

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 FORMULACIÓN DEL ESTUDIO PROPUESTO	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO	4
1.4 METODOLOGÍA Y ACTIVIDADES.....	4
1.5 PLAN DE TRABAJO	6
2 MARCO TEÓRICO	7
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	7
2.1.1 <i>Fotogrametría Analógica</i>	8
2.1.2 <i>Fotogrametría Analítica</i>	9
2.1.3 <i>Fotogrametría Digital</i>	10
2.2 STRUCTURE FROM MOTION (SFM)	11
2.2.1 <i>Primera Aproximación al análisis de imágenes</i>	12
2.2.2 <i>Modelos Lineales</i>	13
2.2.3 <i>Modelos No Lineales</i>	18
2.3 GEORREFERENCIACIÓN.....	19
2.4 RESOLUCIÓN EN TERRENO	22
2.5 OCLUSIÓN.....	23
2.6 DISTANCIA A LA FRENTE	24
3 ASPECTOS METODOLÓGICOS	25
3.1 ELECCIÓN DE LUGARES A ESTUDIAR.....	25
3.1.1 <i>Muestra de laboratorio</i>	25
3.1.2 <i>Deformación Frágil</i>	25
3.1.3 <i>Deformación Compleja</i>	26
3.2 EQUIPO Y TOMA DE FOTOGRAFÍAS.....	27
3.3 PROCESAMIENTO DE FOTOGRAFÍAS: RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL	29
3.4 GEORREFERENCIACIÓN.....	30
3.5 MAPEO ESTRUCTURAL DIGITAL	32
3.6 CONSTRUCCIÓN DE PLANOS	32

4 MUESTRA DE LABORATORIO	34
4.1 LEVANTAMIENTO DE DATOS	34
4.1.1 Descripción de la muestra	34
4.1.2 Toma de fotografías	35
4.1.3 Construcción del modelo digital	36
4.1.4 Georreferenciación y factor de escala	36
4.1.5 Mapeo de discontinuidades.....	37
4.2 RESULTADOS.....	38
5 DEFORMACIÓN FRÁGIL, CERRO BLANCO.....	39
5.1 ZONA DE ESTUDIO	39
5.2 MARCO GEOLÓGICO	40
5.2.1 Formación Abanico (Aguirre, 1960).....	40
5.2.2 Unidad Chicureo-Recoleta	40
5.2.3 Tobas Soldadas San Cristóbal.....	41
5.3 LEVANTAMIENTO DE DATOS	43
5.3.1 Descripción del afloramiento	43
5.3.2 Mapeo de discontinuidades de forma tradicional.....	43
5.3.3 Toma de fotografías	44
5.3.4 Georreferenciación.....	44
5.3.5 Construcción del modelo digital	45
5.3.6 Mapeo de discontinuidades en modelo digital 3-D	46
5.4 RESULTADOS.....	46
5.4.1 Datos obtenidos mediante técnicas tradicionales.....	47
5.4.2 Datos obtenidos mediante fotogrametría digital	49
5.4.3 Agrupación de datos.....	50
6 DEFORMACIÓN COMPLEJA, QUEBRADA LOS SAPOS.....	52
6.1 ZONA DE ESTUDIO	52
6.2 MARCO GEOLÓGICO	53
6.2.1 Formación Hornitos (Segerstrom, 1959).....	53
6.2.2 Unidad 7.....	54
6.2.3 Unidad 9.....	55
6.3 ZONA 1, PIQUE MINERO	56
6.3.1 Levantamiento de datos.....	56
6.3.1.1 Descripción del afloramiento.....	56
6.3.1.2 Toma de fotografías.....	57
6.3.1.3 Construcción del modelo digital.....	58

6.3.1.4	Mapeo de discontinuidades y construcción de planos en modelo digital 3-D	59
6.3.2	<i>Resultados Modelo de deformación Compleja, Zona1</i>	61
6.3.2.1	Datos Estructurales	63
6.4	ZONA 2, LABOR TIPO TRINCHERA	64
6.4.1	<i>Levantamiento de datos</i>	64
6.4.1.1	Descripción del afloramiento	64
6.4.1.2	Toma de fotografías	66
6.4.1.3	Construcción del modelo digital.....	66
6.4.1.4	Mapeo de discontinuidades y construcción de planos en modelo digital 3-D	68
6.4.2	<i>RESULTADOS</i>	71
6.4.2.1	Error de reconstrucción	71
6.4.2.2	Modelo tridimensional de deformación compleja	72
7	DISCUSIÓN	73
7.1	MUESTRA DE LABORATORIO	73
7.2	MODELO DE DEFORMACIÓN FRÁGIL Y GEORREFERENCIACIÓN	78
7.3	MODELO DE DEFORMACIÓN COMPLEJA, ZONA 1	80
7.4	MODELO DE DEFORMACIÓN COMPLEJA, ZONA 2	82
7.5	PESO DE INFORMACIÓN DE ENTRADA, TIEMPO Y ARCHIVOS DE SALIDA	84
7.6	ALGORITMO MATEMÁTICO Y APLICACIÓN EN ESTUDIO DE SONDAJES	86
7.7	ANÁLISIS FUTUROS	88
7.7.1	<i>Posibilidad de Re-Estudio geomorfológico en el pasado reciente</i>	88
7.7.2	<i>Reconstrucción digital en modelos análogos.</i>	91
7.8	ANÁLISIS F.O.D.A.....	92
8	CONCLUSIONES	97
9	BIBLIOGRAFÍA	99

10 ANEXOS	1
10.1 ANEXO A, MODELO DE MUESTRA DE ESQUISTO.....	1
10.2 ANEXO B, MODELO DE MUESTRA FÓSIL.....	2
10.3 ANEXO C, MODELO DE AFLORAMIENTO, BASALTOS COLUMNARES, CERRO SANTA LUCÍA	3
10.4 ANEXO D, MODELO DE MUESTRA DE SERIE SEDIMENTARIA.....	4
10.5 ANEXO E, MODELO DE TESTIGO DE ROCA.....	5
10.6 ANEXO F, MODELO DE LA CORDILLERA DE LA SAL, 1961.....	6

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Plan de Trabajo.....	6
Tabla 2: Datos estructurales de los 94 planos medidos de manera tradicional sobre talud de Cerro Blanco.	47
Tabla 3: Resumen de datos de dip y dipdirection de los diferentes sets estructurales generados a partir de mediciones tradicionales sobre el talud de roca y mediante medición sobre reconstrucciones digitales.....	51
Tabla 4: Resumen de variaciones en Dip y Dipdirection entre los sets estructurales construidos a partir de datos tomados mediante métodos tradicionales y mediante fotogrametría digital.	78
Tabla 5: Resumen de los datos de rendimiento de los diferentes objetos reconstruidos. CB: Cerro Blanco, DCZ1: Deformación compleja Zona 1, DCZ2 371: Deformación compleja Zona 2 a partir de 371 fotografías, DCZ2 572: Deformación compleja Zona 2 a partir de 371 fotografías, M de M: muestra de mano, AA: Anexo A-Esquisto, AB: Anexo B-Muestra fósil, AC: Anexo C-basaltos columnares, AD: Anexo D-Muestra serie sedimentaria y AE: Anexo E-Muestra testigo de roca.	84

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

- Figura 1:** Esquema resumen de la evolución histórica de la teoría de fotogrametría y estereoscopia, de izquierda a derecha se aprecia los bosquejos del artista renacentista Leonardo da Vinci, bosquejo de las primeras ecuaciones matemáticas relacionadas a perspectiva descritas por Johan Heinrich Lambert en su obra Freye Perspective, primera fotografía de la historia tomada por Joseph Nicéphore Niépce en la ciudad de Le Gras y, por último, fotografía de Charles Wheatstone, primer hombre en describir el fenómeno de la estereoscopia. 8
- Figura 2:** Ilustraciones de los personajes, inventos e inventores más relevantes en los campos de fotogrametría analógica, analítica y digital a lo largo de la historia del siglo XX. 9
- Figura 3:** Esquema ilustrativo del nivel de solapamiento entre fotografías para para con ellas obtener una correcta visión estereoscópica, este debe ser de un 60% lateral y un 30% longitudinal. Obtenido de Duellis (2015). 10
- Figura 4:** Esquema del uso de SFM. La proyección del punto P_j perteneciente al espacio 3D sobre la imagen de la cámara en el tiempo y espacio k resulta en el punto 2D llamado $P_{j,k}$. Modificado de Kurz, Thormählen y Siedel (2011). 11
- Figura 5:** Esquema ilustrativo de proyección en perspectiva. 13
- Figura 6:** Esquema ilustrativo en caso de geometría epipolar. 14
- Figura 7:** Esquema ilustrativo en caso de geometría trifocal. 15
- Figura 8:** Esquema ilustrativo en caso de proyección ortográfica. 17
- Figura 9:** Arreglo para diferentes métodos de georreferenciación. Los cuadrados representan la posición de la cámara y las estrellas la de los puntos de control. Si estas figuras o líneas se encuentran en rojo indican que la medicación es local. Obtenido de Sturzenegger y Stead (2009b). 21
- Figura 10:** Ilustración de la oclusión y el sesgo por orientación vertical. Cuando la línea de visión vertical de la cámara es paralela a una discontinuidad, existe la posibilidad de sesgo por orientación. Si la línea de visión vertical de la cámara se dirige hacia arriba en un ángulo más pronunciado que una discontinuidad, la oclusión en una zona de sombra. Modificado de Sturzenegger y Stead (2009b). 23
- Figura 11:** Distancia propuesta entre par de fotografías para su uso en fotogrametría. En caso de que el observador se sitúe respecto al frente a una distancia D debe existir una relación de distancia lateral (*baseline*) entre el par de estaciones de toma de fotografías de entre $1/8$ a $1/5$ de la distancia D dada. (Gaich y Pötsch, 2012). 24
- Figura 12:** Fotografía de cámara Canon PowerShot D30 utilizada en este trabajo, su distancia focal varía entre 5-25mm. 28
- Figura 13:** Imagen la cual muestra la distribución de la toma de fotografías del talud estudiado en el caso de deformación frágil sobre el modelo reconstruido. 28

Figura 14: Esquema ilustrativo del proceso de reconstrucción tridimensional mediante la técnica de fotogrametría digital.	30
Figura 15: Esquema del sistema de georreferenciación propuesto en este trabajo. La X marca el punto medido con GPS, mientras que los puntos muestran los puntos de control tomados mediante la medición manual de distancias con respecto a la X.....	31
Figura 16: Fotografía de la muestra de mano.	34
Figura 17: Imagen la cual muestra la distribución de la toma de fotografías de la muestra de mano estudiada sobre el modelo reconstruido.	35
Figura 18: Imagen cual muestra la exageración en 100 veces de las dimensiones de la muestra de mano.	36
Figura 19: Imagen la cual muestra la distribución de las estructuras mapeadas sobre el modelo digital texturizado, en rojo se observan las fallas inversas y normales mapeadas indistintamente, mientras que en azul se observan los cuatro niveles guías mapeados.	37
Figura 20: Visualización en frontal de los planos de fallas y planos de niveles guías construidos a partir del modelo de muestra de mano. Sobre los planos de niveles guías se ha realizado un análisis de manteo.	38
Figura 21: Mapa de la zona de estudio correspondiente a Cerro Blanco, comuna de Recoleta, Región Metropolitana, Chile. En azul se muestran las calles principales circundantes al área y en naranja la posición exacta del talud estudiado.....	39
Figura 22: Columna estratigráfica tipo de la Formación Abanico. Modificado de Sellés, 1999.	41
Figura 23: Mapa geológico del cordón del Cerro San Cristóbal. Obtenido de Selles, 1999.	42
Figura 24: La Figura 24a muestra parte del talud modelado correspondiente a Cerro Blanco, mientras que en la Figura 24b se muestra un zoom de esta señalándose los puntos en donde se realizó mediciones de rumbo y manteo de manera tradicional.....	44
Figura 25: La fotografía muestra parte del talud modelado, en ella se señala la posición de los puntos de control para georreferenciación utilizados en el proceso de reconstrucción.....	45
Figura 26: Modelo tridimensional del talud de Cerro Blanco, resultado de la reconstrucción por medio de fotogrametría digital. En rojo se observan los puntos de obtención de datos de rumbo y manteo mediante reconstrucción digital.....	46
Figura 27: Distribución de la proyección de los polos correspondientes a los 94 planos de fracturas medidos de manera tradicional sobre talud de Cerro Blanco.	48
Figura 28: Distribución de densidad de los polos correspondientes a los 94 planos de fracturas medidos de manera tradicional sobre talud de Cerro Blanco.	48

Figura 29: Distribución de la proyección de los polos correspondientes a los 133 planos de fracturas medidos mediante reconstrucción digital del talud de Cerro Blanco.....	49
Figura 30: Distribución de densidad de los polos correspondientes a los 133 planos de fracturas medidos mediante reconstrucción digital del talud de Cerro Blanco.	49
Figura 31: La Figura 31a muestra la agrupación en 4 sets estructurales a partir de los 94 planos de fracturas medidos de manera tradicional sobre talud de Cerro Blanco, mientras que en la Figura 31b se observan estos mismos polos y sets a los que se le aplica la corrección de Terzaghi.....	50
Figura 32: Agrupación en 4 sets estructurales a partir de los 133 planos de fracturas medidos mediante reconstrucción digital del talud de Cerro Blanco.....	51
Figura 33: Fotografía satelital la cual muestra las principales rutas de acceso a las dos zonas estudiadas en área denominada como Quebrada los sapos. Las rutas mostradas son Ruta 5, ruta c-451, ruta c-439 y ruta c-445; el punto en naranja muestra la posición de la Zona 1 y el punto en verde la posición de la Zona 2.	52
Figura 34: Mapa geológico de la zona de Quebrada los Sapos. Obtenido de De Ramón, 2015.	53
Figura 35: Fotografía tomada en orientación N-S, la cual corresponde a la entrada del pique estudiado, se aprecian niveles verdes mineralizados con óxidos de cobre los cuales forman un sistema de dúplex.....	57
Figura 36: Fotografía de la toma de mediciones de distancias entre puntos de control usados en la georreferenciación, la orientación de la fotografía es N-S.....	58
Figura 37: La Figura 37a muestra el resultado final de la reconstrucción tridimensional del pique desde una vista superior mientras que la Figura 37b muestra una vista frontal del mismo. En ambas figuras se observan los bloques sur, centro y norte.	59
Figura 38: Vista al sur de bloque sur, en rojo se encuentran mapeadas fracturas, en verde las fallas y en celeste las vetillas.	60
Figura 39: Vista en perspectiva del bloque centro y bloque norte, en violeta y en anaranjado las fracturas correspondientes a cada bloque, mientras que en verde se mapea el sistema de fallas.	60
Figura 40: Se muestra diferentes visiones de una misma escena correspondiente al bloque norte y parte del bloque centro de la reconstrucción digital. En verde se observan las trazas de fallas mapeadas mientras que anaranjado se observan las trazas de fracturas, los planos verdes corresponde a los planos de fallas confeccionados a partir del mapeo de fallas.	61
Figura 41: Visualización en perspectiva de los diferentes planos generados a partir del mapeo de discontinuidades en el modelo de deformación compleja zona1. En verde planos de falla, en morado y azul planos de fractura, en negro planos con menor grado de certeza.	62

Figura 42: Visualización en perspectiva de los planos de fallas (en verde) generados a partir del mapeo de discontinuidades.	62
Figura 43: Figura 43a modelo tridimensional pique minero, vista al norte, bloque centro y bloque norte. En rojo se observan los puntos de obtención de datos de rumbo y manteo mediante reconstrucción digital. Figura 43b Proyección de datos estructurales sobre red estereográfica.	63
Figura 44: Figura 44a modelo tridimensional pique minero. Vista al noroeste, sobre él se muestra la traza de perfil estructural confeccionado. Figura 44b Perfil estructural de la zona, en verde se aprecia las trazas de fallas, mientras que en morado una fractura que atraviesa a ambos flancos del pique.	64
Figura 45: Figura 45a y Figura 45b corresponden a vistas de la entrada y zona interior del afloramiento. En la Figura 45c se observa registro de sistemas de dúplex.	65
Figura 46: Vista hacia el interior de la faena minera, fotografías tomada en dirección norte. Figura 46a corresponde a fotografía tomada a las 11:14, Figura 46b corresponde a fotografía tomada a las 13:25.....	66
Figura 47: La Figura 47a muestra el resultado final de la reconstrucción tridimensional de la faena minera desde una vista superior mientras que la Figura 47b muestra una vista en perspectiva. En ambas figuras se observan los bloques este y oeste.....	67
Figura 48: Vista oeste del bloque oeste, en naranja se han mapeado las fracturas no mineralizadas y en verde las fracturas mineralizadas, no se observa presencia de fallas claras en este bloque.	68
Figura 49: Vista al este del bloque este, las estructuras mapeadas en rojo corresponden a trazas de fracturas no mineralizadas, en verde a fracturas mineralizadas y en azul a fallas indistintamente de su naturaleza.	69
Figura 50: Diferentes vistas del sistema dúplex formado al extremo sur del bloque este de la reconstrucción digital. En azul se observan las trazas de fallas mapeadas mientras que en rojo se observan las trazas de fracturas, los correspondientes planos de fallas y fracturas que conforman el sistema siguen estos mismos colores.	70
Figura 51: Modelos tridimensionales de labor minera. Figura 51a modelo digital confeccionado a partir de fotografías tomadas entre las 11:31 y las 12:20. Figura 51b modelo digital confeccionado a partir de fotografías tomadas entre las 13:00 y las 13:40. Figura 51c error en reconstrucción digital al intentar utilizar ambas fuentes de datos simultáneamente.	71
Figura 52: Visualización en perspectiva de los planos de fallas (en azul) y planos de fractura (en rojo) generados a partir del mapeo de discontinuidades sobre el modelo de deformación compleja zona 2.	72
Figura 53: Esquema de las diferentes discontinuidades modeladas en la muestra de mano.	73
Figura 54: Primer paso en la reconstrucción digital de la muestra de mano.	74
Figura 55: Paso desde Etapa 1 a Etapa 2. Movimiento de falla inversa 1 en - 0,01[m], escala exagerada 100 veces.	75

Figura 56: Paso desde Etapa 2 a Etapa 3. Movimiento de falla inversa 5 en - 0,02[m], escala exagerada 100 veces.	75
Figura 57: Paso desde Etapa 3 a Etapa 4. Movimiento de falla inversa 4 en - 0,07[m] para Nivel Guía 4 y en - 0,15[m] para Nivel Guía 3, escala exagerada 100 veces.	76
Figura 58: Paso desde Etapa 4 a Etapa 5. Movimiento de falla inversa 8 en - 0,02[m], escala exagerada 100 veces.	76
Figura 59: Etapa final de reconstrucción digital en muestra de mano.	77
Figura 60: En verde fotogrametría digital 86°/192° y en rojo tradicional 87°/360°.	79
Figura 61: Se observan los planos que conforman las fallas que forman el sistema dúplex. En azul se observan las fallas de orientación sur este, mientras que en verde se observan las fallas de orientación noreste.	82
Figura 62: Gráfico de MB totales ingresados para la generación de modelos digitales versus tiempo total de reconstrucción.	85
Figura 63: Gráfico de MB totales ingresados para la generación de modelos digitales versus peso del modelo digital reconstruido.	86
Figura 64: Esquema de captura de fotografías en caso de testigos de roca para su posterior reconstrucción digital.	87
Figura 65: Fotografías tomadas en 1961 por International Aereo Service Copr. Mediante una cámara Zeiss, distancia focal 152:8mm en la zona del Salar de Atacama, Chile.	88
Figura 66: Figura 66a: Modelo de elevación digital obtenido a partir de imágenes tomadas en 1961, centrado a los 552299.51 m E y 7425711.31 m S. Figura 66b: Imagen satelital actual de la zona obtenida mediante Google Earth.	89
Figura 67: Figura 67a, Figura 67b y Figura 67c corresponden a fotografías tomadas por medio de vuelos Hycon durante el año 1956 en el flanco oeste del Volcán Tupungatito. Figura 67d: Modelo digital de la zona del Volcán Tupungatito a partir de fotografías tomadas en 1956.	90
Figura 68: Figura 68a: Vista en perspectiva al modelo análogo presentado por Bustamante (2016), sobre el cual se ha realizado el mapeo de estructuras. Figura 68b: Vista en perspectiva del depósito Syn-“tectónico” del modelo análogo estudiado, se calcula de manera preliminar un volumen de 294,895cm ³	91
Figura 69: Análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (F.O.D.A.) del uso de la técnica de fotogrametría digital en el contexto de este trabajo y en las ideas planteadas en el mismo.	92
Figura 70: Anexo A. Figura 69a: Fotografía de muestra de mano Esquisto, tomada en el Laboratorio de Tectónica y Paleomagnetismo de la Universidad de Chile. Figura 69b: Dos vistas en perspectiva de modelo digital de muestra de mano esquisto.	Anexo + 1
Figura 71: Anexo B. Fotografía de muestra fósil, tomada en el Laboratorio de Tectónica y Paleomagnetismo de la Universidad de Chile.	Anexo + 2