

# Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos .....	2
1.2 Ubicación de las zonas de estudio .....	2
1.2.1 Ladera de Río Colorado .....	2
1.2.2 Ladera de Cerro Catedral .....	3
1.3 Metodología.....	4
2. Antecedentes generales.....	6
2.1 Marco Geomorfológico .....	6
2.2 Marco Geológico .....	7
2.2.1 Rocas estratificadas.....	7
2.2.2 Depósitos no consolidados.....	10
2.2.3 Rocas intrusivas .....	11
2.3 Marco Tectónico .....	12
2.4 Marco Sismológico .....	14
3. Levantamiento y análisis de datos LiDAR .....	16
3.1 Antecedentes.....	16
3.1.1 Geología local .....	16
3.2 Obtención de datos en terreno .....	19
3.3 Metodología de procesamiento de datos.....	20
3.4 Análisis estructural .....	22
3.5 Análisis cinemático.....	27
4. Análisis en 3DEC de Cerro Catedral.....	32
4.1 Antecedentes.....	32
4.1.1 Descripción del área de estudio .....	32
4.1.2 Litología.....	32
4.1.3 Propiedades mecánicas .....	33
4.1.4 Características estructurales.....	34
4.1.5 Actividad sísmica local .....	35
4.2 Modelamiento numérico mediante el método de elementos discretos .....	36
4.2.1 3DEC.....	37
4.3 Metodología desarrollada .....	38
4.3.1 Reconstrucción de la geometría original.....	38
4.3.2 Modelo 3D de superficie.....	40

4.3.3 Modelamiento en 3DEC .....	42
4.4 Resultados de los análisis en 3DEC.....	52
4.4.1 Modelamiento estático .....	52
4.4.2 Modelamiento dinámico .....	61
5. Discusiones.....	96
5.1 Levantamiento y análisis de datos LiDAR .....	96
5.1.1 Levantamiento topográfico .....	96
5.1.2 Levantamiento estructural.....	96
5.1.3 Análisis cinemático .....	97
5.2 Análisis en 3DEC de Cerro Catedral .....	97
5.2.1 Metodología .....	97
5.2.2 Propiedades mecánicas y modelos constitutivos .....	97
5.2.3 Condiciones de borde.....	98
5.2.4 Modelos estáticos.....	98
5.2.5 Modelos dinámicos .....	100
6. Conclusiones y recomendaciones .....	106
7. Bibliografía.....	108
Anexos.....	113
1. Código en 3DEC del modelo estático.....	113
2. Código en 3DEC del modelo dinámico .....	117
3. Modelo dinámico con puente de roca en el Set estructural 3 .....	120
4. Espectros de Fourier de las señales de salida .....	120

## Índice de Figuras

Figura 1: Ladera de estudio en Río Colorado y su ubicación geográfica.....	3
Figura 2: Imagen de la ladera de estudio en el sector de Río Colorado. ....	3
Figura 3: Ladera de estudio en Cerro Catedral, su ubicación geográfica y el depósito asociado a la remoción en masas. Extraído de García (2016).....	4
Figura 4: Principales unidades geomorfológicas ubicadas en Chile Central entre los 32°S y 35°S. Extraído de Fock (2005) .....	6
Figura 5: Mapa Geológico de la zona cordillerana entre los 33°30' y los 34°00' y las áreas de estudio en los recuadros. Modificado de Fock (2005).....	8
Figura 6: Ciclo tectónico andino y sus subdivisiones en etapas y subetapas, y eventos tectónicos que marcaron su desarrollo. Extraído de Charrier et al. 2009.....	12
Figura 7: Zonas sismogénicas del margen continental Chileno. a. Sismos interplaca; b. Sismos intraplaca de profundidad intermedia; c. Sismos superficiales de intraplaca; d. Sismos Outer-rise. Extraído de Centro Sismológico Nacional (2016).....	14
Figura 8: Mapa geológico de la zona de estudio con la leyenda y simbología asociada. Modificado de Moreno, Thiele & Varela (1991) .....	17

Figura 9: Perfil WNW-ESE del Río Colorado. Se muestra un anticlinal presente en la zona. Modificado de Fock (2005). .....	18
Figura 10: Área de estudio, su depósito asociado y extensión aproximada. ....	18
Figura 11: Imagen del área de estudio. Se indica la estratificación (negro), intrusiones (amarillo) y conos de detritos (azul).....	19
Figura 12: Equipo utilizado en terreno. A.- Receptor de GPS. B.- Escáner Láser.....	19
Figura 13: Puntos de medición con LiDAR y rangos aproximados de barrido.....	20
Figura 14: Imagen resumen de la exportación de datos. ....	21
Figura 15: A.- DEM generado B.- Hillshade creado a partir del DEM. ....	22
Figura 16: Clasificación de los rangos de pendientes de la zona (Slope). Hillshade usado como base. ....	23
Figura 17: Imagen satelital de la zona con las estructuras analizadas en amarillo.....	23
Figura 18: Plano triangular, vectores directores y su vector normal. ....	24
Figura 19: Sets estructurales obtenidos para la zona. ....	25
Figura 20: Perfil transversal al Set 4 y su manteo. En anaranjado se muestra la estructura analizada. ....	26
Figura 21: Perfil transversal realizado en la ladera y posible manteo original.....	26
Figura 22: Red estereográfica con las estructuras de la zona de estudio.....	27
Figura 23: Red estereográfica y zona crítica para falla plana (variable según el ángulo de fricción de la estructura). ....	28
Figura 24: Zona de inestabilidad de polos para toppling flexural (Zona varía según el valor del ángulo de fricción). ....	30
Figura 25: Análisis cinemático para toppling directo y las zonas críticas asociadas. ....	31
Figura 26: Curvas de atenuación para Cerro Catedral en función del radio de ruptura, considerando los modelos de Sadigh, Idriss y Ambraseys. Extraído de García (2016). ....	35
Figura 27: Elementos y propiedades de los bloques discretos en UDEC y 3DEC. Modificado de Itasca, 2017 .....	36
Figura 28: Zona de estudio y región seleccionada para el modelamiento.....	39
Figura 29: Trazas de los perfiles transversales creados para la reconstrucción de la geometría original del talud. ....	40
Figura 30: Superficie de triangulación de la zona de estudio y la zona de escarpe.....	41
Figura 31: Superficie de poliprismas generada en 3DEC y la zona de escarpe. ....	41
Figura 32: Regiones del modelo en 3DEC. ....	42
Figura 33: Distribución de las discontinuidades en el macizo rocoso en imagen satelital (A) y en modelo en 3DEC (B) .....	43
Figura 34: Ubicación de los puntos de control .....	45
Figura 35: Ejes de referencia utilizados en los análisis. ....	46
Figura 36: Espectros de Fourier representativos para las estaciones del terremoto de Northridge (1994). ....	49
Figura 37: Espectros de Fourier representativos para las estaciones del terremoto de Chi-Chi (1999). ....	50
Figura 38: Espectros de Fourier representativos para las estaciones del terremoto de Kobe (1995). ....	51
Figura 39: Magnitud de desplazamiento en modelo libre de estructuras. ....	52
Figura 40: Magnitud de desplazamiento en metros para los modelos sin puentes de roca. CE = Cohesión de estructuras. ....	53
Figura 41: Desplazamiento en función del tiempo para los modelos sin puentes de roca. CE= Cohesión de estructuras. Eje X: N26E; Eje Y: N64W; Eje Z: vertical. ....	54

Figura 42: Modelo con puente de roca en el Set estructural 3. A: modelo en 3DEC. B: Imagen satelital con las estructuras. ....	55
Figura 43: Magnitud de desplazamiento en metros para los modelos con puente de roca en el Set estructural 3. CE = Cohesión de estructuras.....	55
Figura 44: Desplazamiento en función del tiempo para los modelos con puentes de roca en el Set Estructural 3. CE= Cohesión de estructuras. Eje X: N26E; Eje Y: N64W; Eje Z: vertical. ....	56
Figura 45: Modelo con puente de roca en el Set estructural 2. A: modelo en 3DEC. B: Imagen satelital con las estructuras .....	57
Figura 46: Magnitud de desplazamiento en metros para los modelos con puente de roca en el Set estructural 2. CE = Cohesión de estructuras.....	57
Figura 47: Desplazamiento en función del tiempo para los modelos con puentes de roca en el Set Estructural 2. CE= Cohesión de estructuras. Eje X: N26E; Eje Y: N64W; Eje Z: vertical. ....	58
Figura 48: Modelo estático final con puente de roca en el Set estructural 2. A: modelo en 3DEC. B: Imagen satelital con las estructuras .....	59
Figura 49: Magnitud de desplazamiento en metros para los modelos con puente de roca en el Set estructural 2. CE = Cohesión de estructuras.....	59
Figura 50: Desplazamiento en función del tiempo para los modelos finales, con puentes de roca en el Set Estructural 2. CE= Cohesión de estructuras. Eje X: N26E; Eje Y: N64W; Eje Z: vertical. ....	60
Figura 51: Magnitud de desplazamiento para la estación ANA. Escala de colores de 0 a 5.5 metros. ....	62
Figura 52: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación ANA. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	63
Figura 53: Magnitud de desplazamiento para la estación 116. Escala de colores de 0 a 5.5 metros. ....	65
Figura 54: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación 116. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	66
Figura 55: Magnitud de desplazamiento para la estación PUL. CE corresponde a la cohesión de estructuras. Escala de colores de 0 a 5.5 metros.....	68
Figura 56: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación PUL. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical.....	69
Figura 57: Magnitud de desplazamiento para la estación TTN 042. Escala de colores de 0 a 10 metros. ....	71
Figura 58: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación TTN 042. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	72
Figura 59: Magnitud de desplazamiento para la estación TCU 102. Escala de colores de 0 a 10 metros. ....	74
Figura 60: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación TCU 102. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	75
Figura 61: Magnitud de desplazamiento para la estación CHY 028. CE corresponde a la cohesión de estructuras. Escala de colores de 0 a 10 metros.....	77
Figura 62: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación CHY 028. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical.....	78
Figura 63: Magnitud de desplazamiento para la estación MZH. Escala de colores de 0 a 6.5 metros. ....	80

Figura 64: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación MZH. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	81
Figura 65: Magnitud de desplazamiento para la estación KAK. Escala de colores de 0 a 6.5 metros. ....	83
Figura 66: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación KAK. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	84
Figura 67: Magnitud de desplazamiento para la estación NIS. CE corresponde a la cohesión de estructuras. Escala de colores de 0 a 6.5 metros. ....	86
Figura 68: Desplazamiento en función del tiempo de los puntos de control para la estación NIS. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	87
Figura 69: Modelo y Puntos de Control de García et al. (2018). CG corresponde al centro de gravedad del talud. ....	90
Figura 70: Gráficos de Intensidad de Arias vs PGA. a) Input sísmico. b) Punto de control 3. ....	91
Figura 71: Desplazamiento en función del PGA para el punto de control 3. ....	92
Figura 72: Desplazamiento en función del PGV para el punto de control 3. ....	92
Figura 73: Desplazamiento en función de la Intensidad de Arias. ....	93
Figura 74: Desplazamiento en función de la frecuencia Peak del input sísmico. a) Resultados del presente trabajo. b) Resultados de García et al. (2018). ....	94
Figura 75: Desplazamiento en función de la Frecuencia Peak. a) Resultados de García et al. (2018) para el centro de masas b) Resultados del presente trabajo para el punto de control 3. ....	94
Figura 76: Desplazamiento en función de la duración significativa del registro. A) Resultados del presente trabajo. B) Resultados de García et al. (2018). ....	95
Figura 77: Análisis cinemático para falla en cuña y zona crítica para intersección de sets estructurales. ....	99
Figura 78: Imagen satelital de la zona y estructuras que generan cuñas. ....	99
Figura 79: Gráfico comparativo del desplazamiento en la dirección de deslizamiento con el modelo de García et al. (2018). Fuente: comunicación escrita. ....	101
Figura 80: Relación entre el PGA en el punto de control 3 y el PGA del input sísmico. ....	102
Figura 81: Gráfico comparativo de la amplificación de PGA con el modelo de García et al. (2018). Fuente: Comunicación escrita. ....	103
Figura 82: Comparación entre el área deslizada aproximada de acuerdo a los modelo dinámicos. Imagen izquierda: área de deslizamiento mínima. Imagen central área de deslizamiento máxima. Imagen derecha: área de deslizamiento real. ....	104

## Índice de Tablas

Tabla 1: Sets estructurales definidos .....	25
Tabla 2: Estructuras analizadas .....	27
Tabla 3: Propiedades mecánica de las muestras (García, 2016).....	33
Tabla 4: Parámetros de resistencia de la roca intacta (García, 2016).....	33
Tabla 5: Propiedades mecánicas de las discontinuidades principales (García, 2016).....	33
Tabla 6: Propiedades mecánicas de las discontinuidades (Vejar, 2016).....	34
Tabla 7: Orientación de las discontinuidades menores y mayores del talud (Vejar, 2016) .....	34
Tabla 8: Parámetros del amortiguamiento de Rayleigh utilizados. ....	44
Tabla 9: Terremotos estudiados en el análisis dinámico. ....	45

Tabla 10: Características de las señales de Northridge (1994) utilizadas para los análisis.....	46
Tabla 11: Características de las señales de Chi-Chi (1999) utilizadas para los análisis .....	47
Tabla 12: Características de las señales de Kobe (1995) utilizadas para los análisis.....	47
Tabla 13: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación ANA. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	64
Tabla 14: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación 116. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	67
Tabla 15: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación PUL. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	70
Tabla 16: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación TTN 042. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	73
Tabla 17: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación TCU 102. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	76
Tabla 18: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación CHY 028. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	79
Tabla 19: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación MZH. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	82
Tabla 20: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación KAK. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	85
Tabla 21: Parámetros calculados a partir del modelamiento dinámico para la estación NIS. Componente X: N26E; Componente Y: N64W; Componente Z: vertical. ....	88
Tabla 22: Resumen de los resultados para las señales del terremoto de Northridge (1994) ...	89
Tabla 23: Resumen de los resultados para las señales del terremoto de Chi-Chi (1999).....	89
Tabla 24: Resumen de los resultados para las señales del terremoto de Kobe (1995). ....	90