.

Estas características serán útiles para determinar el punto recomendado para comenzar el proceso de carguío.

Filtrado por área de la roca

Dado que existe la posibilidad de que el algoritmo detecte como roca considerable ciertas rocas que en la realidad pueden ser no relevantes, es necesario definir un parámetro que filtre las rocas pequeñas detectadas.

Para este paso se realiza un filtro simple de área, si es que el clúster que se detecta supera o iguala el área impuesto por el usuario, se considera, en caso contrario no. En la Figura 43 a la izquierda se ve un ejemplo con el filtro y a la derecha sin el filtro activado (roca naranja).

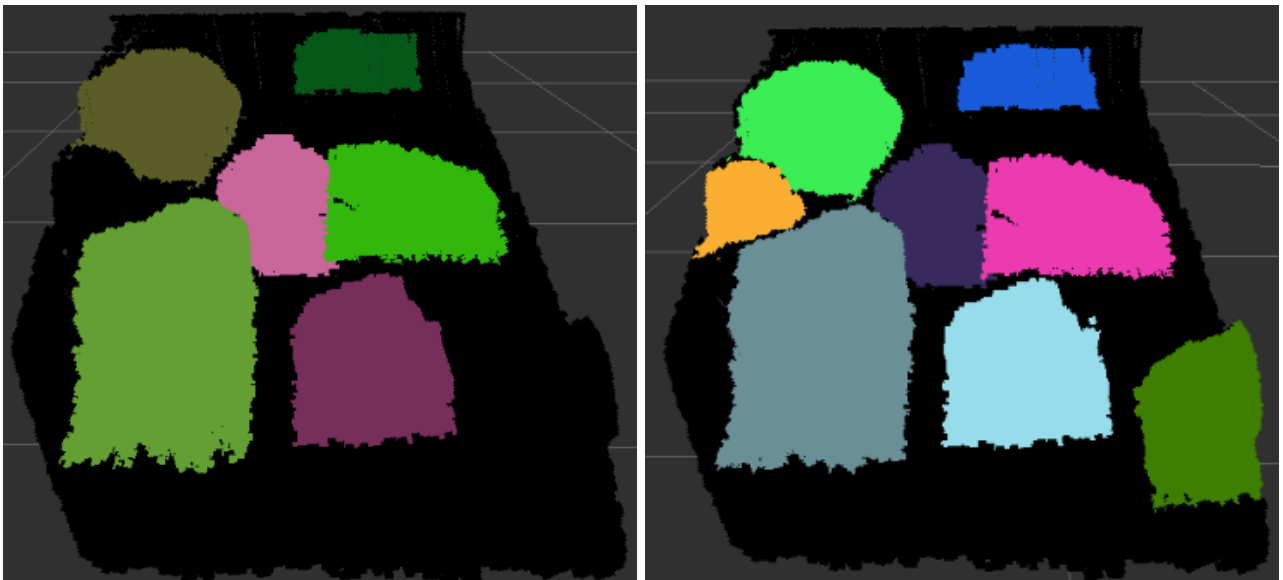


Figura 43- A la izquierda el resultado sin filtro de volumen y a la derecha con un mínimo de área igual a 0.01 m^2

3.2.7 Línea de carguío recomendada

El bloque final consiste en que a partir de toda la información obtenida, se formule una estrategia que indique donde se recomienda comenzar el carguío.

Para ello es necesario entender que lo que dificulta el carguío son las rocas grandes, ya que tal como cuando uno palea material, si es que se tiene una superficie solo con rocas pequeñas, basta con introducir la pala y a pesar de chocar con las rocas pequeñas, la pala lograra entrar de y recoger una cantidad importante de material. El caso contrario, una superficie de rocas no homogéneas con rocas grandes, si es que se introduce la pala en donde hay una roca grande la pala rebotara y no lograremos recoger material.

Considerando lo anterior, la estrategia a seguir será encontrar la roca que se encuentra más baja en el eje Z, encontrar su punto más bajo en Z y trazar una línea de carguío paralela al eje X. De esta manera si se introduce la pala en esta línea, se asegura no chocar con ninguna roca grande.

Para esto se explora cada una de las nubes que representan a las rocas segmentadas, se itera sobre sus puntos encontrando el más bajo en el eje Z y se guarda. Luego entre todas las rocas se encuentra la que tiene el punto más bajo en el eje Z, y utilizando este punto se define una recta paralela al eje X, definiendo la línea de carguío recomendada. En la Figura 44 se puede ver un ejemplo de la recta que determina la línea de carguío recomendada.

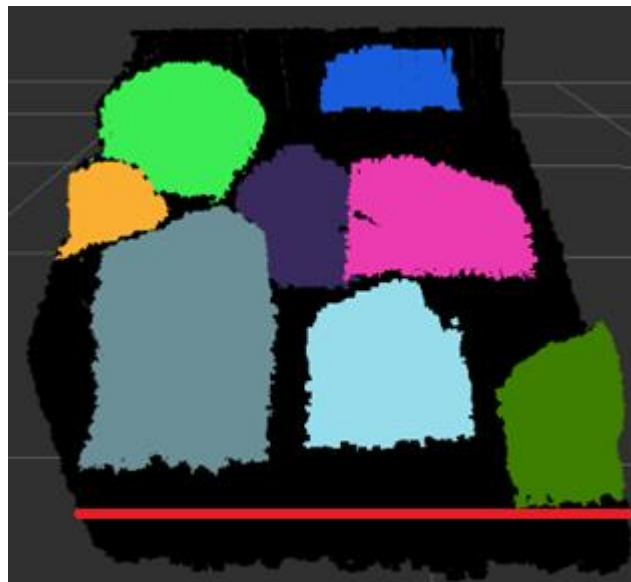


Figura 44- Ejemplo de línea de carguío entregada por el algoritmo

3.2.8 Sintonización de parámetros

Los parámetros del algoritmo descrito anteriormente son los siguientes:

norm_thresh: Es el valor mínimo en la condición de segmentación para que el punto se integre al cluster.

Axis_weight(A): Arreglo que representa el peso que tiene cada componente de la normal sobre la condición de segmentación condicional en el algoritmo. De esta manera la condición de segmentación queda representada por la ecuación (3.7).

$$(3.7) \begin{bmatrix} N_{ax} * A_1 \\ N_{ay} * A_2 \\ N_{az} * A_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_{bx} \\ N_{by} \\ N_{bz} \end{bmatrix} > norm_thresh .$$

cluster_tolerance: Parámetro que determina el radio en el que se revisa si hay puntos que cumplen la condición para meterlos al clúster.

rsearch: Radio que se utiliza para el cálculo de las normales.

Para la sintonización de estos parámetros se utilizaron configuraciones de entrenamiento en las que se priorizo la detección de todas las rocas, y en caso de tener varios parámetros que detecten todas las rocas, se procedió a minimizar el error entre el largo estimado de la roca y el largo real.

Capítulo 4

4 Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los experimentos realizados para caracterizar el algoritmo desarrollado. Para esto se procede a realizar una serie de pruebas con distintas configuraciones de rocas, se cambian las condiciones ambientales humedeciendo las rocas y generando un ambiente con polvo para representar mejor una mina subterránea. Se continúa con pruebas a distintas velocidades para minimizar el tiempo que toma el sistema en entregar una respuesta y finalmente se realiza un análisis para comprender la validez de este trabajo en escala real.

4.1 Desempeño de la medición de rocas

A continuación se presentan los experimentos en los que se utilizaron 11 rocas distintas, y se explica cómo se midió el desempeño. Para la determinación del área de cada una de las rocas primero se procedió a encontrar la mínima bounding box paralela al eje x y se le asigna el área de esta a las rocas.

Tabla 4- Área correspondiente a las rocas

Número de roca	Área de la roca [cm^2]
1	601,44
2	532,97
3	329,30
4	648,93
5	2191,77
6	359,10
7	833,90
8	573,60
9	658,00
10	1358,40
11	807

4.1.1 Medida de desempeño

Para la determinación de los parámetros óptimos y caracterización para el algoritmo de determinación de la granulometría se utiliza la siguiente métrica.

Error de granulometría (E_g): Se define como $|ar_i - am_i|/ar_i$ donde ar_i es el área medida de la roca i , y am_i es el área calculada por el algoritmo. En caso de que una piedra no sea detectada, ar_i toma el valor cero.

4.1.2 Pruebas

A continuación se presentan 10 pruebas en las que se mezclaron las distintas rocas en configuraciones diferentes, de manera de poder caracterizar más representativamente el error de medición del algoritmo. Además se procede a hacer un análisis de los errores más grandes en cada prueba.

Prueba 1



Figura 45- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 1

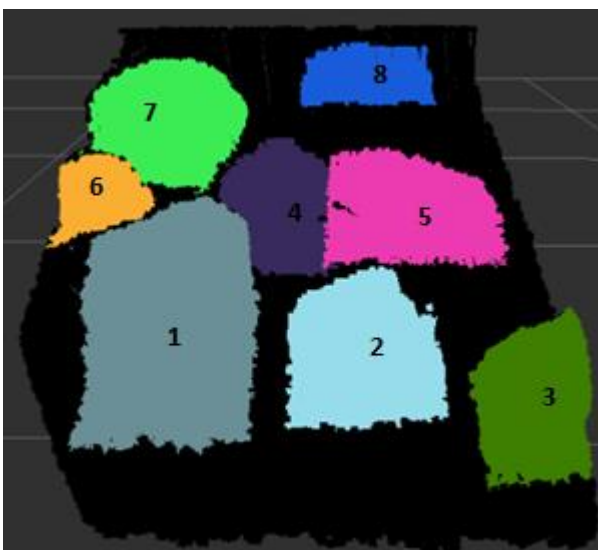


Figura 46- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 1

Tabla 5- Resultados numéricos prueba 1

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
8,00	573,600	332,207	42,1
7,00	833,900	774,684	7,1
6,00	359,100	409,055	13,9
4,00	648,930	589,668	9,1
5,00	2191,770	817,010	62,7
1,00	601,440	744,735	2,38
2,00	532,970	435,283	18,3
3,00	329,300	385,377	17,0
Promedio	710,95	703,85	26,0

De la tabla 5 se puede ver que los mayores errores pertenecen a la roca 5, 1 y 4. La roca uno sufre de una clara sobre segmentación como se puede ver en la Figura 46, generando un largo mayor. En el caso de la roca cinco, está siendo parcialmente tapada por la roca 4, y además de ellos su forma parcialmente plana genera diferencias de normales pequeñas, produciéndole problemas al algoritmo desarrollado. Finalmente el error asociado a la roca número 4 se debe a que esta tapada por la roca 1, como se ve en la Figura 45.

Prueba 2



Figura 47-Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 2

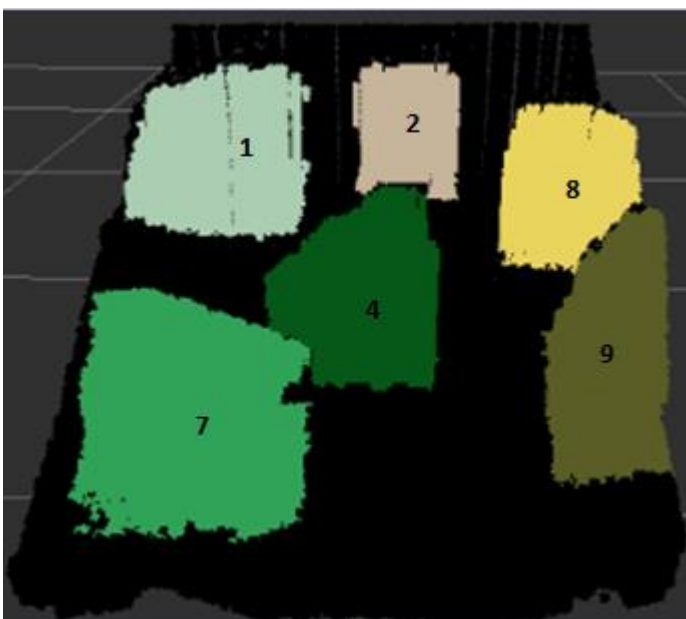


Figura 48- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 2

Tabla 6- Resultados numéricos prueba 2

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
1,00	601,44	656,64	9,0
2,00	532,97	374,77	30,0
4,00	648,93	739,58	14,0
8,00	573,60	614,48	7,0
9,00	658,00	626,68	5,0
7,00	833,90	895,23	7,0
Promedio	710,95	703,85	26,0

Esta prueba solo tiene una roca con un error considerable, la roca uno. Al igual que en la prueba anterior, sufre una sobre segmentación en el lado inferior derecho.

Prueba 3



Figura 49- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 3

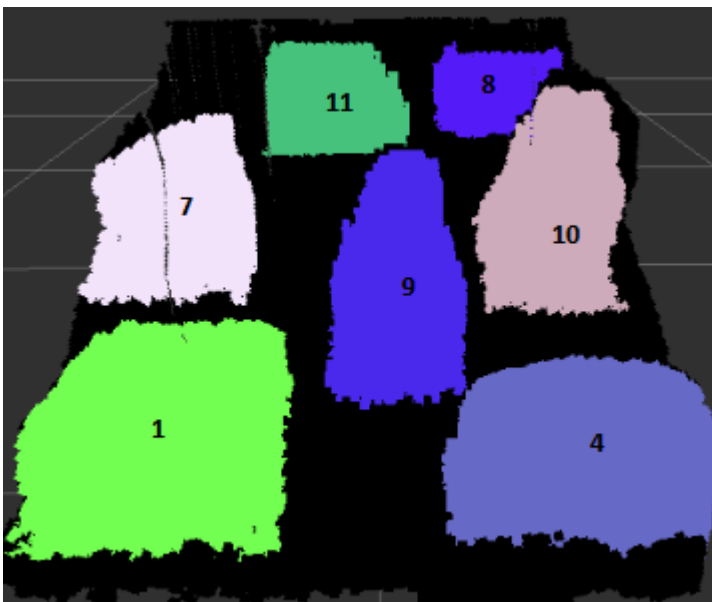


Figura 50- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 3

Tabla 7- Resultados numéricos prueba 3

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
4,00	648,93	739,20	14,0
1,00	601,44	950,40	58,0
9,00	658,00	526,32	20,0
10,00	1358,40	1281,02	6,0
7,00	833,90	847,97	2,0
11,00	807,00	646,28	20,0
8,00	573,60	444,93	22,0
Promedio	710,95	703,85	26,0

En esta prueba el error más alto corresponde a la roca número 10, seguido por la roca 7. En el caso de la roca 10, es debido a lo cerca que esta de la pared del punto que el láser no pudo obtener información de uno de sus lados, por lo que no se segmentó completamente, obteniendo un largo menor al real. En el caso de la roca 7 se puede ver de la Figura 49 que gran parte de esta es invisible al láser debido a la posición en la que está.

Prueba 4



Figura 51- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 4

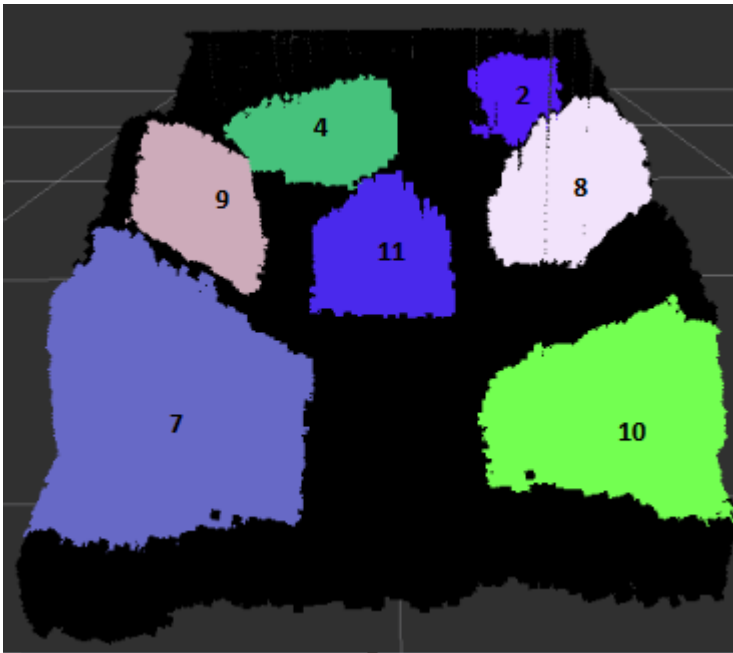


Figura 52- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 4

Tabla 8- Resultados numéricos prueba 4

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
4,00	648,93	474,55	0,27
2,00	532,97	418,22	0,22
9,00	658,00	582,04	0,12
11,00	807,00	547,29	0,32
8,00	573,60	669,24	0,17
7,00	833,90	1375,92	0,65
10,00	1358,40	1060,80	0,22
Promedio	710,95	703,85	0,26

En esta prueba los errores más altos son los de las rocas 9, 10 y 11. Tanto en el caso de la roca 10 y 11, se puede apreciar que el sector no detectado corresponde a donde no hay un gran salto entre el fino y la roca, por lo que no hay grandes diferencias en las normales, dificultando la detección. En el caso de la roca 9, se ve en la Figura 51 que gran parte de la roca esta tapada por la roca número 7.

Prueba 5



Figura 53- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 5

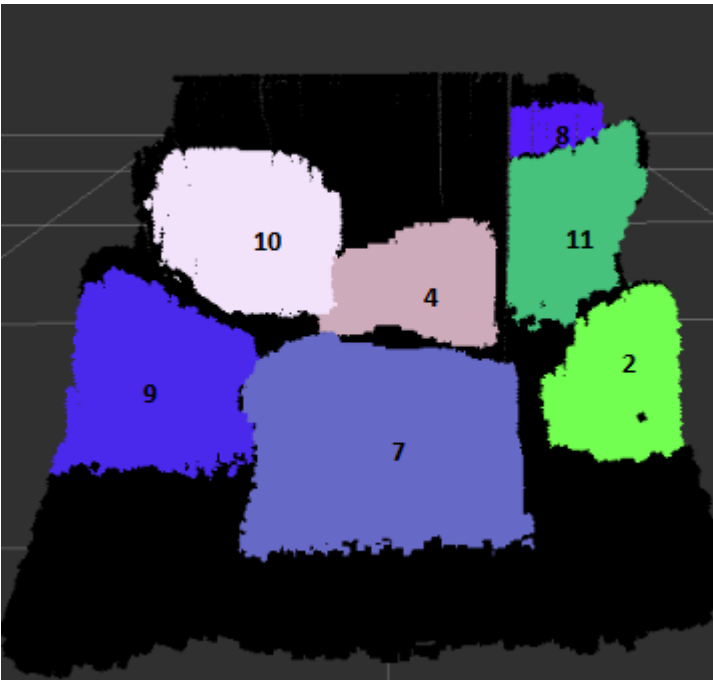


Figura 54- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 5

Tabla 9- Resultados numéricos prueba 5

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
7,00	833,90	995,60	0,19
2,00	532,97	339,92	0,36
9,00	658,00	711,24	0,08
4,00	648,93	608,16	0,06
10,00	1358,40	962,45	0,29
11,00	807,00	618,39	0,23
8,00	573,60	159,30	0,72
Promedio	710,95	703,85	0,26

En esta prueba los errores más grandes están asociados a la roca 10 y 8. La roca 10, como se puede ver comparando la vista frontal y superior de la Figura 53, está posicionada de manera que tiene una componente trasera que es invisible para el láser, produciendo el error en la medición. En el caso de la roca 8 se ve que el error se debe a que parte de está esta tapada por la roca 11.

Prueba 6



Figura 55- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 6

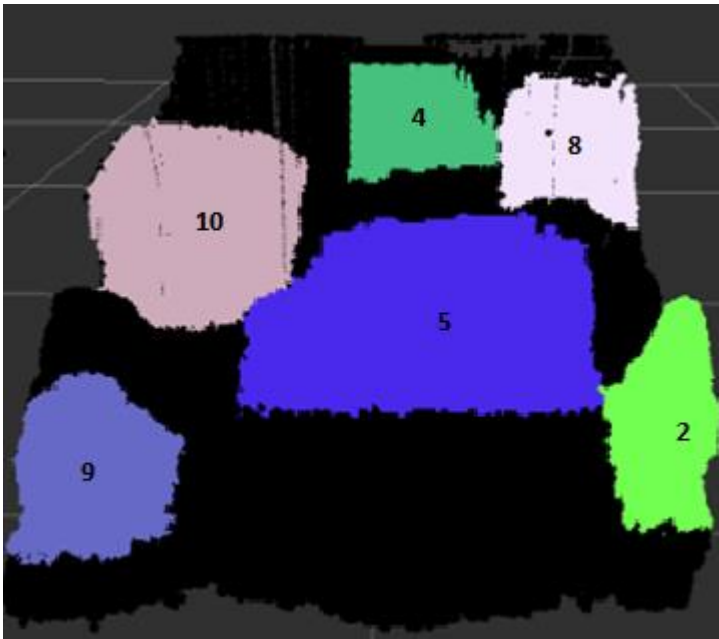


Figura 56- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 6

Tabla 10- Resultados numéricos prueba 6

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
9,00	658,00	373,64	0,43
5,00	2191,77	2253,10	0,03
2,00	532,97	444,08	0,17
10,00	1358,40	1563,91	0,15
4,00	648,93	552,05	0,15
8,00	573,60	671,01	0,17
Promedio	710,95	703,85	0,26

En esta prueba los dos errores más grandes se producen en la roca 9 y 8. Se puede ver que la segmentación en la roca 9, al igual que en casos anteriores, no funciona bien cuando la roca tiene una parte inclinada la que permite que la transición entre el fino y la roca sea suave. En el caso de la roca 8, comparando las vistas frontales y superiores de la Figura 55 se aprecia que está posicionada de manera que su parte trasera quede bloqueada a las mediciones del láser.

Prueba 7



Figura 57- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 7

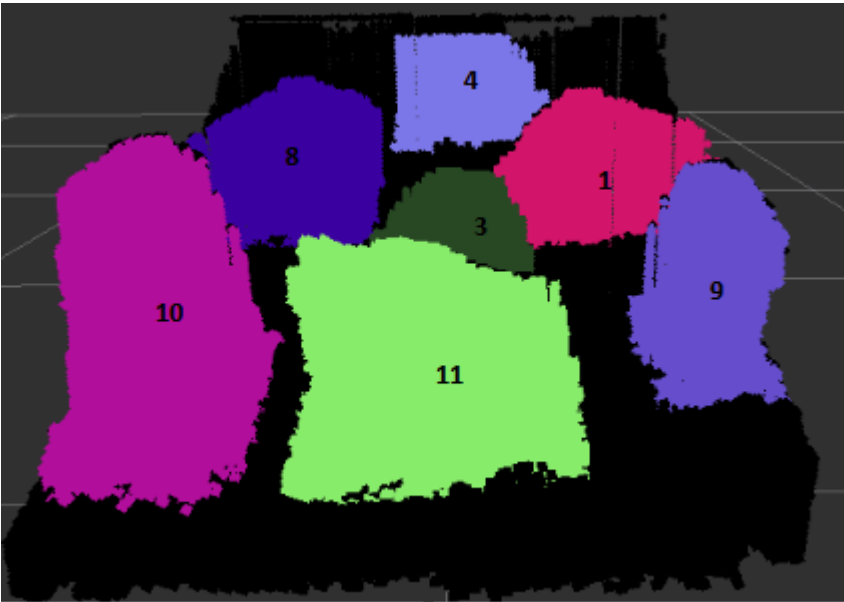


Figura 58- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 7

Tabla 11-Resultados numéricos prueba 7

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
11,00	807,00	921,90	0,14
10,00	1358,40	995,43	0,27
9,00	658,00	630,04	0,04
3,00	329,30	182,66	0,45
8,00	573,60	825,49	0,44
1,00	601,44	807,51	0,34
4,00	648,93	563,95	0,13
Promedio	710,95	703,85	0,26

En esta prueba el único error relevante se encuentra en la roca 8. Este error se debe a que, como se puede ver en la vista superior de la Figura 57, una parte de esta se encuentra tapada por la roca 10.

Prueba 8



Figura 59- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 8

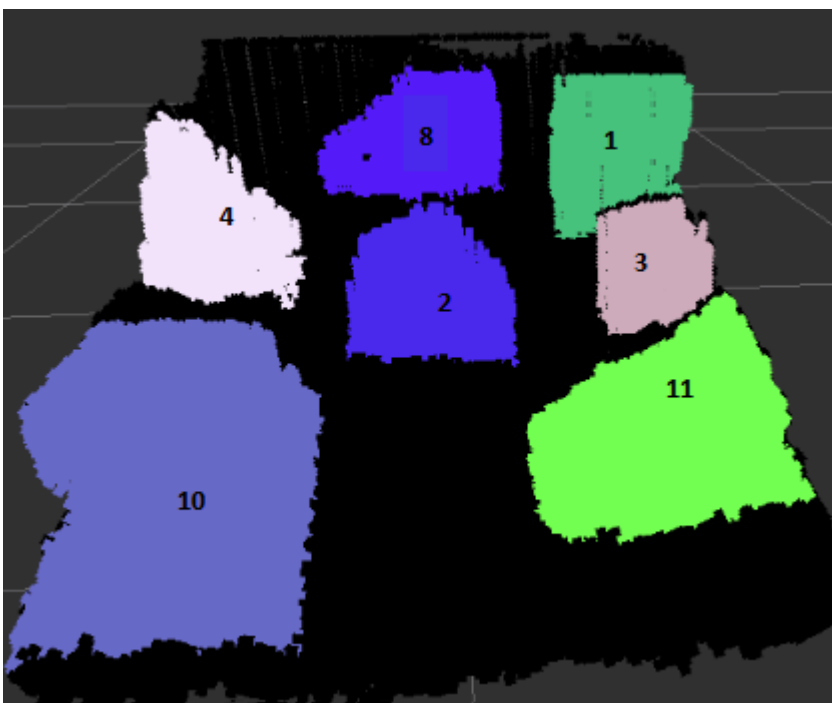


Figura 60- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 8

Tabla 12- Resultados numéricos prueba 8

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
10,00	1358,40	1164,32	0,14
11,00	807,00	897,19	0,11
2,00	532,97	479,09	0,10
3,00	329,30	300,94	0,09
4,00	648,93	557,36	0,14
1,00	601,44	712,79	0,19
2,00	532,97	478,62	0,10
Promedio	710,95	703,85	0,26

En esta prueba los errores significativos son de la roca 10 y 8. En el caso de la roca 10, se ve que está posicionada de manera que gran parte de ella queda detrás de ella, por lo que el láser no es capaz de obtener buenas medidas de la roca. En el caso de la roca 8, se ve que sufre de una sobre segmentación, produciendo un error importante

Prueba 9



Figura 61- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 9

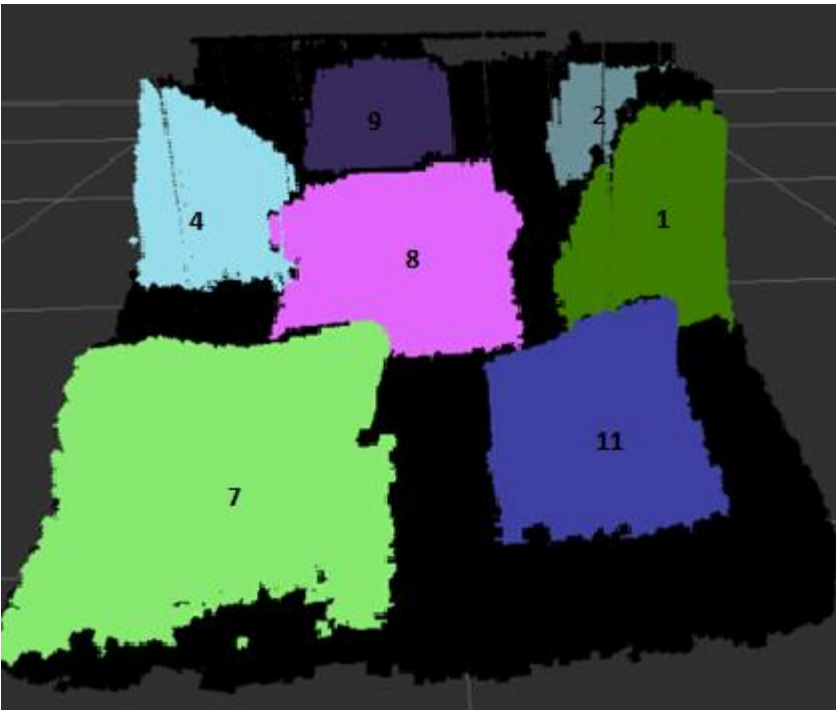


Figura 62- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 9

Tabla 13- Resultados numéricos prueba 9

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
9,00	658,00	789,82	0,20
11,00	807,00	841,00	0,04
2,00	532,97	501,87	0,06
7,00	833,90	945,00	0,13
4,00	648,93	531,55	0,18
1,00	601,44	653,67	0,09
8,00	573,60	693,13	0,21
Promedio	710,95	703,85	0,26

En esta prueba el único error relevante está asociado a la piedra 8. Es fácil ver de la Figura 62 que ocurre una sobre segmentación.

Prueba 10



Figura 63- Vista superior (izq) y frontal (der) del experimento 10

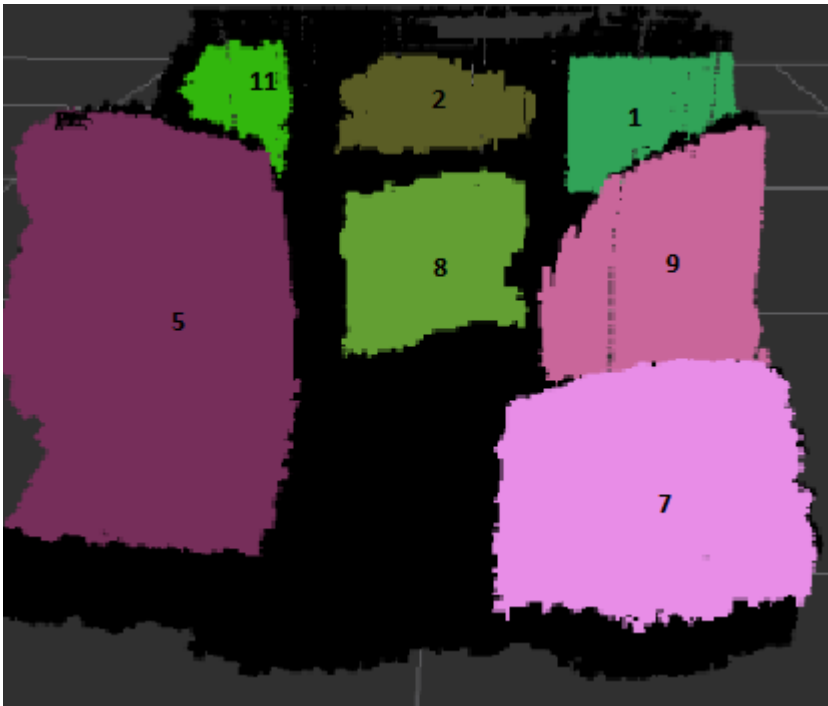


Figura 64- Visualización del resultado del algoritmo en prueba 10

Tabla 14- Resultados numéricos prueba 10

Roca	Área Esperada	Área Segmentación	Error (%)
5,00	2191,77	1573,20	0,28
7,00	833,90	1094,30	0,31
8,00	573,60	547,04	0,05
9,00	658,00	748,09	0,14
11,00	807,00	433,17	0,46
1,00	601,44	573,21	0,05
2,00	532,97	375,05	0,30
Promedio	710,95	703,85	0,26

En esta prueba el error más alto corresponde a la roca 11, la que está siendo tapada por la roca 5.

De esta manera finalizando con los análisis de estas pruebas, se puede ver que los errores vienen principalmente asociados por tres razones:

- Rocas no visibles, ya sea porque están tapadas por otras rocas o por la forma en que están posicionadas. Este error podría ser disminuido si se pudiese mover el láser de esquina a esquina, o si se instalara un láser en cada esquina, así se tendría mejor visual de las rocas.
- Bordes de la roca no son lo suficiente bruscos para generar una diferencia de normales detectable por el algoritmo.

- Sobre segmentación con el fino.

El desempeño promedio de estas once pruebas fue de un 20,70 %, donde el error más bajo que se obtuvo fue de un 1,6 %, el error más grande fue de un 72,22% y la desviación estándar de todos los errores obtenidos es de un 15,4.

4.2 Comportamiento en distintos ambientes

Debido a que en las minas subterráneas se encuentran ambientes húmedos y con partículas de polvo en suspensión, es necesario estudiar el comportamiento del algoritmo en estas condiciones. Los resultados se ven a continuación

4.2.1 Ambiente húmedo

El objetivo de esta prueba es ver cómo se comporta el algoritmo en un ambiente húmedo, para ello se procedió a vaciar agua sobre las rocas como se puede ver en la Figura 65.



Figura 65- Maqueta con rocas húmedas

Los resultados solamente difieren en la intensidad de las mediciones como se puede ver en la Figura 66. Se obtuvieron las mismas mediciones de granulometría que en un ambiente “Normal”, esto es de esperarse ya que las intensidades medidas por el láser no tienen influencia alguna en el algoritmo desarrollado.

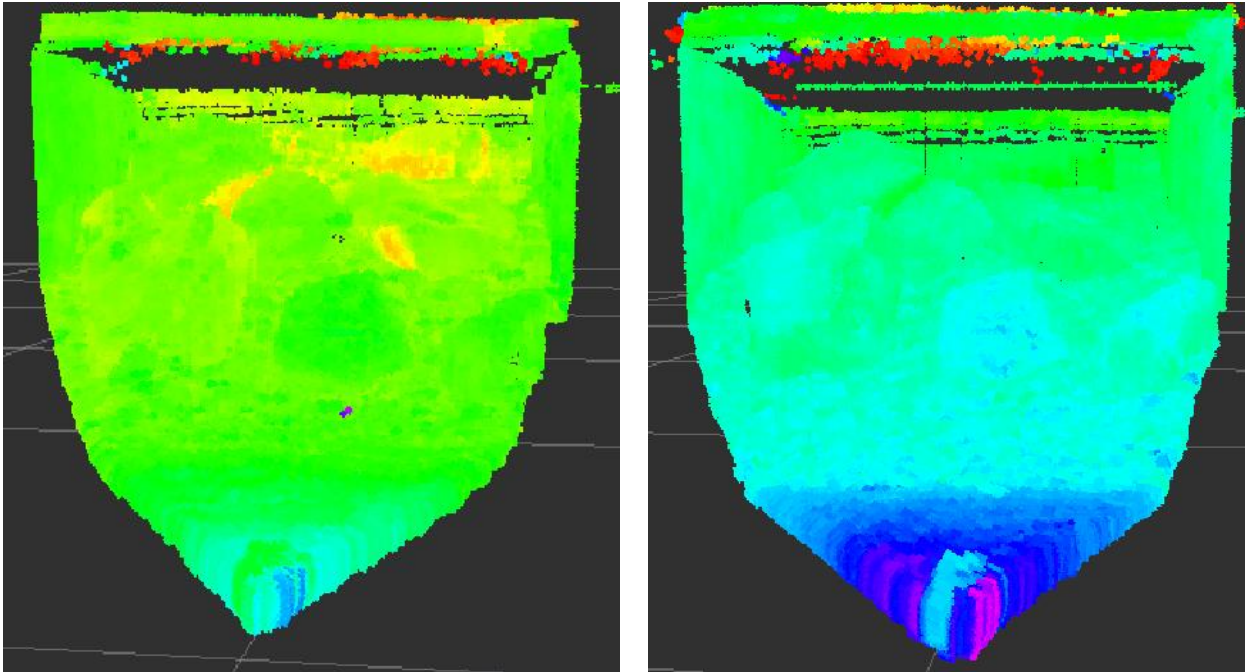


Figura 66- Intensidades medidas en la maqueta húmeda (izq) y seca (der).

4.2.2 Ambiente con polvo

El objetivo de esta prueba es ver cómo se comporta el algoritmo en un ambiente con partículas de polvo, las que afectan el comportamiento del láser ya que reflejan la luz de este. Para esta prueba se procedió a techar la maqueta con una bolsa plástica fija a los ejes, y con una aspiradora se procedió a agitar maicillo dentro del punto de extracción, liberando polvo al ambiente. Una foto de la maqueta tapada se puede ver en la foto 67.



Figura 67- Experimento de polvo realizado cubriendo la maqueta y agitando gravilla dentro de esta.

Se ve en la Figura 68 que el láser a pesar de tener la funcionalidad de multieco, no es capaz de atravesar el polvo, donde se puede ver que este bloquea los haces de luz de tal manera que se genera una cortina como resultado de las mediciones del láser, imposibilitando la medición de las rocas. Además se puede ver en la figura 68, las diferencias de mediciones obtenidas si es que se utiliza el primer eco del láser, y el último eco. Se ve que la principal diferencia es una pequeña capa negra de polvo que es láser es capaz de atravesar utilizando la última medición. Dado estos resultados fue imposible generar porcentajes de desempeño en este ambiente de manera de compararlos con el ambiente normal.

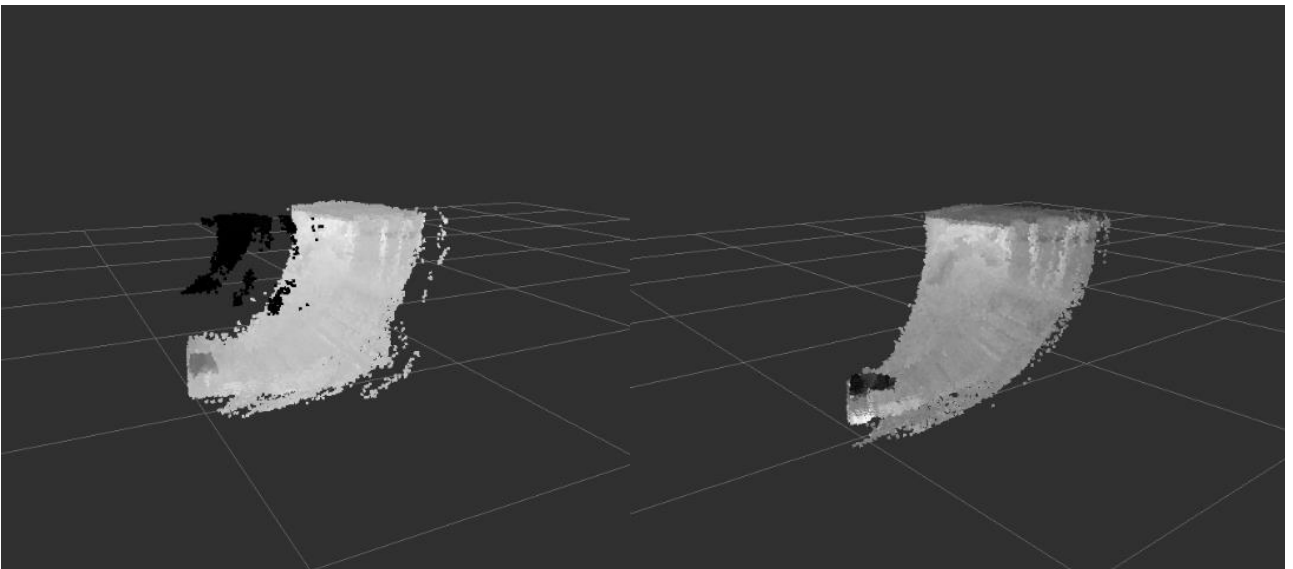


Figura 68- Nube de puntos obtenidas en ambiente con polvo, a la izquierda primer eco y a la derecha último eco.

4.2.3 Velocidad de obtención de la nube de puntos

Existe la posibilidad de que el láser se monte sobre cada LHD en la mina subterránea, en vez de en los techos de los puntos. Es por ello que el tiempo que se demore el láser en entregar una nube de puntos representativa puede llegar a ser importante, ya que en minería cada segundo tiene un alto costo. Tomando esto en cuenta, se llevaron a cabo experimentos sobre una configuración fija para determinar cómo varía la calidad del algoritmo al disminuir el tiempo en que el Snapshotter entrega una nube. Esto significa que el láser dará menos barridas completas por cada nube de puntos que entregue.

20 segundos: Este es el tiempo por default que se utilizó en todos los experimentos, el resultado es el que se ve en la Figura 69.

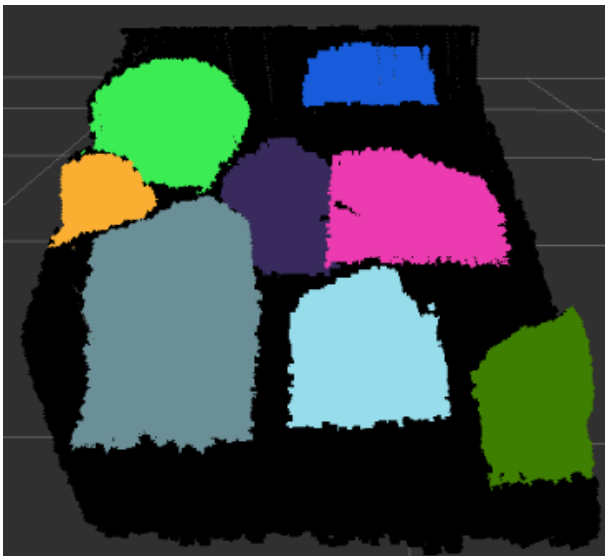


Figura 69- Resultado con un tiempo de 20 segundos

15 segundos: El resultado se ve en la Figura 70. No hay mayores diferencias en comparación con los 20 segundos.

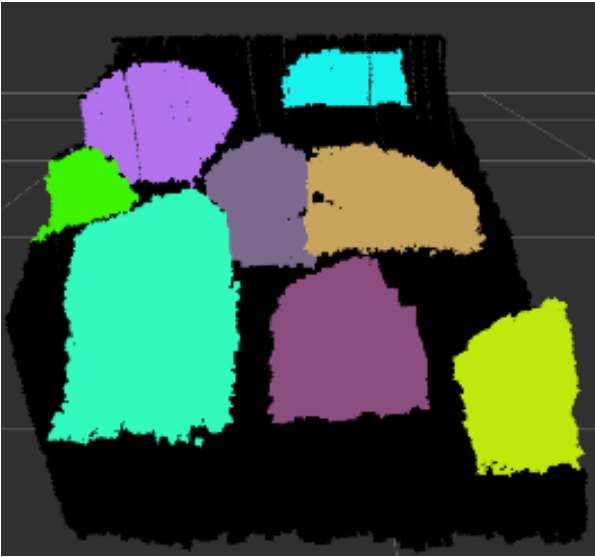


Figura 70- Resultado con un tiempo de 15 segundos

12 segundos: El resultado se ve en la Figura 70. No hay mayores diferencias en comparación con los 20 segundos.

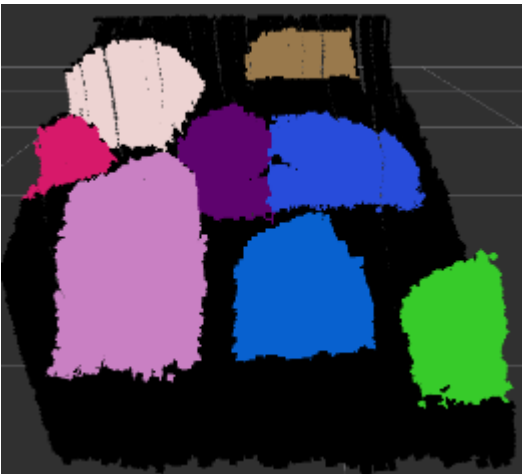


Figura 71- Resultado con un tiempo de 15 segundos

8 segundos: Dos resultados distintos se pueden ver en la Figura 72, donde los resultados son similares a los tiempos anteriores, pero fallan principalmente en la roca marcada en rojo.

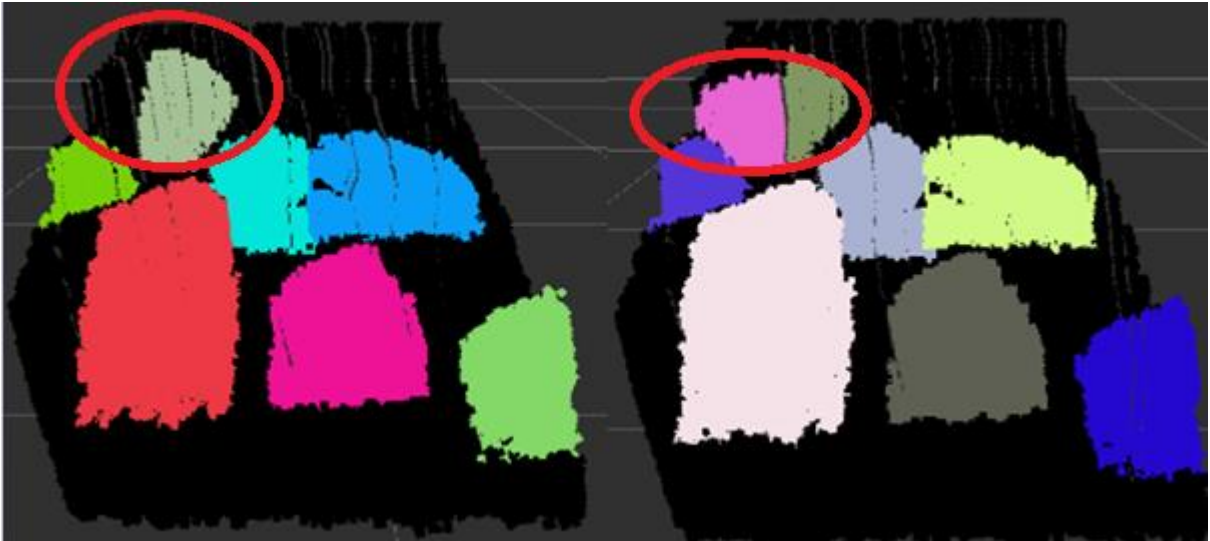


Figura 72- Dos resultados usando un tiempo de 8 segundos

En la Figura 73 se puede ver que esta falla se debe a que el láser no alcanzó a marcar distancias en esa línea, produciendo una separación entre dos partes de la roca y debido a que el algoritmo de segmentación usa clustering euclidiano, es decir solo forman parte del mismo clúster si están cerca, es que se marcan como dos rocas distintas. Este problema es solucionable haciendo una interpolación dentro de la misma nube de puntos, por lo que a priori se puede asumir que utilizando 8 segundos y una interpolación correcta, los resultados no debiesen cambiar.

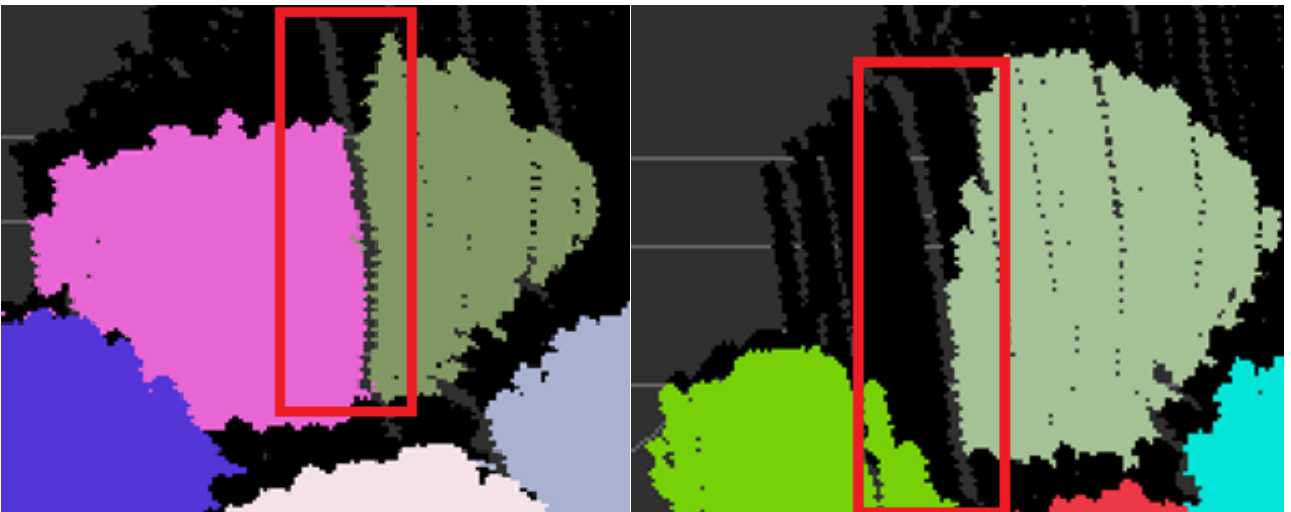


Figura 73- Zoom sobre la roca en la que fallo el algoritmo, donde se marca con rojo la causa de esta.

4.2.4 Funcionamiento a escala real

Para que este algoritmo y sus resultados sean válidos en un ambiente real, es decir escalado a cinco veces más grande, es necesario que los cambios en las normales sean similares. Para ello basta con demostrar que el número de puntos obtenidos por el láser en una misma roca

es el mismo. A continuación se hace un análisis de los parámetros que cambian al aumentar la escala y se concluye.

Largo de las rocas: Las rocas aumentaran sus tamaños en cinco veces, es decir cada arista aumentara en cinco veces su largo.

Distancia láser-rocas: La distancia entre el láser y las rocas aumentara cinco veces.

Resolución láser: A pesar de que en una mina subterránea lo más probable es que se cambie e láser por uno mejor, para efectos de este análisis lo mantendremos constante igual a 0.25° entre medidas.

Resolución Servo motor: Al igual que el láser se supondrá que se mantiene constante igual a 0.33° .

Número de puntos totales: Esta variable es la multiplicación del número de puntos horizontales y verticales obtenidos, los que dependen de la resolución del láser y servo motor respectivamente. Al ver la Figura 74, se desprende que el número de mediciones total será para el caso horizontal, $2\alpha/R_s$ donde R_s es la resolución del servo motor, y para el caso vertical es $2\alpha/R_l$ donde R_l es la resolución del láser. Siendo $\alpha = \arctan(L1/(L2 \cdot 2))$ es fácil ver que si $L1$ y $L2$ son escalados por el mismo factor β , α se mantiene constante y por lo tanto también el número de puntos totales por roca.

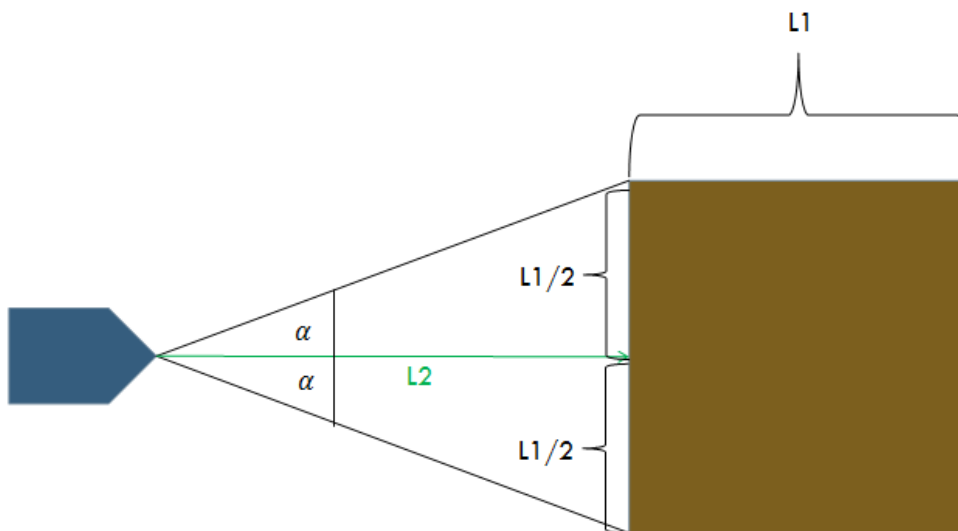


Figura 74- Geometría para la obtención de número de puntos por el láser

Capítulo 5

5 Conclusiones

En este trabajo se presenta un sistema de medición de granulometría de mineral utilizando la plataforma de desarrollo ROS, para el Advanced Mining Technology Center de la Universidad de Chile. La metodología propuesta es implementada y sujeta a pruebas para caracterizar el sistema, utilizando tanto el software como hardware requerido por el AMTC. Este sistema fue sujeto a distintas pruebas para caracterizar su desempeño. La primera serie de pruebas fue en un ambiente normal en el laboratorio, con once rocas distintas siendo la más pequeña de 18,5 [cm] y la más grande de 49,5 [cm], en donde el desempeño promedio de las diez pruebas fue de un 14,17 %, la mejor medición tuvo un error de 0,2 %, la peor un 43,28 % y la desviación estándar del error de todas las pruebas es un 11,8 %.

Dentro de los resultados obtenidos relacionados a la determinación de largos de las rocas, hay cuatro fuentes de errores. La primera se relaciona con aquellas rocas que quedaron posicionadas de manera que ellas mismas bloquean las mediciones del láser con respecto al resto de la roca, engañando al algoritmo y obteniendo un largo menor al real. Otra de las razones, que es similar, son aquellas rocas que son bloqueadas por otras, generando el mismo efecto anterior. También hay ciertas rocas con lados diagonales, de manera que el quiebre entre el fino y la roca misma no es lo suficientemente grande para detectar esa zona de la roca, dejando parte de ella fuera del clúster y obteniendo un largo menor al real. Finalmente se produce sobre segmentación en rocas hacia el fino, entregando largos más grandes de los reales.

El sistema fue sometido a pruebas en ambientes especiales para simular una mina real, la primera serie de pruebas fue mojando las rocas simulando un ambiente húmedo, en donde los resultados no cambiaron con respecto al ambiente original. Esto es de esperarse ya que las distancias medidas no debiesen cambiar si es que la superficie de las rocas está húmeda. De esta manera se concluye que estos resultados son representativos en el caso de ambientes húmedos.

La segunda prueba de ambientes se realizó en un ambiente con polvo. Para esta serie de pruebas no fue posible obtener resultados, ya que el láser no fue capaz de atravesar el polvo y generar una nube de datos representativa de la maqueta. Se desprende de esto que el láser no es lo suficientemente potente para la aplicación. De todas maneras no es posible concluir que las mediciones láser no son útiles en un ambiente con polvo representativo de la mina, para ello sería necesario volver a realizar las pruebas utilizando sensores de polvo y comparar los niveles de polvo con los correspondientes a una mina subterránea real.

Una tercera tanda de pruebas se realiza buscando minimizar el tiempo que se demora el sistema en entregar una nube de datos representativa de la maqueta, en esta se ve que el tiempo mínimo que se logró sin bajar el desempeño ni presentar problemas es doce segundos. Este

tiempo al bajar más comienza a presentar errores debido a que el láser no alcanza a tomar mediciones en ciertas líneas generando discontinuidades en la nube y debido a que se utiliza una estrategia de clustering euclidiano se segmentan incorrectamente las rocas.

El sistema logra entregar satisfactoriamente una recta de recomendación para el inicio de carguío siguiendo con la estrategia ideada. Lamentablemente no se pudo caracterizar el desempeño de esta estrategia ya que el LHD a escala no está funcional al término de este trabajo. Además se concluye del análisis teórico realizado en el capítulo anterior, que los resultados obtenidos en este trabajo utilizando una escala cinco veces más pequeña que en la realidad, son representativos de los que se obtendrían en una escala cinco veces más grande, es decir en una mina real.

Se puede concluir que se diseñó y construyó una maqueta a escala de un punto de extracción de manera satisfactoria ya representativa de la realidad, en el que se montó el hardware requerido para obtener satisfactoriamente una nube de puntos representativa de esta, utilizando la plataforma de trabajo ROS.

Se logró desarrollar un algoritmo capaz de diferenciar material fino de rocas considerables, y entregar una medida de estas. Este fue caracterizado en un ambiente normal de laboratorio y en un ambiente húmedo. Lamentablemente en el tercer ambiente que se buscaba caracterizar, con polvo, no se pudo ya que el láser no fue capaz de atravesar esté y obtener mediciones representativas de la maqueta. También se ideó una estrategia de carguío autónomo básica, entregando una línea de recomendación en el punto en donde comenzar el carguío con la pala del LHD

De esta manera se concluye que se logró diseñar y desarrollar un sistema de medición de granulometría de mineral utilizando la plataforma de desarrollo ROS y el hardware necesario, enfocado en el proyecto de automatización de LHD del Advanced Mining Technology Center de la Universidad de Chile.

El trabajo realizado en esta memoria permite entregarle al LHD una representación tridimensional del ambiente de trabajo, entregando los tamaños, posiciones y geometría de las rocas que puedan dificultar el carguío, abriendo las puertas para así seguir adelante con el desarrollo de nuevas estrategias de carguío autónomo que permitan avanzar en el desarrollo de la automatización del LHD en la minería subterránea.

5.1 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone que estando listo el LHD a escala del AMTC, se realicen pruebas utilizando la estrategia de carguío ideada en este trabajo y determinar su efectividad. Para disminuir la tasa de error en la medición de las rocas y aumentar la información sobre el ambiente se propone generar una plataforma móvil que permita al láser obtener mediciones desde las dos esquinas superiores o montar dos láseres de manera que quede uno en cada esquina y mezclar los

datos obtenidos. Otro de los aspectos que se pueden trabajar a futuro para mejorar el desempeño del algoritmo es implementar estrategias para reducir la sobre segmentación entre rocas y fino.

Otra propuesta para complementar el trabajo realizado, es llevar a cabo una serie de pruebas con distintos niveles de polvo medidos por sensores, de manera de poder caracterizar el nivel de penetración en esté del láser, y compararlo con los niveles que se tienen en una mina subterránea así pudiendo concluir sobre la efectividad de este láser en un ambiente con polvo representativo de la mina.

Como tercera propuesta, en caso de que se monte el láser sobre el LHD, se sugiere generar un algoritmo de interpolación en la nube de puntos de manera de reducir al mínimo el tiempo necesario para la obtención de una nube de datos. Además es importante volver a realizar pruebas con el láser montado sobre la máquina de manera de ver los cambios en el desempeño del algoritmo. Finalmente se sugiere realizar pruebas en una mina subterránea y comparar los resultados con los obtenidos experimentalmente en este trabajo.

Bibliografía

- [1] SOFOFA, «web.sofofa.cl,» [En línea]. Available: <http://web.sofofa.cl/informacion-economica/indicadores-economicos/estructura-de-la-industria/>.
- [2] J. V. Iturra, «www.centroestudios.cl,» 2003. [En línea]. Available: <http://www.centroestudios.cl/articulos/cobresueldodechile.htm>.
- [3] J. Barreno, «www.elmundo.es,» 19 02 2012. [En línea]. Available: <http://www.elmundo.es/america/2012/02/15/noticias/1329346204.html>.
- [4] LeFeaux, «Apuntes de carguío y transporte,» Universidad de Chile, 1997.
- [5] J. O. C., «Apuntes de explotación de minas, curso MI57E,» Santiago, 2008.
- [6] R. B. R. a. S. Cousins, «3D is here: Point Cloud Library (PCL),» *IEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 9 mayo 2011.
- [7] A. Rebguns, «dinamixel_motor ROS package,» [En línea]. Available: http://wiki.ros.org/dynamixel_motor.
- [8] ROS, «Connecting to Dynamixel bus,» [En línea]. Available: http://wiki.ros.org/dynamixel_controllers/Tutorials/ConnectingToDynamixelBus.
- [9] ROS, «Creating a joint controller,» [En línea]. Available: http://wiki.ros.org/dynamixel_controllers/Tutorials/CreatingJointPositionController.
- [10] C. Rockey, «Urg_node,» [En línea]. Available: http://wiki.ros.org/urg_node.
- [11] D. Gossow, «Laser_assembler package de ROS,» [En línea]. Available: http://wiki.ros.org/laser_assembler.
- [12] P. C. Library, «Clase Pass Trhough libreria Point Cloud,» [En línea]. Available: http://docs.pointclouds.org/1.7.1/classpcl_1_1_pass_through.html.
- [13] P. C. Library, «Normal Estimation PCL,» [En línea]. Available: http://docs.pointclouds.org/1.0.1/classpcl_1_1_normal_estimation.html.
- [14] P. C. Library, «Conditional Euclidean Clustering,» [En línea]. Available: http://pointclouds.org/documentation/tutorials/conditional_euclidean_clustering.php.
- [15] P. C. Library, «Region Growing,» [En línea]. Available: http://pointclouds.org/documentation/tutorials/region_growing_segmentation.php.
- [16] P. C. Library, «Compute3DCentroid,» [En línea]. Available: http://docs.pointclouds.org/1.7.0/group__common.html#gaf5729fae15603888b49743b118025290.
- [17] «Conditional Euclidean Clustering,» [En línea]. Available: http://pointclouds.org/documentation/tutorials/conditional_euclidean_clustering.php.
- [18] R. Castro, «Equipos de carguío-transporte-vaciado,» 2008.
- [19] T. A. Mathew J. Thurley, «An Industrial 3D Vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation,» *ScienceDirect*, 2007.
- [20] K. C. N. Mathew J. turley, «Identification and sizing of the entirely visible rocks from a 3D surface data segmentation of laboratory rock piles,» *ScienceDirect*, 2007.
- [21] M. J. Thurley, «Fragmentation Size Measurement using 3D Surface Imaging,» 2009.
- [22] J. U. N. K. V. V. A. Q. P. M. A. F. B. Douillard, «On the Segmentation of 3D LIDAR Point Clouds».
- [23] G. Vosselman, «POINT CLOUD SEGMENTATION FOR URBAN SCENE

CLASSIFICATION,» 2013.

- [24] J. Delmerico, «PCL Tutorial: The Point Cloud Library By Example,» 2013.
- [25] F. A. v. d. H. G. V. T. Rabbania, «SEGMENTATION OF POINT CLOUDS USING SMOOTHNESS CONSTRAINT,» *ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'*.
- [26] B. Poudel, «3D Point Cloud Segmentation,» 2013.

Anexos

Resultados pruebas

Roca	Largo Calculado	Largo real	Error (%)
8	573,600	332,207	0,421
7	833,900	774,684	0,071
6	359,100	409,055	0,139
4	648,930	589,668	0,091
5	2191,770	817,010	0,627
1	601,440	744,735	0,238
2	532,970	435,283	0,183
3	329,300	385,377	0,170
1	601,44	656,64	0,09
2	532,97	374,77	0,30
4	648,93	739,58	0,14
8	573,60	614,48	0,07
9	658,00	626,68	0,05
7	833,90	895,23	0,07
4,00	648,93	739,20	0,14
1,00	601,44	950,40	0,58
9,00	658,00	526,32	0,20
10,00	1358,40	1281,02	0,06
7,00	833,90	847,97	0,02
11,00	807,00	646,28	0,20
8,00	573,60	444,93	0,22
4	648,93	474,55	0,27
2	532,97	418,22	0,22
9	658,00	582,04	0,12
11	807,00	547,29	0,32
8	573,60	669,24	0,17
7	833,90	1375,92	0,65
10	1358,40	1060,80	0,22
7	833,90	995,60	0,19
2	532,97	339,92	0,36
9	658,00	711,24	0,08
4	648,93	608,16	0,06
10	1358,40	962,45	0,29
11	807,00	618,39	0,23
8	573,60	159,30	0,72
9	658,00	373,64	0,43

5	2191,77	2253,10	0,03
2	532,97	444,08	0,17
10	1358,40	1563,91	0,15
4	648,93	552,05	0,15
8	573,60	671,01	0,17
11	807,00	921,90	0,14
10	1358,40	995,43	0,27
9	658,00	630,04	0,04
3	329,30	182,66	0,45
8	573,60	825,49	0,44
1	601,44	807,51	0,34
4	648,93	563,95	0,13
10	1358,40	1164,32	0,14
11	807,00	897,19	0,11
2	532,97	479,09	0,10
3	329,30	300,94	0,09
4	648,93	557,36	0,14
1	601,44	712,79	0,19
8	532,97	478,62	0,10
9,00	658,00	789,82	0,20
11,00	807,00	841,00	0,04
2,00	532,97	501,87	0,06
3,00	833,90	945,00	0,13
4,00	648,93	531,55	0,18
1,00	601,44	653,67	0,09
8,00	573,60	693,13	0,21
5	2191,77	1573,20	0,28
7	833,90	1094,30	0,31
8	573,60	547,04	0,05
9	658,00	748,09	0,14
11	807,00	433,17	0,46
1	601,44	573,21	0,05
2	532,97	375,05	0,30
PROMEDIO	769,112	715,512	0,207