

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Formulación del estudio propuesto	1
1.2. Ubicación y vías de acceso	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
2. Estado del arte	4
2.1. Conceptos y definiciones de remociones en masa	4
2.1.1. Remociones en masa y clasificación	4
2.1.2. Factores condicionantes y factores desencadenantes	5
2.1.2.1. Litología	5
2.1.2.2. Rasgos estructurales	5
2.1.2.3. Geomorfología	6
2.1.2.4. Vegetación	6
2.1.2.5. Condiciones hidrogeológicas	7
2.1.2.6. Sismicidad	7
2.1.2.7. Clima	7
2.1.2.8. Factores antropogénicos	9
2.1.3. Susceptibilidad y peligro de remociones en masa	11
2.2. Metodologías para la evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa	11
2.2.1. Metodologías cualitativas	12
2.2.1.1. Análisis de distribución	12
2.2.1.2. Análisis geomorfológico	12
2.2.2. Metodologías semicuantitativas	12
2.2.2.1. Análisis jerárquico de procesos (AHP)	13
2.2.2.2. Lógica difusa	13
2.2.2.3. Tasa de frecuencia combinada de remociones en masa	14
2.2.2.4. Combinación lineal ponderada	15
2.2.3. Metodologías cuantitativas	15
2.2.3.1. Metodologías determinísticas geotécnicas	15
2.2.3.2. Enfoque probabilístico geotécnico	15
2.2.3.3. Análisis de distribución libre: enfoque basado en machine learning	16
2.3. Enfoques y procedimientos actualmente en uso	16
2.3.1. Arquitectura y parámetros de una red neuronal convolucional	19
2.3.1.1. Componentes básicas de una red neuronal convolucional	19

2.3.2.	Antecedentes de arquitecturas de redes neuronales convolucionales utilizadas para la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa .	22
3.	Antecedentes del área de estudio	29
3.1.	Geomorfología regional	29
3.2.	Geología regional	30
3.3.	Geomorfología del área de estudio	35
3.4.	Unidades geológicas del área de estudio	36
3.4.1.	Generalidades	36
3.4.2.	Estratigrafía	37
3.4.2.1.	Unidades estratificadas	37
3.4.2.2.	Unidades intrusivas	40
3.4.3.	Geología estructural	40
3.5.	Hidrología e hidrogeología	43
3.6.	Clima y vegetación	44
3.7.	Antecedentes de sismicidad	45
3.8.	Antecedentes de remociones en masa	46
3.8.1.	Flujos de barro, Complejo Hospitalario San José de Maipo (Junio, 2000)	46
3.8.2.	Flujos de detritos, El Alfalfal (25 de Diciembre, 2001)	46
3.8.3.	Caída de bloque, San José de Maipo (27 de Febrero, 2010)	46
3.8.4.	Caída de rocas, El Volcán (27 de Febrero, 2010)	47
3.8.5.	Caída de rocas, San José de Maipo (12–13 de Junio, 2012)	47
3.8.6.	Caída de rocas, Ruta G-25 (18 de Junio, 2012)	47
3.8.7.	Flujos de detritos, ríos Volcán, Maipo y Colorado (21 de Enero, 2013; 8 de Febrero, 2013)	47
3.8.8.	Flujos de detritos, rutas G-25, G-345, G-455 y G-465 (14–18 de Abril, 2016)	48
3.8.9.	Flujos de detritos y de barro, rutas G-25, G-345, G-455 y G-465 (25–26 de Febrero, 2017)	48
3.8.10.	Flujos de barro, Estero San Alfonso (20 de Abril, 2017)	48
3.8.11.	Caída de rocas, Embalse el Yeso (3 de Junio, 2019)	48
3.8.12.	Flujo de Detritos, Quebrada San Antonio (8 de Noviembre, 2019) . .	49
3.8.13.	Flujos de detritos, San José de Maipo, San Alfonso, El Volcán y La Mercedita (29–31 de Enero, 2021)	49
4.	Evaluación de susceptibilidad de remociones en masa en la comuna de San José de Maipo	50
4.1.	Introducción	50
4.2.	Mapa inventario de remociones en masa de la comuna de San José de Maipo	51
4.2.1.	Puntos libres de remociones en masa	54
4.3.	Factores condicionantes de remociones en masa en la comuna de San José de Maipo	56
4.3.1.	Análisis exploratorio de datos de factores condicionantes	61
4.3.1.1.	Elevación	61
4.3.1.2.	Pendiente	62
4.3.1.3.	Curvatura perfil	63
4.3.1.4.	Curvatura planar	64

4.3.1.5.	Índice topográfico de humedad	65
4.3.1.6.	Índice de potencia de cauce	66
4.3.1.7.	Índice de transporte de sedimento	67
4.3.1.8.	Distancia a red de drenaje	68
4.3.1.9.	Distancia a fallas	69
4.3.1.10.	Geología	70
4.3.1.11.	Aspecto	71
4.3.2.	Estadística multivariable	72
4.3.2.1.	Estadística multivariable para puntos de alta susceptibilidad	72
4.3.2.2.	Estadística multivariable para puntos libres de remociones en masa	74
4.3.3.	Procesamiento de factores condicionantes	75
4.4.	Arquitectura y parámetros de red neuronal convolucional propuesta en este trabajo	76
4.5.	Entrenamiento y desempeño de la red neuronal convolucional	77
4.6.	Resultados	79
5.	Discusiones	86
5.1.	Arquitectura, entrenamiento y validación de la red	86
5.2.	Mapas de susceptibilidad de remociones en masa	87
5.3.	Error de predicción de la red	91
5.4.	Discusión de factores condicionantes	97
5.4.1.	Elección de factores condicionantes	97
5.4.2.	Escala de factores condicionantes	97
5.4.3.	Importancia relativa de factores condicionantes	98
5.4.3.1.	Pendiente	100
5.4.3.2.	Geología	101
5.4.3.3.	TWI	102
5.4.3.4.	SPI	103
5.4.3.5.	Distancia a fallas	104
5.4.3.6.	Aspecto	105
5.4.3.7.	Elevación	106
5.4.3.8.	Distancia a red de drenaje	107
5.4.3.9.	Curvatura perfil	108
5.4.3.10.	STI	109
5.4.3.11.	Curvatura planar	110
5.4.3.12.	Caracterización final de zonas de alta susceptibilidad y zonas de baja susceptibilidad	111
5.4.3.12.1	Zonas de muy alta susceptibilidad	111
5.4.3.12.2	Zonas de baja susceptibilidad	112
6.	Conclusiones	114
7.	Recomendaciones	116
	Bibliografía	118
	Anexos	136

Anexo A. Clasificación de remociones en masa de acuerdo con Hungr et al. (2014)	136
Anexo B. Datos fluviométricos de cauces principales de la cuenca del Maipo Alto	145
Anexo C. Antecedentes de remociones en masa en la Comuna de San José de Maipo	147
Anexo D. Mapa inventario de remociones en masa de la zona de estudio	155
Anexo E. Mapa de puntos de alta susceptibilidad de la zona de estudio	156
Anexo F. Mapa de puntos libres de remociones en masa de la zona de estudio	157
Anexo G. Mapas temáticos de factores condicionantes de remociones en masa calculados en la zona de estudio	158
G.1. Pendiente	158
G.2. Orientación	159
G.3. Curvatura	160
G.4. TWI	162
G.5. SPI	163
G.6. STI	164
G.7. Distancia a red de drenaje	165
G.8. Geología local	166
G.9. Distancia a fallas	167
Anexo H. Código Python para procesamiento de factores condicionantes	168
Anexo I. Adaptive Momentum Optimizer (Adam)	171
Anexo J. Valores de la función de pérdida y exactitud general durante el entrenamiento de la red	173
Anexo K. Comparación de distribución de valores de factores condicionantes entre puntos ejemplo y puntos de aplicación	187
K.1. Modelo de 30 épocas	188
K.2. Modelo de 169 épocas	192
Anexo L. Valores de Shapley: marco teórico y metodología de cálculo	196