

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Página.
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Objetivos.	2
1.2.1 Objetivo general.	2
1.2.2 Objetivos específicos.	2
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.	3
2.1 Sismo.....	3
2.2 Origen del sismo.....	3
2.2.1 Partes del sismo.	3
2.2.2 Medición de sismos.	4
2.2.2.1 Magnitud.	4
2.2.2.2 Intensidad.	4
2.2.2.3 Escala de Richter.	4
2.2.2.4 Escala de Mercalli.	5
2.2.2.5 Escala de magnitud de momento (M_w).	6
2.3 Ondas sísmicas.	6
2.3.1 Ondas de cuerpo (internas)	7
2.3.1.1 Ondas P.	7
2.3.1.2 Ondas S.	7
2.3.2 Ondas de superficie.	8
2.3.2.1 Ondas L.	8
2.3.2.2 Ondas R.	9
2.4 Frecuencia de sismos.	9
2.5 Principales eventos sísmicos.	10
2.5.1 Mundo.	10
2.5.1.1 Italia.....	10
2.5.1.2 Sumatra-Andamán (Indonesia).	11
2.5.1.3 Costa de Honshu (Japón).	12
2.5.2 América.	12
2.5.2.1 Northridge, California (Estados Unidos).	12

	Página.
2.5.2.2 Haití.....	13
2.5.2.3 México.....	14
2.5.3 Chile.....	14
2.5.3.1 Valdivia.....	14
2.5.3.2 Arica.....	15
2.5.3.3 Zona Central.....	16
2.5.3.3.1 Maule.....	16
2.6 Instrumentos de medición de los sismos.....	16
2.6.1 Sismógrafo.....	17
2.6.2 Acelerómetro.....	17
2.6.3 Instrumento de navegación satelital (GNSS).....	18
2.7 Alertas tempranas.....	18
2.7.1 Mundo.....	19
2.7.1.1 Japón.....	19
2.7.1.2 Taiwán.....	22
2.7.2 América.....	24
2.7.2.1 México.....	24
2.8 Análisis estadísticos de aceleraciones.....	26
2.8.1 Análisis discriminante.....	27
2.8.2 Análisis estimativo.....	27
2.8.3 Algoritmo usado en alertas tempranas.....	28
2.8.3.1 Regresiones lineales multivariadas.....	28
2.8.3.2 Redes neuronales.....	29
2.8.3.3 Árbol de clasificación y predicción.....	30
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	31
3.1 Datos sismológicos.....	31
3.1.1 Datos positivos.....	31
3.1.1.1 Datos sismológicos de la zona central de Chile.....	31
3.1.2 Datos negativos.....	35
3.1.2.1 Mediciones de campo.....	35
3.1.2.1.1 Mediciones de campo realizadas.....	36
3.1.2.2 Ruidos blancos.....	42

	Página.
3.2 Algoritmos.....	42
3.2.1 Algoritmos de clasificación.	43
3.2.2 Algoritmos de predicción.	44
3.2.3 Diagrama de flujo del algoritmo de clasificación.	46
3.2.4 Diagrama de flujo del algoritmo de predicción.....	47
3.3 Árbol de clasificación y regresión.	48
3.3.1 Diagrama de flujo del árbol de clasificación y regresión.	48
3.4 Red neuronal.	49
3.5 Programa MATLAB.....	50
3.5.1 Diagrama de flujo general del programa Matlab.....	53
3.5.2 Red neuronal dentro de MATLAB.	53
3.5.2.1 Uso de la aplicación de ajuste de red neuronal.	55
3.5.2.2 Uso de la aplicación de reconocimiento de patrones de redes neuronales.....	63
3.5.2.3 Uso de la aplicación de serie de tiempo de red neuronal.....	72
3.5.2.4 Uso de la aplicación aprendiz de regresión.	82
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	86
4.1 Resultados del algoritmo de clasificación.....	86
4.1.1 Resultado con herramienta de reconocimiento de patrones.	87
4.1.2 Resultado con herramienta árbol de clasificación.....	91
4.2 Resultados del algoritmo de predicción.....	92
4.2.1 Resultado con herramienta de ajuste de red neuronal.	93
4.2.2 Resultado con herramienta de serie de tiempo de red neural.	94
4.3 Análisis de función de alerta temprana.....	96
4.4 Análisis de ruidos blancos y mediciones de campo.....	105
CAPÍTULO V: IMPLEMENTACIÓN.....	107
5.1 Dispositivos y accesorios.	107
5.2 Forma de implementación.	109
5.2.1 Instalación subterránea.	110
5.2.2 Instalación con dispositivo anclado a nivel de piso.	111
5.3 Costo directo.	112
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	113
6.1 Conclusiones.	113

	Página.
6.2 Línea futura de investigación.	114
BIBLIOGRAFÍA.....	115
Libros y tesis.	115
Páginas web.	115
Publicaciones.	116
ANEXOS.....	117
Anexo 1: Estaciones utilizadas y sus características.	117
Anexo 2: Sismos analizados y sus características.	121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

	Página.
Ilustración 1: Foco o Hipocentro y Epicentro.....	3
Ilustración 2: Escala de Richter.....	5
Ilustración 3: Escala de Mercalli.....	5
Ilustración 4: Ondas sísmicas.....	6
Ilustración 5: Movimiento de ondas primarias.....	7
Ilustración 6: Movimiento de ondas secundarias.....	8
Ilustración 7: Movimiento de partículas de ondas Love.....	8
Ilustración 8: Movimiento de partículas de ondas Rayleigh.....	9
Ilustración 9: Cinturón de fuego del Pacífico.....	10
Ilustración 10: La basílica de Norcia, tras el terremoto.....	11
Ilustración 11: Efectos caudados por el sismo en Sumatra-Andamán (Indonesia) de 2004.....	11
Ilustración 12: Escombros del tsunami, en la prefectura de Miyagi, al norte de Japón.....	12
Ilustración 13: Vista de las destrucciones en California (EE. UU.), después del terremoto.....	13
Ilustración 14: Daños, terremoto de Haití el año 2010.....	13
Ilustración 15: Daños, terremoto de México el año 2017.....	14
Ilustración 16: Daños, terremoto de Valdivia, Chile el año 1960.....	15
Ilustración 17: Daños, terremoto de Arica Chile el año 2014.....	15
Ilustración 18: Daños tsunami en costas chilenas de 2010.....	16
Ilustración 19: Sismógrafo.....	17
Ilustración 20: Acelerómetro.....	17
Ilustración 21: Instrumento de navegación satelital (GNSS).....	18
Ilustración 22: Pasos de transmisión del sistema de alerta temprana en Japón.....	20
Ilustración 23: Sistema de alerta de tsunami, Japón.....	21
Ilustración 24: Llegada de la alerta en Japón.....	21
Ilustración 25: Estaciones de la red TSMIP (negro) y de la red de dispositivos P-alert (rojo).....	23
Ilustración 26: Sistema marítimo de alerta temprana.....	23
Ilustración 27: Sistema de alerta sísmica mexicano.....	24
Ilustración 28: Sensores ubicados en México.....	25
Ilustración 29: Funcionamiento del SASMEX.....	26
Ilustración 30: Regresión lineal múltiple de dos variables independientes.....	28

	Página.
Ilustración 31: Esquema del proceso de red neuronal.....	29
Ilustración 32: Filtros de registros (cuadrado naranja).....	32
Ilustración 33: Algunos registros de eventos significativos (cuadro naranja).....	32
Ilustración 34: Algunos registros de eventos significativos.....	33
Ilustración 35: Datos en block de notas.....	34
Ilustración 36: Datos pasados a un archivo excel.....	34
Ilustración 37: Placa dispositivo.....	35
Ilustración 38: Dispositivo raspberry pi con sense hat.....	35
Ilustración 39: Caída de cubos de hormigón.....	36
Ilustración 40: Caída de cubos de hormigón.....	36
Ilustración 41: Tamizadora.....	37
Ilustración 42: Trotes a diferentes frecuencias.....	38
Ilustración 43: Salto a nivel de cadera.....	38
Ilustración 44: Actividad en la galería de fútbol.....	38
Ilustración 45: Betonera.....	39
Ilustración 46: Medición de vibraciones sobre el equipo.....	39
Ilustración 47: Medición de vibraciones a nivel de terreno natural.....	39
Ilustración 48: Medición de placa vibradora.....	40
Ilustración 49: Medición de retroexcavadora.....	40
Ilustración 50: Puente a las afuera de Curicó.....	41
Ilustración 51: Medición dirección de sur-norte de la carretera, después de la pasarela.....	41
Ilustración 52: Medición dirección de sur-norte de la carretera, antes de la pasarela.....	41
Ilustración 53: Diagrama de flujo de algoritmo de clasificación.....	46
Ilustración 54: Diagrama de flujo de algoritmo de predicción.....	47
Ilustración 55: Modelo de funcionamiento de árbol de clasificación y regresión.....	48
Ilustración 56: Modelo de funcionamiento de red neuronal.....	49
Ilustración 57: Página principal de MATLAB y herramientas principales.....	51
Ilustración 58: Pestañas globales; (1) HOME, (2) PLOTS y (3) APPS.....	52
Ilustración 59: Pestañas contextuales; (4) EDITOR, (5) PUBLISH y (6) VIEW.....	52
Ilustración 60: Diagrama de flujo del programa MATLAB.....	53
Ilustración 61: Aplicaciones de red neuronal dentro del programa MALTAB (Cuadro rojo).....	54
Ilustración 62: Página inicial del programa MATLAB.....	55

	Página.
Ilustración 63: Pestaña de la herramienta de ajuste de red neuronal.	55
Ilustración 64: Pestaña de selección de datos.	56
Ilustración 65: Pestaña de selección del conjunto de datos.	56
Ilustración 66: Pestaña de validación y datos de prueba.	57
Ilustración 67: Pestaña de la red de arquitectura.	58
Ilustración 68: Pestaña de entrenamiento de la red.	58
Ilustración 69: Pestaña del panel de gráficos e iteraciones.	59
Ilustración 70: Pestaña de gráficos, opción actuación de datos.	59
Ilustración 71: Pestaña de gráficos, opción histograma de error.	60
Ilustración 72: Pestaña de evaluación de la red.	61
Ilustración 73: Pestaña de implementación de solución.	62
Ilustración 74: Pestaña para guardar resultados obtenidos.	62
Ilustración 75: Página inicial del programa MATLAB.	63
Ilustración 76: Pestaña de la herramienta de reconocimiento de patrones de redes neuronales.	64
Ilustración 77: Pestaña de selección de datos.	64
Ilustración 78: Pestaña selección de conjunto de datos.	65
Ilustración 79: Pestaña de validación y datos de prueba.	65
Ilustración 80: Pestaña de la red de arquitectura.	66
Ilustración 81: Pestaña de entrenamiento de la red.	67
Ilustración 82: Pestaña de panel de gráficos e iteraciones.	67
Ilustración 83: Pestaña de resultados de la red.	68
Ilustración 84: Pestaña de panel de gráficos e iteraciones.	69
Ilustración 85: Pestaña de curvas ROC.	69
Ilustración 86: Pestaña de evaluación de la red.	70
Ilustración 87: Pestaña de implementación de solución.	71
Ilustración 88: Pestaña para guardar resultados obtenidos.	72
Ilustración 89: Página inicial del programa MATLAB.	72
Ilustración 90: Pestaña principal de la herramienta de red neuronal serie de tiempo.	73
Ilustración 91: Pestaña de selección de datos.	74
Ilustración 92: Pestaña de validación y pruebas de datos.	75
Ilustración 93: Pestaña de red de arquitectura.	76
Ilustración 94: Pestaña de entrenamiento de la red.	76

	Página.
Ilustración 95: Pestaña de panel de gráficos e iteraciones.	77
Ilustración 96: Pestaña de autocorrelación de errores.	78
Ilustración 97: Pestaña de correlación cruzada de errores de entrada.	78
Ilustración 98: Pestaña de respuesta de serie temporal.	79
Ilustración 99: Pestaña de evaluación del trabajo.	80
Ilustración 100: Pestaña de implementación de solución.	81
Ilustración 101: Pestaña para guardar los resultados obtenidos.	81
Ilustración 102: Página inicial del programa MATLAB.	82
Ilustración 103: Página inicial de la herramienta aprendiz de regresión.	82
Ilustración 104: Nueva herramienta de aprendiz de regresión.	83
Ilustración 105: Pestaña de selección de datos.	83
Ilustración 106: Página principal de herramienta aprendiz de regresión, muestra de datos.	84
Ilustración 107: Aplicaciones dentro de la herramienta aprendiz de regresión.	84
Ilustración 108: Página principal de herramienta aprendiz de regresión, botón de entrenamiento. ..	85
Ilustración 109: Página principal de herramienta aprendiz de regresión, entrega de error.	85
Ilustración 110: Resultados obtenidos con los datos al azar.	88
Ilustración 111: Iteraciones y validaciones realizadas en el análisis.	88
Ilustración 112: Gráfico actuación de datos opción 6, de datos al azar.	89
Ilustración 113: Gráfico histograma de error opción 6, de datos al azar.	89
Ilustración 114: Gráfico confusión opción 6, de datos al azar.	90
Ilustración 115: Resultados obtenidos con los 22.000.000 de datos.	90
Ilustración 116: Gráfico confusión opción 6, con los 22.000.000 de datos.	91
Ilustración 117: Error del árbol fino.	91
Ilustración 118: Resultados obtenidos con los datos al azar.	95
Ilustración 119: Iteraciones y validaciones realizadas en el análisis.	95
Ilustración 120: Gráfico actuación de datos opción 1.	95
Ilustración 121: Histograma de error del análisis de datos opción 1.	96
Ilustración 122: Gráfico de regresiones de objetivos y resultados de la opción 1.	96
Ilustración 123: Herramienta con el error más bajo de la aplicación aprendiz de regresión.	97
Ilustración 124: Resultados gráficos del análisis del sismo 1.	103
Ilustración 125: Resultados gráficos del análisis del sismo 7.	104
Ilustración 126: Resultados gráficos del análisis del sismo 13.	104

	Página.
Ilustración 127: Accesorios del dispositivo raspberry pi.	108
Ilustración 128: Batería de litio.	108
Ilustración 129: Bocina de sonido.	108
Ilustración 130: Caja metálica.	108
Ilustración 131: Raspberry pi 3.	109
Ilustración 132: Panel fotovoltaico.	109
Ilustración 133: Raspberry pi 3.	109
Ilustración 134: Instalación subterránea del sistema de alerta.	110
Ilustración 135: Instalación del sistema de alerta sobre el nivel de piso.	111

ÍNDICE DE TABLAS.

	Página.
Tabla 1: Estaciones ubicadas en la zona central de Chile.	33
Tabla 2: Opciones de variantes para el algoritmo de clasificación.	86
Tabla 3: Resultados del algoritmo de clasificación, herramienta de patrones de red neural.	87
Tabla 4: Opciones de variantes para el algoritmo de predicción.	92
Tabla 5: Resultados del algoritmo de predicción, herramienta de ajustes de red neural.	94
Tabla 6: Resultados del algoritmo de predicción, herramienta de serie de tiempo de red neural.	94
Tabla 7 :Sismos analizados y características.	97
Tabla 8: Magnitud de momentos de los sismos analizados en los segundos estudiados.	99
Tabla 9: Porcentaje de error en los sismos analizados.	99
Tabla 10: Porcentaje de precisión alcanzado en los sismos analizados.	100
Tabla 11: Segundos de detección de ondas P en ruidos blancos.	105
Tabla 12: Segundos de detección de ondas P en mediciones de campo.	106
Tabla 13: Costo directo de dispositivos del sistema para una vivienda.	112
Tabla 14: Estaciones y características utilizadas.	120
Tabla 15: Información relevante de los sismos analizados y utilizados.	140

ÍNDICE DE GRÁFICOS.

	Página.
Gráfico 1: Gráfico de tiempo de detección de onda P.	98
Gráfico 2: Gráfico Mw alcanzada v/s Mw original, para el segundo 1.....	100
Gráfico 3: Gráfico Mw alcanzada v/s Mw original, para el segundo 2.....	101
Gráfico 4: Gráfico Mw alcanzada v/s Mw original, para el segundo 3.....	101
Gráfico 5: Gráfico Mw alcanzada v/s Mw original, para el segundo 4.....	102
Gráfico 6: Gráfico Mw alcanzada v/s Mw original, para el segundo 5.....	102
Gráfico 7: Gráfico final de Mw alcanzada v/s Mw original.	103