UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
DEPARTAMENTO CIENCIAS DE LA TIERRA

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE AMENAZA EN CENTROS VOLCÁNICOS Y POBLADOS ALEDAÑOS APLICADA EN LOS VOLCANES CALLAQUI, LLAIMA, LONQUIMAY, TOLHUACA, VILLARRICA Y MOCHO-CHOSHUENCO, CHILE

Memoria para optar al Título de Geólogo

Nicolás Camilo Hidalgo Bahamonde

Profesor Patrocinante : **Dr. José Luis Palma Lizana**
Profesores Comisión : **Dra. Verónica Laura Oliveros Clavijo**
Dr. Jorge Andrés Quezada Flory

Concepción, 2023

INDICE

RESUMEN.

1. INTRODUCCIÓN ……. 1

1.1. Formulación del proyecto ..…… 1

1.2. Objetivos ……. 4

1.2.1. Objetivo general …...…… 4

1.2.2. Objetivos específicos …..…….. 4

1.3. Ubicación y Accesos ……... 5

1.4. Volcanes en estudio …… 9

1.5. Etapas de Trabajo …… 11

1.6. Agradecimientos ……..... 14

2. MARCO GEOLÓGICO Y VOLCANOLÓGICO ……... 15

2.1. Rocas intrusivas y basamento …...……. 15

2.1.1. Volcán Callaqui …… 15

2.1.2. Volcanes Llaima, Lonquimay y Tolhuaca…….…. 15

2.1.3. Volcán Villarrica ……..……. 16

2.1.4. Complejo volcánico Mocho-Choshuenco ..…… 16

2.2. Rocas y depósitos volcánicos …….. 17

2.2.1. Volcán Callaqui …… 17

2.2.2. Volcán Lonquimay ……... 18

2.2.3. Volcán Tolhuaca …….. 20

2.2.4. Volcán Llaima ……... 21

2.2.5. Volcán Villarrica ……...……... 24

2.2.6. Complejo volcánico Mocho-Choshuenco ……...…… 27

2.3. Actividad eruptiva prehistórica e histórica ……. 29

2.3.1. Volcán Callaqui …… 29

2.3.1.1. Actividad prehistórica ……... **29**

2.3.1.2. Actividad histórica …… **30**

2.3.2. Volcán Tolhuaca ……... 30

2.3.3. Volcán Lonquimay ……... 31

2.3.3.1. Actividad prehistórica ……... **31**

2.3.3.2. Actividad histórica …… **31**

2.3.4. Volcán Llaima ……... 32

2.3.4.1. Actividad prehistórica ……... **32**

2.3.4.2. Actividad histórica …… **33**

2.3.5. Volcán Villarrica …….. 36

2.3.5.1. Actividad prehistórica ……... **36**

2.3.5.2. Actividad histórica …… **37**

2.3.6. Complejo volcánico Mocho-Choshuenco ……... 39

2.3.6.1. Actividad prehistórica ……... **39**

2.3.6.2. Actividad histórica …… **40**

3. ESTRUCTURA DEL ANÁLISIS DE AMEANZA VOLCÁNICA …… 42

3.1. Generalidades ……..…… 42

3.2. Estructura del análisis de amenaza volcánica ……. 43

3.2.1. Definición del problema (preguntas o escenarios) 43
3.2.2. Objetivos y utilización 43
3.2.3. Peligros (fenómenos volcánicos peligroso) a considerar 44
3.2.4. Escenarios eruptivos y escala de tiempo 46
3.2.5. Escala y resolución espacial 46
3.2.6. Elementos vulnerables 48
3.2.7. Metodología 48
3.2.8. Formato de los resultados 49
3.2.9. Limitaciones e incertidumbres 49
3.2.10. Indicaciones y ejemplos para la utilización de resultados 50
4. BASE DE DATOS ESPACIAL 51
4.1. Estructura de la base de datos 51
4.1.1. Datos espaciales de peligro volcánico 51
4.1.2. Datos espaciales de elementos expuestos 52
4.2. Mapas de peligro volcánico 53
4.2.1. Mapas de peligro volcánico integrado 54
4.2.2. Mapas de peligro volcánico de SERNAGEOMIN 56
4.2.2.1. Zonas de peligro en mapas de SERNAGEOMIN **57**
4.2.2.2. Digitalización y homogenización de mapas **60**
4.2.2.3. Cuantificación de las zonas de peligro **61**
4.2.2.4. Factor de peligro **62**
4.3. Elementos expuestos 63
4.3.1. Población y viviendas (Censo) 64
4.3.2. Distribución real de la población 65
4.3.2.1. Análisis de distribución de construcciones **66**
4.4. Infraestructura crítica 71
4.4.1. Infraestructuras de carácter social 72
4.4.1.1. Centros de salud **72**
4.4.1.2. Establecimientos de educación escolar **72**
4.4.2. Infraestructura de respuesta 73
4.4.2.1. Municipios **73**
4.4.2.2. Cuerpos de Bomberos **73**
4.4.2.3. Cuarteles de Carabineros de Chile **74**
4.4.3. Infraestructura de energía y suministro 74
4.4.3.1. Centrales hidroeléctricas de Chile **74**
4.4.4. Infraestructura de transporte 74
4.4.4.1. Aeropuertos y aeródromos de Chile **74**
4.4.4.2. Red vial nacional **75**
4.4.4.3. Puentes **75**
4.5. Poblados expuestos 75
4.6. Cuantificación y ponderación de los elementos expuestos 77
4.6.1. Población 77
4.6.2. Infraestructuras 77
4.6.2.1. Viviendas **77**
4.6.2.2. Infraestructura crítica **77**

4.6.2.2.1. Infraestructuras de carácter social 78
4.6.2.2.2. Infraestructura de respuesta 78
4.6.2.2.3. Infraestructura de energía y suministro 78
4.6.2.2.4. Infraestructura de transporte 78
5. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE AMENAZA VOLCÁNICA 80
5.1. Trabajos previos 80
5.2. Análisis de exposición y amenaza los elementos en torno a un volcán 82
5.2.1. Activos poligonales 83
5.2.1.1. Personas 85
5.2.1.2. Viviendas 86
5.2.2. Activos lineales 86
5.2.3. Activos puntuales 88
5.2.3.1. Infraestructuras críticas 88
5.2.3.2. Puentes 88
5.3. Exposición y amenaza totales de un volcán 90
5.3.1. Amenaza de personas de un volcán 90
5.3.2. Amenaza de infraestructuras de un volcán 91
5.3.3. Amenaza total de un volcán 92
5.4. Exposición y amenaza de un poblado 93
6. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE AMENAZA VOLCÁNICA 97
6.1. Mapas de peligro y exposición de los volcanes estudiados 97
6.1.1. Mapas con zonas de peligro integrado 98
6.1.2. Mapas con zonas de peligro de SERNAGEOMIN 104
6.2. Resultados de la evaluación de amenaza a nivel volcán 111
6.2.1. Número de elementos expuestos a cada volcán 111
6.2.2. Valores de exposición ponderados de cada volcán 113
6.2.3. Amenaza absoluta de los volcanes estudiados 116
6.2.4. Amenaza normalizada de los volcanes estudiados 118
6.3. Mapas de peligro y exposición de los poblados en torno a los volcanes 121
6.3.1. Mapas con zonas de peligro integrado 121
6.3.2. Mapas con zonas de peligro de SERNAGEOMIN 141
6.4. Resultados de la evaluación de amenaza a nivel de poblados 156
6.4.1. Cantidad de elementos presentes en cada poblado 156
6.4.2. Valores de exposición de cada poblado 158
6.4.3. Amenaza absoluta de los poblados estudiados 161
6.4.4. Amenaza normalizada de los poblados estudiados 164
7. DISCUSIÓN 168
7.1. Una nueva metodología de evaluación de la amenaza volcánica 168
7.2. Base de datos espaciales 171
7.2.1. Análisis de distribución de construcciones 173
7.3. Análisis de exposición 174
7.3.1. Personas vs Infraestructuras 176
7.4. Amenaza volcánica y Ranking de Riesgo Específico de SERNAGEOMIN .. 182
7.4.1. Factor de peligro 187
7.4.2. Análisis de amenaza volcánica a escala de poblados 188

7.5. Amenaza absoluta y amenaza normalizada ……. 188
7.6. Importancia de un sistema unificado de evaluación de amenaza …… 193
8. CONCLUSIONES ……... 194
8.1. Base de datos espaciales ……. 194
8.2. Análisis de exposición y amenaza ……. 195
8.3. Poblados amenazados …… 196
8.4. Mapas de peligro volcánico …… 197
8.5. Proyección ……... 197
9. REFERENCIAS ……. 199
ANEXO ……. 206

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura			Página
1.	**1.**	Mapa de ubicación de la zona de estudio …….……..	**6**
4.	**1.**	Tipos de elementos expuestos ……..……..	**53**
4.	**2.**	Ejemplo de zonificación de peligro volcánico en mapas de peligro ……..	**54**
4.	**3.**	Zonificación de peligro volcánico en mapas de SERNAGEOMIN ……...	**58**
4.	**4.**	Descripción de zonas de peligro de peligro del volcán Villarrica ……..	**59**
4.	**5.**	Comparación entre un mapa de peligro de SERNAGEOMIN y la adaptación hecha para esta metodología ……	**61**
4.	**6.**	Ejemplo de entidades censales ……...	**64**
4.	**7.**	Distribución real de la población dentro de las entidades censales ……...	**66**
4.	**8.**	Selección de las entidades expuestas al peligro volcánico según los mapas integrados y los mapas de SERNAGEOMIN ……	**67**
4.	**9.**	Ejemplo de selección de puntos más próximos a las construcciones observadas dentro de las entidades rurales ……	**68**
4.	**10.**	Ejemplo de circunferencias guía que marcan el radio de 50 m en torno a cada punto ……..	**69**
4.	**11.**	Ejemplo de buffer cuadrado de 50 m generado a partir de los puntos que cumplen las condiciones proximidad a las construcciones ……	**70**
4.	**12.**	Distribución de las ECM al rededor del volcán Villarrica comparada con los límites de las entidades censales originales ……..	**71**
4.	**13.**	Ejemplo del buffer generado para la ciudad de Melipeuco ……	**76**
5.	**1.**	Ejemplo de la superposición entre ECM y el mapa de peligros del volcán Villarrica, cuya intersección da origen a las ECMP ……...	**84**
5.	**2.**	Rutas, caminos y puentes en sectores aledaños a la localidad de Cherquenco ……	**87**
5.	**3.**	Ejemplo de infraestructuras críticas amenazadas ……...	**89**
5.	**4.**	Ejemplo de elementos que componen un poblado de acuerdo al método del buffer ……..	**94**
6.	**1.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Callaqui basado en zonas de peligro integrado …….……	**98**

6.	**2.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Tolhuaca basado en zonas de peligro integrado …….……	**99**
6.	**3.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Lonquimay basado en zonas de peligro integrado ….……	**100**
6.	**4.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Llaima basado en zonas de peligro integrado ……...……	**101**
6.	**5.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Villarrica basado en zonas de peligro integrado …….	**102**
6.	**6.**	Mapa de peligro y exposición detallada del complejo volcánico Mocho-Choshuenco basado en zonas de peligro ……...	**103**
6.	**7.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Callaqui basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN ……...	**105**
6.	**8.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Tolhuaca basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN ……...	**106**
6.	**9.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Lonquimay basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN ……..	**107**
6.	**10.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Llaima basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN …….	**108**
6.	**11.**	Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Villarrica basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN ……...	**109**
6.	**12.**	Mapa de peligro y exposición detallada del complejo volcánico Mocho-Choshuenco basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN …….	**110**
6.	**13.**	Comparación entre el número de personas dentro de un radio de 30 km de cada volcán y el número de personas dentro de las zonas de los mapas de peligro integrado y de SERNAGEOMIN ……..	**113**
6.	**14.**	Comparación entre valores de exposición total de acuerdo a mapas de peligro integrado y mapas de SERNAGEOMIN ……...	**115**
6.	**15.**	Valores de amenaza absoluta de los volcanes estudiados ……..	**117**
6.	**16.**	Valores de amenaza total normalizada de los volcanes estudiados ……	**120**
6.	**17.**	Mapa de peligro y exposición detallada de la ciudad de Ralco de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Callaqui …….	**122**
6.	**18.**	Mapa de peligro y exposición detallada de la ciudad de Lonquimay de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Tolhuaca ……	**123**
6.	**19.**	Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Curacautín de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Tolhuaca …….	**124**
6.	**20.**	Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Curacautín de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Lonquimay …….	**125**
6.	**21.**	Mapa de peligro y exposición del poblado de Manzanar de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Lonquimay ……..	**126**
6.	**22.**	Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Malalcahuello de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Lonquimay …….	**127**
6.	**23.**	Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Malalcahuello de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Llaima ……	**128**
6.	**24.**	Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Melipeuco de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Llaima ……	**129**

6. 25. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Cherquenco de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Llaima. **130**

6. 26. Mapa de peligro y exposición del poblado de Caburgua de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica …….. **131**

6. 27. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Pucón de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica ……... **132**

6. 28. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Curarrehue de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica …… **133**

6. 29. Mapa de peligro y exposición del poblado de Catripulli de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica …….. **134**

6. 30. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Lican Ray de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica …….. **135**

6. 31. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Coñaripe de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica …….. **136**

6. 32. Mapa de peligro y exposición del poblado de Liquiñe de acuerdo a mapa de peligro integrado del complejo volcánico Mocho-Choshuenco …… **137**

6. 33. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Neltume de acuerdo a mapa de peligro integrado del complejo volcánico Mocho-Choshuenco …… **138**

6. 34. Mapa de peligro y exposición del poblado de Choshuenco de acuerdo a mapa de peligro integrado del complejo volcánico Mocho-Choshuenco ….. **139**

6. 35. Mapa de peligro y exposición del poblado de Puerto Fuy de acuerdo a mapa de peligro integrado del complejo volcánico Mocho-Choshuenco ….. **140**

6. 36. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Ralco de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Callaqui ……. **142**

6. 37. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Curacautín de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Lonquimay …….. **143**

6. 38. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Lonquimay de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Lonquimay …….. **144**

6. 39. Mapa de peligro y exposición del poblado de Malalcahuello de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Lonquimay …….. **145**

6. 40. Mapa de peligro y exposición del poblado de Manzanar de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Lonquimay …… **146**

6. 41. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Melipeuco de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Llaima ……. **147**

6. 42. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Cherquenco de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Llaima ……. **148**

6. 43. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Pucón de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Villarrica …… **149**

6. 44. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Lican Ray de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Villarrica ……... **150**

6. 45. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Coñaripe de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Villarrica ……... **151**

6. 46. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Villarrica de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Villarrica ……... **152**

6.	**47.**	Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Neltume de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del complejo volcánico Mocho-Choshuenco ……	**153**
6.	**48.**	Mapa de peligro y exposición del poblado de Choshuenco de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del complejo volcánico Mocho-Choshuenco ……	**154**
6.	**49.**	Mapa de peligro y exposición del poblado de Puerto Fuy de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del complejo volcánico Mocho-Choshuenco ……	**155**
6.	**50.**	Gráfica comparativa de valores de exposición total de poblados ……..	**160**
6.	**51.**	Valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro integrado vs Valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN……...	**163**
6.	**52.**	Valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro integrado vs Valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN con ejes en escala logarítmica ……...	**164**
6.	**53.**	Valores de amenaza normalizada de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro integrado vs Valores de amenaza normalizada de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN…	**167**
7.	**1.**	Factores de peligro de la metodología NVEWS ……	**169**
7.	**2.**	Factores de exposición de la metodología NVEWS ……..	**170**
7.	**3.**	Exposición de personas vs exposición de infraestructuras a nivel volcán ….	**177**
7.	**4.**	Exposición de personas vs exposición de infraestructuras a nivel poblado ...	**179**
7.	**5.**	Valores totales de exposición y amenaza de infraestructuras críticas y porcentajes de exposición y amenaza de infraestructuras críticas …….	**180**
7.	**6.**	Valores de exposición y amenaza de rutas acorde a los mapas de peligro integrado …….	**181**
7.	**7.**	Ejemplo de borde del mapa cortando zonas de peligro volcánico en mapa de SERNAGEOMIN ……..	**185**
7.	**8.**	Áreas de las zonas de peligro de los mapas de peligro integrado vs mapas de peligro de SERNAGEOMIN …….	**186**
7.	**9.**	Cantidad de personas amenazadas por zonas de peligro acorde a mapas de peligro integrado y de SERNAGEOMIN ……..	**187**
7.	**10.**	Amenaza absoluta vs Amenaza normalizada a nivel de volcanes …….	**189**
7.	**11.**	Amenaza absoluta vs Amenaza normalizada a nivel de volcanes …….	**191**
7.	**12.**	Amenaza absoluta vs Amenaza normalizada a nivel de poblados …….	**192**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		**Página**
2.1.	Resumen de actividad eruptiva histórica del volcán Callaqui ……..	**30**
2.2.	Resumen de la actividad volcánica histórica del volcán Llaima ……..	**35**
2.3.	Resumen de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica …….	**38**
2.4.	Resumen de la actividad eruptiva histórica del volcán Mocho-Choshuenco ...	**41**

4.1.	Evaluación e integración de zonas de peligro volcánico ……..	**55**
4.2.	Puntajes asignados a cada zona de mapas de peligro de SERNAGEOMIN …	**62**
4.3.	Factores de peligro de cada volcán y valores finales de las zonas de peligro para mapas de peligro de SERNGEOMIN adaptados ……..	**63**
4.4.	Tabla de factores de exposición de los elementos analizados ……...	**79**
6.1.	Elementos vulnerables en torno a los volcanes estudiados ……...	**111**
6.2	Elementos expuestos a los volcanes estudiados de acuerdo a zonas de mapas de peligro integrado ……..	**112**
6.3.	Elementos expuestos a los volcanes estudiados de acuerdo a zonas de mapas de peligro de SERNAGEOMIN ……...	**112**
6.4.	Valores de exposición a nivel volcán según zonas de peligro integrado ……..	**114**
6.5.	Valores de exposición a nivel volcán según zonas de peligro de SERNAGEOMIN …….	**114**
6.6.	Valores de amenaza absoluta a nivel volcán según zonas de peligro integrado ……...	**116**
6.7.	Valores de amenaza absoluta a nivel volcán según zonas de peligro SERNAGEOMIN …….	**116**
6.8.	Valores de amenaza normalizada a nivel volcán según zonas de peligro integrado ……...	**119**
6.9.	Valores de amenaza normalizada a nivel volcán según zonas de peligro SERNAGEOMIN …….	**119**
6.10.	Elementos que conforman cada uno de los poblados amenazados por los volcanes estudiados ……...	**156**
6.11.	Cantidad de elementos expuestos dentro de los poblados según zonas de peligro integrado ……...	**157**
6.12.	Cantidad de elementos expuestos dentro de los poblados según zonas de peligro de SERNAGEOMIN ……	**158**
6.13.	Valores de exposición ponderados de los elementos dentro de cada poblado según zonas de peligro integrado ……..	**159**
6.14.	Valores de exposición ponderados de los elementos dentro de cada poblado según zonas de peligro SERNAGEOMIN ……	**160**
6.15.	Valores de amenaza absoluta de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro integrado ……	**161**
6.16.	Valores de amenaza absoluta de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro integrado ……	**162**
6.17.	Valores de amenaza absoluta de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro de SERNAGEOMIN …….	**163**
6.18.	Valores totales de los elementos que conforman cada poblado ……	**165**
6.19.	Valores de amenaza normalizada de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro integrado ……	**166**
6.20.	Valores de amenaza normalizada de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro de SERNAGEOMIN.	**167**

RESUMEN

El crecimiento de la población en Chile ha propiciado su expansión hacia territorios expuestos a peligros volcánicos, creando la necesidad de contar con métodos adecuados para la evaluación de amenaza y riesgo, más aún si se considera el hecho de que nuestro país tiene más de 90 volcanes activos.

La metodología propuesta integra mapas de peligro y de exposición detallados de personas, viviendas, rutas e infraestructuras críticas, conformando una base de datos geo-espacial de alta relevancia para el análisis de amenaza y riesgos volcánicos. Los elementos de dicha base de datos fueron cuantificados y ponderados mediante el uso de SIG, con el objetivo de reflejar la importancia relativa de cada componente. La evaluación fue llevada a cabo en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco, empleando mapas de peligro integrado semicuantitativos y, además, mapas de peligro elaborados por SERNAGEOMIN, los cuales fueron previamente adaptados y cuantificados. Los resultados dependen del mapa utilizado y solo son comparables entre mapas del mismo tipo. La idea tras esta metodología es que mientras existan mapas de peligro adecuados se puede analizar su relación con los elementos expuestos y, por lo tanto, calcular la amenaza.

Los resultados pueden ser comparados con el Ranking de Riesgo Específico Volcánico de SERNAGEOMIN del año 2019, pero entregan mayor detalle y claridad de la relación entre peligros volcánicos y la exposición asociada en cada volcán. Existe una buena correlación entre los valores de amenaza absoluta de personas y de infraestructuras, por lo cual, el número de personas amenazadas puede ser tomada como *proxy* de la amenaza total para la confección del ranking.

Se elaboraron rankings de amenaza absoluta y normalizada tanto para volcanes como para poblados expuestos. Para los volcanes estudiados, los poblados que exhiben mayor amenaza son Pucón, Neltume, Coñaripe y Melipeuco.

Esta metodología se presenta como una base para la inclusión de la mayor cantidad de volcanes posibles y posteriores estudios de vulnerabilidad que permitan, en un futuro, llevar a cabo una completa evaluación del riesgo volcánico en Chile.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Formulación del proyecto

Una de las notorias características de Chile, geológicamente hablando, es su abundante volcanismo. A lo largo del país existen más de 90 volcanes considerados activos por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), institución oficial encargada del estudio del peligro volcánico. Esta situación, sumada a la constante expansión y desarrollo de la población, genera la necesidad de contar con métodos adecuados de evaluación de la amenaza y riesgo volcánico.

La evaluación y gestión del riesgo volcánico son importantes temas de interés científico, económico y político, especialmente donde los volcanes amenazan áreas densamente pobladas. Las respuestas estas a preocupaciones requieren una evaluación precisa y programas de mitigación adecuados (Martí, 2017). La evaluación de riesgos se basa en la caracterización del peligro, la exposición y la vulnerabilidad (De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008). Se requiere un enfoque multidisciplinario para combinar estos aspectos en planes integrales de gestión de riesgos (Martí et al., 2008).

Debido a la infrecuente ocurrencia de erupciones de gran magnitud a nivel mundial, que es aproximadamente una vez cada 10 años, los efectos de las erupciones volcánicas no están en la conciencia pública tan constantemente como los de otros fenómenos naturales como terremotos, tsunamis o huracanes. Sin embargo, esto no disminuye en absoluto la importancia de los esfuerzos realizados para predecir, prevenir y prepararse para los desastres que conllevan pérdidas económicas y humanitarias a gran escala. La evidencia del registro histórico muestra lo absolutos y terminales que pueden ser tales eventos (Martí, 2017).

A nivel mundial, más de 800 millones de personas viven en áreas que tienen el potencial de verse afectadas por peligros volcánicos, y este número está aumentando. Por lo tanto, la necesidad de juicios informados sobre la extensión global de los peligros volcánicos potenciales y las amenazas relativas es más urgente que nunca. También es imperativo identificar áreas de riesgo relativamente

alto donde los estudios y las medidas de reducción de riesgos pueden enfocarse mejor (Loughlin et al., 2015).

Durante el siglo XX, cerca de 90 mil personas alrededor del mundo murieron como consecuencia de actividad volcánica. Una de las tragedias más grandes, en lo que respecta a erupciones, tuvo lugar en Sudamérica. El año 1985 en Colombia, la erupción del Nevado del Ruiz superó las expectativas de lo que podía hacer aquel volcán, ya que luego de un largo periodo de aparente inactividad, las autoridades de la época no lo veían como una potencial amenaza. La erupción produjo grandes lahares que alcanzaron la ciudad de Armero, ubicada a 50 km del macizo. En Nevado del Ruiz, los volcanólogos luchaban por instalar sistemas de monitoreo en el volcán, preparar evaluaciones de peligros y educar a las autoridades y al público sobre el peligro inminente. En última instancia, hubo una notificación pública de que se estaba produciendo una erupción, pero en el transcurso de las horas siguientes, más de 23.000 personas perdieron la vida, innecesariamente, debido a que no existía un seguimiento adecuado previo al evento y no se habían establecido vínculos entre científicos, funcionarios públicos y la comunidad en riesgo (Voight, 1996 en Ewert, 2005).

En Chile, al menos 99 personas perdieron la vida durante el siglo XX por causas asociadas a volcanismo (Witham, 2005). Sin embargo, no hay un registro preciso respecto a personas desplazadas o pérdida de bienes materiales.

Este trabajo propone una metodología de evaluación de amenaza volcánica objetiva e innovadora, incorporando cualidades relevantes de métodos anteriormente desarrollados, destacando al "National Volcano Early Warning System" (NVEWS) (Ewert et al., 2005), utilizado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y el "Estudio de Riesgo Volcán Mocho-Choshuenco" (Palma, 2018). En Chile, SERNAGEOMIN utiliza una adaptación de la metodología estadounidense, llamada Ranking de Riesgo Específico, la cual se basa en la consideración integrada de factores de peligro propios de cada volcán y factores de exposición asociados a ellos, de manera tal, de identificar prioridades de monitoreo y/o cartografía geológica (Lara et al., 2007).

Recogiendo la definición de amenaza de Ewert, esta se entiende aquí como, “el riesgo cualitativo que representa un volcán para las personas y la propiedad independiente de los esfuerzos de mitigación”. Lo que se sabe sobre la historia eruptiva de cada volcán, individualmente varía mucho. Para ser eficaz, un sistema de clasificación de amenazas debe usar factores de peligro y exposición que sean lo suficientemente generales como para ser aplicados fácilmente a la mayoría o todos los volcanes. Además, debe haber suficientes factores para que la presencia o ausencia de datos para uno o más factores no tenga un efecto excesivamente grande en las valoraciones individuales finales de volcanes específicos (Ewert, 2007).

La evaluación de los peligros volcánicos consiste en identificar cómo se ha comportado un sistema volcánico (es decir, un volcán activo o un área volcánica) en el pasado y aplicar este conocimiento para inferir cómo se puede comportar en el futuro, determinando así el alcance de los peligros potenciales y las áreas que podrían ser impactadas. El análisis de exposición identifica los elementos expuestos al peligro y se centra en los activos relevantes para la zona de estudio (Birkmann, 2013; Scaini et al., 2014; Jiménez, 2019). Además, cabe señalar que un análisis de riesgo completo debe incorporar los factores peligro, exposición y vulnerabilidad (o vulnerabilidades). El análisis de vulnerabilidad debe definir inventarios de elementos (personas, propiedades, infraestructuras, etc.) en riesgo de ser afectados por erupciones volcánicas, determinar su respuesta (resistencia) a los peligros volcánicos, y llevar a cabo evaluaciones de impacto basadas en escenarios eruptivos dados (por ejemplo, Gehl et al., 2013).

La vulnerabilidad es un factor complejo que va más allá de las consideraciones del presente estudio. Por lo tanto, en lugar de riesgo, se utiliza el término amenaza para cuantificar la relación existente entre los peligros volcánicos y los elementos expuestos a estos peligros, sin considerar su respuesta específica ante el potencial impacto.

A diferencia del Ranking de Riesgo Específico elaborado por SERNAGEOMIN, la metodología aquí propuesta, incorpora además una componente espacial, ya que, en lugar de factores de peligro y exposición, se utilizan mapas de peligro y mapas de exposición detallados de personas e infraestructuras. La amenaza se obtiene por la relación espacial entre peligros y elementos expuestos. Tanto los mapas de peligros como los de exposición han sido previamente cuantificados,

permitiendo obtener valores de amenaza para cada zona y para la totalidad del volcán. Para la elaboración de los mapas de peligro se utilizaron dos tipos: (i) mapas de peligro integrado semicuantitativos que combinan diferentes fenómenos volcánicos, y mapas de peligro elaborados por SERNAGEOMIN. Se busca cubrir con un alto nivel de detalle las particularidades de cada volcán, en cuanto a los elementos cuya distribución y comportamiento están altamente influenciados por la topografía.

Como fin último, este trabajo comparará la amenaza en los diferentes volcanes estudiados, con análisis detallados de carácter local. Esto se presenta como una herramienta para el monitoreo temprano de volcanes, que permita priorizar esfuerzos y recursos, como complemento del trabajo de observatorios y que a la vez permita entregar resultados objetivos y claros que puedan ser usados previo a una eventual crisis volcánica, por ejemplo, para la elaboración de planes de evacuación y emergencia, planificación territorial, entre otros.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar y comparar la amenaza volcánica de 6 estratovolcanes y complejos volcánicos de Chile: Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco, por medio del desarrollo de una metodología innovadora, objetiva y acorde al contexto local, que considere mapas de peligro volcánico y los principales elementos expuestos, haciendo uso de datos georeferenciados (SIG) de libre acceso. Además, establecer las bases para una evaluación de amenaza que pueda ser llevada a cabo de forma sistemática con más volcanes bajo un criterio unificado.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Construir una base de datos espaciales cuantificados de peligro y exposición, con los elementos involucrados en el análisis.

2. Identificar y cuantificar los elementos expuestos a los peligros de cada uno de los volcanes estudiados.

3. Evaluar y comparar la amenaza absoluta que imparten los 6 volcanes estudiados, construyendo un ranking de amenaza volcánica. Además, evaluar y comparar la "amenaza normalizada" relacionada a cada volcán.

4. Evaluar y comparar la amenaza absoluta volcánica absoluta y normalizada en los principales centros urbanos que se ubican alrededor de los 6 volcanes, construyendo un ranking de poblados amenazados.

5. Posibilitar la implementación de la metodología desarrollada con diferentes mapas de peligro, particularmente, llevarla a cabo con los mapas de peligro volcánico oficiales de SERNAGEOMIN.

6. Comparar y discutir los resultados obtenidos con los diferentes mapas de peligro utilizados para implementar la metodología desarrollada.

7. Comparar entre los resultados obtenidos en este trabajo, con los resultados de otras metodologías, particularmente, el actual ranking de riesgo específico del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

1.3. Ubicación y accesos

El área de estudio de este trabajo (Figura 1.1), involucra territorios desde el sureste de la VIII región, pasando por la parte oriental de la IX región, hasta el noreste de la XIV región, donde se ubican los volcanes en estudio y comunas aledañas, que pudiesen ser afectadas por los peligros provenientes de los macizos volcánicos.

En la región del Biobío está el volcán Callaqui, situado en la comuna de Alto Biobío, provincia del Biobío. La comuna extiende por 2.125 km2 y posee 5.923 habitantes (INE, 2017), la mayoría de la población se encuentra en la localidad de Ralco. Para acceder a la comuna en primer lugar se debe

llegar a la ciudad de Los Ángeles, ubicada 517 km al sur de Santiago, y a 120 km de Concepción. Tomando la ruta Q-61-R, se deben recorrer 42 km hacia el este, hasta el poblado de Santa Barbara, desde ahí resta recorrer 52 km más hacia el este para llegar a Ralco. A 14 km y 15 km respectivamente del cráter principal del volcán Callaqui en dirección S-SW se encuentran las centrales hidroeléctricas Ralco y Pangue.

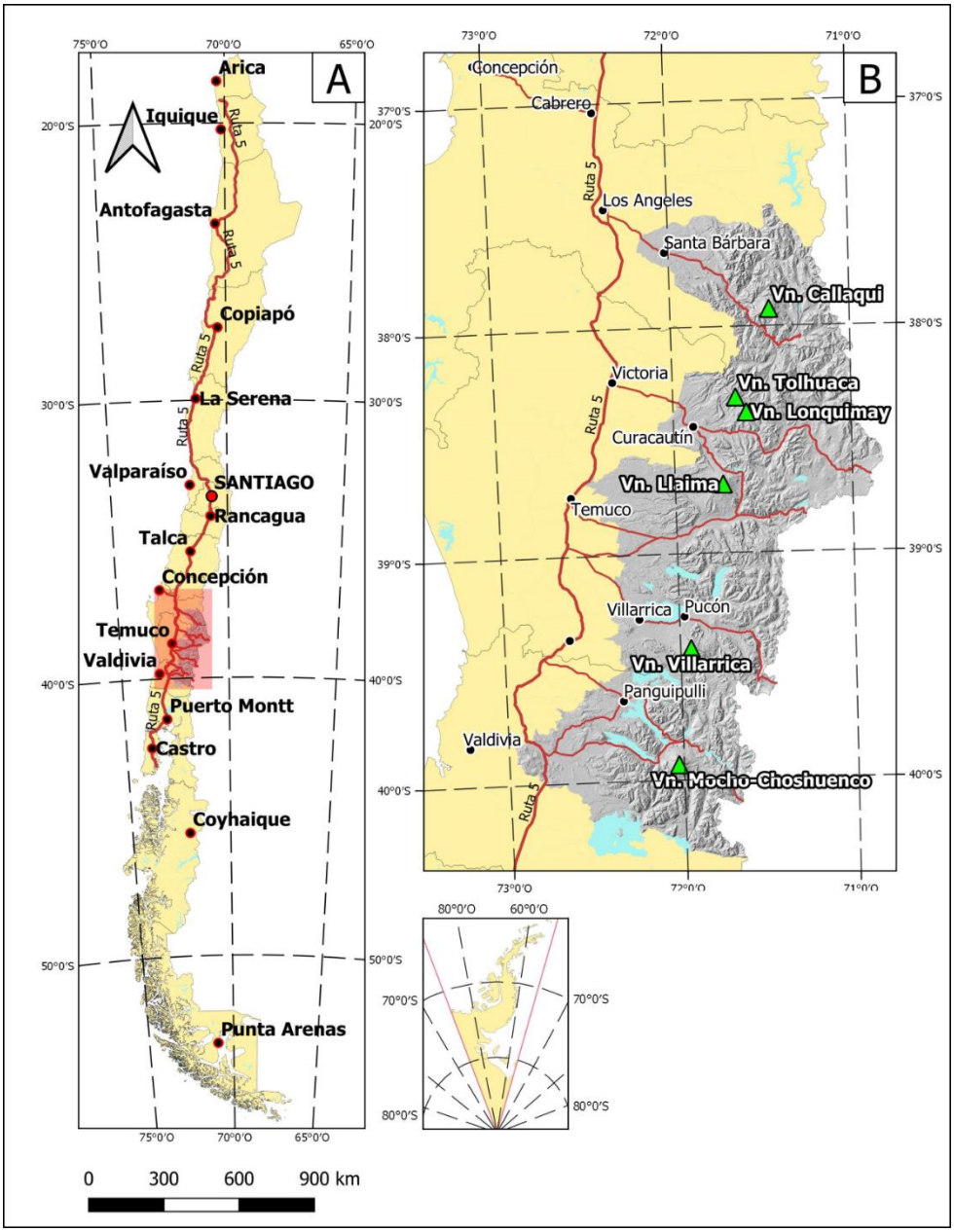


Figura 1.1. **Mapa de ubicación de la zona de estudio.** Ubicación de centros volcánicos y principales rutas de acceso. Elaboración propia.

Los volcanes Tolhuaca, Lonquimay, Llaima y Villarrica se encuentran en la región de la Araucanía. Estos macizos amenazan directamente a las comunas de Curacautín, Lonquimay, Melipeuco y Vilcún, provincia de Malleco y las comunas Villarrica y Pucón pertenecientes a la provincia de Cautín.

La comuna de Curacautín tiene una población de 17.413 habitantes (INE, 2017) y abarca una superficie de 1.664 km2. El principal centro cívico, la ciudad de Curacautín, se encuentra a 80 km de la capital regional, Temuco. Para llegar a Curacautín desde Santiago o Concepción se debe tomar la ruta 5 Sur hasta llegar a Victoria, desde donde se debe tomar la ruta 181 internacional, que llega hasta Lonquimay pasando por Curacautín. Si el acceso se hace desde Temuco se debe ir en dirección norte por la ruta 5 Sur, luego la S-13, llegando hasta Lautaro, finalmente seguir por la ruta S-11-R hasta Curacautín. 30 km hacia el este por la ruta 181 internacional se llega a Malalcahuello.

La comuna de Lonquimay tiene una población de 10.251 habitantes (INE, 2017), abarca una superficie de 3.914 km² y su principal poblado es la ciudad que le da el nombre a la comuna. Un 63% de los habitantes de la comuna viven en el área rural, frente a un 37%, que reside en el área urbana.

La comuna de Melipeuco tiene una población de 6.138 habitantes (INE, 2017), abarca una superficie de 1.107 km², y su localidad principal es la ciudad de Melipeuco. El 45,7 % de la población de la comuna habita en el área urbana, el 54,3% lo hace en el área rural. Melipeuco está ubicada a 89 km de la ciudad de Temuco, en el lado este de la región de La Araucanía. Para acceder al pueblo desde Temuco, se debe tomar la ruta S-51 atravesando Padre Las Casas por Huichahue y conectar con la ruta S-61 hasta llegar a Melipeuco.

La comuna de Vilcún, por su parte, cuenta con una población de 28.151 habitantes (INE, 2017) y abarca 1.421 km², los principales centros urbanos de la comuna ordenados de oeste a este son Cajón, General López, Vilcún (capital comunal), San Patricio y Cherquenco, siendo este último el más expuesto al peligro volcánico. Para acceder a la comuna desde la ruta 5 Sur, se debe llegar a

la ciudad de Cajón, justo al norte de Temuco. Desde ahí tomar la ruta S-31 que recorre la comuna longitudinalmente, a través de ella se conectan todos los poblados antes listados.

El volcán Villarrica amenaza directamente a comunas de las regiones de la Araucanía y de Los Ríos. En la región de la Araucanía se encuentran expuestas Villarrica, Pucón y Curarrehue pertenecientes a la provincia de Cautín. La comuna de Villarrica cuenta con una población de 55.478 habitantes y abarca una superficie de 1.291 km², un 65,8 % de la población vive en el área urbana y un 34,2 % lo hace en el área rural. La comuna de Pucón cuenta con una población de 28.523 habitantes y abarca una superficie de 1.249 km², el 64,3% de su población habita el área urbana y el 35,7% habita en el área rural. La comuna de Curarrehue por su parte tiene una población de 7.489 habitantes y abarca una superficie de 1.171 km², el 30,4% de su población habita en el área urbana y un 69,6% lo hace en el área rural. La ciudad de Villarrica se encuentra a 87 km de la ciudad de Temuco, y a 760 km de Santiago. Para llegar a estas comunas, desde la ruta 5 sur lo primero es llegar a la ciudad de Freire, desde ahí se debe tomar la ruta 199 hasta llegar a Villarrica, esta misma ruta es la que se debe seguir por 27 km para llegar a la ciudad de Pucón, continuando otros 38 km por la ruta 199 se llega a Curarrehue.

La comuna de Panguipulli ubicada en la provincia de Valdivia, posee 35.539 habitantes y una superficie de 3.292 km². En la parte noreste de la comuna y a 18 km del cráter principal del volcán Villarica, está localizada la ciudad de Coñaripe. En la zona sur de la comuna se encuentran las localidades de Choshuenco, Neltume, y Puerto Fuy, ubicadas a los pies del volcán Mocho-Choshuenco. El 44,2% de los habitantes de la comuna residen en el área urbana, mientras que el 55,8% lo hace en el área rural. La forma más directa de acceder a la comuna es llegando a la ciudad de Lanco, ubicada a 770 km de Santiago, a través de la ruta 5 Sur, desde donde se debe seguir la ruta 203 46 km hasta Panguipulli. Para llegar al volcán se debe continuar otros 50 km por la ruta 203 hasta Choshuenco, desde donde se puede hacer ingreso a la Reserva Biológica Huilo-Huilo, donde se encuentra el complejo volcánico.

1.4. Volcanes en estudio

Los volcanes estudiados en este trabajo forman parte de la Zona Volcánica Sur (ZVS) de los Andes, la zona volcánica más activa de Chile. La ZVS comienza en el volcán Tupungatito (33.4° S; 69.8° O), en una latitud similar a la de la ciudad de Santiago, y termina donde subduce la Dorsal de Chile, en el punto triple donde convergen las placas Sudamericana, de Nazca y Antártica, al sur del volcán Hudson (45.9° S; 72.9° O) (Amigo, 2021). La Figura 1.1. muestra que la zona de estudio se encuentra en la parte central de la ZVS. La elección de los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco para este trabajo se justifica debido a su ubicación en la ZVS, su diversidad en términos de peligrosidad volcánica y la variación en población y elementos vulnerables en sus alrededores. Estas características permiten una evaluación exhaustiva de la amenaza volcánica y la efectividad de la metodología desarrollada.

El volcán Callaqui es un complejo estratovolcán elongado formado principalmente por lavas andesíticas y andesítica-basálticas, con menor cantidad de flujos andesíticos-dacíticos (González-Ferrán, 1995). Una fractura de rumbo N50°-60°E controla la fase eruptiva Holoceno - Reciente (Naranjo et al., 2000), además, se reconocen al menos 4 eventos explosivos-efusivos, según Moreno et al., 1984. En la actualidad presenta persistente actividad fumarólica y un glaciar de ~11 km2 en su cima. En cuanto a peligros asociados, existen elevadas probabilidades de erupciones explosivas, con posibilidad de generar lahares, que afectarían a los cursos de los ríos y valles. Las zonas orientales al macizo podrían ser afectadas por caída de tefra (González-Ferrán, 1995).

El Tolhuaca es un estratovolcán ubicado en el límite de las regiones del Biobío y de la Araucanía. Las rocas que componen este volcán, van desde basaltos a dacitas, con predominio de andesitas-basálticas. Su actividad en el periodo Holoceno está representada por al menos 3 depósitos piroclásticos de edad entre 7.750 y 6.590 AP (Polanco, 1998; Polanco et al., 2000). No presenta registros de actividad histórica.

El Complejo Volcánico Lonquimay (CVL; Bustamante, 2013) está compuesto por el volcán Lonquimay y el Cordón Fisural Oriental. Pesenta un registro de erupciones tanto efusivas como explosivas (Moreno y Gardeweg, 1989) con productos de composición andesíticosandesíticos

basálticos (Bustamante, 2013). Según los trabajos de Polanco (1998) y Gilbert et al. (2012), habrían ocurrido al menos 25 erupciones explosivas del CVL en los últimos 10.200 años aproximadamente.

El volcán Llaima está situado en la región de la Araucanía y corresponde a un estratovolcán compuesto por un edificio volcánico mixto. Los productos eruptivos de este macizo tienden a tener composiciones predominantes basálticas a andesíticas (Naranjo y Moreno, 1991). El registro eruptivo histórico va desde el año 1640 al año 2009, marcado por una actividad efusiva a explosiva de baja intensidad con 48 eventos documentados (Naranjo y Moreno, 2005). Los antecedentes geológicos y volcanológicos disponibles del volcán permiten señalar que, en un futuro evento eruptivo, los procesos volcánicos peligrosos serán: caída de piroclastos, flujos de lava y generación de lahares (Moreno y Naranjo, 2003).

El volcán Villarrica es uno de los volcanes con mayor registro eruptivo histórico en Sudamérica y el más activo de Chile. Está situado al SE y NE de los lagos Villarrica y Calafquén respectivamente. La actividad de este volcán inició hace unos 650.000 años y sus productos eruptivos históricos son esencialmente de composición andesítico–basáltica (Clavero y Moreno, 2004). El macizo posee un cráter activo con actividad fumarólica constante, el cual tiene un diámetro de 200 m y su profundidad varía entre 50 y 100 m. Al fondo del cráter, existe un lago de lava, activo casi de manera permanente y, en algunas ocasiones, forma pequeños conos de piroclastos (Moreno y Clavero, 2006). Un importante glaciar de 30,3 km2 y un volumen equivalente en agua de ~4,2 km^3, cubre al edificio volcánico (Sernageomin, 2018). Desde el año 1558, se han producido al menos 60 erupciones, lo que lo convierte en el volcán más activo de los Andes (Petit-Breuilh, 1994; Petit-Breuilh y Lobato, 2004). El último evento se registró el 3 de marzo del año 2015, el cual generó una columna eruptiva de ~10,8-12 km (Romero et al., 2018). Sus erupciones son principalmente de carácter efusivo (Moreno, 2000). Dentro de los principales peligros que se pueden vincular a futuras erupciones del volcán Villarrica están los originados por el deslizamiento de corrientes de lava, caída de piroclastos y el paso de corrientes laháricas acompañadas por la crecida de los ríos y esteros. Desde el cráter principal y adventicios se han emitido coladas de hasta 18 km de longitud (Moreno, 2000).

El complejo volcánico Mocho-Choshuenco corresponde a un conjunto volcánico de orientación NO-SE integrado por los volcanes Choshuenco y Mocho (Gardeweg, 2010). Está ubicado en la región de Los Ríos, al SE del lago Riñihue. Sus productos eruptivos cubren parte de las comunas de Panguipulli, Los Lagos y Futrono, representando episodios volcánicos ocurridos desde el Pleistoceno Medio hasta el presente (Moreno y Lara, 2007). Morfoestructuralmente consiste en una estructura compuesta, de orientación NO-SE formada por un edificio antiguo principal (Mocho) y un estratovolcán sobrepuesto (Choshuenco, cono Holoceno), además de centros eruptivos menores situados en sus flancos. El volcán Mocho es un cono piroclástico de aproximadamente 220 m de altura y con un cráter de 400 m de diámetro; está emplazado en una caldera elongada en dirección NW-SE de 4,5 km de largo por 3,5 km de ancho, la cual está cubierta por un glaciar (Moreno y Lara, 2007). Si bien el complejo no presenta actividad visible, se registra actividad microsísmica (Moreno y Lara, 2007). Al ser un volcán activo con una importante masa de hielo en su cima, un reactivamiento eruptivo podría generar importantes lahares (González-Ferrán, 1995).

1.5. Etapas de trabajo

A continuación, se expone la metodología general para abordar los objetivos específicos de este trabajo.

Objetivo 1:

- Recopilación de mapas de peligro de los seis volcanes en estudio, elaborados en trabajos previos.
- Recopilación de datos SIG de posibles elementos expuestos al peligro volcánico: población, infraestructuras críticas y rutas de transporte, disponibles en fuentes públicas de información oficial.
- Categorización de las infraestructuras consideradas en el análisis, agrupándolas según afinidad de funciones y/o servicios prestados.

- Revisión, pre-procesamiento y corrección, en caso de ser necesario, de los datos recopilados sobre elementos expuestos.
- Cuantificación de los elementos expuestos por medio de un factor de exposición, basado en la categorización e importancia de ellos.

Objetivo 2:

- Superposición de capas vectoriales de exposición pre-procesadas y mapas de peligro volcánico, determinando el número de elementos amenazados por cada volcán.
- Elaboración de mapas de peligro y exposición detallados para cada uno de los volcanes estudiados.

Objetivo 3:

- Cálculo del valor de amenaza a personas que imparte cada volcán, relacionando el número de personas expuestas y el valor de la zona de peligro donde se encuentran.
- Cálculo del valor de amenaza volcánica a infraestructuras relacionando el puntaje de exposición que le fue otorgado y el puntaje de la zona de peligro en la que se encuentran.
- Integración de los valores de amenaza obtenidos para personas e infraestructuras, de manera de obtener un valor de amenaza único y representativo de cada macizo.
- Ordenar de forma decreciente los valores de amenaza obtenidos para cada volcán, construyendo un ranking de amenaza volcánica.

Objetivo 4:

- Identificación de poblados amenazados y determinación del área que será analizada en cada uno, a través de un criterio objetivo.
- Determinación de los elementos de exposición que se encuentran dentro de los límites de cada poblado y organizándolos en capas vectoriales por cada tipo de elemento.

- Intersección de las capas de exposición de poblados con mapas de peligro.
- Cálculo de valores de amenaza representativos de cada poblado evaluado, siguiendo el mismo procedimiento llevado a cabo para la totalidad del área potencialmente afectada por cada volcán.
- Cálculo de un valor de amenaza normalizado de cada poblado, complementario al valor de amenaza absoluto.
- Organización y comparación de los resultados de amenaza absoluta y amenaza normalizada de poblados en tablas, ordenándolos de mayor a menor.
- Representación de los resultados del análisis de poblados en gráficos y mapas de exposición y amenaza.

Objetivo 5:

- Recopilación de mapas de peligro oficiales de SERNAGEOMIN de los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco.
- Digitalización de las zonas de peligro y análisis de los elementos principales de los mapas, determinando el pre-procesamiento necesario para implementar la metodología de evaluación.
- Homogenización de simbologías y leyendas de cada mapa y cuantificación de las zonas de peligro en ellos representadas.
- Implementación de la metodología, evaluando volcanes y poblados.
- Representación de los resultados obtenidos en gráficos, tablas y mapas de peligro y exposición detallada.

Objetivo 6:

- Presentación en paralelo de los resultados obtenidos con ambos grupos de mapas de peligro, expresados como gráficos y tablas.
- Discusión de los resultados obtenidos y análisis de las principales causas en las diferencias y las limitaciones de cada uno.

Objetivo 7:

- Comparación y discusión de los rankings elaborados con los resultados de amenaza impartida por cada volcán, analizando similitudes y diferencias en los lugares que ocupa cada volcán en los respectivos rankings.

1.6. Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mi profesor patrocinante, Dr. José Luis Palma, por darme la oportunidad de trabajar en el desarrollo de una nueva metodología de evaluación de amenaza volcánica, tema central de esta memoria de título. Agradezco su apoyo, enseñanzas y críticas para mejorar este trabajo.

Agradezco al Servicio Nacional de Geología y Minería, en especial a Franco Vera y Constanza Jorquera, por su apoyo y colaboración en tantas discusiones que fueron indispensables para el desarrollo de este trabajo. También le doy las gracias a Paula Peñaloza y Diego Castillo, con quienes hemos trabajo de manera conjunta.

Agradezco al Departamento de Ciencias de la Tierra (DCT) de la Universidad de Concepción, por darme la oportunidad de aprender esta hermosa disciplina llamada Geología. Agradecer a todos quienes forman parte y hacen posible que nos formemos como profesionales.

Le quiero dar gracias a mi familia, en especial a mi madre Nury, por siempre apoyarme y creer en mi en todo este proceso universitario. Agradecer también a los grandes amigos que he conocido en el camino en especial a la hermandad llamada “PDA” con quienes hemos compartido toda clase de momentos, la gran mayoría gratos. Agradezco también a Danitza, por su apoyo y su amor en estos años. Finalmente, agradezco a todos quienes han sido parte y de algún modo han estado presentes, mencionarlos a todos sería una lista interminable, pero sepan que por cada uno siento la más inmensa gratitud. MUCHAS GRACIAS.

2. MARCO GEOLÓGICO Y VOLCANOLÓGICO

2.1. Rocas intrusivas y basamento

2.1.1. Volcán Callaqui

El volcán Callaqui se encuentra sobre antiguas secuencias volcánicas sub-horizontales correspondientes a la Formación Cola de Zorro (Niemeyer y Muñoz, 1983). El edificio volcánico se levanta sobre un basamento consistente en estratos terciarios plegados pertenecientes a las formaciones Curamallín (Mioceno Inferior - Mioceno Medio) y Trapatrapa (Mioceno), los cuales se encuentran intruídos por cuerpos graníticos (Moreno *et al*., 1985).

2.1.2. Volcanes Llaima, Lonquimay y Tolhuaca

La geología de los volcanes Llaima, Lonquimay y Tolhuaca está representada en la Hoja Curacautín (Suárez y Emparán, 1997). En ella se describen una serie de unidades geológicas, las que incluyen depósitos sedimentarios y volcánicos que evidencian una historia geológica que se desarrolla al menos desde el Jurásico. La Hoja Curacautín incluye las formaciones Nacientes del Biobío (Jurásico Inferior – Jurásico Medio) y el Complejo Vizcacha – Cumilao (Cretácico – Paleógeno) que infrayacen de manera discordante a las formaciones Curamallín y Malleco (Plioceno – Pleistoceno Inferior). Estas formaciones corresponden a la zona oeste de la Cuenca Neuquina.

Situadas hacia el este de los volcanes se distribuyen tres unidades intrusivas, de estas, el Complejo Plutónico Gualletué es el que tiene las rocas más antiguas, que según radiometría tiene edades del Jurásico Superior y Cretácico. Ubicadas al oeste de este grupo, se encuentran rocas intrusivas del Mioceno, que corresponden al Grupo Plutónico Melipeuco. Por su parte, en el área centro norte de este sector, las unidades hipabisales del Cerro Mocho y Río Renaico aparecen en un pequeño afloramiento, sin mostrar una evidente relación con alguna unidad estratigráfica (Suárez y Emparán, 1997).

2.1.3. Volcán Villarrica

Filitas, cuarcitas y gneisses fuertemente deformados de manera local constituyen el Basamento Paleozoico, que se encuentra cubierto por depósitos glaciares y piroclásticos del Volcán Villarrica (Moreno y Clavero, 2006). Campos *et al*. (1998) atribuye estas rocas a la parte oriental del basamento metamórfico de la cordillera de la costa de edad Paleozoico Superior. Al basamento lo sobreyace la Formación Panguipulli del Triásico Superior y una serie de rocas estratificadas definidas de manera informal, las que se conocen como Pino Huacho de edad Oligoceno-Mioceno (Moreno y Clavero, 2006), Península de Pucón de Mioceno (Moreno, 1993) y Huincacara de edad Plioceno Superior-Pleistoceno (Moreno, 1993).

En cuanto a las rocas plutónicas, circundantes al volcán Villarrica afloran unidades de diferentes litologías y con edades que van del Paleozoico al Cenozoico Tardío (Moreno, 1993). Moreno y Clavero (2006) reconocen alforamientos de granito, granodiorita y tonalita de grano grueso en las cercanías de la localidad de Lican Ray, además de un grupo principalmente compuesto de tonalitas con cuerpos menores de dioritas cuarcíferas y granodioritas pertenecientes a la parte oeste de la franja de granitoides cretácicos situada al oriente del volcán Villarrica. Con una mayor distribución areal en comparación a los dos grupos mencionados anteriormente, se distingue un tercer grupo plutónico compuesto por dioritas, tonalitas y granodioritas de edad Mioceno, cuyos afloramientos se reconocen al norte, sur y este del volcán (Moreno y Clavero, 2006).

2.1.4. Complejo volcánico Mocho-Choshuenco

Entre las unidades que componen el basamento sobre el cual se alza el volcán Mocho-Choshuenco se encuentra el Complejo Metamórfico Trafún de edad Devónico a Carbonífero. Sobreyaciendo a este complejo metamórfico, y de manera discordante, se encuentran rocas del Triásico Superior, correspondientes a la Formación Panguipulli. Por encima de esta, descansan los Estratos de Lago Ranco, compuestos por una secuencia volcanosedimentaria oligomiocena. Dispuestas transversalmente y en forma de franja se hayan las Secuencias Volcánicas Indiferenciadas de edad Pleistoceno Inferior a Pleistoceno Medio. Estas cubren a plutones jurásicos, rocas intrusivas miocenas y a los Estratos de Lago Ranco. Por encima de estas hay depósitos de material volcánico

perteneciente a los grupos Chanchán y Fui, de edad Pleistoceno Superior a Holoceno, que cubren de manera local a las mencionadas secuencias.

Las rocas intrusivas presentes en la zona incluyen al Batolito Futrono-Riñihue de edad Carbonífero Superior a Pérmico Inferior, el Plutón Panguipulli del periódo Jurásico, el Plutón Choshuenco del Cretácico Inferior, además de granitoides y pórfidos del Mioceno (Moreno y Lara, 2007).

2.2. Rocas y depósitos volcánicos

2.2.1. Volcán Callaqui

Las unidades volcánicas más antiguas han sido datadas en alrededor de 500 mil años mientras que las unidades posteriores cubren un amplio rango en el Pleistoceno Superior-Holoceno. Morfológicamente, el volcán Callaqui es un centro elongado en dirección NE-SW como resultado de la presencia de notables complejos de diques y cadenas de conos piroclásticos emplazados en esa orientación. Moreno *et al.* (1984; 1985) dividen los depósitos volcánicos del volcán Callaqui en cuatro unidades.

Unidad Callaqui 1: Conjunto de aglomerados y brechas originados por lavas basálticas, andesítico-basálticas y lahares, que intercalan con sedimentos aluviales. La potencia que alcanza esta unidad se acerca a los 700 m en las zonas de mayor espesor, siendo cortada por diques dacíticos y andesíticos de 2 a 4 m de espesor cuya orientación preponderante es N60°-70°E. Estas rocas están por sobre la Formación Cola de Zorro, sobreyaciendo a esta en discordancia erosiva, a su vez, estas rocas se ubican por debajo de la unidad Callqui 2. Dataciones K/Ar le asignan una edad de 540±140 ka a esta secuencia.

Unidad Callaqui 2: Secuencia de lavas basálticas y andesítico-basálticas, brechas volcánicas originadas por lahares con intercalasiones de delgadas capas de ceniza y lapilli, que alcanza una potencia máxima de aproximadamente 300 m. Esta secuencia se encuentra por debajo de la Unidad Callaqui 3 y de algunos depósitos morrénicos no consolidados.

Unidad Callaqui 3: Conjunto de lavas cordadas de composiciones basáltica, basáltica-andesítica y andesítica, contextura porfídica. En las partes altas del volcán, además presenta una serie de depósitos en los que se forman conos de piroclastos a todo lo largo y ancho del eje principal del Volcán Callaqui.

Unidad Callaqui 4: Corresponde a todo lo que va por sobre la Unidad Callaqui 3, hasta el Reciente. Es un conjunto de lavas y piroclastos asociado a cráteres, fisuras y pequeños conos piroclásticos (Sielfeld, 2008). En su mayoría, las lavas son basaltos y andesitas basálticas que sobreyacen a rocas de las unidades anteriores y depósitos de morrena.

2.2.2. Volcán Lonquimay

El Complejo Volcánico Lonquimay está formado por el estratovolcán Lonquimay, o volcán principal, sumado a una cadena de centros de emisión adventicios más pequeños que se ubican hacia el sector oriente, en una fisura de orientación NE-SW llamada “Cordón Fisural Oriental” (Moreno y Gardeweg, 1989).

Moreno y Gardeweg (1989) distinguen 5 unidades cronoestratigráficas, ordenándolas de más antigua a más reciente.

Unidad Lonquimay 1: Lavas andesíticas y basálticas que afloran de manera discontinua en la parte inferior del flanco SE y NW del volcán principal, y una secuencia volcánica estratificada de 400 m de espesor dispuesta de manera subhorizontal, la cual foma parte del cordón fisural. Esta unidad muestra pocos afloramientos, y estos se encuentran cubiertos en su mayoría por depósitos de secuencias posteriores, además de estar fuertemente afectados por erosión glaciar. Esta unidad tiene una edad de Pleistoceno Superior.

Unidad Lonquimay 2: Esta unidad está compuesta de lavas aa y piroclastos andesíticos-basálticos, atribuidos a emisiones postglaciales. Estas rocas son parte de la ladera oriental y forman gran parte del cráter del cono principal, la ladera NW también tiene pequeños afloramientos de lavas de composición andesítico-silícea. La edad de estas rocas es Pleistoceno Superior – Holoceno

temprano, y está por debajo de la unidad Lonquimay 3 y algunos depósitos de morrena neoglaciales.

Unidad Lonquimay 3: Se compone principalmente por coladas de lava “aa” y coladas de bloques de composición andesítica emitidas desde el cráter principal y desde cráteres secundarios ubicados hacia el flanco NE y al S del edificio principal. Las coladas están bien conservadas, mostrando solo erosión glaciar incipiente en la cima. La Unidad Lonquimay 3 se le atribuye una edad de Holoceno Temprano y está cierta parcialmente a esta en algunos sectores.

Unidad Lonquimay 4: Lavas emitidas desde el cono principal hacia los flancos W y N en forma de coladas muy bien conservadas. Una colada de menor tamaño, generada en el flanco W por una cadena de cráteres más pequeños, también forma parte de esta unidad. Estas lavas alcanzan un espesor de 8 m en su frente. La edad de estas rocas es Holoceno.

Unidad Lonquimay 5: Unidad constituida por coladas de tipo “aa” y de bloques producidas en las erupciones históricas de 1853 y 1887 a 1889. Son lavas de composición andesítica y fueron expulsadas tanto del cono principal, como de una fisura en el flanco W del volcán.

El Cordón Fisural Oriental (CFO) está formado primordialmente por conos de piroclastos y lavas relacionadas a estos conos, con composiciones que van de andesítico-basálticas a andesítico-dacíticas. El CFO se extienden desde la base del volcán Lonquimay hasta el Cerro Canasto, siguiendo una dirección SW-NE. Moreno *et al*. (2012) diferencia 5 subunidades, basándose en las diferentes morfologías volcánicas observables.

Estas 5 subunidades son:
- Volcanes Portezuelo, de edad Holoceno.
- Conos, domos, lavas y cráteres de explosión, de edad Holoceno.
- Lavas de bloques Río Lolco, del Holoceno histórico.
- Lavas de bloques Diamante 1889 (Holoceno histórico).
- Volcán Navidad, del año 1988 a 1990.

Cinco (5) conos piroclásticos monogenéticos de composicón andesítico-basáltica de edades holocenas acompañan al CFO, estos pequeños volcanes periféricos reciben los nombres de: Holandesa, Laguna Verde, Lolco, Caracol y Colli (Moreno *et al.*, 2012).

2.2.3. Volcán Tolhuaca

Este volcán es un estrato-cono compuesto conformado por una sucesión de tres cráteres principales que han migrado hacia el noroeste seguido de por lo menos 3 centros monogenéticos parásitos, todo bajo el control de una falla de rumbo N40°W (González Ferrán, 1995). Las rocas de este volcán van desde basaltos hasta dacitas, predominando las andesitas basálticas y andesitas.

Basándose en criterios morfoestructurales y dataciones K-Ar se han distinguido 7 unidades (Thiele *et al*., 1987; Moreno, 1992):

Unidad Tolhuaca 1 (Qvt1): Secuencia estratificada de lavas de composiciones basálticas a dacíticas, con intercalaciones aisladas de brechas volcánicas, presentan intensa erosión glacial; son afloramientos aislados, pero que se distribuyen en torno a todo el volcán, con un alcance quizás hasta el valle del río Lolco. Esta unidad sobreyace a las rocas del basamento y está en una relación de discordancia angular con los depósitod posteriores a ella.

Unidad Tolhuaca 2 (Qvt2): Unidad compuesta de lavas basálticas a dacíticas de extensa distribución que rellenan los valles glaciares que han sido formados en la unidad Qvt1. Según una datación K-Ar realizada por Thiele et al. (1987) se pudo establecer una edad de 52 ± 20 Ka para las rocas de esta unidad.

Unidad Tolhuaca 3 (Qvt3): Formada por lavas de composición andesítico-basáltica depositadas en los valles que la erosión glacial formó en la unidad Qvt2. Esta unidad aflora principalmente hacia el norte y el oeste del volcán.

Unidad Tolhuaca 4 (Qvt4): Una colada de lava de composición andesítico-basáltica que desciende hacia el norte y se extiende por 7 km.

Unidad Tolhuaca 5 (Qvt5): Constituida por un cono de piroclastos (Qvt5p) y lavas de bloque de composición andesítica (Qvt5l) posicionados en el flanco NW del volcán. Representa la superficie de erosión actual.

Unidad Cordón Fisural Tolhuaca 1 (Qcft1): Unidad formada por dos centros de emisión alineados en dirección NW-SE y por lavas andesítico basálticas que descienden hacia el noroeste.

Unidad Cordón Fisural Tolhuaca 2 (Qcft2): Esta es una fisura de 1,5 km de largo ubicada al sureste de los centros de emisión de la unidad Qcft1 junto a lavas de composicioón andesítico-basáltica que descendieron hacia el oeste y noroeste. También forma parte de la actual superficie de erosión.

2.2.4. Volcán Llaima

El Llaima es un estratovolcán compuesto, cuyos productos son esencialmente basaltos y andesitas basálticas. Es un edificio volcánico mixto y de escudo, rodeado por alrededor de 40 conos de escoria adventicios, orientados en dirección NE, según una alineación curva de 29 km de longitud, desde el suroeste hacia el noreste del volcán (Moreno *et al*, 1991).

Naranjo y Moreno (2005) describen las unidades Llaima Ancestral 1 y 2 (unidades basales), Llaima Fisural 1, 2 y 3 (unidades fisurales), Llaima Cono Principal y Erupciones Históricas (generadas desde el cráter principal) y las secuencias piroclásticas Ignimbrita Curacautín y Secuencia Trufultruful. Además, añaden unidades actuales de origen lahárico, morrénico, aluvial, fluvial y de caída de escoria.

Llaima Ancestral 1 y Llaima Ancestral 2 son unidades correspondientes a secuencias de basálticas a andesíticas macizas, con intercalaciones de brechas e intrusiones de lacolitos. Lo anterior es interpretado como el remanente de una antigua estructura de mayores dimensiones que lo que es hoy en día el volcán Llaima, con lavas que muestran un manteo radial repartidas al rededor del edificio volcánico (Naranjo y Moreno, 2005). Llaima Ancestral 1 alcanza un espesor máximo que llega a unos 600 m que destaca por sobre un nivel más joven y más bajo correspondiente a Llaima

Ancestral 2, el que solo llega hasta unos 300 m de espesor. La edad para estas secuencias va del Pleistoceno Medio a Pleistoceno Superior.

La Ignimbrita Curacautín (del Pleistoceno Superior) es definida como un depósito de flujo piroclástico de escoria y ceniza de composición basáltica a andesítica que se dispone de manera radial desde el volcán hacia los alrededores de este y constituye el suelo sobre el cual está ubicada la ciudad de Curacautín (Naranjo y Moreno, 2005).

La secuencia Trufultruful ha sido descrita por Naranjo y Moreno (1991, 2005) como una sucesión estratificada de edad holocena compuesta por depósitos piroclásticos de flujo, caída y oleada, propias de erupciones explosivas del volcán Llaima. Esta unidad sobreyace a la Ignimbrita Curacautín, al Grupo Plutónico Melipeuco y a las unidades Llaima ancestral 1 y 2. Las rocas de esta secuencia están dispuestas principalmente al este y sureste del volcán, lo que se debe a los vientos que soplan primordialmente desde el oeste y noroeste. Los mejores afloramientos de esta secuencia se encuentran a lo largo del valle del río Trufultruful y sus tributarios, donde la sucesión alcanza una potencia máxima de 35 m en los que se puede ver una alternancia de aproximadamente 70 niveles de caída de piroclastos y flujos, con delgados horizontes de paleosuelos. Naranjo y Moreno (2005) distinguen 40 niveles de caída de escoria, 25 niveles de flujos u oleadas piroclásticas y 2 niveles de caída de pómez.

Hacia su base esta secuencia está compuesta por una sucesión de tefras de 3 m de espesor, a la cual sobreyace un depósito de caída de piroclastos pliniano de pómez dacíticas, bien seleccionado de 4 m de potencia. A techo, la unidad tiene dos depósitos de oleada piroclástica, separados localmente entre sí por una discordancia de erosión; el depósito basal tiene 4 m de espesor y llega a una distancia de 12 km de la cima del volcán, su distribución se restringe a la desembocadura de los valles ubicados al este y sur del volcán, tiene mala selección y presenta estratificación cruzada y laminación paralela; el depósito superior aflora solo parcialmente en el corte oriental del río Trufultruful a 9 km en dirección ESE de la cima del volcán, y corresponde a una sucesión interestratificada de lapilli y ceniza gruesa, que además exhibe bandas con gradación normal, alcanzando un espesor de 5 m (Naranjo y Moreno, 2005).

Dataciones radiométricas ^{14}C en restos de madera carbonizada, obtenidos directamente de los niveles de flujo y oleada, indican una edad entre 10.530 y 280 AP. Los depósitos de caída, indican un predominio de erupciones estrombolianas a subplinianas durante el desarrollo de esta unidad (Naranjo y Moreno, 2005).

Las unidades Llaima Fisural 1, 2 y 3, de edad holocena y estratigraficamente sucesivas se disponen en el flanco noreste y en todo el pie occidental del volcán. Formadas por conos de escoria parcialmente erosionados y coladas de lava de tipo ‘aa’ de composición andesítico-basáltica a andesítica, de textura afanítica a porfídica (Naranjo y Moreno, 2005). Los centros de emisión están distribuidos de modo que forman lineamientos con tendencia NE-SW a E-W. Las lavas han descendido hacia los sectores nororiental, noroccidental y suroccidental del volcán Llaima, con alcance de hasta 20 km, siendo estas las responsables de haber embalsado las lagunas Conguillío, Verde y Arcoíris. Se observa además que yacen de manera concordante sobre la Ignimbrita Curacautín y la Secuencia Trufultruful (Naranjo y Moreno, 2005).

Dataciones de ^{14}C obtenidas en madera carbonizada entregan edades entre 3.440 y 2.949 AP para Llaima Fisural 1, 2.949 y 770 AP para la unidad Llaima Fisural 2, y de 320 AP para la unidad Llaima Fisural 3 (Naranjo y Moreno, 2005).

La unidad denominada Llaima Cono Principal incluye las rocas que han construido el edificio volcánico con su forma cónica, las cuales han sido emitidas tanto del cráter principal como de las fisuras radiales presentes en la parte alta de los flancos del volcán. Sus lavas más antiguas sobreyacen a la unidad Llaima Fisural 2, y las más jóvenes han sido emitidas durante las Erupciones Históricas. Estas lavas tipo ‘aa’ han fluido radialmente alrededor del volcán, alcanzando distancias que sobrepasan los 27 km desde el centro de emisión. Son rocas en su mayoría porfíricas, con fenocristales de olivino, clinopiroxeno y plagioclasa, en diversas proporciones, y corresponden a basaltos y andesitas basálticas (Naranjo y Moreno, 2005).

Dataciones ^{14}C en restos de carbón bajo las coladas entregan edades de 1.160 a 410 AP, pero al ser obtenidas en productos superficiales, y ya que no existen dataciones de las coladas más antiguas,

se infiere que la edad máxima de la unidad se extiende hasta el límite superior de la unidad Llaima Fisural 2, a la cual sobreyacen, es decir, a 2.940 AP (Naranjo y Moreno, 2005).

2.2.5. Volcán Villarrica

El volcán Villarrica está conformado principalmente por lavas y piroclastos de composición andesítica y andesítica-basáltica. Adicionalmente, en sus flancos se ubican 30 centros eruptivos adventicios, los cuales se formaron a partir de fisuras menores (Moreno, 1993; HickeyVargas et al., 1989).

Los productos del volcán Villarrica han sido agrupados por Moreno (1993) en tres unidades (Villarrica 1, 2 y 3 en edad decreciente) de evolución basados en rasgos estratigráficos, geomorfológicos, estructurales y geocronológicos. Se destaca que el volcán ha tenido tres etapas de construcción, dos colapsos de caldera y dos grupos de conos adventicios asociados, Los Nevados y Chaillupén.

La Unidad Villarrica 1 consiste en una sucesión de 500 m de lavas, brechas volcanoclásticas (piroclásticas y laháricas), aglomerados, algunas tobas de ignimbrita, de composición basáltica a andesítica y algunas intrusiones de diques dacíticos, lacolitos y pequeños domos. Esta es la unidad más antigua del volcán, con una edad de Pleistoceno Medio – 13.850 AP (Clavero y Moreno, 2004).

La Unidad Villarrica 1 sobreyace en inconformidad a granitoides del Mioceno (Munizaga *et al*, 1988) y a rocas volcanoclásticas de Cenozoico. Moreno y Clavero (2006) distinguen dos subunidades separadas por un gran evento eruptivo que sería responsable del colapso parcial sufrido por el edificio formado en una primera etapa. Esta primera etapa de construcción del edificio ancestral iría desde hace unos 600 ka hasta la generación de la primera caldera hace unos 100 ka. La composición de las lavas y depósitos de esta unidad va de basáltica a andesítica basáltica, estos se encuentran afectados por erosión glacial y por un colapso que generó una caldera (Caldera 1) de unos 6,5 por 4,2 km de diámetro (Moreno y Clavero, 2006).

Una segunda etapa de construcción del edificio ancestral inicia posteriormente a Caldera 1, la cual comienza con la formación de domos dacíticos (Clavero & Moreno, 2004), y la inyección de filones y diques de igual composición. Moreno (1993) y Gaytán *et al*. (2005; 2006) han identificado al menos 8 niveles de flujos piroclásticos, correspondientes a depósitos pobremente seleccionados, con fragmentos pumíceos y escoriáceos juveniles de tamaño lapilli fino a medio, líticos subangulosos de hasta 10 cm de diámetro, insertos en una matriz de ceniza fina parda altamente argilizada. Restos de materia vegetal carbonizada se encuentran de manera local y en los niveles inferiores es posible reconocer bolones de hasta 1 m de diámetro, incorporados de los depósitos glaciales inferiores.

La Unidad Villarrica 2, de edad Pleistoceno Superior – Holoceno, es una sucesión de depósitos piroclásticos, laháricos y lavas andesítico-basálticas (Clavero, 1996) emitidos desde los 13.850 años AP (Ignimbrita Licán) hasta los 3.700 años AP (Ignimbrita Pucón). Esta unidad evidencia una fase altamente explosiva en la que se produce un segundo colapso (Caldera 2) hace 14 ka, situado dentro del anterior (Moreno, 1993). La Ignimbrita Licán se extiende en un área aproximada de más de 1.000 km², con un volumen de alrededor de 10 km^3 (Clavero, 1996), hallándose depósitos a más de 40 km del volcán (Clavero y Moreno, 1994; Clavero, 1996).

Este es el primer evento postglacial explosivo del volcán, y a la vez, una de las mayores erupciones de toda su historia. Dataciones efectuadas en restos de carbón indican edades de 14.320 y 13.690 años AP (Clavero 1996).

Seguidamente, se produjeron una serie de erupciones efusivas y explosivas, desde el conducto principal como por conos piroclásticos parásitos. Estos productos formaron un estratovolcán compuesto en la parte noroccidental de la Caldera 1. El fin de la unidad Villarrica 2 está dado por una violenta erupción que provocó el colapso de este estratovolcán, en conjunto a una serie de flujos piroclásticos que originaron la Ignimbrita Pucón y generó una nueva caldera (Caldera 3) de 2,2 x 2,0 km (Moreno y Clavero, 2006).

La Ignimbrita Pucón abarca una superficie de 400 a 500 km², su volumen se estima entre 4 a 5 km^3 y se han encontrado depósitos entre los 15 a 25 km desde la cima del volcán (Clavero y Moreno,

1994; Clavero, 1996; Moreno y Clavero, 2006). Restos de materia vegetal carbonizada arrojó dataciones entre 3.580 y 3.740 años AP. Los productos de esta unidad se disponen normalmente en discordancia erosiva (en su mayoría por acción glacial) sobre lavas y depósitos piroclásticos de la Unidad Villarrica 1 y sobre depósitos glaciales de la Glaciación Llanquihue (Moreno y Clavero, 2006).

El depósito piroclástico mejor expuesto y de amplia dispersión es la Formación Chaimilla, que fue erupcionada después de la ignimbrita formadora de la caldera (Clavero y Moreno, 2004). Según sus características litológicas y texturales, el depósito Chaimilla consta de 4 secuencias principales: Basal, Inferior, Media y Superior, que poseen varias unidades. El contacto basal con la Ignimbrita de Pucón subyacente es generalmente plano-paralelo, aunque en pocas localizaciones se puede ver que los dos depósitos están separados por una discordancia angular, a veces con lechos retrabajados de la Ignimbrita del Pucón (Constantini et al., 2011).

La Unidad Villarrica 3 (del Holoceno tardío) corresponde al cono actual, de unos 450 m de altura edificados sobre la caldera más joven (Caldera 3), ubicada a unos 2.400 m s.n.m. y sus productos asociados (Clavero, 1996). Esta unidad está conformada por lavas tipo aa y pahoehoe que alcanzan hasta 18 km de longitud (siendo en promedio 12 km) y espesores de 15 m, de composición basáltica a andesítico–basáltica al igual que depósitos piroclásticos de flujo, oleada, y de caída, generados por erupciones estrombolianas a sub-plinianas y depósitos laháricos (Moreno 1993; Clavero y Moreno, 2004; Moreno y Clavero, 2006). Las 53 erupciones históricas del volcán Villarrica pertenecen a esta unidad (Petit-Breuilh, 2004), las que incluyen flujos de lava y lahares (Clavero y Moreno, 2004). Los últimos flujos piroclásticos que han sido registrados en este volcán habrían ocurrido en la erupción de 1948-1949, los cuales fueron de pequeños volúmenes dirigidos hacia el flanco W. Previo a esto, ocurrió un flujo hace 530 años AP, y anterior a este, el flujo piroclástico Cónquil, de edad 1.600 años AP posee 6 depósitos piroclásticos de flujo (de ceniza y escoria) y oleada, con intercalaciones de niveles piroclásticos de caída de hasta 30 cm de espesor. Los depósitos cubren una amplia área, extendiéndose por más de 2.000 km^2, con potencias de entre 30 cm hasta 4 m y con longitudes máximas de hasta 18 km (Moreno y Clavero, 2006).

Alrededor de 30 centros adventicios (conos de piroclastos y centros de emisión) pueden ser reconocidos en los flancos del volcán Villarrica, que pueden ser separados en 2 grandes grupos (Moreno y Clavero, 2006): Los Nevados, ubicados sobre la unidad Villarrica 1; y Chaillupén, ubicado sobre la unidad Villarrica 2. Los centros adventicios de Los Nevados están localizados entre 5,5 y 10 km al ENE del cono actual del volcán Villarrica y están controlados por una fisura principal N60°E. Las coladas reconocidas en estos centros son de tipo 'aa' y presentan extensiones entre 8-9 km. Los centros adventicios de Chaillupén están ubicados hacia el S y SW del volcán, controlados por 3 fisuras radiales de orientación N20°W, NS y N35°E. las coladas al igual que Los Nevados son de tipo 'aa' pero tienen una menor extensión, no superando los 5 km. La composición de los productos generados por ambos centros es andesítico-basáltica (52,5-53,5% SiO_2) y por lo general de textura casi afírica (Moreno y Clavero, 2006).

2.2.6. Complejo volcánico Mocho-Choshuenco

En el CVMC en base a criterios geológicos, morfoestructurales y geocronológicos han sido reconocidas 2 unidades en el estratovolcán Choshuenco, y 5 unidades evolutivas en el edificio principal del volcán Mocho (Moreno y Lara, 2007). Adicionalmente, relacionados al CVMC, existen alrededor de 40 centros adventicios distribuidos en los flancos del volcán, Ranquil (4 conos) y grupo Fui (25) hacia el NE y Altos de Caunahue (13) al SW.

La Unidad Choshuenco 1 es una secuencia del Pleistoceno Medio cuyo espesor sobrepasa los 1.000 m en la zona noroccidental del complejo volcánico y que conforma el edificio principal del volcán Choshuenco. Forma parte de la secuencia pre-caldera del complejo y ha sido afectada por una intensa erosión glacial en su cima y en los flancos superiores. Primordialmente, está compuesta por lavas de tipo 'aa' andesítico-basálticas a andesíticas (52-59% SiO_2) y, en menor proporción, por coladas de bloques andesítico-silíceas y dacíticas (62-68% SiO_2).

La Unidad Choshuenco 2, de edad Pleistoceno Superior, es un conjunto de lavas ubicadas en el flanco noroeste del Choshuenco. Son principalmente coladas de bloques que se extienden hasta por 7 km, de espesores medios de 20 m y formas lobuladas con frentes de hasta 30 m en la parte distal. Las composiciones predominantes son andesíticas y dacíticas (59-66% SiO_2).

Una sucesión de lavas, conglomerados volcánicos y tobas en el sector sur del complejo volcánico constituyen la Unidad Mocho 1, la secuencia más antigua (Pleistoceno medio) del edificio volcánico. Alcanza hasta 750 m de espesor y presenta una fuerte erosión glacial.

La Unidad Mocho 2 es una sucesión de lavas con intercalaciones volcanoclásticas, en su mayoría brechas y tobas, con conglomerados volcánicos. Esta unidad de edad Pleistoceno Medio – Superior, aflora mayormente en los flancos oriente y nororiente del complejo, dando forma a gran parte de la secuencia pre-caldera del edificio volcánico. La secuencia alcanza un espesor aproximado de 500 m en el flanco oriental, donde es posible reconocer 3 subunidades sucesivas de lavas tipo 'aa' y de bloques, con espesores de entre 5 y 40 m.

La sucesión estratificada terminal de la secuencia pre-caldera del CVMC es lo que se define como la Unidad Mocho 3. Coladas de composiciones andesíticas y dacíticas (56-66% SiO_2) que rellenan en parte los márgenes de la caldera en los sectores nororiental y suroccidental, además de los valles del flanco alto del edificio principal. En el flanco noreste las lavas más extensas llegan a tener una longitud de hasta 8 km, son coladas de tipo 'aa', de morfologías lobuladas y espesores que llegan a varias decenas de metros (Moreno y Lara, 2007). Después de esta unidad, y aún durante la última glaciación (> 14 ka), el edificio del antiguo estratovolcán sufre un colapso, el cual habría dado origen a la caldera.

La Unidad Mocho 4 corresponde a un conjunto de lavas holocenas expuestas en su mayoría en el lado occidental del CVMC y en zonas altas del flanco oriental. Estas son coladas de tipo 'aa' de composición andesítico-basáltica (52-55% SiO_2) y lavas de bloque de composición andesítico-silíceas (60-67% SiO_2), tienen formas lobuladas, con espesores de hasta 25 m, sin muestras claras de erosión glacial. Corresponde a una fase temprana de la construcción del nuevo cono. Material emitido tanto desde centros ubicados al interior de la caldera como desde fisuras en los flancos. Según Rawson *et al.* (2015) la edad máxima de esta unidad es de 18 ka, mientras que la edad mínima está dada por la presencia de secuencias piroclásticas por sobre las lavas holocenas de esta unidad. Estas secuencias contienen al mayor depósito de corriente piroclástica, llamado Enco, datado en 1,7 – 1,5 ka AP mediante 14C (Rawson, 2015).

Se define como Unidad Mocho 5 a las emisiones más recientes del CVMC (Holoceno tardío e Histórico), incluyendo lavas, aglomerados volcánicos, depósitos de flujo piroclástico, de oleada, y de lahares que constituyen el cono central del volcán Mocho en tiempo históricos. Las emisiones de lava, de composición andesítico-dacítica (57-64% SiO2), son principalmente coladas de tipo ‘aa’ y de bloques. Se cuenta como parte de esta unidad una colada de bloques dacítica de 4 km de largo y 30 m de espesor medio, proveniente de un centro eruptivo lateral localizado en el flanco occidental, justo al norte del cráter Tumba del Buey, expulsada durante la erupción del año 1864. A esta unidad también pertenecen las coladas indiferenciadas, de tipo ‘aa’ en el área proximal, pasando a lavas de bloques en la parte distal, alcanzan longitudes de hasta 11 km y espesores de hasta 20 m.

En cuanto a los centros eruptivos menores del CVMC, a grandes rasgos se puede caracterizar al grupo Fui como un conjunto de 25 conos piroclásticos monogenéticos con coladas de menos de 5 km de extensión y hasta 30 m de espesor, y depósitos piroclásticos de composición variada. El grupo Fui tiene dos subdivisiones, Fui Alto y Fui Bajo, diferenciados entre sí según sus composiciones. El primero tiene basaltos de olivino, por su parte el segundo presenta lavas de tipo ‘aa’ andesíticas. El grupo llamado Altos de Caunahue, corresponde a 13 conos de piroclastos con coladas de tipo ‘aa’ y lavas ‘pahoehoe’ que alcanzan hasta 13 km de longitud, con espesores menores a 10 m. Finalmente, 4 conos piroclásticos andesíticos sin lavas asociadas constituyen el grupo Ranquil. Tanto Altos de Caunahue como Ranquil evidencian diferentes grados de erosión en sus estructuras, señalando distintos períodos eruptivos dentro del Holoceno.

2.3. Actividad eruptiva prehistórica e histórica

2.3.1. Volcán Callaqui

2.3.1.1. Actividad prehistórica

Al menos 6 eventos se cuentan en la actividad eruptiva holocena del Volcán Callaqui entre los 10.000 y 320 AP. Entre los 2.630 y 2280 AP, el volcán habría pasado por su etapa más explosiva, alcanzando un índice de explosividad volcánica (VEI por sus siglas en inglés) igual o menor a 4

(Polanco *et al*., 2000). El periodo de recurrencia para un evento eruptivo explosivo se ha estimado en ca. 1.000 años (Polanco *et al*., 2000).

2.3.1.2. Actividad histórica

En la actualidad, el Callaqui muestra actividad fumarólica en su cima (Naranjo et al., 2000). El registro de erupciones históricas de este volcán es poco preciso, pero existen datos de, al menos, 4 eventos históricos, de los cuales el más reciente habría ocurrido en 1937 (Petit-Breuilh en Moreno, 1992 en Naranjo, 2000). Además, según los antecedentes recopilados por Moreno *et al*. (1984) es posible identificar al menos seis erupciones desde 1751. Durante el siglo XX sólo hay registros ocasionales de presencia de fumarolas y algunas pequeñas explosiones freatomagmáticas como la reportada en 1980 por el geólogo Rolando Barozzi. Por tanto, el período de silencio mínimo es de 43 años y el período de silencio máximo es de 113 años. Moreno y Lahsen (1984) realiza un cuadro resumen de la actividad del volcán Callaqui, el cual se observa en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Resumen de actividad eruptiva histórica del volcán Callaqui. Moreno et al. (1984)

Fecha	Tipo de actividad
Octubre de 1980	Desde la fumarola principal, la nieve se cubrió de cenizas y lapilli.
1966-1978	“Resplandor rojizo” en la fumarola principal, avalanchas de hielo.
1974-1978	Fumarólica.
18 de septiembre de 1937	Fumarólica.
Octubre de 1864	Impreciso.
31 de diciembre de 1751	Fumarola o erupción de piroclastos (?)

2.3.2. Volcán Tolhuaca

La actividad eruptiva Holocena, incluye sólo tres eventos relativamente antiguos entre 8050 y 6590 A.P., pero de explosividad importante (IEV = 3 - 4), y actualmente su única anomalía ha sido actividad fumarólica débil en la cima (Polanco *et al.*, 2000). El volcán no ha registrado actividad eruptiva durante los últimos 6500 años (Polanco, 1998).

El volcán Tolhuaca es el edificio volcánico con menos documentación en la literatura, no se tiene registro de actividad explosiva durante los últimos 6.500 años, por lo que el conocimiento que se tiene sobre su geología, actividad eruptiva histórica y fenómenos asociados es precario.

2.3.3. Volcán Lonquimay

2.3.3.1. Actividad prehistórica

La actividad prehistórica del volcán Lonquimay, inferida del registro cronoestratigráfico, de su actividad histórica y en base a la bibliografía disponible, corresponde a erupciones tanto explosivas como efusivas, de magnitudes moderadas a grandes, variando de tipo estromboliano a subpliniano, y con VEI de entre 2 y 4 (Moreno y Gardeweg, 1989).

Según la información que provee el registro estratigráfico, existen al menos 27 erupciones explosivas identificables en el volcán Lonquimay, en aproximadamente los últimos 10.000 años (Polanco, 1998; Gilbert *et al*., 2012). Estas erupciones son responsables de los depósitos piroclásticos que afloran de manera más notoria en la zona este y sureste del complejo a lo largo de los ríos Cautín, Naranjo y Lolco (Polanco, 1998).

2.3.3.2. Actividad histórica

Los datos bibliográficos señalan que la actividad histórica del CVL consta por lo menos de 5 eventos desde el año 1853, hasta la erupción de 1988 – 1989 (Thiele *et al*., 1987; Moreno y Gardeweg, 1989).
En base a la escasa documentación sobre la cronología de las erupciones para este volcán, se ha obtenido una tasa eruptiva de 2,2 cada 100 años, en otras palabras, aproximadamente 1 cada 50 años (Polanco, 2010).

La última erupción, ocurrida en 1988-1989 en el flanco nororiental del edificio principal y sobre la fisura aún activa de 1887-1889, dió origen a un nuevo cráter que rápidamente pasó a ser una pequeña fisura con 4 centro de emisión, para que con el pasar de unos pocos días diera origen al cono de piroclastos Navidad.

A continuación, se presentan las erupciones históricas del Volcán Lonquimay (Thiele *et al*., 1987; Moreno y Gardeweg, 1989):

Erupción de febrero de 1853: Erupción del Volcán Lonquimay. Fuertes explosiones con proyección de material y derrames de lava. Este evento alcanzó un VEI de 3, con una columna eruptiva de más de 3000 m.

Erupción del 24 de junio de 1887 a diciembre de 1889: Erupción del Cordón Fisural Oriental. Violento ciclo eruptivo con proyección de material piroclástico y abundantes emisiones de lavas bloque. La altura de la columna eruptiva fue de aproximadamente 2000 m con un VEI igual a 2.

Erupción del 4 de enero de 1933: Erupción de piroclastos con un VEI de 2 originada en el Volcán Lonquimay.

Erupción de febrero de 1940: Desarrollo de una fumarola o posible erupción de piroclastos en el Volcán Lonquimay.

Erupción del 25 de diciembre de 1988 al 5 de abril de 1989: Ciclo eruptivo responsable de la formación del Cono Navidad en el flanco oriental del Volcán Lonquimay. Fue una erupción estromboliana que alcanzó un índice de explosividad volcánica de hasta 3 cuya columna eruptiva alcanzó una altura de 9000 m por sobre el cráter del volcán. La erupción generó proyección de balísticos (bombas), caída de lapilli y ceniza, mientras que la lava expulsada formó coladas de bloques que descendieron en dirección noreste, ocupando el valle del Río Lolco. La magnitud de este evento disminuyó con el correr de los meses, en abril de 1989 la columna eruptiva no superaba los 2000 m de altura y el VEI de 2-3 disminuyó a 1.

2.3.4. Volcán Llaima

2.3.4.1. Actividad prehistórica

El Llaima es uno de los mayores volcanes de los Andes del Sur, y se encuentra activo desde Pleistoceno superior. El volcán tiene una mayor proporción de lavas respecto de piroclástos, de composición primordialmente basáltica a andesítica (51-59% SiO_2) y en menor proporción, productos andesíticos silíceos a dacíticos (60-65% SiO_2). Dentro de la base de la unidad postglacial

se destaca una sucesión que revela una intensa actividad explosiva entre los 13.200 y 7.200 AP. La evolución de esta etapa comienza con el emplazamiento de la Ignimbrita Curacautín de composición basáltica a andesítica rellenando el fondo de los valles alrededor del volcán y extendiéndose hacia la Depresión Central hasta más de 100 km al oeste (Moreno y Naranjo, 1991a). Esta etapa estaría ligada a la formación de una caldera de unos 8 km de diametro (González-Ferrán, 1995).

La sucesión incluye además depósitos de caída de pómez, los cuales representan los productos más silíceos del volcán (65% SiO_2) y que fueron eyectados a los ca. 8.800 AP mediante una erupción pliniana, cuya columna habría alcanzado unos 40 km de altura. La erupción piroclástica culmina con depósitos de oleadas piroclásticas de composición andesítica a andesítica silícea (59-62% SiO_2), originados probablemente producto del colapso de la columna eruptiva hacia el sureste del volcán, generando acumulaciones de espesores entre 6-8 m (Moreno y Naranjo, 1991a).

La etapa de actividad altamente explosiva del Llaima culminó aproximadamente a los 7.200 AP, con el emplazamiento de oleadas piroclásticas menores hacia el sector oriental. En base a los depósitos encontrados se establece que la dispersión eólica de la tefra ha sido principalmente hacia el cuadrante suroriental, con vientos dominantes del noroeste, condición que ha perdurado hasta la actualidad (Moreno y Naranjo, 1991a).

2.3.4.2. Actividad histórica

Petit-Bruilh y Lobato (1994) sugieren que el Volcán Llaima ha hecho erupción al menos 20 cada siglo. No obstante, solo desde 1640 se lleva un registro de las erupciones, desde entonces han sido documentadas alrededor de 50 (Naranjo y Moreno, 2005), la mayoría de ellas han sido acompañadas por lahares, coladas de lava, proyección de piroclastos y ocasionalmente flujos piroclásticos.

Desde la erupción de 1640 la actividad del Llaima ha mantenido un carácter primordialmente efusivo a explosivo de baja intensidad, cuyo estilo eruptivo ha seguido un modelo fisural y de

flanco, con centros de emisión en cráteres adventicios ubicados entre los 2.000 y 2.250 m s.n.m. (Naranjo y Moreno, 2005).

Naranjo y Moreno (2005) destacan las erupciones de los años 1640, 1751, 1875, 1903, 1927, 1944-1946, 1955-1957, debido a la magnitud de estas y de sus impactos, ya sean humanos como ambientales.

Después del ciclo eruptivo de 1955-1957, el periodo 2007-2009 es el más significativo de la historia reciente del volcán Llaima (Moreno et al., 2009). Este periodo incluye erupciones de estilo estromboliano y hawaiano que generaron *spatter* y flujos de lava basáltica (~51% SiO_2). Los principales eventos eruptivos fueron los del 1 y 25 de enero de 2008 y el 3 de abril de 2009. Las erupciones del 1 y 25 de enero de 2008 y del 3 de abril de 2009 fueron energéticamente 1 y 2 órdenes mayores que las demás de este periodo. Estas fueron clasificadas por Moreno et al. (2009) como fases paroximales estrombolianas, que generaron lahares que barrieron los flancos del volcán. Los eventos eruptivos de este periodo alternaron entre fuentes de lava, flujos de lava, pulsos estrombolianos, y explosiones ricas en cenizas, involucrando varios centros de emisión y dos fracturas importantes en las laderas del volcán.

La Tabla 2.2. resume los eventos eruptivos del Llaima, de ella se infiere queen una futura erupción podrían ocurrir: caídas de piroclastos, flujos de lava, generación de lahares y ocasionalmente la generación de flujos piroclásticos. De acuerdo al mapa de peligros de SERNAGEOMIN (Naranjo & Moreno, 2000), las zonas más afectadas por estos fenómenos son las que se encuentran en la parte NW del macizo (sector Captrén), SW y W. Además de los sectores Trufultruful al SE y Cherquenco al S. La localidad más amenazada corresponde a Melipeuco (González-Ferrán, 1995).

Tabla 2.2. Resumen de la actividad volcánica histórica del volcán Llaima. *Modificado de Petit-Breuilh (2004).*

n.º	Fecha de Inicio	Fecha de Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	FP	A2	LH	AR	DR	Altura Columna (m)	IEV
1	1624		-	-	x	x	x	?	-	-	-	-	-	>1000	2
2	1640-02	1640	x	x	x	x	x	x	?	-	x	x	x	1000	3 – 4
3	1751-12-18	1751-12	-	-	x	x	x	x	-	x	-	-	-	>2000	2
4	1759-12		-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-		?
5	1822-11-19	1822-11	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	>2000	2
6	1852-12-18	1853-principio de	x	x	x	x	x	?	-	x	-	-	-	>2000	2
7	1860-03-15	1860-03-fines de	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-		1
8	1862		x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	>2000	2
9	1864-12		x	x	x	x	x	-	-	x	-	-	-	5 o 6000	2 – 3
10	1866		x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	4 o 5000	2
11	1869-04	1870-10	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-		?
12	1872-06-06	1872-06	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	-	4 o 5000	2
13	1874-01-12	1874-10-24	x	x	x	x	x							> 3000	2
14	1875 fines de	1876-06	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	x	> 3000	2
15	1877-01-17	1877-05	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	>1000	?
16	1883		-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	1000	1 – 2
17	1887-01-16	1887-06-24	x	x	x	x	x	-	-	-	?	x	-	>2000	2
18	1892-04-20	1889-07	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	>1000	2
19	1892-04-06	1892-04	x	x	x	x	x	?	-	-	-	-	-	>2000	2
20	1893-12	1893-12	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-		1 – 2
21	1894-03	1894-12	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	1000	1
22	1895. findes de	1896. fines de	-	-	x	x	x	x	-	x	x	x	-	4 o 5000	2
23	1903-05-12	1903-05-14	x	x	x	x	x	x	-	x	-	-	-	>2000	2
24	1907-03-08	1908-03	x	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	>2000	2
25	1912		-	-	x	x	x	?	-	-	-	-	-	>1000	1 – 2
26	1914-07-03	1914	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	>1000	1 – 2
27	1917-02-04	1917	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	>1000	1 – 2
28	1922-10-24	1922	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	1000	2
29	1927-04-14	1927-12-05	x	x	x	x	x	x	-	x	-	-	-	4 o 5000	2
30	1929-12	1929-12	-	-	x	x	x	-	-	x	-	-	-	>1000	2
31	1930-07-06	1930-08-20	x	x	x	x	x	x	-	x	-	-	-	>2000	2
32	1932-03-02	1933-01-05	x	x	x	x	x	-	?	x	x	x	-	10000	3
33	1937-02-10	1937-01-02	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-		?
34	1938-12		-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-		?
35	1941-06-23	1941	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	>1000	1
36	1942-06-09	1942-11	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	>2000	2
37	1944		-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	3 o 4000	2
38	1945-03-31	1945-04-03	x	x	x	x	x	-	?	-	x	-	-	5 o 6000	2
39	1946-07-23	1947	?	?	x	x	x	x	-	-	x	x	x	llovía	2
40	1949-09		-	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-	>1000	1 – 2
41	1955-10-22	1955-10-23	-	-	x	x	x	x	x	x	-	-	-	>2000	2
42	1956-01-18	1956-10-11	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	3000	1 – 2
43	1957-02-18	1957-02-22	-	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-		1 – 2
44	1957-07-14	1957-11	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	10-15000	2
45	1959-11				x	x									
46	1961-11													1800	2
47	1964	1964	-	-	x	x	x	x	-	-	-	-	-		1 – 2
48	1971-11	1972-03-12	-	-	x	x	x	-	-	x	-	-	-	1500	2
49	1979-10-15	1979-11-28	x	x	x	x	x	x	-	-	x	-	-	2000-3000	2
50	1984-04-20	1984-11-26	x	x	x	x	x	-	x	-	-	-	-	5000	1 – 2
51	1990-02-25	1990-11-25	-	-	x	x	x	-	-	-	-	-	-	1000	1 – 2
52	1994-05-17	1994-05-19	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	-	4000	2
53	1994-08-25	1994-08-30	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	3700	2
54	2007	2009	-	x	x	x	-	x	x	-	x	x	-	8000	3

RS: ruidos subterráneos; SV: sismos volcánicos; EX: explosiones cráter central; GC: columna cenizas y gases; EP: eyección de piroclastos; FL: flujo de Lava; FP: flujo piroclástico; LH: flujos laháricos; AR: aumento caudal ríos; DR: derrumbes en cráter; IEV: Índice de explosividad volcánica.

2.3.5. Volcán Villarrica

2.3.5.1. Actividad prehistórica

En el pasado, el volcán Villarrica ha tenido abundante actividad explosiva, la que produjo alrededor de 16 flujos piroclásticos de gran volumen, los más destacables ocurrieron hace 13.900 y 3.900 años, con volúmenes de 10 y 3 km^3, respectivamente. Esta actividad postglacial ha causado la formación de 2 calderas de 6,5 x 4,2 km y de 2,2 km de diámetro (SERNAGEOMIN).

Los antecedentes indican que el volcanismo de la etapa prehistórica ocurrió previo a la Glaciación Llanquihue y durante ella, abarcando, por lo menos, entre los 95 ka y los 13,9 ka. Durante este periodo la actividad fue de carácter tanto efusivo como explosivo (Clapperton, 1993; Clavero y Moreno, 2004; Gaytán *et al*., 2005; Gaytán *et al*., 2006).

La Unidad Villarrica 2, evidencia una etapa de importante actividad explosiva durante el Pleistoceno Superior al Holoceno, donde se reconoce una sucesión de depósitos piroclásticos, lahári cos y de lavas emitidos desde los 13.850 años AP (Ignimbrita Licán) hasta los 3.700 años AP (Ignimbrita Pucón). Los depósitos de flujo son macizos, incluyen bombas de hasta 60 cm, las cuales se encuentran insertas en una matriz de ceniza. Este sería el primer evento postglacial explosivo del Villarrica y una de las mayores erupciones que ha tenido este volcán (Moreno y Clavero, 2006).

La Ignimbrita Pucón corresponde a una serie de depósitos piroclásticos, en su mayoría de flujo y oleada, con menor presencia de depósitos de caída. Está compuesta de, al menos, cuatro unidades de flujo, con distintas facies, que posiblemente estén divididas en subunidades de flujo individuales. Estas unidades son ricas en material juvenil y material lítico, además, en todas ellas se reporta la presencia de materia vegetal carbonizada (Clavero y Moreno, 1994; Moreno y Clavero, 2006).

Según lo indicado por Constantini et al. (2011), las características de las unidades basales del depósito Chaimilla y el alto contenido lítico de la base de la secuencia Inferior sugieren que el respiradero estaba probablemente cerrado al inicio de la erupción. En la actualidad, el volcán Villarrica es un sistema abierto con desgasificación continua desde un reservorio muy superficial.

Sin embargo, los autores sugieren que la erupción de Chaimilla fue probablemente impulsada por el rápido ascenso de un gran lote de magma no desgasificado desde un depósito profundo. Por lo tanto, no se puede excluir la posibilidad de una erupción como Chaimilla solo por las condiciones de la parte superior del sistema de alimentación.

2.3.5.2. Actividad histórica

Petit-Breuilh (2004), basada en su recopilación histórica, establece que entre los años 1558 y 1991 el volcán Villarrica ha tenido 53 eventos eruptivos, los cuales son, principalmente, de tipo efusivo y en menor proporción, algunos eventos explosivos (Petit-Breuilh y Lobato, 1994, Clavero y Moreno, 2004). Por su parte, Van Daele *et al*. (2014), señala que el volcán ha presentado 112 erupciones de IEV ≥ 2 en los últimos 600 años, basándose en un estudio estratigráfico de los sedimentos del fondo de los lagos Calafquén y Villarrica. En tiempo histórico, la actividad del volcán Villarrica ha sido principalmente de tipo hawaiana, freatomagmática, vulcaniana y estromboliana (Moreno, 1993). Los productos emitidos durante los eventos eruptivos han sido lavas, tefras y flujos piroclásticos de composición basáltica a andesítica, y lahares (Moreno, 1993).

La última erupción del Villarrica ocurrió el 3 de marzo del año 2015, produciendo intensa actividad estromboliana. La vigorosa erupción comenzó a las 03:10 en la que se produjo una columna eruptiva sostenida de 6 a 8 km de altura, que duró 16 minutos; toda la erupción duró alrededor de 55 min. De acuerdo con las isócronas derivadas de las imágenes satelitales GOES 13, la velocidad de deriva de la pluma eruptiva fue de 8,57 m/s. El volumen de material emitido fue entre 1,2 y 3,4 $\times 10^6$ m^3, con una media de 2,3 $\times 10^6$ m^3 (Romero *et al*., 2018). Parte de los piroclastos emitidos durante la erupción provocaron fusión local de la cobertura de la cobertura de hielo, lo que produjo cientos de flujos híbridos, conformados por un cuerpo de hielo o nieve y una delgada cobertura piroclástica. También se generaron lahares de pequeño volumen y avalanchas mixtas. (Vera y Palma, 2017).

La Tabla 2.3. resume la actividad histórica que ha tenido el volcán Villarrica.

Tabla 2.3. Resumen de la actividad eruptiva histórica del volcán Villarrica. Modificado de Petit-Breuilh (2004). Complementado con GVP de Smithsonian Institution.

n.º	Fecha de Inicio	Fecha de Término	RS	SV	EX	CG	EP	FL	LH	AR	DR	Altura Columna (m)	IEV
1	1558		-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 2000	2
2	1562		-	-	x	x	x	?	-	-	-	> 3000	2
3	1594		-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	2
4	1640-02-03	1640	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10000	3 – 4
5	1688?		-	-	x	x	x	-	-	-	-		1
6	1716		-	-	x	x	x	-	-	-	-		1
7	1742?		-	-	-	-	-	-	-	-	-		?
8	1745?		-	-		-	-	-	-	-	-		?
9	1751-12-14	1751-12, fines	-	-	x	x	x	x	-	-	-	1000	1 – 2
10	1759	1759	-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1000	1
11	1777	1779	-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1000	1
12	1780		-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1000	1
13	1787		-	-	x	x	x	x	-	-	-	> 1000	1 – 2
14	1790-01	1801	-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1000	1
15	1806-04	1806-05	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1000	1
16	1815	1818	-	-	x	x	x	-	-	-	-	< 1000	1
17	1822-11-19	1822-11	x	x	x	x	x	-	-	-	-	>2000	2
18	1832-12-24		x	x	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	2
19	1837-11-07	1837-11-21	x	x	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	2
20	1852-11	1853-01-08	x	x	x	x	x	x	-	-	-	> 1000	2
21	1859-05-19	1860-04-12	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	2
22	1864-10		-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	1 – 2
23	1869-02-04	1869-09	x	x	x	x	x	?	-	-	-	> 1000	2
24	1874-04-16		-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	1 – 2
25	1877-03-12	1877-05			x	x	x					> 1000	2
26	1879-02-02	1879-03	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1000	1
27	1880		-	-	x	x	x	-	-	-	-	1000	2
28	1883		-	-	x	x	x	-	-	-	-	1000	2
29	1893 fines de	1894 princip	-	-	x	?	?	-	-	-	-	> 1000	2
30	1897.fines de	1898.princip	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	2
31	1904		-	-	x	x	x	?	x	-	-	1000	2
32	1906-04-22	1906-12	-	-	x	?	?	-	-	-	-	1000	1 – 2
33	1907-05.inicio	1907-05-26	x	x	x	x	x	?	-	-	-	> 3000	2
34	1908-10-31	1908-12-12	-	x	x	x	x	x	x	-	x	3000	2
35	1909-08-19	1910	-	-	x	x	x	x	x	-	-	> 3000	2
36	1915	1918	-	-	x	?	?	-	-	-	-	< 1000	1
37	1920-12-10	1920-12-13	-	x	x	x	x	x	x	-	-	>2000	2
38	1922-10-24	1922	x	x	x	x	x	-	-	-	-	1000	1
39	1927	1928	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1000	2
40	1933-01-05	1933-01	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	1
41	1935.fines de	1936-06-27	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	1
42	1938.fines de	1939.princ de	-	-	x	x	x	-	-	-	-	> 1000	1
43	1948-04-10	1949-02-03	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Hasta 8000	3
44	1956-10-03	1956	-	-	x	x	x	x	-	-	-		1
45	1963-03-08	1963-05-25	-	-	x	x	x	x	-	x	-	500 – 1000	1
46	1964-03-02	1964-04-21	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1500	2
47	1971-10-29	1972-02-12	x	x	x	x	x	x	x	x	?	3000	2
48	1977-01-26	1977-01-30	x	x	x	x	?	-	-	-	-	<1000	1
49	1980-06-20	1980-09-24	-	-	x	x	x	-	-	-	-	2200	1 – 2
50	1983-10-14	1983-10-16	-	-	x	x	x	-	-	-	-	1000	1 – 2
51	1984-10-30	1985-11-18	x	x	x	x	x	x	-	x	-	600 / 3000	1 – 2
52	1996-09-14	1996-09-15	-	-	x	x	?	-	-	-	-	200	1
53	1999-11	1999-12	-	-	x	x	?	-	-	-	-	>300	1
54	2003-05-23	2004-03-25	-	-	x	-	-	-	-	-	-		1
55	2004-08-05	2007-12-24	-	-	x	-	-	-	-	-	-		1
56	2008-10-26	desconocido	-	-	x	-	-	-	-	-	-		1
57	2009-01-29	2009-03-24	-	-	-	-	x	-	-	-	-		1
58	2009-11-22	2012-04-20	-	-	-	-	x	-	-	-	-		1
59	2015-03-03		-	-	x	x	x	x	x	x	-		2
60	2019-06-22	2019-06-25	-	x	x	-	x	-	-	-	-		1
61	2019-09-08	2019-09-15	-	x	x	-	x	-	-	-	-		1

RS: ruidos subterráneos; SV: sismos volcánicos; EX: explosiones cráter central; GC: columna cenizas y gases; EP: eyección de piroclastos; FL: flujo de Lava; FP: flujo piroclástico; LH: flujos laháricos; AR: aumento caudal ríos; DR: derrumbes en cráter; IEV: Índice de explosividad volcánica.

2.3.6. Complejo volcánico Mocho-Choshuenco

2.3.6.1. Actividad prehistórica

Los estudios realizados en los depósitos del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco (CVMC) revelan, en su conjunto, una continua actividad eruptiva explosiva del volcán, durante los últimos 18.000 años (Moreno y Lara, 2007). Sus unidades se componen de una alternancia de lavas y depósitos piroclásticos de flujo, oleada y caída generados a partir de erupciones de diversa magnitud, variando entre episodios efusivos, con emisión de lavas andesítico-basálticas y erupciones plinianas de alta explosividad. El evento más destacado el responsable del depósito Neltume, el cuál es reconocible hasta Curarrehue a 75 km del CVMC, en las cercanías del volcán Villarrica (Moreno y Lara, 2007). Los depósitos piroclásticos del complejo, muestran características de actividad explosiva freato-magmática, especialmente en los depósitos proximales a los conos piroclásticos cercanos a Puerto Fuy, lo que indica que el volcanismo reciente, ha sido acompañado también de una intensa actividad explosiva que involucra interacción con agua (Moreno y Lara, 2007).

La fase de reconstrucción del edificio moderno del volcán Mocho, el principal centro volcánico activo en el periodo post-glacial e histórico, ha ocurrido principalmente durante el Holoceno (Moreno y Lara, 2007). Desde el Holoceno Temprano, inició una etapa intenso volcanismo explosivo con erupciones plinianas de alcance regional, en el interior de la caldera, acompañadas por efusiones de lavas andesítico-basálticas a riolíticas correspondientes a la Unidad Mocho 4. Por su gran magnitud, los eventos más detacadosen el registro estratigráfico son Neltume, Pirehueico y Huilo (Moreno y Lara, 2007).

La construcción del cono actual ocurrió en el Holoceno Tardío (Unidad Mocho 5), donde sobresalen los eventos subplianianos Enco (~ 1,7 ka, Moreno y Lara, 2007) y Hua-Hum (Rawson *et al*., 2015). Además, se produjo la erupción de lavas andesíticas a dacíticas desde el cono central como desde centros adventicios (Moreno y Lara, 2007).

Los antecedentes geológicos disponibles, especialmente el registro de depósitos piroclásticos, permiten señalar que las erupciones explosivas holocenas se habrían generado principalmente en

centros de emisión del interior de la caldera y, las más recientes, en el cono actual del volcán Mocho (Naranjo *et al*., 2001; Pérez, 2005; Moreno & Naranjo, 2006).

2.3.6.2. Actividad histórica

La actividad en tiempos histórico de este complejo volcánico se ha desarrollado solo en el volcán Mocho y en conos adventicios del mismo. Lo anterior es consistente con la profunda erosión que presenta el volcán Choshuenco (Moreno y Lara, 2007). A continuación, se presenta una breve descripción de las observaciones de las últimas erupciones.

Mocho-Choshuenco cuenta con 5 erupciones históricas documentadas desde el año 1759 hasta mediados del siglo XIX. Los reportes indican erupciones explosivas en 1759 y 1777, y de tipo estromboliano en 1822 y 1863, según lo que se infiere de las descripciones realizadas por Göll (1904 en Moreno y Lara, 2007). La última de ellas habría sido precursora de la erupción explosiva de 1864, el principal y último evento eruptivo histórico registrado, aparentemente de tipo subpliniano (Moreno y Lara, 2007). Respecto a esta última, se añaden los antecedentes recopilados por Petit-Breuilh (2004) y el relato de Vidal Gormaz (1869 en Moreno y Lara, 2007) donde se describen la ocurrencia de flujos piroclásticos al hacer referencia que “por las quebradas del volcán corrían arroyos de fuego”. Testimonios más recientes señalan que “en tiempos pasados la región vivió una trágica experiencia al hacer erupción el Choshuenco, pues acabó con toda la población de los alrededores; además, las aguas del lago Panguipulli habrían “hervido” producto de la erupción (Bernales, 1990 en Moreno y Lara, 2007); esto hace sentido, ya que en los depósitos de flujos piroclásticos ubicados a orillas del lago Panguipulli asociados a esta erupción se han encontrado restos de cerámica indígena (Moreno y Lara, 2007).

La Tabla 2.4. resume la actividad eruptiva histórica del complejo volcánico Mocho-Choshuenco.

Tabla 2.4. Resumen de la actividad eruptiva histórica del volcán Mocho-Choshuenco. Moreno y Lara (2007).

Año	Observaciones
1759	Erupción explosiva. Se registró actividad eruptiva en el volcán Valdivia, el cual correspondería al actual volcán Mocho (Mapa de León Garavito, 1759 en Gardeweg, 2010). IEV: 2.
1777	Erupción explosiva. En el mapa de Tomás López (1777 en Gardeweg, 2010), el volcán Valdivia (volcán Mocho) aparece con "llama". IEV: 2.
1822	Erupción estromboliana, deducido de descripción por Göll (1904 en Gardeweg, 2010): “reventaron con gran violencia y luego volvieron a su estado habitual de quietud" (Caldcleugh, 1855 en Gardeweg, 2010). IEV: 2.

3. ESTRUCTURA DEL ANÁLISIS DE AMENAZA VOLCÁNICA

3.1. Generalidades

Los volcanes son sistemas geológicos complejos que pueden producir una serie de fenómenos peligrosos durante y después de las erupciones. Estos incluyen corrientes de densidad piroclástica (CDPs), flujos de lava, lahares, avalanchas de detritos, emisión de proyectiles balísticos (PBVs), columnas y caída de cenizas, así como terremotos volcánicos, deslizamientos de tierra, emisiones de gases, inundaciones a través de tsunamis, e incendios. Compleja también es la relación entre los volcanes y los elementos que se encuentran a su alrededor.

Desarrollar una evaluación de amenaza volcánica es un desafío, ya que requiere la consideración e integración de una amplia gama de información, tanto de los peligros volcánicos, como de la diversidad de elementos expuestos a ellos. Las diferentes fuentes de información disponibles para desarrollar un análisis de amenaza son, en consecuencia, diversas, tanto en origen como en los tipos de datos y los métodos en que se genera dicha información.

Un análisis de estas características debe estar construido de manera adecuada y ser comunicado de forma clara, de forma que los resultados sean óptimos para su uso y entendibles para sus usuarios. La información entregada debe ser apta para el entendimiento del usuario general, y en especial para los organismos tomadores de decisiones, quienes son los encargados de minimizar las consecuencias de la ocurrencia de peligros volcánicos.

Es de suma importancia que quienes utilizan los productos de un análisis de amenaza volcánica tengan claro cuál es el objetivo, el significado de los resultados y las limitaciones del análisis, ya que las decisiones que se tomen serán fundamentadas en la información entregada por estos productos.

3.2. Estructura del análisis de amenaza volcánica

3.2.1. Definición del problema

Las erupciones volcánicas son capaces de generar diversos fenómenos potencialmente destructivos, dependiendo de su magnitud, estos fenómenos pueden alcanzar lugares poblados, lo que acarrea graves consecuencias, cobrando vidas humanas, destruyendo bienes materiales y perjudicando las actividades económicas. Estos fenómenos son catalogados como peligros volcánicos. A pesar de esto, los volcanes siempre han sido atractivos para las personas, ya sea porque despiertan interés turístico, por las actividades económicas que se llevan a cabo en torno a ellos, o simplemente por la belleza de sus paisajes que motivan a la gente a vivir en estos territorios. Cualquiera sea el caso, la población alrededor de los volcanes es cada vez mayor, y no parece que esta situación vaya a revertirse en el futuro. El aumento de la presencia humana alrededor de los volcanes conlleva un incremento en la exposición a los peligros volcánicos. Es fundamental contar con métodos que permitan evaluar la amenaza relativa de cada volcán. Es importante llevar a cabo una evaluación de la amenaza volcánica para poder tomar decisiones informadas sobre la planificación territorial, el diseño de infraestructuras y la gestión de emergencias. Si bien, en el pasado se han desarrollado metodologías de este tipo, la mayoría son de gran escala (mundial o nacional). Los principales ejemplos de estas metodologías son NVEWS (Ewert, 2007) y GAR15 (UN ISDR). Es necesario entonces, tomar en cuenta el contexto local, con una escala adecuada para este propósito. La metodología debe ser detallada y precisa, teniendo en consideración las particularidades de cada volcán.

3.2.2. Objetivos y utilización

El objetivo es evaluar la amenaza volcánica tomando como base el método norteamericano NVEWS (Ewert, 2007), que permite obtener un valor de amenaza a través de la combinación de factores de peligro y de exposición. La propuesta de este trabajo es llegar a un valor de amenaza más detallado, haciendo uso de mapas de peligro combinados con mapas de exposición detallados, en lugar de factores de peligro y exposición. De manera específica, la metodología será implementada en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-

Choshuenco. Adicionalmente, se realizará una evaluación de amenaza volcánica en los poblados expuestos a los volcanes mencionados, comparándolos para determinar cuáles son los más amenazados.

Se busca además que esta metodología pueda ser implementada con diferentes tipos de mapas de peligro, por lo que, además de utilizar mapas de peligro integrado pensados para este fin, es llevado a cabo con los mapas oficiales de SERNAGEOMIN, tanto en el análisis de volcanes como de poblados. Dichos mapas requieren una adaptación previa.

La utilidad de implementar esta metodología es conocer las zonas más amenazadas en torno a los volcanes, para contribuir en la toma de decisiones y manejo de futuras crisis volcánicas. Establecer los volcanes que representan una mayor amenaza permite enfocar los esfuerzos y recursos de monitoreo en aquellos macizos. Los insumos generados también son útiles como herramientas para la construcción de planes de emergencia y evacuación adecuados.

Este estudio fue llevado a cabo pensando en la extensión futura a una mayor cantidad de volcanes, en la medida que existan mapas de peligro disponibles. Posteriormente, mediante análisis de vulnerabilidad pertinente, estos resultados se podrían utilizar para una evaluación completa de riesgo.

3.2.3. Peligros volcánicos a considerar

En este trabajo se utilizan los resultados de la evaluación de peligros realizada en trabajos anteriores en cada uno de los 6 volcanes ya señalados para los peligros de CDPs y flujos de lava (Jorquera, 2018); lahares (Álvarez, 2020), caída de tefra y PBVs (Arias, 2020). En el caso de la aplicación de la metodología con los mapas de SERNAGEOMIN, se consideran todos los fenómenos volcánicos que en ellos se representan.

Las CDPs son los peligros volcánicos con mayor potencial destructivo, principalmente por las altas velocidades que pueden alcanzar y su elevada temperatura, además de ser capaces de viajar sobre cuerpos de agua e incluso remontar barreras topográficas. Con estas características, no es

sorpresivo que estos estos flujos sean los causantes de la mayor cantidad de muertes por fenómenos volcánicos (Auker, 2013).

El segundo peligro a considerar en cuanto a potencial destructivo son los lahares, de temperaturas mucho menores que las CDP y con una movilidad que está fuertemente controlada por la topografía, descienden a altas velocidades por los causes de los ríos transportando material en suspensión, acarreando bloques de tamaños métricos. Estos flujos de agua, lodo y material volcánico tienen la fuerza suficiente para ocasionar graves perjuicios e incluso destruir la infraestructura y acabar con la vida de lo que encuentren a su paso. En proporción, han causado menos muertes que las CDPs, pero aun así han sido significativos en lo que se refiere a la pérdida de vidas humanas (Auker, 2013).

La caída de tefra ocurre desde la columna eruptiva ascendente y desde la pluma conforme esta se desplaza a favor del viento. A medida que la nube de tefra se eleva, su densidad disminuye de modo que las partículas más grandes y pesadas caen. Similarmente, mientras la nube de tefra se dispersa a favor del viento, la concentración de partículas disminuye, por lo que el espesor depositado también va en declive. Las áreas que experimentan caída de tefra en una erupción importante pueden ser muy extensas (Blong, 1984).

Los flujos de lava han sido responsables de solo una pequeña fracción de las muertes atribuibles a erupciones volcánicas (Blong, 1984). Las muertes por flujos de lava representan solo el 0,32% del total de fatalidades relacionadas a volcanes, mientras que si se excluyen las 5 catástrofes volcánicas más grandes de la historia este porcentaje aumentan a 0,89% (Auker, 2013), lo que no deja de ser bajo en comparación a los demás fenómenos aquí considerados (CDPs, lahares, etc). Si bien la lava posee elevadas temperaturas, esta suele viajar muy lento, lo suficiente como para que sea posible escapar de ella en la mayoría de las ocasiones. Sin embargo, las infraestructuras que están a su alcance si pueden ser gravemente afectadas por la acción de la lava.

Las bombas volcánicas, los bloques y los lapilli que salen del centro de emisión con trayectorias balísticas se denominan proyectiles. En general, una bomba se expulsa como una masa de magma, con un diámetro mayor a 64 mm. La forma de la bomba depende de factores como la fluidez del

magma, la longitud y velocidad de vuelo, la velocidad de enfriamiento, la velocidad de escape de gas y la deformación en el impacto (Williams y McBirney, 1979 en Blong, 1984).

3.2.4. Escenarios eruptivos y escala de tiempo

Los escenarios eruptivos considerados en esta evaluación de amenaza fueron descritos en los trabajos previos que dieron origen a los mapas de peligros integrados (Jorquera, 2019; Arias, 2020 y Álvarez, 2020). Ellos analizaron cada uno de los volcanes describiendo múltiples escenarios para cada uno de los fenómenos anteriormente mencionados. Fue considerada toda la historia eruptiva de cada volcán, complementando con información de volcanes similares para aquellos cuyos datos disponibles fuesen insuficientes, con el fin de comprender mejor como podría ser su comportamiento futuro.

Acorde a lo indicado por CEPAL (Comisión Económica Para América Latina y el Caribe) e INE (Instituto Nacional de Estadísticas), un tiempo prudente para observar cambios poblacionales significativos es cada 10 años, periodo recomendado por estas instituciones para la realización de censos. Por lo tanto, los resultados de amenaza debiesen ser válidos a lo más por 10 años, pasado ese tiempo, dichos resultados debiesen ser actualizados.

3.2.5. Escala y resolución espacial

El área de estudio, definida en el Capítulo 1, abarca seis estratovolcanes activos, lo cual es bastante extenso. Dado que se está desarrollando una metodología nueva, es necesario aplicarla en múltiples volcanes, para que pueda ser probada y obtener un volumen de resultados suficiente para comparar la amenaza entre los edificios volcánicos evaluados.

En cada volcán se consideró el área de influencia de sus zonas de peligro, las cuales varían según los tipos de mapa. El peligro que mayor extensión alcanza en los mapas utilizados, es la caída de tefra, abarcando hasta alrededor de 55 km desde el cráter en la dirección dominante del viento en los volcanes Llaima y Villarrica. Las CDPs por su parte, alcanzan un radio máximo de aproximadamente 20 km en los escenarios más grandes. Las lavas y lahares están confinados en

los valles, alcanzando largas distancias, pero sin expandirse demasiado lateralmente, los lahares llegan a longitudes de decenas de kilómetros río abajo, por su parte las lavas tienen longitudes más reducidas en general, pero de mayor expansión lateral. Cabe mencionar que, la escala y precisión espacial dependen fuertemente de la incertidumbre inherente a los modelos numéricos, además de la resolución de los *DEM* utilizados en el modelado de peligros, que en este caso corresponde a 12,5 m.

En el caso de los mapas de SERNAGEOMIN, los volcanes Callaqui, Tolhuaca y Lonquimay están incluidos en el Mapa de peligros de los volcanes del Alto Biobío (Naranjo et al., 2000), cuya escala es 1:100.000. El Mapa de peligros del volcán Llaima (Moreno y Naranjo, 2003) y el Mapa de peligros del volcán Villarrica (Moreno, 2000) tienen una escala de 1:75.000. El mapa de peligro del complejo volcánico Mocho-Choshuenco (Moreno y Naranjo, 2006) tiene una escala de 1:50.000.

Las capas de elementos expuestos tienen una escala nacional, por lo que se cuenta con la geolocalización de todos los elementos representados como puntos (infraestructuras críticas y puentes) y como líneas (rutas), pudiendo ser ubicado a nivel de poblado con leves discrepancias, de unos pocos metros, respecto su ubicación en las imágenes satelitales de *Google Earth*. Para delimitar las áreas residenciales se realizó un análisis de las imágenes de Google Earth. Para dicho análisis se utilizó una escala de 1:10.000, y hasta 1:2.500 en las zonas rurales donde la densidad poblacional es muy baja o la imagen satelital no es tan clara. El análisis de áreas residenciales se describe en detalle en el Capítulo 4.

La forma ideal para la presentación de los resultados son mapas de peligro y exposición de alta resolución de escala 1:100.000, donde es posible observar el contexto general, es decir, las zonas de peligro de cada volcán por completo y la distribución de los elementos expuestos en torno a ellos y al mismo tiempo, dicha escala permite observar con en detalle la situación de sectores de interés, tales como los poblados o cualquier otra zona donde existan elementos estratégicos expuestos al peligro volcánico.

3.2.6. Elementos vulnerables

Los elementos vulnerables considerados se detallan en el Capítulo 4. Se consideraron personas, viviendas, centros de salud, colegios, rutas y caminos, puentes, cuerpos de bomberos, cuarteles policiales y centrales hidroeléctricas. La información requerida fue obtenida en formato SIG del Censo de Población y Vivienda 2017, del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y de Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE) del Ministerio de Bienes Nacionales.

En cuanto a los elementos expuestos, el análisis es válido siempre que no haya una variación significativa en la población y/o la infraestructura revisada. Dichos elementos pueden ser actualizados e integrados al análisis siempre que haya nuevos datos disponibles (por ejemplo, un nuevo censo de población y vivienda).

3.2.7. Metodología

Los análisis y procesos se realizaron con el software de código abierto *QGIS* 3.14.

Este trabajo puede ser dividido en las siguientes etapas:

1. Compilación de insumos de peligro volcánico de cada centro volcánico analizado y elementos potencialmente expuestos para construir la base de datos espaciales (BDE).

2. Preprocesamiento de datos: En esta etapa se hacen todos los ajustes necesarios para utilizar los datos colectados. Se les otorga un valor numérico a los elementos expuestos. Se construye una tabla en la que los elementos expuestos son categorizados y ponderados por un factor de exposición. En el caso de los mapas de peligro de SERNAGEOMIN, estos son adaptados para cuantificar el peligro en ellos representado y hacerlos comparables entre mapas de diferentes volcanes.

3. Intersección de capas de peligro y exposición: Una vez ubicados los elementos expuestos, se realiza una intersección entre la capa de peligro y las diferentes capas de exposición.

Esto da como resultado nuevas capas que contienen la información necesaria para calcular la amenaza volcánica.

4. Cálculo de la amenaza volcánica: Esto es, multiplicar el valor de exposición de cada elemento (polígono, punto o línea) por el valor de peligro de la zona donde está ubicado. En este punto, cada elemento expuesto tiene asociado un valor de amenaza. Luego, se suman los valores de amenaza de los elementos expuestos y se obtienen valores para amenaza a personas y amenaza a infraestructura. Finalmente, ambos valores son sumados según la regla euclidiana. Para cada volcán y poblado se obtendrá un valor de amenaza absoluta y amenaza normalizada. Los pasos metodológicos detallados son descritos en el Capítulo 5 de este trabajo.

Lo anterior se realiza con cada uno de los volcanes y poblados, para luego comparar y ordenarlos de mayor a menor amenaza.

3.2.8. Formato de los resultados

Los resultados de este trabajo serán expuestos por medio de mapas de peligro volcánico y exposición detallada, en conjunto a tablas y gráficos con los valores de exposición y amenaza calculados. Los mapas facilitan visualizar la distribución del peligro y la relación de estas zonas con los elementos expuestos, lo que determina la amenaza en torno a los seis macizos estudiados.

Las tablas y gráficos de exposición y amenaza sirven para ver y comparar directamente los resultados (Capítulo 6) de los análisis realizados. De este modo, se logra identificar y comparar, entre otros, la amenaza impartida por cada volcán, los poblados más amenazados, la exposición de los elementos según su tipo, etc.

3.2.9. Limitaciones e incertidumbres

En primer lugar, esta evaluación está sujeta a la incertidumbre propia del modelado numérico de cada peligro. Esto último debido a que los modelos numéricos se basan en cálculos probabilísticos

y/o analíticos según parámetros volcanológicos, los que tienen mucha incertidumbre debido a las limitaciones en las metodologías de estimación (Bonadonna y Hougton, 2005) y a que pueden ser muy distintos de una erupción a otra (Scollo *et al.*, 2008).

Una de las limitaciones fue la falta de datos para elementos de exposición importantes para la base de datos, tales como redes de transmisión de agua y electricidad. La limitante principal es la falta de información sobre población flotante y las fluctuaciones de ésta en las temporadas estivales, considerando que los volcanes son importantes núcleos turísticos para algunas comunas.

3.2.10. Indicaciones y ejemplos para la utilización de resultados

La utilidad primordial de este trabajo es proporcionar una guía para priorizar los recursos y los esfuerzos de monitoreo volcánico. Conocer los volcanes de mayor amenaza es de suma importancia para prevenir posibles catástrofes, en función de aumentar la vigilancia y aumentar el conocimiento disponible sobre estos macizos y su relación con los poblados circundantes.

Los mapas elaborados pueden ser utilizados para identificar zonas de alta amenaza, es decir, zonas en las que algún peligro potencialmente destructivo afecta una gran cantidad de personas y/o infraestructura. Contar con información de este tipo puede ser de utilidad en la elaboración planes de emergencia y prepararse para una eventual crisis volcánica.

Los resultados del análisis de poblados permiten visualizar y comparar que tan crítica es la situación de cada uno en relación a los macizos que tienen más próximos. Estos resultados pueden ser utilizados de manera complementaria a la información que entrega el monitoreo volcánico, de modo de anticipar las consecuencias una posible erupción y decidir, por ejemplo, si es necesaria una evacuación temporal, y a su vez decidir cuáles son las zonas prioritarias.

4. BASE DE DATOS ESPACIAL

Antes de establecer los pasos metodológicos de la evaluación de amenaza, se recopilaron todos los datos necesarios para llevarla a cabo. Se creó una Base de Datos Espacial (en adelante BDE), organizada en base a 2 ejes principales: mapas de peligro y posibles elementos expuestos. Se incluyen además los datos de topografía y mapas base.

Luego de recopilar los datos, estos son revisados, ordenados y corregidos, en caso de ser necesario. En esta etapa se consideran todos los procesos previos a la puesta en marcha de la evaluación de amenaza. La creación y preparación de la BDE es uno de los pasos más importantes de este trabajo, pues constituye el pilar fundamental sobre el cual se realizarán todos los procesos siguientes.

4.1. Estructura de la base de datos

A continuación, se describe la organización estructural de la BDE y las subdivisiones de sus dos grupos principales: peligro y exposición. La mayoría de los datos son capas vectoriales (*shapefiles*) y en menor medida, archivos *raster.*

4.1.1. Datos espaciales de peligro volcánico

Aquí se almacenan los datos vectoriales de los 6 volcanes estudiados. Se utilizaron dos tipos de mapa: (1) mapas de peligros volcánicos integrados, (2) mapas de peligro volcánico de SERNAGEOMIN.

En el caso de los mapas de peligro integrado, para cada volcán existe una serie de *shapefiles* poligonales. Cada uno representa una zona que podría ser afectada por un peligro volcánico en un escenario eruptivo determinado. La integración de estas zonas forma el mapa de peligro integrado de cada volcán (ver detalle en Subcapítulo 4.2.1.)

Los mapas de SERNAGEOMIN fueron obtenidos en formato PDF y fueron utilizados como base para trazar los contornos de sus zonas de peligro, las cuales fueron almacenadas como *shapefiles* poligonales. Por lo tanto, cada mapa tiene un equivalente en formato vectorial.

4.1.2. Datos espaciales de elementos expuestos

Esta sección se compone de información referente a diferentes ámbitos temáticos de índole territorial; entidades y manzanas censales, distribución topográfica, exposición de infraestructuras críticas, por ejemplo: establecimientos educacionales, centros de salud, bomberos y otros establecimientos importantes, etc.

La forma en que los datos son representados, determina sus características operacionales y el procesamiento requerido para su uso. De manera similar a Gehl (2013), los activos que forman este inventario han sido clasificados en tres categorías (Figura 4.1.):

- Áreas residenciales: representan zonas de edificios residenciales, todo tipo de viviendas. Estos datos se representan como polígonos (entidades censales) formados a partir de cuadrados de 100 x 100 m, cuyos centros están separados cada 70 m, por lo que cada cuadrado tiene un traslape de 30 m con el cuadrado adyacente, tanto en el eje vertical como en el horizontal. Estos polígonos contienen la información sobre el número de viviendas y cantidad de habitantes (para personas), entre otros datos cualitativos.

- Redes: incluyen todo tipo de redes de salvamento (por ejemplo, energía eléctrica, suministro de agua o gas), pero dada la disponibilidad de información, en este caso, este apartado se refiere a redes de transporte terrestre. Cada red está representada por un conjunto de polilíneas.

- Instalaciones críticas: estos componentes en forma de puntos representan edificios estratégicos como establecimientos de atención médica, centros de decisión, departamentos de aplicación de la ley, etc. Estas importantes estructuras son tratadas como objetos individuales, a diferencia de los edificios residenciales normales, y sus

atributos incluyen la puntuación otorgada a cada elemento, en función de su importancia relativa (ver detalle en Subcapítulo 4.5.).

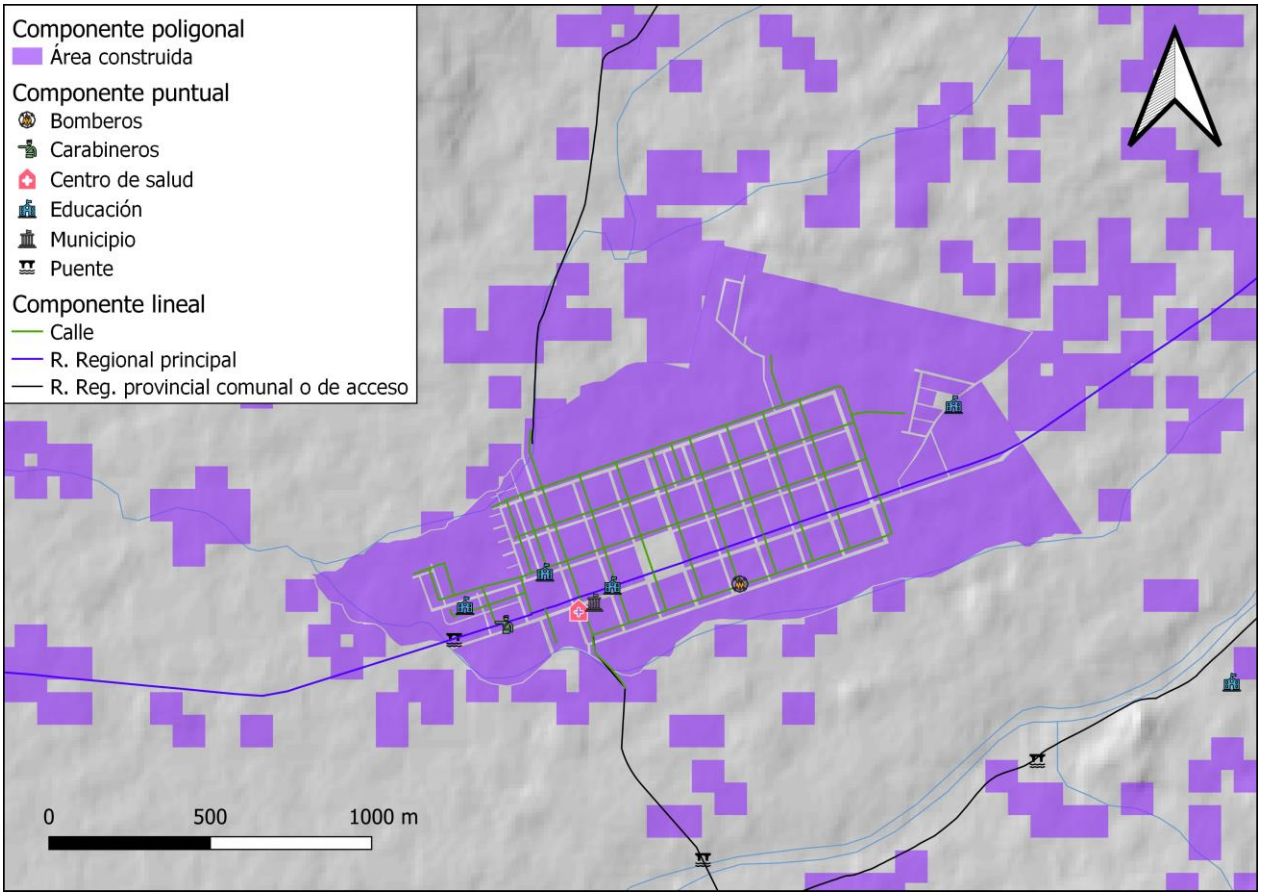


Figura 4.1: **Tipos de elementos expuestos**. Las áreas construidas se representan como polígonos, donde los polígonos más pequeños son cuadrados de 100 m². Las infraestructuras críticas son representadas con símbolos (puntos) y las redes de transporte como polilíneas.

4.2. Mapas de peligro volcánico

Para poder llegar a valores de amenaza a partir de la relación entre los mapas de peligro y exposición, primero, ambas componentes deben ser cuantificadas. Los mapas de peligro integrado cumplen con esta condición (Figura 4.2.), ya que cada una de las zonas y colores en ellos representadas están relacionadas a un valor numérico de peligro. En el caso de los mapas de peligro de SERNAGEOMIN, esto no se cumple. Además, en estos últimos, los criterios que determinan la peligrosidad de una zona varían de un volcán a otro, por lo tanto, no son comparables entre sí.

Teniendo en consideración estas limitaciones, debieron ser adaptados, otorgándoles valores numéricos a las zonas de peligro y así posibilitar su uso en esta evaluación de amenaza.

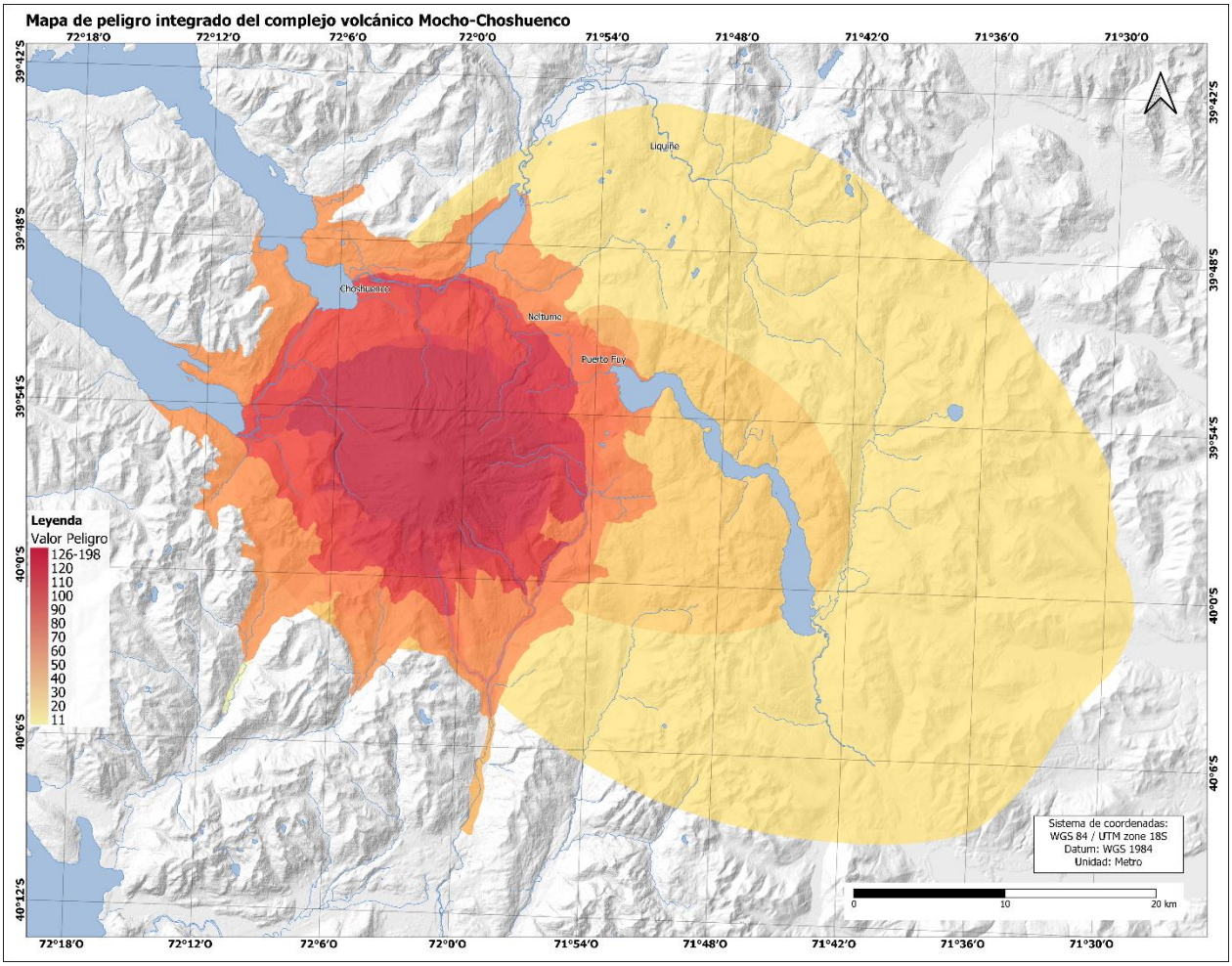


Figura 4.2. **Ejemplo de zonificación de peligro volcánico en mapas de peligro integrado.** Cada zona tiene un color relativo a su puntaje de peligro según la Tabla 4.1. Modificado de Arias (2020).

4.2.1. Mapas de peligro volcánico integrado

Los mapas de peligro integrado fueron construidos bajo una metodología uniforme que integra los análisis de peligros volcánicos mediante la asignación de puntajes a diferentes categorías para cada zona de peligro previamente determinada (Tabla 4.1.). Las categorías en las cuáles se basa esta metodología son: recurrencia de los peligros en las zonas determinadas, alcance de los peligros expresados en términos de su velocidad y dificultad que puede tener una persona para evadir el

peligro y el potencial de impacto que tiene cada peligro cuando éste alcanza poblados e infraestructura (Jorquera, 2018).

Tabla 4.1. **Evaluación e integración de zonas de peligro volcánico.** Cada zona definida en cada peligro volcánico es evaluada según los factores considerados en esta tabla (Jorquera, 2018).

Ítem	**Valores Posibles**
Recurrencia conocida	
En últimos 500 años	0= No 1= Poco probable 2= Incierto 3= Probable 4= Cierto
En últimos 2500 años	
En el Holoceno	
Nivel de ocurrencia (últimos 500 años)	0= No se ha reconocido 1= Se ha reconocido 2= Es frecuente
Total Recurrencia (suma de los ítems)	0-14
Alcance zonal	
Velocidad (tiempo de llegada a zona distal)	1= días 2= hrs-días 3= min-hrs 4= seg-min
Dificultad de protección	0= Fácil escapar 1= Con condiciones 2= Muy difícil
Total Alcance (promedio entre ambos ítems)	0-3
Potencial de impacto directo	
Daño a la salud	1= Leve 2= Severo 3= Absoluto
Interrumpe vía de evacuación	
Daño a infraestructura o servicios	
Total Impacto (promedio entre los tres ítems)	1-3
TOTAL PELIGRO (Recurrencia conocida*Alcance zonal*Potencial de impacto directo)	0-126

En estos mapas, las zonas de peligro fueron superpuestas y traslapadas con el objetivo de destacar las áreas donde confluyen múltiples fenómenos espacialmente, conduciendo a un aumento del peligro en estas zonas.

Lo anterior fue aplicado a cada volcán, en donde a la zona de mayor puntaje involucrada en el traslape se suman las demás ponderadas por un factor, de forma tal que se mantenga la predominancia del peligro principal (o de mayor puntaje) por sobre el resto. El factor utilizado fue 0,1, debido a que de esta manera no se altera tanto la distribución de peligro inicial (Jorquera, 2018).

El resultado de este proceso, fue la generación de mapas de peligro integrado, en los que se utiliza una rampa de tonos amarillos a rojizos como escala de color normalizada (Figura 4.2.). La escala de 0 a 126, estándar para todos los volcanes, fue dividida en tres categorías considerando los siguientes valores de quiebre:

• 0-40: bajo peligro.
• 41-80: medio peligro.
• 81-126: alto peligro.

Las áreas donde el puntaje fuese mayor a 126, valor máximo que una zona puede alcanzar por sí misma (Tabla 4.1.), se catalogaron como zonas de "muy alto peligro", marcadas por un color rojizo oscuro. Cabe destacar que el valor de peligro más alto fue 220, alcanzado por el volcán Llaima.
Como resultado final de la integración de peligros volcánicos se generaron mapas para cada volcán, en los que se expone la distribución del peligro combinado como resultado del traslape de las zonas descritas para caída de tefra, piroclastos balísticos, CDPs, lavas y lahares.

4.2.2 Mapas de peligro volcánico de SERNAGEOMIN

En virtud de satisfacer el objetivo de implementar la metodología aquí desarrollada utilizando diferentes tipos de mapas, se usaron los mapas de peligro volcánico oficiales de SERNAGEOMIN.

Acorde a la definición del sitio web de SERNAGEOMIN, un mapa de peligro o amenaza identifica áreas expuestas al efecto directo e indirecto de posibles erupciones volcánicas, a través de diferentes formas y escalas de representación, que distinguen cada uno de los procesos posibles durante una erupción, y proponen una zonificación más simple e integrada (https://www.sernageomin.cl/mapas-de-amenaza-o-peligro-volcanico/, 2023).

Se tomaron los mapas correspondientes a los 6 volcanes estudiados, para luego comparar y discutir los resultados obtenidos con ambos tipos de mapa (capítulos 6 y 7), estos son: Mapa de peligros de los volcanes del Alto Biobío (que incluye a los volcanes Callaqui, Lonquimay y Tolhuaca, además del volcán Copahue) (Naranjo et al., 2000), Mapa de peligros del volcán Llaima (Moreno y

Naranjo, 2003), Mapa de peligros del volcán Villarrica (Moreno, 2000) y Mapa de peligros del complejo volcánico Mocho-Choshuenco (Moreno y Naranjo, 2006). Estos mapas están principalmente basados en la geología, donde la zonificación de los peligros está delimitada mediante el mapeo de los depósitos dejados por eventos eruptivos ocurridos en el pasado.

4.2.2.1. Zonas de peligro en mapas de SERNAGEOMIN

En los mapas oficiales de SERNAGEOMIN, los peligros se representan en zonas agrupadas de la siguiente forma: áreas que pueden ser afectadas por lavas y/o lahares, áreas que pueden ser afectadas por flujos piroclásticos y áreas que pueden ser afectadas por caída de piroclastos.

A continuación, se expone un breve análisis de las zonas de peligro presentes en los mapas de SERNAGEOMIN.

Las coladas de lava y lahares son representadas como áreas coloreadas en tonos amarillos, naranja, rosa y rojo, que denotan “bajo”, “moderado”, “alto” y “muy alto peligro”, respectivamente. Cabe mencionar que ambos fenómenos comparten la misma área de afectación, a excepción de aquellas áreas donde se especifica que podrían ser afectadas solo por lahares. Son las áreas que más destacan en el mapa (Figura 4.3.). Los criterios que determinan el nivel de peligro de cada área, si bien son similares, varían en cada volcán, en especial los rangos de tiempo considerados para evaluar las zonas de “muy alto” y “alto peligro”. En general, estas zonas refieren la actividad más reciente del volcán a la fecha, con mayor detalle en aquellos macizos con un registro eruptivo más nutrido. Las zonas de “bajo” y “moderado peligro” están asociadas a “erupciones de gran magnitud” que pudiesen ocurrir en el futuro, o “de mayor magnitud que las ocurridas en tiempo histórico”. Algunas zonas, especialmente las de “bajo” y “moderado” peligro, están relacionadas a erupciones que ocurran durante la época de mayor acumulación de nieve (Figura 4.4.).

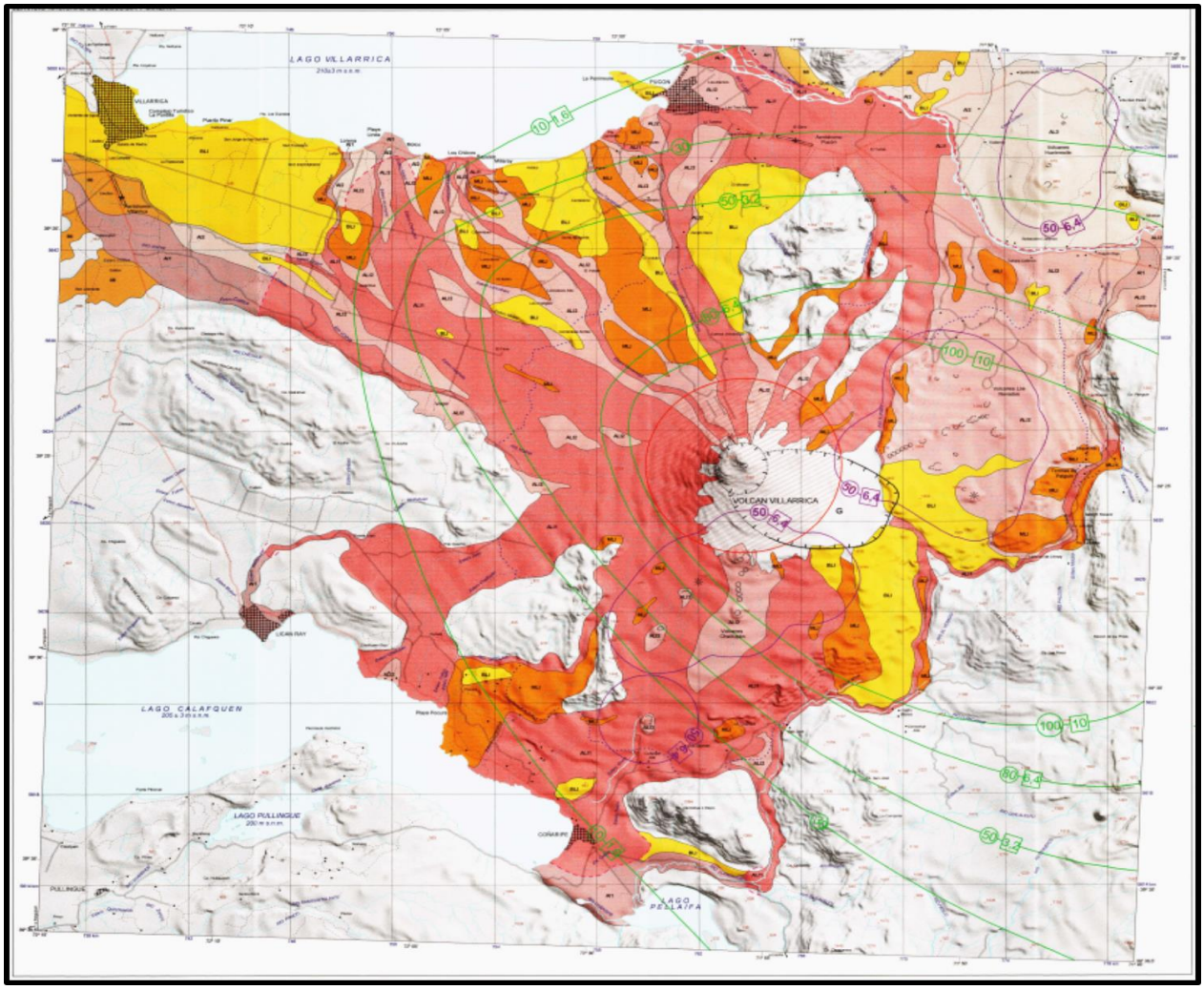


Figura 4.3. **Ejemplo de zonificación de peligro volcánico en mapas de SERNAGEOMIN.** Las áreas coloreadas de amarillo, naranja, rosa y rojo representan zonas de bajo, moderado, alto y muy alto peligro, respectivamente, de lavas y/o lahares. Las áreas de caída de piroclastos balísticos y posibles flujos piroclásticos se representan con una zona achurada con líneas rojas. Las áreas de caída de ceniza están delimitadas con líneas verdes. Tomado de Mapa de peligros del volcán Villarrica (Moreno, 2000).

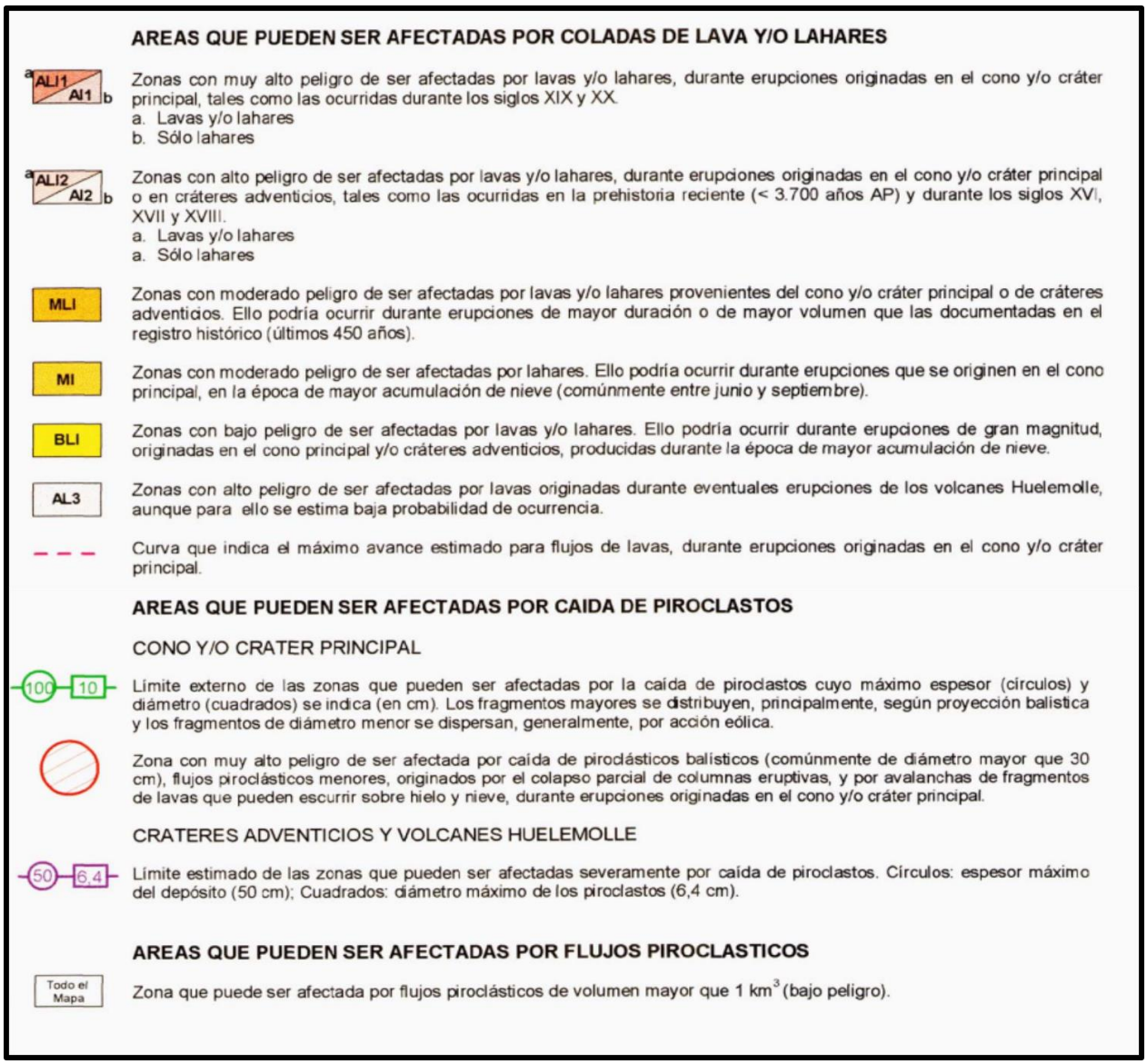


Figura 4.4. **Descripción de zonas de peligro de peligro del volcán Villarrica (Figura 4.3.).** Tomado de Mapa de peligros del volcán Villarrica (Moreno, 2000).

Los flujos piroclásticos son representados de diferentes maneras. En el mapa de Alto Biobío, dependiendo del volumen del flujo y el volcán que lo produzca, se muestran con 2 diferentes achurados de líneas negras finas, uno para el volcán Callaqui (moderado a bajo peligro) y otro para el Lonquimay (alto a moderado peligro), y 4 zonas delimitadas por líneas segmentadas de colores rosa (peligro "muy bajo" en los volcanes Callaqui y Copahue), magenta (peligro "remoto", volcán Tolhuaca), azul (peligro "muy bajo", volcán Lonquimay) y rojo (peligro "muy remoto", volcán Tolhuaca). En el mapa del complejo volcánico Mocho-Choshuenco se expresa como un área delimitada por una línea negra, rellena de puntos rojos, representando "alto peligro", además, al

igual que en los mapas de los volcanes Llaima y Villarrica, se indica que toda el área del mapa podría ser afectada por flujos piroclásticos.

Las zonas de caída de tefra son representadas en el mapa de Alto Biobío y el mapa del volcán Villarrica por isolíneas de color verde que indican al mismo tiempo el diámetro de partícula máximo (mm), y el espesor máximo que podría acumularse (cm). En el volcán Llaima esta información se encuentra separada, las isópacas se marcan con líneas rojas, mientras que líneas verdes indican el tamaño máximo de las partículas (mm) que podrían caer dentro de cada zona. En el mapa del complejo Mocho-Choshuenco se muestra una zona que podría ser afectada por caída de piroclastos en erupciones de "muy alta" explosividad, representada con una línea segmentada de color negro. En ningún volcán les fue otorgado un nivel de peligro. Además, en los volcanes Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco, la caída de tefra asociada a centros eruptivos adventicios se representa con isolíneas de color púrpura (Llaima y Villarrica) y negro (Mocho-Choshuenco), indicando el diámetro de partícula y espesor máximo del depósito.

Dentro de caída de piroclastos se cuentan los piroclastos balísticos. En el mapa de Alto Biobío no se le otorga un nivel de peligro y su zona de afectación es delimitada por una línea roja. En los volcanes Llaima y Villarica es una zona de muy alto peligro delimitada por una línea roja cuya área interna está cubierta por un achurado fino del mismo color; adicionalmente, se señala la ocurrencia de flujos piroclásticos menores dentro de esta zona. En el mapa de Mocho-Choshuenco, una circunferencia de 14 km de diámetro de línea punteada color negro marca el límite exterior del área con "muy alto" peligro de ser afectada por caída de piroclastos balísticos.

4.2.2.2. Digitalización y homogenización de mapas

Antes de poder realizar la evaluación de amenaza haciendo uso de los MPS, fue necesario crear *shapefiles* de las zonas de peligro. Estos fueron construidos replicando la forma de las zonas delimitadas en los mapas, para posteriormente otorgarle los atributos necesarios para realizar cálculos mediante álgebra de mapas. Se realizaron además ciertas modificaciones en la representación de los mapas, de manera que todas las zonas de peligro tengan un color. A las zonas con el mismo nivel de peligro, independientemente del fenómeno que representen, les fue asignado

el mismo color. Las zonas de muy alto peligro quedan de color rojo oscuro; las de alto peligro, de color rojo; moderado peligro es representado con un color naranja, bajo peligro, de color amarillo y finalmente, muy bajo peligro es representado con un color amarillo pálido. De esta manera se busca una representación más homogénea de la distribución del peligro en el entorno del volcán (Figura 4.5.).

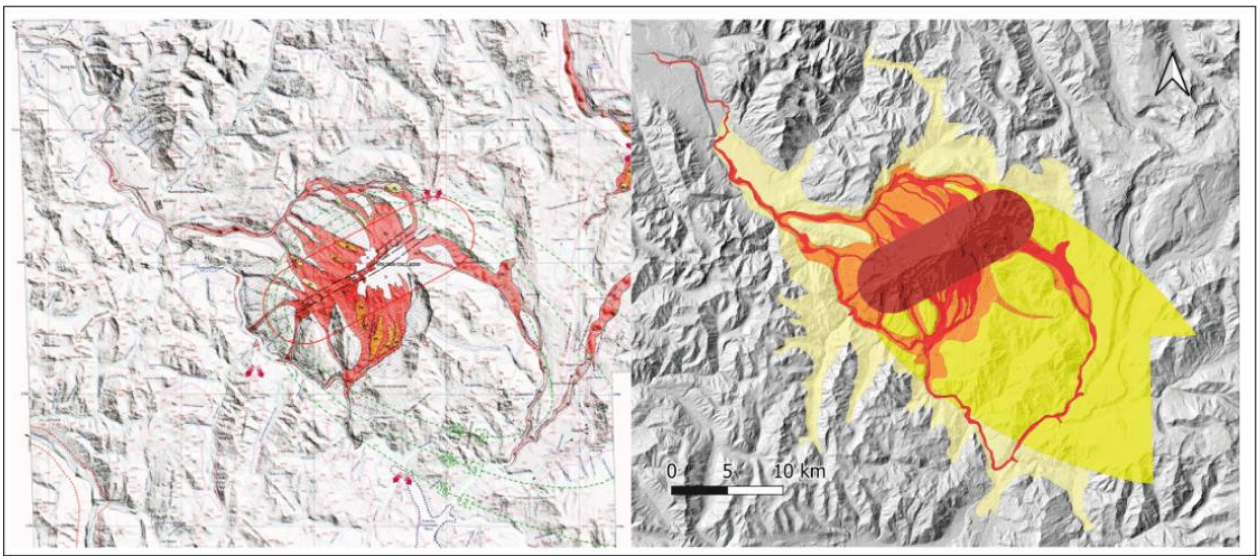


Figura 4.5. **Comparación entre un mapa de peligro de SERNAGEOMIN y la adaptación hecha para esta metodología.** A la derecha, mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Callaqui, extraído del mapa de peligro volcánico de Alto Biobío. A la izquierda, la adaptación de las zonas del mapa de peligro del volcán Callaqui para esta metodología.

4.2.2.3. Cuantificación de las zonas de peligro

En esta sección se describe la metodología propuesta para darle valores cuantificar los niveles de peligro de los mapas de SERNAGEOMIN. Luego de homogenizar los mapas, le fue otorgado un valor numérico a cada uno de los 5 niveles de peligro relativo. Dichos valores están basados en la clasificación de las zonas de los mapas integrados (Jorquera, 2018), calculando el valor medio de cada tramo y redondeando al múltiplo de 10 más cercano (Tabla 4.2.). A pesar de las diferencias que existen entre ambos tipos de mapa de peligro, tanto en su construcción, como en los criterios que definen la peligrosidad de cada zona, se implementó esta forma de cuantificar el peligro en conciencia de las limitaciones que esto conlleva; este tema será revisado en profundidad en el Capítulo 7.

Tabla 4.2. **Puntajes asignados a cada zona de mapas de peligro de SERNAGEOMIN (MPS).** Se indica el valor medio redondeado en base a las divisiones hechas para clasificar el peligro de los mapas de peligro integrado (MPI). *La zona de muy bajo peligro está presente sólo en los volcanes Callaqui y Lonquimay, en este caso se le asignó la mitad del valor de la zona de bajo peligro.

Peligro relativo MPS		Tramos de peligro MPI	Valor medio redondeado
Muy Alto		126-220	170
Alto		80-126	100
Moderado		40-80	60
Bajo	Bajo	0-40	20
	Muy Bajo*		10*

La zona de muy bajo peligro no está originalmente contemplada en los mapas de peligro integrado, ya que, en ellos, los valores de peligro más bajos están contenidos dentro de la zona de bajo peligro. En los MPS, esta zona de peligro está presente sólo en 2 de los 6 volcanes, en específico, es una zona de muy bajo peligro de ser afectada por flujos piroclásticos en el volcán Callaqui y el Lonquimay. Para otorgar un puntaje, en este caso se optó por asignarle la mitad del valor correspondiente a la zona de bajo peligro (Tabla 4.2.).

4.2.2.4. Factor de peligro

En los mapas de peligro de SERNAGEOMIN es posible distinguir qué zona es más o menos peligrosa que otra dentro de un mismo volcán, pero difícilmente permiten comparar entre volcanes distintos. Por ejemplo, una zona de alto peligro del volcán Villarrica no puede tener el mismo valor que una zona de alto peligro del volcán Callaqui, considerando que el Villarrica hace erupción de forma más recurrente que el Callaqui. Para sortear este obstáculo y lograr hacer que los mapas sean, de algún modo, comparables, se integró un factor de peligro. El factor de peligro fue tomado del Ranking de Riesgo Específico de SERNAGEOMIN del año 2019 y en particular, corresponde al Total de Factores de Peligro de cada volcán. Los valores de las zonas de peligro de la Tabla 4.2. fueron multiplicados por el factor de peligro correspondiente, lo cual se expone en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. **Factores de peligro de cada volcán y valores finales de las zonas de peligro para mapas de peligro de SERNGEOMIN adaptados.**

Volcán	Nivel de peligro	Valor de peligro sin ponderar	Factor de peligro	Valor de peligro final
Callaqui	Muy Alto	170	16	2720
	Alto	100		1600
	Moderado	60		960
	Bajo	20		320
	Muy Bajo	10		160
Tolhuaca	Muy Alto	170	8	1360
	Alto	100		800
	Moderado	60		480
	Bajo	20		160
Lonquimay	Muy Alto	170	16	2720
	Alto	100		1600
	Moderado	60		960
	Bajo	20		320
	Muy Bajo	10		160
Llaima	Muy Alto	170	22	3740
	Alto	100		2200
	Moderado	60		1320
	Bajo	20		440
Villarrica	Muy Alto	170	23	3910
	Alto	100		2300
	Moderado	60		1380
	Bajo	20		460
Mocho-Choshuenco	Muy Alto	170	19	3230
	Alto	100		1900
	Moderado	60		1140
	Bajo	20		380

4.3. Elementos expuestos

Cualquier análisis de riesgo (o en este caso, amenaza) debe contar con un inventario de personas expuestas o elementos del entorno construido y natural sobre el territorio seleccionado (Gehl, 2013). Conforme a esto, una parte importante de la BDE está compuesta de información referente a la distribución de la población urbana y rural, ubicación de las infraestructuras (por ejemplo: establecimientos educacionales, centros de salud, bomberos y otra infraestructura crítica) y las principales vías de transporte terrestre. Se construyeron diferentes mapas digitales de exposición para cada tipo de elemento estudiado.

La finalidad de este componente es recopilar y homogeneizar toda la información espacial relativa al área de estudio que pueda vincularse al objetivo principal de esta memoria, generando las bases de una herramienta que permita desplegar, analizar, consultar y actualizar los diferentes conjuntos de datos territoriales presentados.

4.3.1. Población y vivienda (Censo)

El censo de población y vivienda 2017 (INE) provee información desagregada en diferentes unidades territoriales, la más específica de ellas (y la utilizada como insumo para este trabajo) es la entidad censal. Las entidades censales están representadas por polígonos vectoriales (*shapefiles*) y se clasifican en rurales y urbanas (Figura 4.6.). En su tabla de atributos se pueden encontrar diversos datos de interés, entre ellos, la cantidad de personas y viviendas que se encuentran dentro de cada entidad.

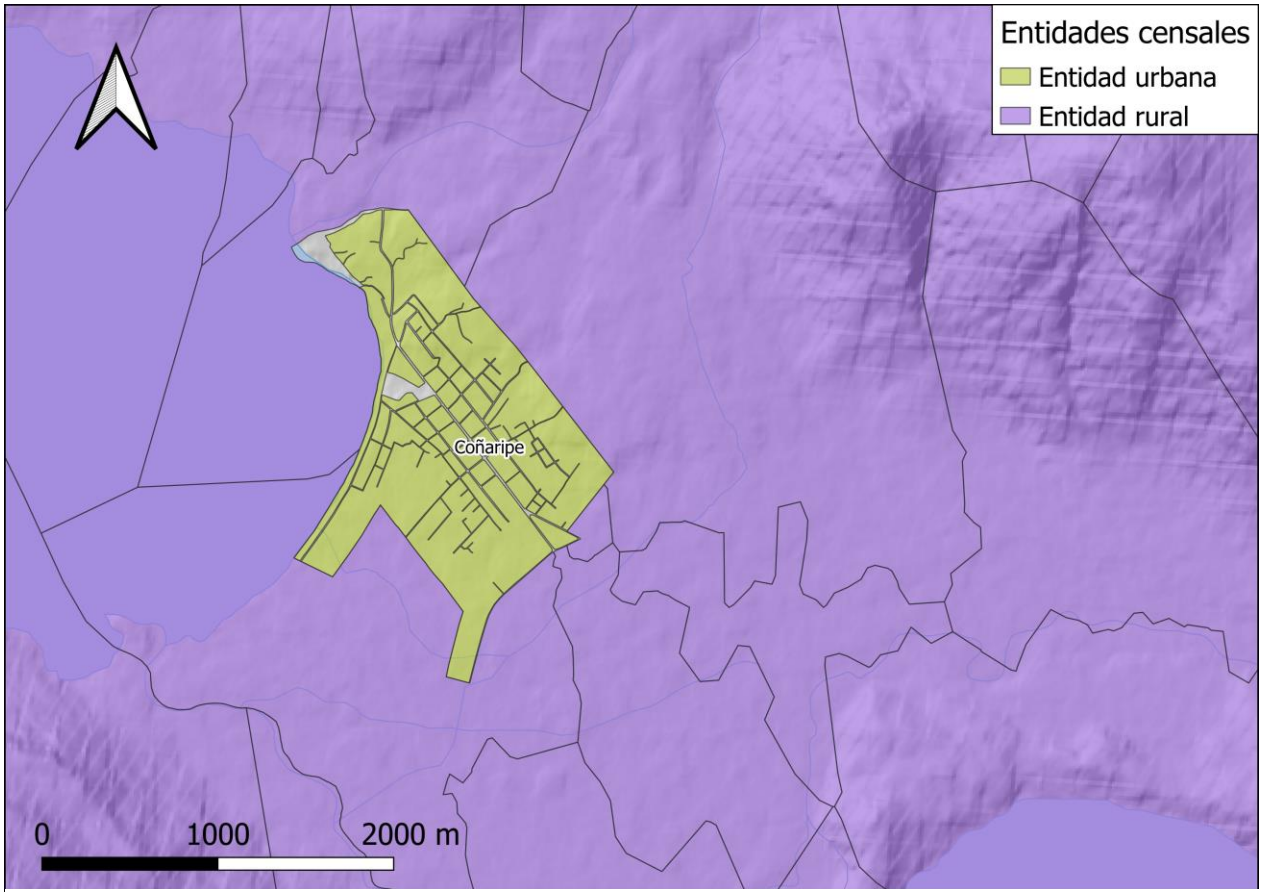


Figura 4.6. **Ejemplo de entidades censales.** Entidades rurales en color morado poseen áreas más grandes que las entidades urbanas (color verde).

Área urbana: se entiende como entidad urbana un asentamiento humano con continuidad y concentración de construcciones en un amanzanamiento regular con población mayor a 2.000 habitantes, o entre 1.001 y 2.000 habitantes, donde menos del 50% de la población que declara haber trabajado se dedica a actividades primarias. Las entidades que no cumplen con alguno de los criterios descritos son definidas como rurales.

Área rural: se entiende como entidad rural un asentamiento humano con población menor o igual a 1.000 habitantes, o entre 1.001 y 2.000 habitantes donde más del 50% de la población que declara haber trabajado se dedica a actividades primarias. Además, se define como rural a un conjunto menor de entidades que reúnen los criterios de población para ser definidas como urbanas, pero no los requisitos de amanzanamiento, continuidad o concentración de construcciones.

4.3.2. Distribución real de la población

En este trabajo se considera que el número de personas y viviendas de cada entidad se distribuye de manera uniforme dentro de cada una. Las entidades urbanas poseen mayor cantidad de habitantes que las entidades rurales y al mismo tiempo, áreas más acotadas, que se ajustan a los límites físicos del poblado que representan. Se consideró que las entidades urbanas son los suficientemente precisas y representan bien la distribución de la población en ellas contenida. Al contrario, las entidades rurales cubren superficies más extensas y no representan la ubicación de las personas y/o viviendas dentro de ellas. Para reducir la incertidumbre en la distribución de la población en las entidades rurales, la información del censo fue complementada con un análisis de distribución de construcciones, cuyo objetivo es acotar el área de cada entidad expuesta, para trabajar con las zonas donde realmente está asentada la población permanente y sus hogares. A estas zonas se les llamó Entidad Censal Modificada (en adelante, ECM) y corresponden a sub-áreas, donde se excluye aquellos sectores en los que no hay ningún tipo de construcción, y, por lo tanto, la exposición se supone nula. La identificación de las construcciones se realizó mediante la observación de imágenes satelitales de *Google Earth* (Figura 4.7.).

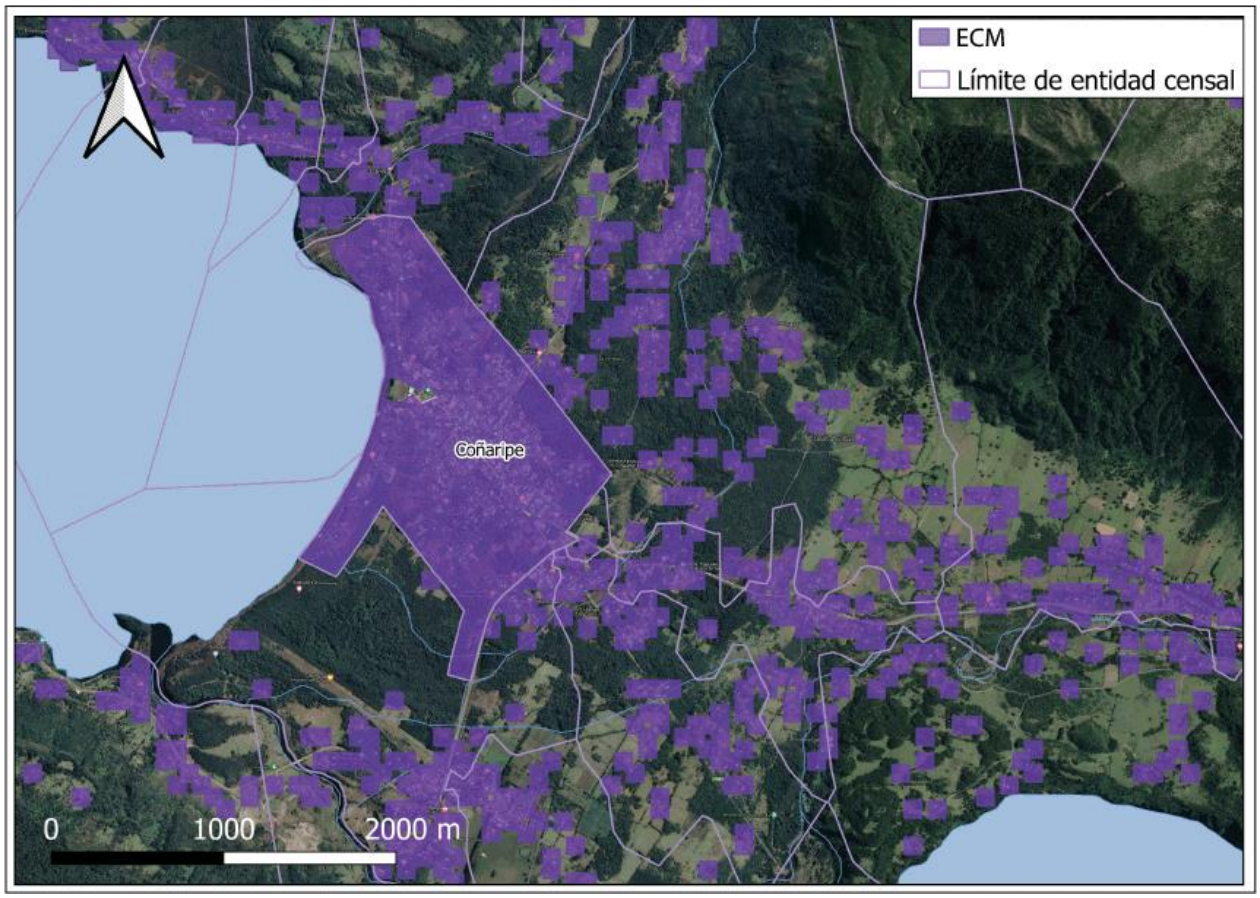


Figura 4.7. **Distribución real de la población dentro de las entidades censales.** Las ECM representan dónde está asentada la población dentro de cada entidad censal rural, lo que permite un análisis de exposición de alto detalle.

4.3.2.1. Análisis de distribución de construcciones

A continuación, se describen los pasos metodológicos seguidos durante el análisis de distribución de construcciones, donde fueron identificadas y marcadas las sub-áreas residenciales que luego darían origen a las ECM. Las imágenes satelitales empleadas para este fin fueron obtenidas de *Google Earth*. Este procedimiento fue realizado solo con las entidades rurales, ya que las entidades urbanas están bien acotadas al área donde se ubica la población.

En primer lugar, se determinó cuáles entidades censales están expuestas al peligro volcánico, superponiendo ambos mapas de peligro con la capa de entidades rurales (Figura 4.8.). En este paso se define la extensión mínima de territorio que debe ser analizada. Es importante analizar la

superficie total de cada entidad involucrada. Posteriormente y de forma complementaria, se agregan algunas entidades adicionales (no expuestas), que se encuentran cerca de los bordes de las zonas de peligro o adyacentes a las entidades expuestas.

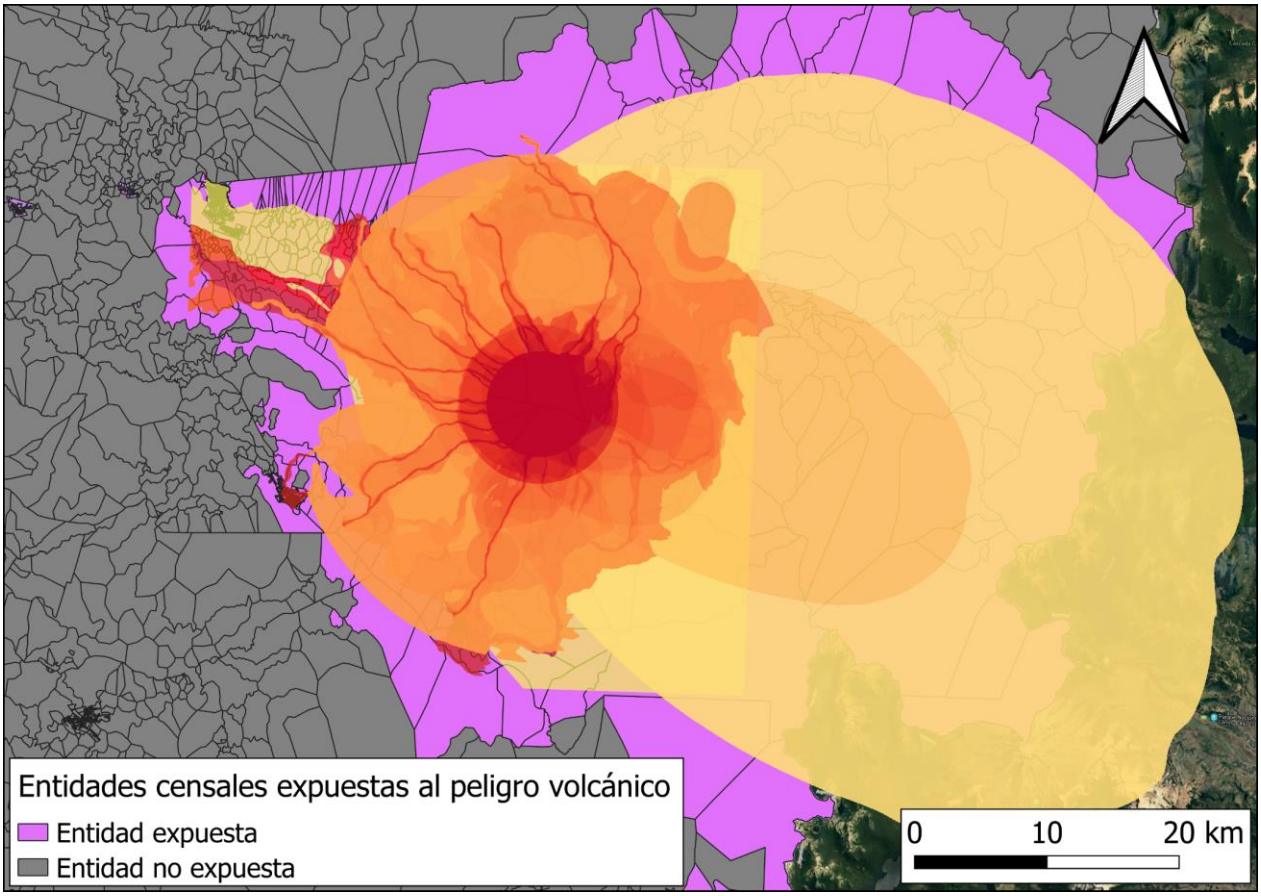


Figura 4.8. **Selección de las entidades expuestas al peligro volcánico según los mapas integrados y los mapas de SERNAGEOMIN.** Todas las entidades censales coincidentes con alguna zona de peligro deben ser preprocesadas. Elaboración propia.

Luego de definir las entidades que deben ser preprocesadas, el área de interés fue cubierta con una cuadrícula de puntos, donde se seleccionaron los puntos más próximos a las construcciones reconocibles desde la imagen satelital (Figura 4.9.). Los puntos de la cuadrícula están separados cada 70 metros. Esta distancia permite evaluar la infraestructura presente dentro de círculos de 50 m de radio centrados en cada punto, con traslape horizontal y vertical, pero sin traslape diagonal (Figura 4.10.). Las condiciones que se deben cumplir para que un punto sea seleccionado son las siguientes:

- Debe haber una o más construcciones dentro de un radio de 50 metros. Este radio fue delimitado con la ayuda de una capa auxiliar, generada exclusivamente para esta función (Figura 4.10.).

-Además, si más de un punto cumple con la condición anterior, es decir, se observan construcciones que están dentro de dos circunferencias al mismo tiempo, se seleccionó el punto cuyo radio de influencia contenga también a otras construcciones.

-En caso de que ninguna de las dos circunferencias contuviese otras construcciones, se seleccionó el punto más próximo a la edificación observada (Figura 4.9.).

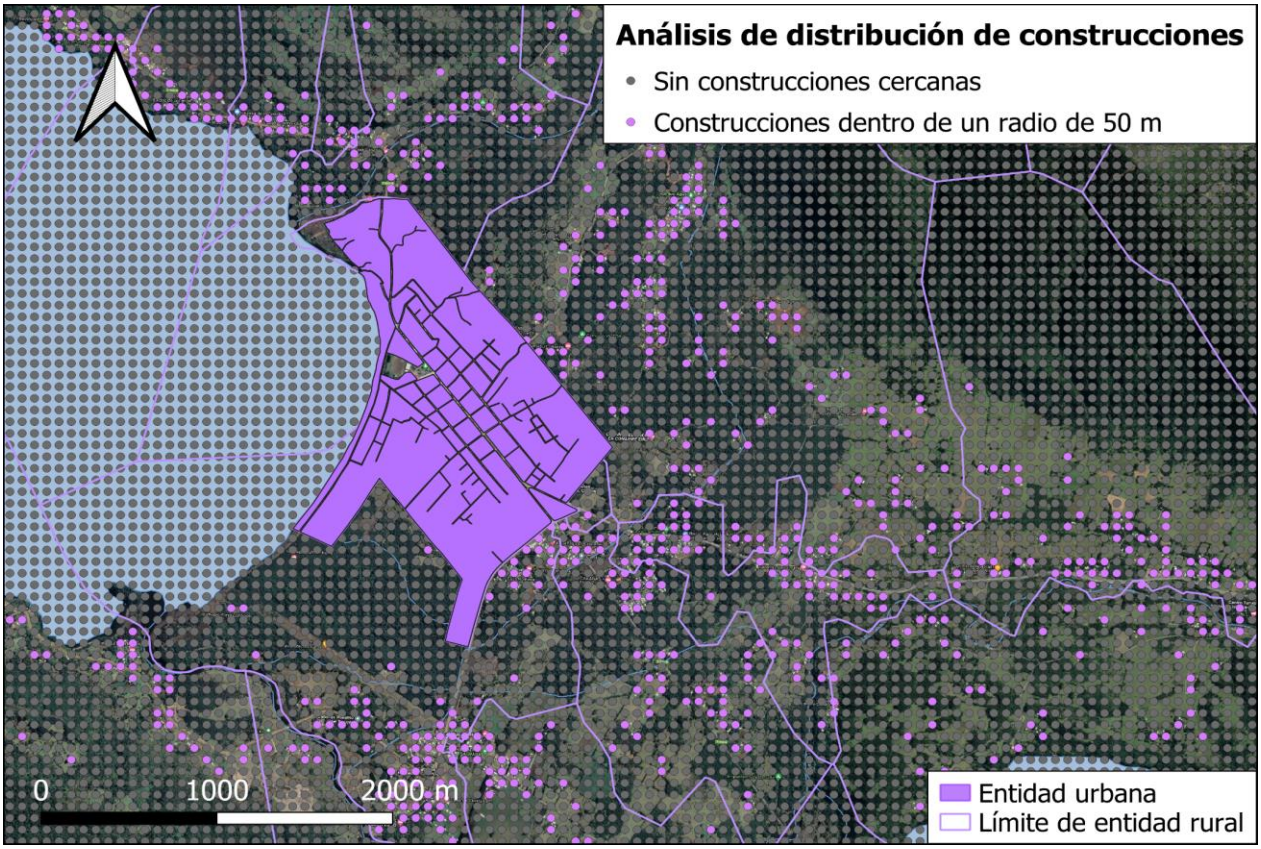


Figura 4.9: **Ejemplo de selección de puntos más próximos a las construcciones observadas dentro de las entidades rurales.** La entidad urbana se mantiene sin cambios. Elaboración propia.

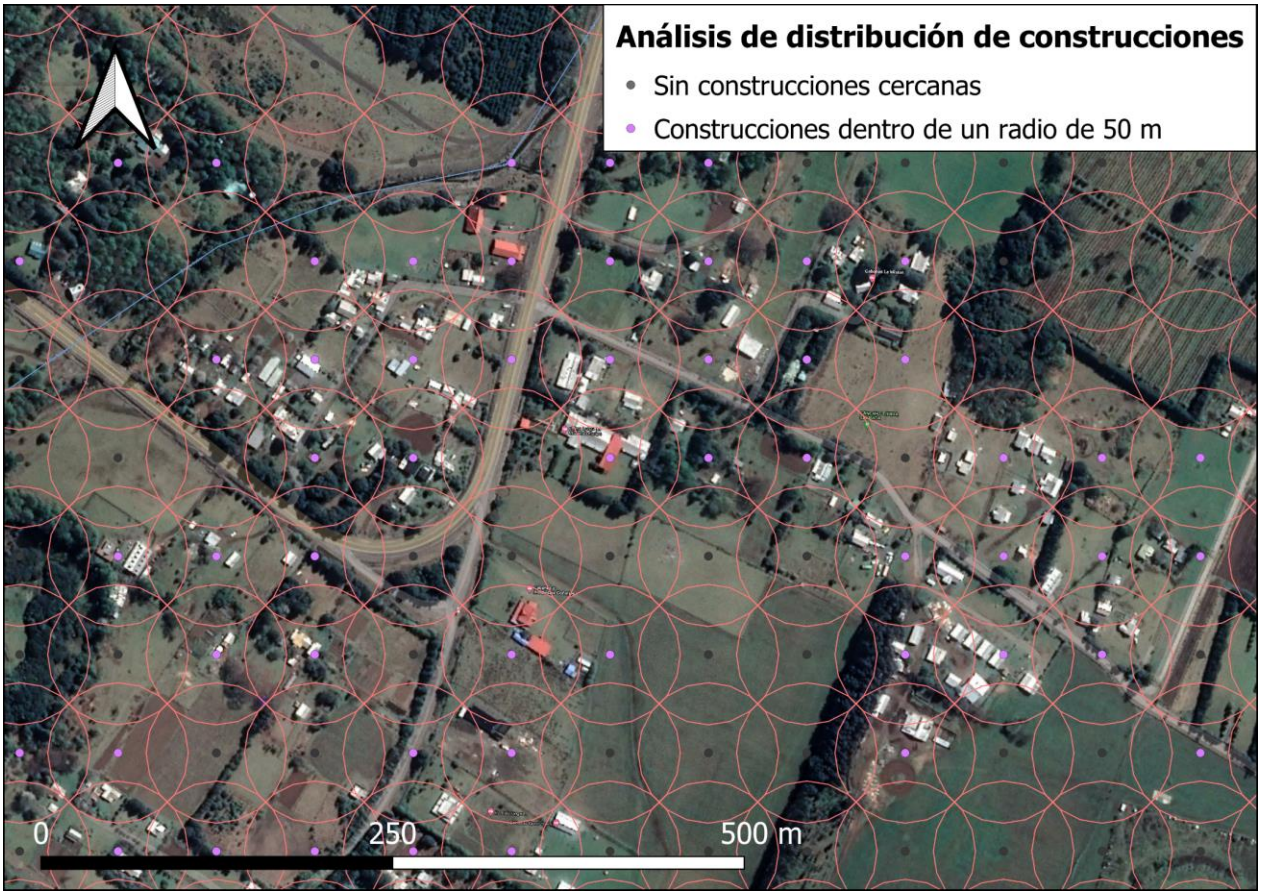


Figura 4.10: **Ejemplo de circunferencias guía que marcan el radio de 50 m en torno a cada punto.** Los puntos rosados cumplen con las condiciones impuestas para su selección. Elaboración propia.

Tras seleccionar todos los puntos que cumplen con las condiciones antes mencionadas, se les aplica un *buffer* cuadrado de 50 m, asegurándose de que los cuadrados generados a partir de puntos adyacentes se fundan (Figura 4.11.). Con este proceso se delimitan las áreas residenciales dentro de cada entidad censal rural en un *shapefile* cuya división mínima es un cuadrado de 100 x 100 m. Luego, la capa recién creada se intersecó con las entidades censales originales, el resultado de este proceso es que las ECM quedan con todos los atributos de las entidades originales. Esta nueva capa fue unida a las de entidades urbanas. Al igual que con las entidades censales originales, se asume que tanto las personas como las viviendas se distribuyen de manera uniforme dentro de las ECM. Por lo tanto, se mantiene cierta incertidumbre sobre la ubicación de la población, pero se reduce de forma significativa con respecto a las entidades originales, y se considera que es suficiente para la escala de trabajo. Esto permite realizar estimaciones mucho más precisas sobre el número de

personas y viviendas amenazadas, con respecto a lo que se puede hacer utilizando las entidades censales sin ningún tipo de preprocesamiento.

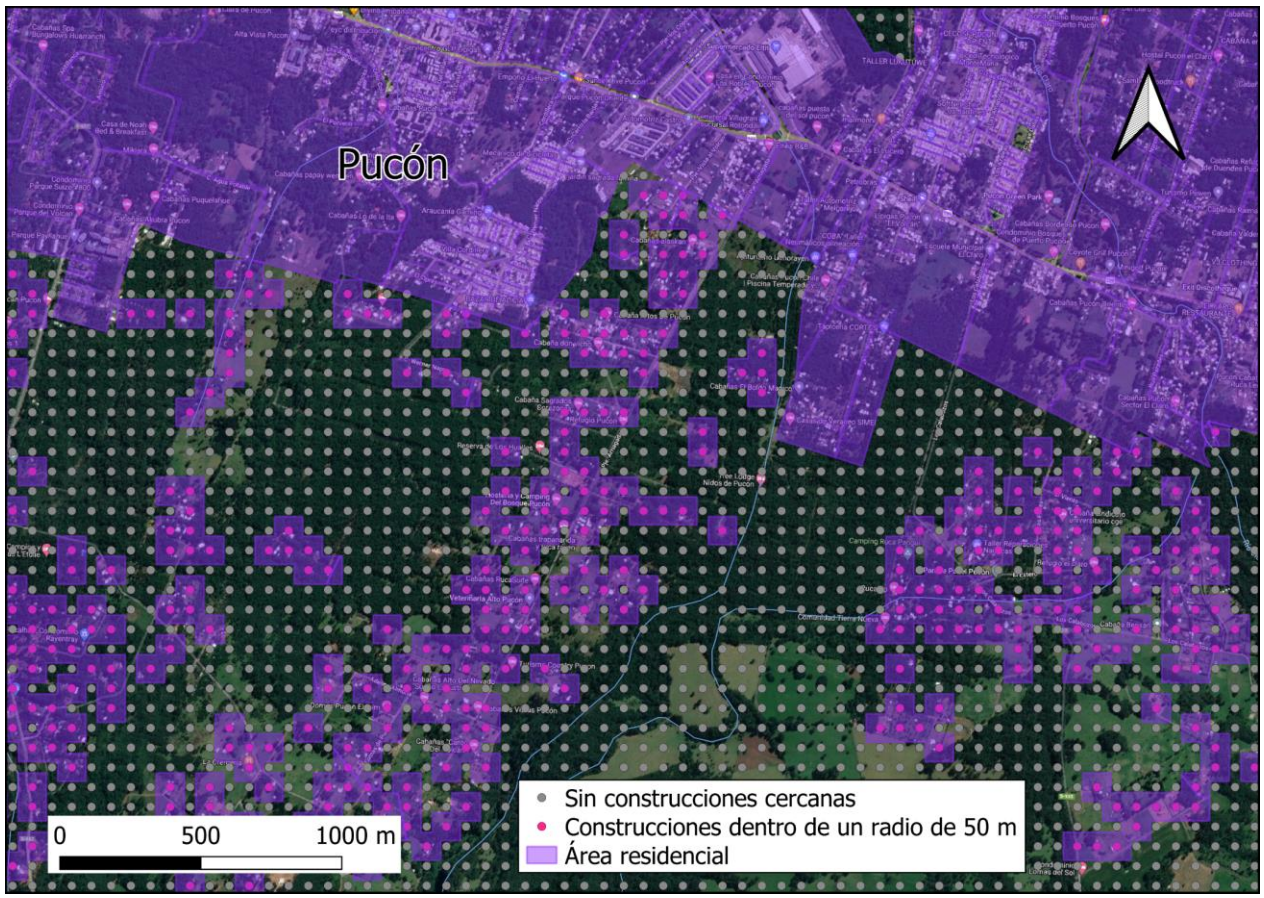


Figura 4.11. **Ejemplo de *buffer* cuadrado de 50 m generado a partir de los puntos que cumplen las condiciones proximidad a las construcciones.** Este proceso marca las áreas residenciales. Se observa que las entidades urbanas de la ciudad de Pucón no están cubiertas de puntos, porque en ellas no fue necesario realizar el análisis de distribución de construcciones, tal como fue señalado al principio de la sección 4.3.2. Elaboración propia.

Todos los procesos necesarios para la evaluación de exposición y amenaza de la población (Capítulo 5) son llevados a cabo utilizando las ECM marcadas en este análisis, lo cual fue realizado para las entidades expuestas a cada uno de los volcanes en estudio. Las ECM mantienen los límites entre entidades censales originales colindantes, es decir, son sub-áreas de las mismas, las cuales representan de manera concreta la distribución de la población permanente en torno a los volcanes (Figura 4.12.).

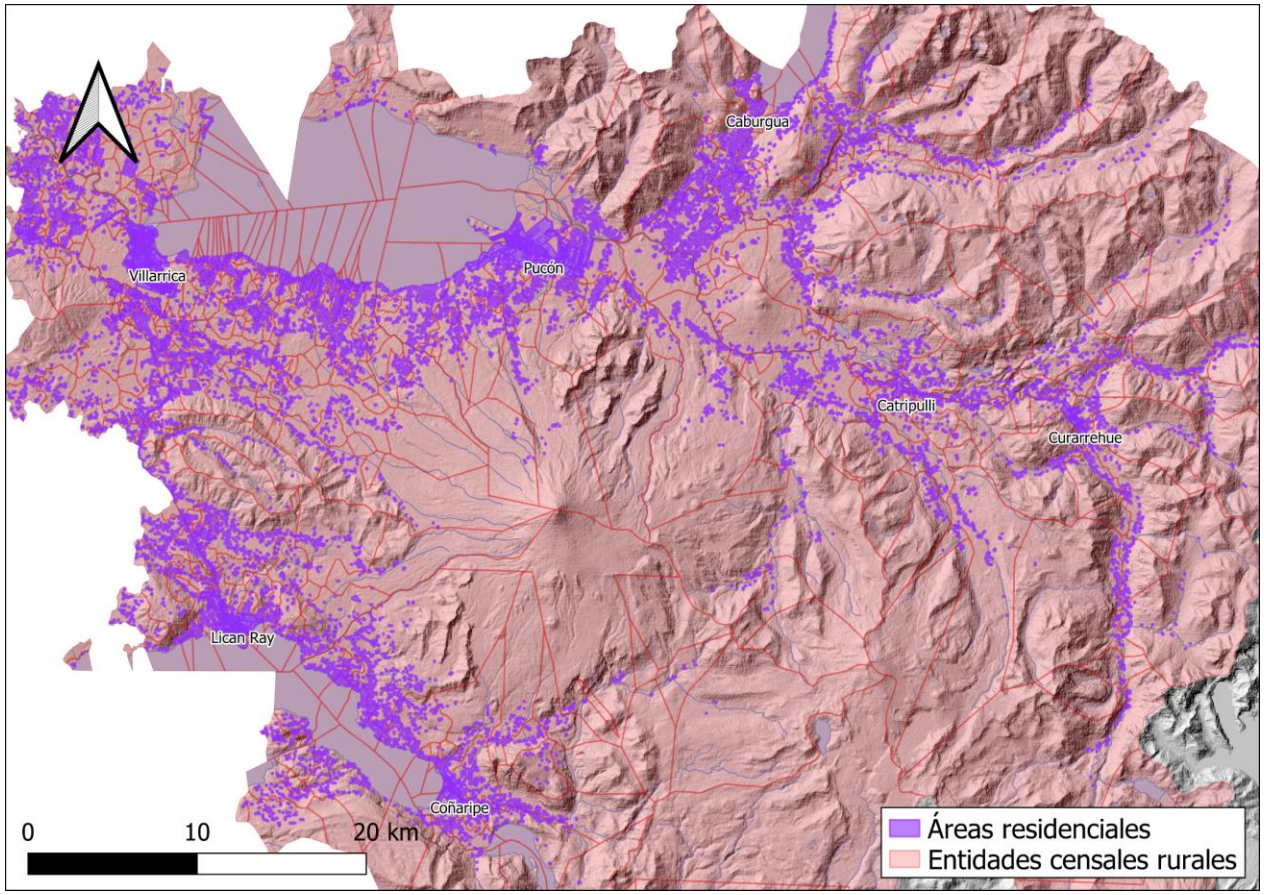


Figura 4.12. **Distribución de las ECM al rededor del volcán Villarrica comparada con los límites de las entidades censales originales.** Luego del preprocesamiento, se pueden ver claramente las zonas donde existe población permanente. Elaboración propia.

4.4. Infraestructura crítica

Esta parte de la base de datos contiene la distribución de las principales infraestructuras de la zona en base a 5 categorías. Debido a la limitada disponibilidad de datos y a la dificultad de obtenerlos en formato GIS, este inventario se limita a colegios, centros de salud, municipios, cuerpos de bomberos, cuarteles de carabineros y centrales hidroeléctricas; las que fueron agrupadas en base a afinidad en las funciones que en ellas se realizan, dichos grupos se detallan en las secciones 4.4.1. – 4.4.4.

En este sentido, uno de los repositorios consultados más destacados fue la Infraestructura de Datos Geoespaciales (https://www.ide.cl), dependiente del Ministerio de Bienes Nacionales. Habiendo

integrado también los diferentes servidores de información vinculados a IDE Ministerio de Energía (https://arcgis2.minenergia.cl), Biblioteca de Congreso Nacional (https://www.bcn.cl) y Comisión Nacional de Energía (https://www.cne.cl).

4.4.1. Infraestructuras de carácter social

Pertenecen a este grupo todas las instalaciones que trabajan directamente con personas, que en este caso corresponden a centros de salud y establecimientos educacionales. Estos establecimientos son clave, dado su rol importante satisfaciendo necesidades primordiales de la población como la salud y la educación. Además, en tiempos de emergencia son aún más relevantes, dado que en los centros de salud se atenderán las emergencias y los colegios podrían ser usados como albergues en caso de ser necesario.

4.4.1.1. Centros de salud

Cada Servicio de Salud debe contar con una estrategia de planificación y programación en red, y cumplir con ciertos atributos como: tener asignada una población y un territorio, centrarse en el usuario, basarse en la atención primaria y contar con establecimientos suficientes para otorgar atención integral al paciente. Estos establecimientos asistenciales del sector público se organizan en distintos niveles de complejidad e incluyen prestaciones ambulatorias (abiertas) u hospitalarias (cerradas) que interactúan a través de mecanismos de referencia y contrareferencia.

4.4.1.2. Establecimientos de educación escolar

La capa contiene la ubicación de todos los establecimientos de educación escolar que a noviembre de 2019 se encontraban funcionando a nivel nacional. Lo anterior excluye aquellos establecimientos educacionales que se encuentran cerrados, en receso o que dependen de la Junta Nacional de Jardines Infantiles, Fundación Integra o instituciones de educación superior. Estos datos han sido generados por la Unidad de Estadísticas del Centro de Estudios, perteneciente a la División de Planificación y Presupuesto del Ministerio de Educación. Para su confección se utilizaron las direcciones reportadas por los establecimientos a través del Sistema de Información

General de Estudiantes (SIGE). Se realizaron correcciones en base a datos del Censo 2017 efectuado por el Departamento de Geografía del Instituto Nacional de Estadísticas. Además, fue necesario corregir la ubicación de algunos establecimientos; tal fue el caso de los colegios Ramón Eduardo Ramírez Henriquez, Centro Integral de Adultos Treucanche, Escuela Básica Peuma Mew, Escuela Dahuelhue, Escuela Particular Trelehueno y Escuela Los Prados; para ello se consultó *Google Maps* y el sitio web www.colegiosenchile.cl.

4.4.2. Infraestructura de respuesta

Toda infraestructura clave al momento de tomar acción de respuesta frente a una eventual emergencia. Esta categoría incluye municipios, en su calidad de centros de decisión y gestión de emergencias; cuarteles de carabineros, y cuerpos de bomberos. Las capas de información respecto a estas infraestructuras se describen a continuación.

4.4.2.1. Municipios

Capa de puntos que representan la localización de los municipios de todas las comunas del país (edificio consistorial, según listado de direcciones entregada por el Sistema Nacional de Información Municipal SINIM de la Subsecretaría de Desarrollo Regional SUBDERE). Cuenta con el Código Único Territorial de la comuna. Capa generada por SUBDERE en 2016, con ayuda en la geolocalización de direcciones por Carabineros.

4.4.2.2. Cuerpos de Bomberos

El archivo incluye información sobre la geolocalización de cuerpos de bomberos de Chile. Posee escala a nivel regional y comunal a través de código único territorial (CUT).

4.4.2.3. Cuarteles de Carabineros de Chile

Contiene la ubicación de los Cuarteles de Carabineros de Chile, correspondiente a comisarías, subcomisarías, tenencias, tenencias de carretera y retenes operativos. La escala de referencia espacial es a nivel país.

4.4.3. Infraestructura de energía y suministro

Aquí se consideran infraestructuras generadoras de energía, en específico, centrales hidroeléctricas. Estas infraestructuras están presentes en la mayoría de los volcanes, siendo algunas de gran magnitud, como las que se ubican cerca del volcán Callaqui.

4.4.3.1. Centrales hidroeléctricas de Chile

Descripción: Capa que contiene la ubicación de las centrales hidroeléctricas en Chile. Incluye, entre otra información, el tipo de central, su potencia, el sistema eléctrico del que forma parte, la empresa a la que pertenece, etc.

La entidad responsable de esta capa de datos es la Comisión Nacional de Energía (CNE)

4.4.4. Infraestructura de transporte

Esta sección incluye las principales infraestructuras que permiten el transporte de personas y/o carga. Dentro de este grupo se encuentran aeropuertos y aeródromos, rutas principales y puentes.

4.4.4.1. Aeropuertos y aeródromos de Chile

Capa que contiene la ubicación geográfica, nombre y categoría de los aeropuertos del territorio nacional, diferenciando entre aeródromos y aeropuertos.

Información obtenida de la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN).

4.4.4.2. Red vial nacional

Descripción: Capa elaborada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), principalmente, en base a levantamiento geo-referenciado con el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) entre años 2000-2003. Contiene actualización en base al proceso de Homologación de caminos y, entre otras cosas, nuevos levantamientos con tecnología GNSS. La Red Vial esta segmentada con información de los tipos de carpeta o rodadura, incluyendo información de los Caminos Básicos con data actualizada a agosto de 2015. Escala aproximada entre 1:10.000 y 1:25.000, dependiendo de la región. Estos archivos son considerados documentos de trabajo y corresponden a Bases de Datos dinámicas que están en constante depuración, complementación y actualización. La Red Vial contenida en estos archivos es parte de lo que se encuentra disponible en el servicio web de mapas de la Dirección de Vialidad

4.4.4.3. Puentes

Descripción: Cobertura de puntos que representa la ubicación y contiene la descripción de los puentes, viaductos y pasos superiores de tuición de la Dirección de Vialidad del MOP a nivel nacional. Definición técnica Activo de obra de infraestructura pública: Puentes: Son las obras viales destinadas a permitir la continuidad de un camino de uso público sobre obstáculos naturales, tales como ríos, mar, esteros, lagos, etc. Corresponde a información de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas. La fuente es mayormente levantamiento georreferenciado con el Sistema Global de Navegación por Satélite GNSS. Escala estimada de precisión 1:5.000.

4.5. Poblados expuestos

Una de las ventajas que brinda la metodología propuesta en este trabajo es que permite evaluar no solo la amenaza que imparte un volcán en particular, sino que, también se pueden realizar evaluaciones de amenaza en áreas específicas. Esta sección de la BDE está destinada a las ciudades y pueblos expuestos al peligro volcánico. Posteriormente se evaluará la amenaza volcánica a nivel poblado, este análisis tiene una escala más detallada que la evaluación de la totalidad de los elementos expuestos al volcán.

Al hablar de ciudades y poblados se hace necesario remarcar las diferencias entre estos y las zonas rurales. De acuerdo a la información obtenida del Censo de población y vivienda del año 2017 las entidades censales rurales se refieren a aquellas áreas que se encuentran fuera de los límites de las zonas urbanas. Estas áreas están generalmente asociadas a una menor densidad de población, con predominancia de actividades agrícolas, ganaderas o relacionadas con la explotación de recursos naturales. Los asentamientos rurales suelen tener una infraestructura menos desarrollada en comparación con las áreas urbanas.

Por otro lado, las entidades censales urbanas engloban las áreas geográficas caracterizadas por una mayor concentración de población, así como por la presencia de infraestructuras y servicios más avanzados. Estas áreas son generalmente centros de actividad económica, con una diversidad de sectores como comercio, industria, servicios y administración. Los asentamientos urbanos cuentan con una mayor oferta de servicios básicos, como educación, salud, transporte público y acceso a tecnologías de comunicación.

En resumen, las entidades censales rurales y urbanas se diferencian principalmente por la densidad de población, actividades económicas predominantes y el nivel de desarrollo de la infraestructura y servicios. Por lo tanto, las ciudades y poblados son representados según los datos de Censo como entidades urbanas (manzanas).

En la práctica, un poblado tiene influencia más allá de sus límites físicos, la población asentada en las afueras, se comporta como parte del mismo, ya que depende de estos centros urbanos para realizar muchas de sus actividades. Si bien determinar hasta dónde llega la influencia de un poblado no es tarea sencilla, ya que responde a variables sociales y demográficas complejas, se optó por construir un *buffer* a partir del área total de cada poblado, de manera de incluir las zonas adyacentes de forma simplificada, objetiva y rápidamente aplicable. Cada poblado tiene un *buffer* proporcional a su tamaño, generado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Buffer_{poblado} = \sqrt{\left(\frac{Área_{poblado}}{\pi}\right)}$$

De esta forma las ciudades más grandes tienen un área de influencia mayor que los poblados pequeños, lo que resulta una manera objetiva y de fácil aplicación para integrar la zona rural que interactúa directamente con la zona urbana. Se generó un *buffer* para cada poblado que esté en alguna zona de peligro volcánico. Para el análisis y evaluación de amenaza, todos los elementos dentro del *buffer* se consideran como parte del poblado (Figura 4.13.).

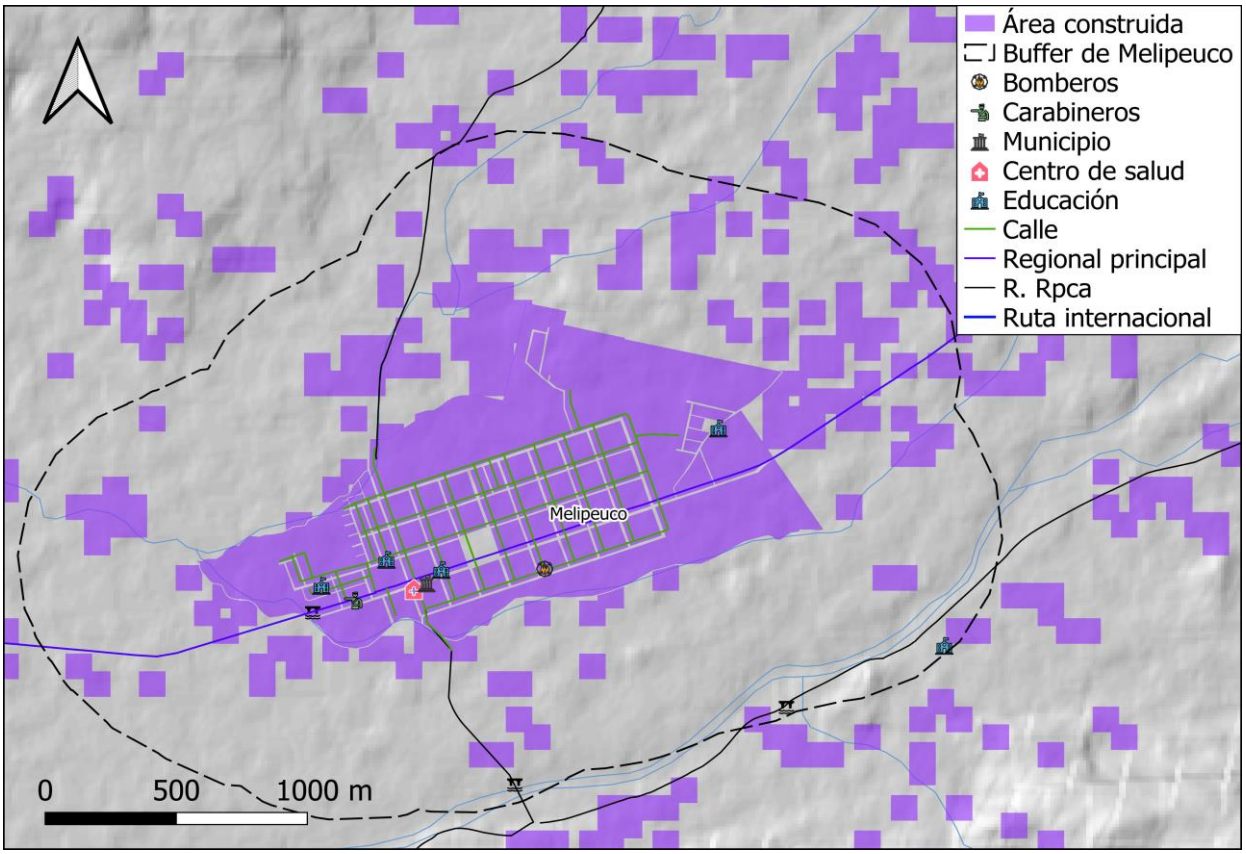


Figura 4.13: **Ejemplo del *buffer* generado para la ciudad de Melipeuco.** Para los análisis, todos los elementos al interior del *buffer* son considerados como parte de la ciudad. Elaboración propia.

4.6. Cuantificación y ponderación de los elementos expuestos

El paso final referente a la base de datos fue cuantificar la exposición. Para esto, se le concedió un factor de exposición a los elementos potencialmente amenazados, en función de sus características y según su tipo. Este factor pretende reflejar que no todos los elementos pueden ser considerados de la misma forma.

4.6.1. Población

La base de esta evaluación de amenaza está centrada en las personas, por lo tanto, no se le otorgó una ponderación, o en otras palabras su factor de exposición (F_p) es 1.

4.6.2. Infraestructuras

Los factores de exposición adjudicados a las infraestructuras se describen a continuación.

4.6.2.1. Viviendas

Las viviendas son la infraestructura más básica de todas las evaluadas, además de ser mucho más numerosas, con respecto a las demás infraestructuras, por lo tanto, se le otorgó un factor de exposición de 0,01. Un factor más elevado podría dejar a las viviendas sobre-representadas. En este caso se contará el número de viviendas para luego multiplicar por su factor de exposición. Este proceso se describe en detalle en el Capítulo 5 de esta memoria.

4.6.2.2. Infraestructura crítica

A cada tipo de elemento le fue otorgado un factor de exposición para que de alguna manera se evidencie de forma comparativa la importancia relativa de cada uno de ellos. Por ejemplo, dentro de la categoría de salud, un hospital regional debe tener un peso mayor que un consultorio o una posta rural, ya que en el hospital se realizan procesos de mayor complejidad, se almacenan equipos más sofisticados y se atiende más gente; además que los establecimientos menores suelen estar bajo el alero de algún establecimiento superior.

4.6.2.2.1. Infraestructuras de carácter social

Los centros de salud fueron ponderados según su nivel de atención. La mayoría de los establecimientos de atención primaria poseen un factor de exposición igual a 3 (F_i=3), a excepción de los consultorios generales rurales y urbanos cuyo factor de exposición es 4 (F_i=4), al igual que

los establecimientos que brindan atención secundaria; los establecimientos de atención terciaria tienen un factor de exposición de 5 (F_i=5).

Los colegios fueron ponderados en base a su matrícula total del año 2019. Aquellos cuya matrícula va de 1 a 100 alumnos tienen un factor de exposición de 2 (F_i=2), de 101 a 500 alumnos su factor es 3 (F_i=3), de 501 a 1000 alumnos el factor de exposición es 4 (F_i=4), de 1001 a 2000 alumnos el factor de exposición es 5 (F_i=5) y sobre 2000 alumnos el factor es 6 (F_i=6)

4.6.2.2.2. Infraestructura de respuesta

Los municipios poseen un factor de exposición de 4 (F_i=4), mientras que los cuarteles y cuerpos de bomberos tienen un factor de exposición de 2 (F_i=2).

4.6.2.2.3. Infraestructura de energía y suministro

Las centrales mini hidráulica de pasada tienen un factor de exposición de 3 (F_i=3), las centrales hidráulicas de pasada tienen un factor de 4 (F_i=4) y el factor de exposición las centrales hidráulicas embalse, al ser las obras de mayor magnitud dentro de esta categoría, es igual a 5 (F_i=5).

4.6.2.2.4. Infraestructura de transporte

Los aeropuertos y aeródromos pertenecen a esta categoría, pero para esta metodología, son más afines a las infraestructuras críticas, por lo que su factor de exposición será representado, al igual que estas últimas, como F_i. Los aeropuertos tienen un factor de exposición igual a 5 (F_i=5) y los aeródromos un factor igual a 3 (F_i=3).

Las rutas principales fueron puntuadas en base a su rol según la dirección de vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile. A los caminos regionales provinciales, comunales, de acceso y caminos les fue otorgado un factor de 0,5 (F_r=0,5); los caminos regionales principales recibieron un factor igual a (F_r=2), las rutas internacionales tienen un factor de 3 (F_r=3), finalmente las rutas nacionales longitudinales recibieron un factor igual a 4 (F_r=4). Los puentes, por su parte, tienen un factor (F_b)

igual a la décima parte del factor de exposición correspondiente al tipo de ruta de la cual forman parte. Cabe mencionar que las rutas se evalúan en función de la longitud expuesta, posteriormente se multiplicará por el factor de exposición correspondiente. Este proceso se describe en detalle en el Capítulo 5 de esta memoria.

La Tabla 4.4. resume los factores de exposición otorgados a cada tipo de elemento expuesto.

Tabla 4.4. Tabla de factores de exposición de los elementos analizados. Elaboración propia.

Factor de Exposición	POBLACIÓN		TRANSPORTE			SOCIAL		RESPUESTA	ELECTRICIDAD (SERVICIOS BÁSICOS)
	Residencial	**Habitantes**	**Rutas**	**Puentes**	**Aeropuertos**	**Educación (n.º de alumnos)**	**Salud**	**Respuesta**	**Generación**
	F_v	F_p	F_r	F_b	F_i				
0,01	Viviendas								
0,05				Puente en camino regional provincial, comunal o de acceso					
0,2				Puente en camino regional principal					
0,3				Puente en ruta internacional					
0,4				Puente en ruta nacional longitudinal					
0,5			Caminos regionales provinciales, comunales y de acceso						
1		Personas							
2			Caminos regional principales			1-100		Bomberos, Carabineros	
3			Ruta internacional		Aeródromos	101-500	Atención primaria		Mini H. Pasada
4			Ruta nacional longitudinal			501-1000	Atención secundaria	Municipios	H. Pasada
5					Aeropuertos	1001-2000	Atención terciaria		H. Embalse
6						>2000			

5. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE AMENAZA VOLCÁNICA

5.1. Trabajos previos

La metodología de evaluación de amenaza presentada en esta memoria de título recoge las características más importantes de trabajos realizados anteriormente sobre peligro, exposición y amenaza volcánica.

Ewert y Harpel (2004) introdujeron el Índice de Población en Volcanes (VPI, por sus siglas en inglés), que estima el número de personas que viven dentro de los radios de 5 y 10 km de los volcanes (VPI5 y VPI10). Estas estadísticas de población, junto a VPI30 y VPI100 (población dentro de los 30 y 100 km de volcanes con actividad holocena) se informan en la base de datos VOTW4.0 (2013) (www.volcano.si.edu; Siebert et al., 2010). Aspinall y otros (2011) desarrollaron el Índice de Exposición de la Población (PEI) para un estudio de riesgo volcánico en los países prioritarios del Fondo Mundial para la Reducción y Recuperación de Desastres (GFDRR) del Banco Mundial. Aquí, las poblaciones dentro de un radio de 10 y 30 km se estimaron y combinaron usando ponderaciones que reflejan cómo las muertes históricas varían con la distancia a los volcanes.

La metodología *RiskScape* New Zealand (King y Bell, 2006) propone el análisis de diversos fenómenos naturales peligrosos (escenarios de peligro) y como estos afectan a los elementos expuestos. Esta metodología incorpora datos SIG como base. Este método entrega una distribución del daño y un estimado de las perdidas en términos monetarios.

Ewert (2007) presentó una metodología basada en índices para evaluar la amenaza volcánica (la combinación de peligro y exposición) en los Estados Unidos, para permitir la priorización de la investigación, seguimiento y mitigación de potenciales daños en los volcanes de este país. El estudio formó parte del desarrollo del Sistema Nacional de Alerta Temprana de Volcanes (NVEWS). El método NVEWS evalúa y suma 12 indicadores de peligro y 3 de *unrest*, cuyo resultado se multiplica por la suma de 10 indicadores de exposición. El valor obtenido es luego asignado a uno de los cinco niveles de amenaza volcánica. Si bien representa una mejora

significativa con respecto a los índices anteriores, el uso de un sistema de puntuación, en gran medida binario, oculta gran parte de la complejidad del peligro volcánico. Por ejemplo, a la ocurrencia de flujos de lava del Holoceno y flujos piroclásticos del Holoceno se les asigna la misma ponderación, aunque este último es mucho más peligroso, particularmente desde la perspectiva de la pérdida de vidas (Auker et al., 2013; Witham, 2005).

El período de tiempo durante el cual se evalúan los peligros volcánicos no se establece explícitamente en los métodos NVEWS y GDFRR. Sin embargo, las evaluaciones de peligros son más valiosas si se especifica el tiempo y, de hecho, el carácter informativo de los resultados depende del plazo. Por ejemplo, una evaluación de más de diez años probablemente arrojará un resultado muy diferente a una evaluación de más de 10.000 años, en la que erupciones muy grandes pero raras pueden ser el peligro dominante (Loughlin et al, 2015). Ambos métodos se basan en todo el registro de erupciones del Holoceno. Esta nueva metodología incorpora mapas donde el peligro ha sido previamente cuantificado utilizando un sistema objetivo e innovador, en base a diferentes escenarios para cada fenómeno evaluado, los cuales han sido caracterizados y donde se asigna mayor ponderación a los patrones de actividad recientes, ya que es más probable que indiquen el carácter de futuras erupciones.

El análisis *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards* (Rougier *et al*., 2013) habla del desafiante campo de la evaluación de la incertidumbre y el riesgo en los peligros naturales. En concreto, defiende la cuantificación transparente del riesgo y la incertidumbre para poder tomar decisiones informadas, tanto para reducir los riesgos asociados a los peligros naturales como para evaluar las diferentes estrategias de mitigación. Un marco defendible para la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre se convierte en una herramienta vital en la era de la "ciencia postnormal", en la que "los hechos son inciertos, los valores están en disputa, hay mucho en juego y las decisiones son urgentes" (Funtowicz y Ravetz, 1991; Hulme, 2009 en Rougier et al., 2013). Los peligros naturales, al igual que los sistemas medioambientales de los que forman parte, son ricos, complejos y llenos de interacciones y no linealidades. Nuestra comprensión de su naturaleza y nuestra capacidad para predecir su comportamiento son limitadas. Sin embargo, debido a su impacto en las personas y bienes que valoramos, los efectos de los peligros naturales deben ser gestionados, es decir, hay que tomar decisiones, a pesar de nuestro limitado conocimiento. Por ello,

es fundamental que cuando los científicos contribuyen a la toma de decisiones o a la formulación de políticas, es crucial que sus incertidumbres se evalúen de forma transparente, se comuniquen honestamente y de forma efectiva, y que estén disponibles para el escrutinio de todas las partes interesadas.

Por su parte, Jiménez (2019) presenta un análisis de exposición del área del volcán San Miguel considerando la distribución de la población, el uso del suelo, las viviendas privadas, los edificios oficiales (hospitales, escuelas, etc.) y las infraestructuras de comunicación. Mediante herramientas de análisis espacial del Sistema de Información Geográfica (SIG) se estima la exposición a diferentes peligros; precipitación aérea, flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica y lahares.

Recogiendo las principales características de los métodos anteriormente mencionados, lo que se busca aquí es, entregar una metodología semi-cuantitativa y objetiva, que permita evaluar y comparar la amenaza volcánica mediante el análisis de la relación espacial del peligro y la exposición. A ambos factores se les ha otorgado un sistema de puntos, a fin de obtener valores cuantificados de amenaza. La evaluación mantiene un carácter local, por lo cual, tanto los peligros como los elementos expuestos fueron analizados en detalle. Cabe destacar que, en lugar de hacer uso de índices, en esta metodología se incorporan análisis de exposición detallados, donde la ubicación espacial de cada elemento cobra gran relevancia. Sin embargo, es importante mencionar que, los datos de exposición considerados deben ser suficientemente generales para poder ser evaluados sin problemas en la mayor cantidad de volcanes.

5.2. Análisis de exposición y amenaza en torno a un volcán

Combinando los mapas de peligro con cada grupo de elementos vulnerables colectados, se llevó a cabo un análisis de exposición, identificando cuáles elementos podrían ser afectados y en qué zona de peligro se encuentran. Dependiendo del tipo de elemento, el proceso fue diferente. También fueron identificados y evaluados los poblados amenazados, cuyos procesos son descritos en la sección 5.5.

Cada elemento vulnerable analizado tiene un valor de exposición (*E*) y un valor de peligro (*H*), que depende de la zona de peligro volcánico donde se encuentre dicho elemento. Producto de estos dos valores es igual a la amenaza (*A*) de cada elemento en particular.

Para cada volcán se calculó un valor de amenaza absoluta y amenaza normalizada, estos términos se describen en el subcapítulo 5.3.

5.2.1. Activos poligonales

Tal como se expuso en el Capítulo 4, cada Entidad Censal Modificada (ECM) contiene datos sobre el número de personas y el número de viviendas dentro de ella. La capa de ECM fue superpuesta con las zonas de peligro del volcán correspondiente, la intersección formada entre ambas es el área amenazada, denominada como Entidad Censal Modificada en zona de Peligro (en adelante ECMP). A partir de una ECM, luego de la intersección, pueden generarse múltiples ECMP, dependiendo de la cantidad de divisiones que tenga la zona de peligro que la interseque. Cada ECMP es diferente a la otra, a menos que provenga de una ECM que se encuentre cubierta completamente por la misma zona de peligro (Figura 5.1.). Los márgenes de una ECMP están dados tanto por los márgenes censales originales, como por los límites de las zonas de peligro. Cada ECMP tiene asociados valores característicos, tanto de personas (EP) y viviendas (EV) amenazadas, como del valor de peligro al que está expuesta (H).

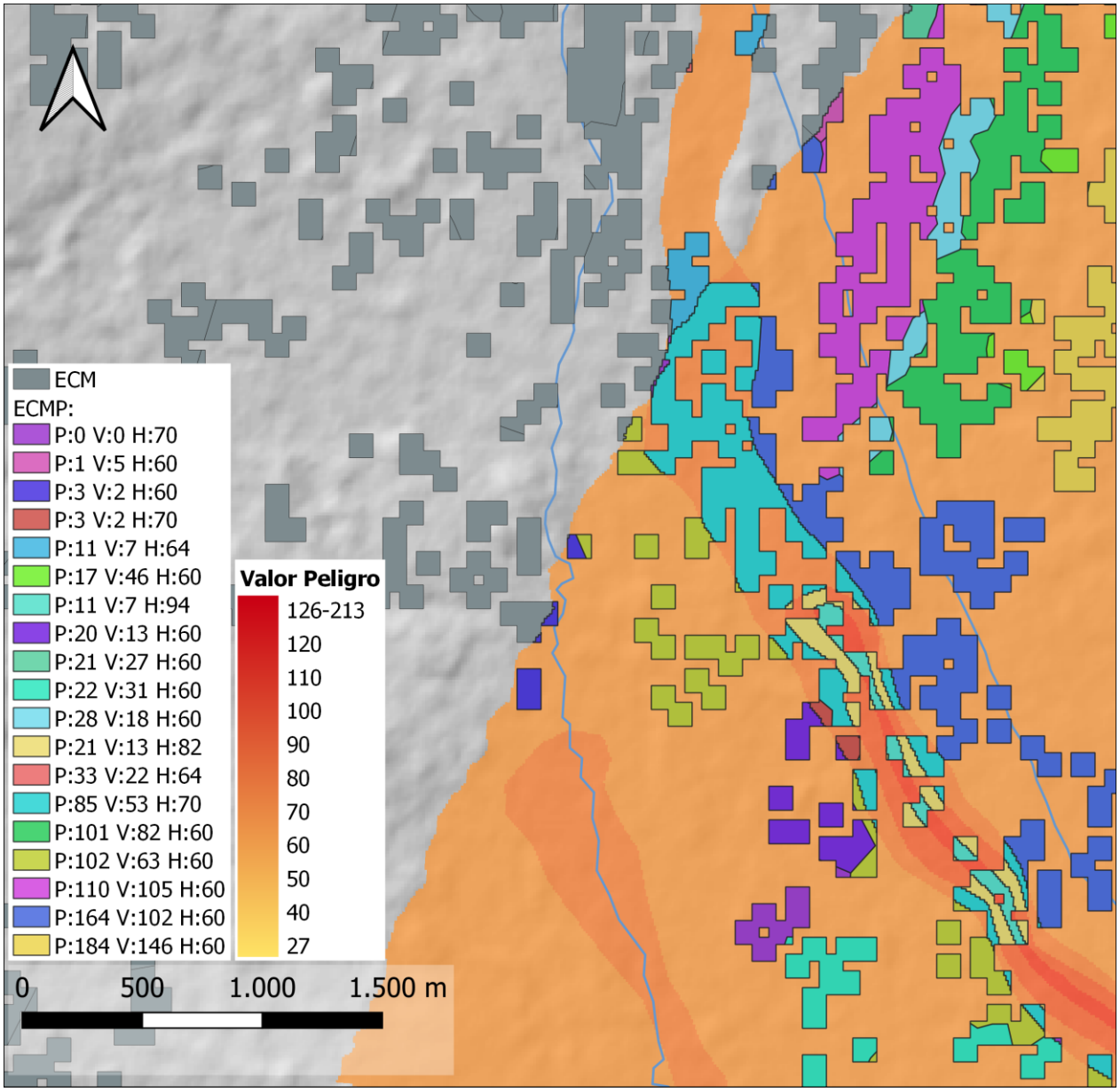


Figura 5.1. **Ejemplo de la superposición entre ECM y el mapa de peligros del volcán Villarrica, cuya intersección da origen a las ECMP.** De una ECM pueden resultar múltiples ECMP, dependiendo de cuantas zonas de peligro diferentes la corten. Cada una de las ECMP generadas a partir de la intersección de la capa de ECM (gris) con las zonas de peligro volcánico tiene asociado un número de personas, número de viviendas y un valor de peligro. Las ECM han sido representadas en gris y las ECMP han sido representadas con diferentes colores, en la leyenda se indica el número de personas, número de viviendas y valor de peligro asociado a cada ECMP visible en la figura.

5.2.1.1. Personas

El número de personas dentro de una ECMP es proporcional al área que ocupa dentro de la ECM a la que pertenece. De tal modo, el valor de Exposición de Personas (*EP*) de una ECMP está dado por la ecuación (1), donde el subíndice *j* representa una ECM en particular (áreas grises en Figura 5.1.), el subíndice *k* representa una ECMP en particular (un área expuesta a un nivel de peligro en particular, representada por áreas de colores en Figura 5.1.). nP_j corresponde al número de personas de una ECM y F_p es el factor de exposición respectivo en la tabla 4.4. El valor de exposición de personas (*EP*), necesario para calcular la amenaza, es válido solo en aquellas zonas expuestas a algún peligro, pues, si no hay peligro, se considera que la exposición es nula.

$$EP_{j,k} = \frac{\text{Área}_k}{\text{Área}_j} \times nP_j \times F_p \qquad (1)$$

En este caso el número de personas dentro de una ECMP es igual al número de personas que ella contiene, dado que el factor de exposición es igual a 1 ($F_p = 1$).

El valor de exposición de personas en una ECM_j (EP_j) está dado por la sumatoria de todos los valores de exposición de las $ECMP_k$ dentro de sus márgenes.

$$EP_j = \sum_k EP_{j,k} \qquad (2)$$

El valor de amenaza a personas de una $ECMP_k$ se calcula multiplicando el número de personas amenazadas dentro de ella ($EP_{j,k}$) por el valor de peligro correspondiente (H_k). El valor *H* es propio de cada zona de peligro del mapa que se esté usando (integrado o SERNAGEOMIN) (Subcapítulo 4.2.), en este caso H_k corresponde al valor de peligro de la zona que interseca a una ECMP en particular.

$$AP_{j,k} = EP_{j,k} \times H_k \qquad (3)$$

5.2.1.2. Viviendas

Para calcular el valor de exposición de viviendas (*EV*) de cada $ECMP_j$ se llevó a cabo el mismo proceso realizado con las personas. El valor $EV_{j,k}$ de una $ECMP_k$ depende de la porción del área total de la ECM_j de la cual forma parte, lo que da origen a la ecuación (4). nV_j es el número de viviendas de la ECM_j y F_v es el factor de exposición de viviendas de la tabla 4.4.

$$EV_{j,k} = \frac{\text{Área}_k}{\text{Área}_j} \times nV_j \times F_v \qquad (4)$$

El valor de exposición de viviendas es válido siempre que exista algún peligro, en caso contrario, dicho valor es nulo.

El valor de exposición de viviendas de una ECM_j (EV_j) es igual a la sumatoria de todos los $V_{j,k}$ de las $ECMP_k$ que pertenezcan a ella, tal como está representado en la ecuación (5).

$$EV_j = \sum_k EV_{j,k} \qquad (5)$$

El valor de amenaza a viviendas de una $ECMP_k$ en particular es igual al producto entre su valor de exposición de viviendas ($EV_{j,k}$) y el valor de peligro de la zona en que se encuentra (H_k)

$$AV_{j,k} = EV_{j,k} \times H_k \qquad (6)$$

5.2.2. Activos lineales

Los activos lineales corresponden a las rutas y caminos, las cuales fueron trabajadas de manera similar a las áreas pobladas, pero en este caso el valor de exposición (*ER*) de cada una depende de la longitud de la misma. Cada 10 km una ruta (*r*) suma el valor correspondiente a su factor de exposición (F_r), lo cual está expresado por la ecuación (7).

$$ER_r = \frac{m_r}{10000m} \times F_r \qquad (7)$$

El valor de exposición de un tramo de ruta ER_r es igual a su R_r, siempre que se encuentre dentro de una zona de peligro, si no lo está, su valor de exposición es nulo (Figura 5.2.).

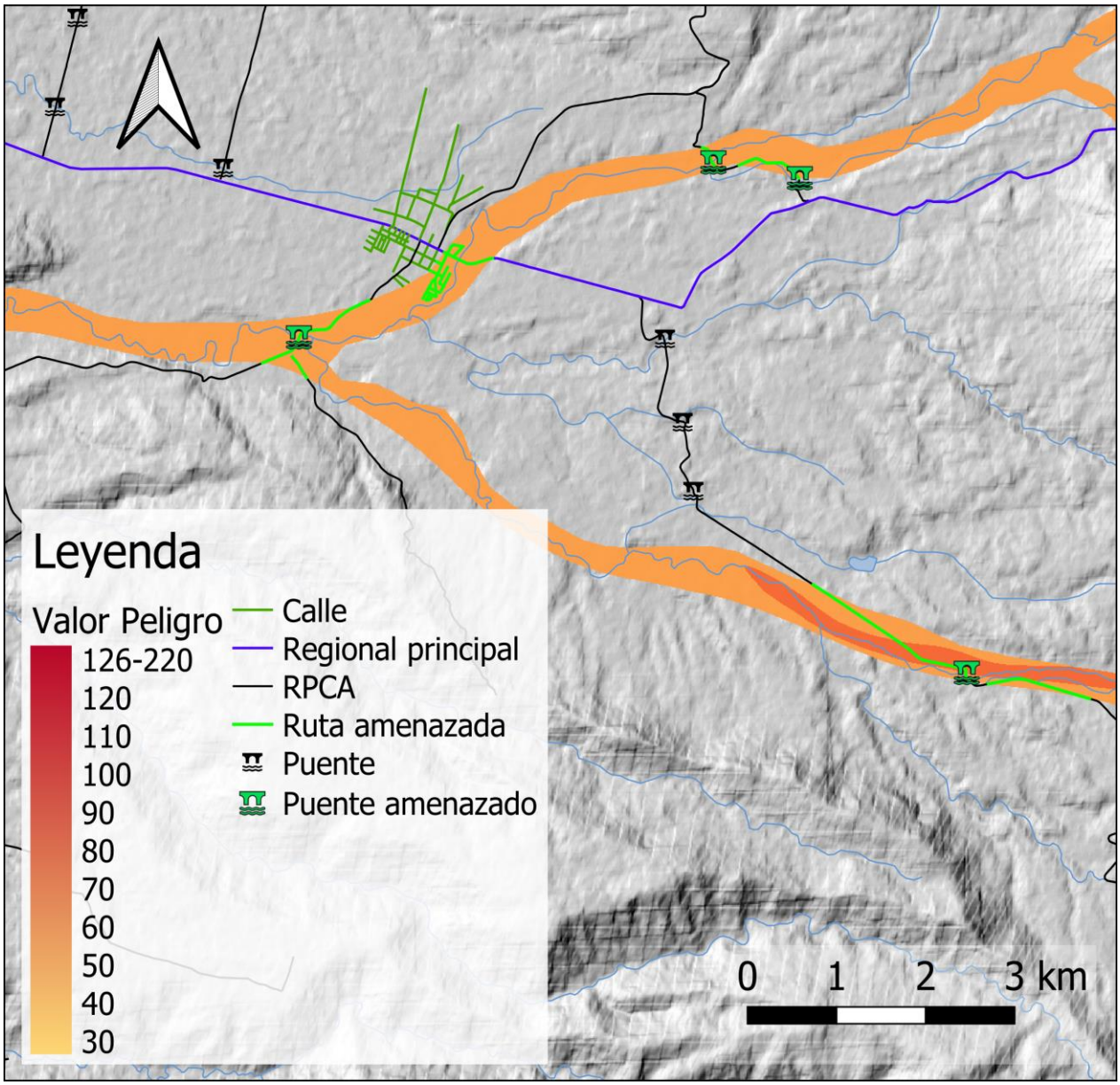


Figura 5.2: **Rutas, caminos y puentes en sectores aledaños a la localidad de Cherquenco.** En verde claro se marcan los tramos de ruta y puentes amenazados por el volcán Llaima.

El valor de amenaza (AR_r) de un tramo expuesto se calcula como el producto de su valor de exposición (ER_r) y el valor de peligro correspondiente a la zona donde se encuentra (H_r).

$$AR_r = ER_r \times H_r \qquad (8)$$

5.2.3. Activos puntuales

5.2.3.1. Infraestructuras críticas

En el caso de las infraestructuras críticas (*Ic*), el procedimiento de intersección con la capa de peligro es más simple que con los activos poligonales y lineales, ya que cada infraestructura está representada como un punto, cuyo valor de exposición (EIc_i) es igual al factor de exposición (F_i) que le corresponde según la Tabla 4.4.

$$EIc_i = F_i \qquad (9)$$

Al igual que con los activos nombrados anteriormente, el valor de exposición (EIc_i) es válido solo para aquellas infraestructuras que se encuentran en una zona de peligro (Figura 5.3.).

Luego de la intersección de ambas capas, cada infraestructura queda asociada al valor de peligro (H_i) de la zona donde se haya y a su propio valor de exposición (EIc_i), cuyo producto es igual al valor de amenaza de una infraestructura crítica en particular (AIc_i). En otras palabras, para los activos puntuales, simplemente se realiza un conteo de puntos dentro de cada zona de peligro.

$$AIc_i = Ic_i \times H_i \qquad (10)$$

5.2.3.2. Puentes

Los puentes también son elementos puntuales, pero a diferencia de las infraestructuras críticas, estos son componentes de las rutas, por lo cual fueron ponderados en función de estas. El Valor de Exposición (*EB*) cada puente es igual al factor de exposición de puentes (F_b) indicado en la Tabla 4.4.

$$EB_b = F_b \qquad (11)$$

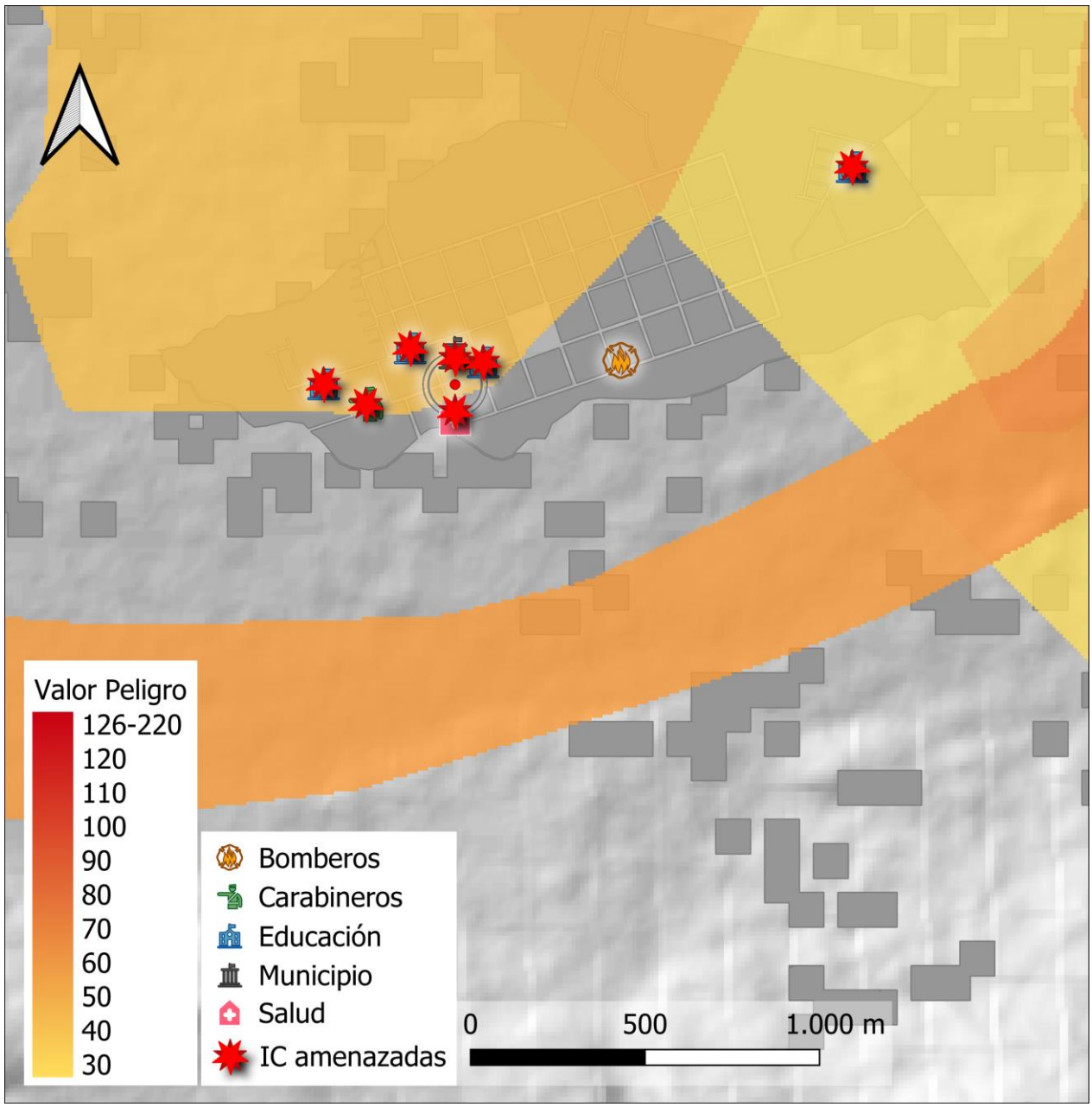


Figura 5.3. **Ejemplo de infraestructuras críticas amenazadas en la ciudad de Melipeuco.** Las infraestructuras amenazadas se marcan con una estrella roja. Todas aquellas infraestructuras inmersas en zonas de peligro tienen valor de exposición (EIci). Elaboración propia.

Al igual que con todos los tipos de elemento evaluados, el valor de exposición de un puente es válido siempre que este se encuentre dentro de una zona de peligro.

El valor de amenaza de un puente se calcula como el producto de su valor de exposición por el valor de peligro de la zona donde está.

$$AB_b = B_b \times H_b \quad (12)$$

5.3. Exposición y amenaza totales de un volcán

A nivel volcán, se buscaron valores que integren a todos los elementos evaluados, definiendo los valores de amenaza absoluta (A_{volc}) y amenaza normalizada ($A_{volc/norm}$). La amenaza absoluta (A_{volc}) es la sumatoria de todos los valores de amenaza de los elementos expuestos a las zonas de peligro de un volcán en particular, en otras palabras, todos los elementos dentro de los contornos de las zonas de peligro ($\in volcán$). Mientras que la amenaza normalizada de un volcán ($A_{volc/norm}$) se define como el peligro ponderado en zonas susceptibles a ser afectadas por peligros volcánicos (es decir, en zonas de exposición).

A continuación, se describen los procedimientos necesarios para obtener los valores de amenaza absoluta y normalizadas, tanto para personas, como para infraestructuras. Posteriormente se describen los procesos llevados a cabo para integrar ambos grupos y así obtener valores de amenaza absoluta y normalizada totales para cada volcán y posteriormente para cada poblado expuesto.

5.3.1. Amenaza de personas de un volcán

La amenaza total de personas de un volcán ($AP_{volcán}$) se obtiene calculando la sumatoria de las amenazas ($AP_{j,k}$) de cada una de las ECMP, lo que da origen a la ecuación (13).

$$AP_{volcán} = \sum_j \sum_k AP_{j,k} \quad (13)$$

Para calcular la amenaza de personas normalizada de un volcán ($AP_{volcán/norm}$), primero se debe conocer la exposición total de personas ($EP_{volcán}$), es decir, el número de personas dentro de los contornos de todas las zonas de peligro de un mapa en particular. Dicho valor corresponde a la sumatoria de todos los valores de exposición de personas de cada una de las ECMP amenazadas según el mapa de peligro.

$$EP_{volcán} = \sum_{j} \sum_{k} EP_{j,k} \qquad j,k \in volcán \qquad (14)$$

De este modo, la amenaza de personas normalizada de un volcán corresponde a la amenaza absoluta dividida por el total de personas expuestas, lo que, en otras palabras, corresponde al peligro ponderado entre las personas expuestas, expresado por la ecuación (15).

$$AP_{volcán/norm} = \frac{AP_{volcán}}{EP_{volcán}} \qquad (15)$$

5.3.2. Amenaza de infraestructuras de un volcán

Para calcular la amenaza de infraestructuras total de un volcán ($AI_{volcán}$) se suman los valores correspondientes de amenaza de viviendas ($AV_{volcán}$), rutas ($AR_{volcán}$), puentes ($AB_{volcán}$) e infraestructuras críticas ($AIc_{volcán}$) del volcán.

La amenaza a viviendas de un volcán ($AV_{volcán}$) es igual a la sumatoria de las amenazas a viviendas ($AV_{j,k}$) de cada una de las $ECMP_k$ expuestas a dicho volcán, lo cual se expresa en la ecuación (16).

$$AV_{volcán} = \sum_j \sum_k AV_{j,k} \ni \quad j,k \in volcán \quad (16)$$

La amenaza de rutas total de un volcán es igual a la sumatoria de todos los valores de amenaza de los tramos de ruta expuestos al mismo, tal como lo expresa la ecuación (17).

$$AR_{volcán} = \sum_{r} AR_r \quad r \in volcán \qquad (17)$$

Para calcular la amenaza de puentes total de un volcán se deben sumar todos los valores de amenaza de los puentes en zona de peligro.

$$AB_{volcán} = \sum_{b} AB_b \qquad (18)$$

La amenaza total a infraestructuras críticas en un volcán ($AIc_{volcán}$) está dada por la suma de todos los valores de amenaza (AIc_i) de cada una de las infraestructuras críticas inmersas en las zonas de peligro volcánico.

$$AIc_{volcán} = \sum_{i} AIc_i \; i \in volcán \qquad (19)$$

Por lo tanto, la amenaza de infraestructuras total de un volcán ($AI_{volcán}$) se calcula acorde a la ecuación (20).

$$AI_{volcán} = AV_{volcán} \;\; AIc_{volcán} + AR_{volcán} + AB_{volcán} \quad (20)$$

Para calcular la amenaza de infraestructuras normalizada se debe dividir la amenaza total de infraestructuras ($AI_{volcán}$) por el valor de exposición de infraestructuras total ($EI_{volcán}$). El valor $EI_{volcán}$ se expresa matemáticamente tal como lo indica la ecuación (21).

$$EI_{volcán} = \sum_{j}\sum_{k} EV_{j,k} + \sum_{i} EIc_i + \sum_{r} ER_r + \sum_{b} EB_b \qquad (21)$$
$$j,k,i,r,b \quad \in \quad volcán$$

Por lo tanto, la amenaza normalizada de infraestructuras queda expresada por la ecuación (22).

$$AI_{volcán/norm} = \frac{AI_{volcán}}{EI_{volcán}} \qquad (22)$$

5.3.3. Amenaza total de un volcán

La amenaza total de un volcán ($AT_{volcán}$) se obtiene mediante la suma euclidiana de su valor de amenaza de personas ($AP_{volcán}$) y su valor de amenaza de infraestructuras ($AI_{volcán}$), resultando la ecuación (29).

$$AT_{volcán} = \sqrt{AP_{volcán}{}^2 + AI_{volcán}{}^2} \quad (23)$$

Tal como en los pasos anteriormente descritos, para llegar a la amenaza normalizada, primero se debe conocer la exposición total ($ET_{volcán}$), según corresponda. En este caso la exposición de personas ($EP_{volcán}$) e infraestructuras ($EI_{volcán}$) se combina de la misma manera que la amenaza, es decir, mediante la suma euclidiana de los respectivos valores, dicha expresión está representada por la ecuación.

$$ET_{volcán} = \sqrt{EP_{volcán}{}^2 + EI_{volcán}{}^2} \quad (24)$$

El valor de amenaza normalizada de un volcán ($AT_{volcán/normalizada}$) es igual a la amenaza total ($AT_{volcán}$) dividida por la exposición total del mismo volcán ($ET_{volcán}$), esto queda expresado matemáticamente por la ecuación (31).

$$AT_{volc/norm} = \frac{AT_{volcán}}{ET_{volcán}} \quad (25)$$

5.4. Exposición y amenaza de un poblado

Para evaluar la amenaza en cada poblado, se siguió el mismo procedimiento que para la totalidad de las zonas amenazadas por cada volcán. La diferencia radica en que, en el caso de los poblados, el número de elementos expuestos se limita a lo que está dentro del *buffer* de poblado visto en la sección 4.5. Los resultados obtenidos para cada poblado serán expuestos en el Capítulo 6 de esta memoria.

Para ejemplificar, la Figura 5.4. muestra la exposición de elementos en la ciudad de Neltume. Se cuentan como parte de esta ciudad todos los elementos dentro del área delimitada por la línea segmentada (*buffer*). En las ECM, representadas en morado, se contaron 1.971 personas. Dentro de esas mismas áreas se encuentran 847 viviendas, que ponderadas por su F_v da un valor de 8,47. En Neltume se encuentra la Segunda Compañía de Bomberos de Choshuenco y el Retén Neltume, estos establecimientos pertenecen a la categoría de “Respuesta” y y tal como lo indica su F_i, cada

una de ella aumenta en 2. Dentro de las infraestructuras de la categoría “Social” se hayan dos establecimientos educacionales, ellos son, la Escuela Francisco de Asis y el Complejo Educacional Tierra de Esperanza, cuyas matriculas totales son de 213 y 184 alumnos, respectivamente, lo que significa que cada una tiene un F_i de 3. Los dos centros de salud de esta ciudad son la Posta de Salud Rural de Neltume y el Centro Comunitario de Salud Familiar de Neltume, ambos establecimientos corresponden al nivel de atención primario, por lo que sus F_i son de 3 cada uno. En cuanto a las rutas, la ciudad tiene 12,37 km de calles, que en total suman un valor de 0,62; además de 4,11 km de ruta internacional, cuyo valor es de 1,23; dentro de la ruta internacional se encuentra el puente “Los Cortes”, cuyo valor corresponde a 0,3 (Figura 5.4.).

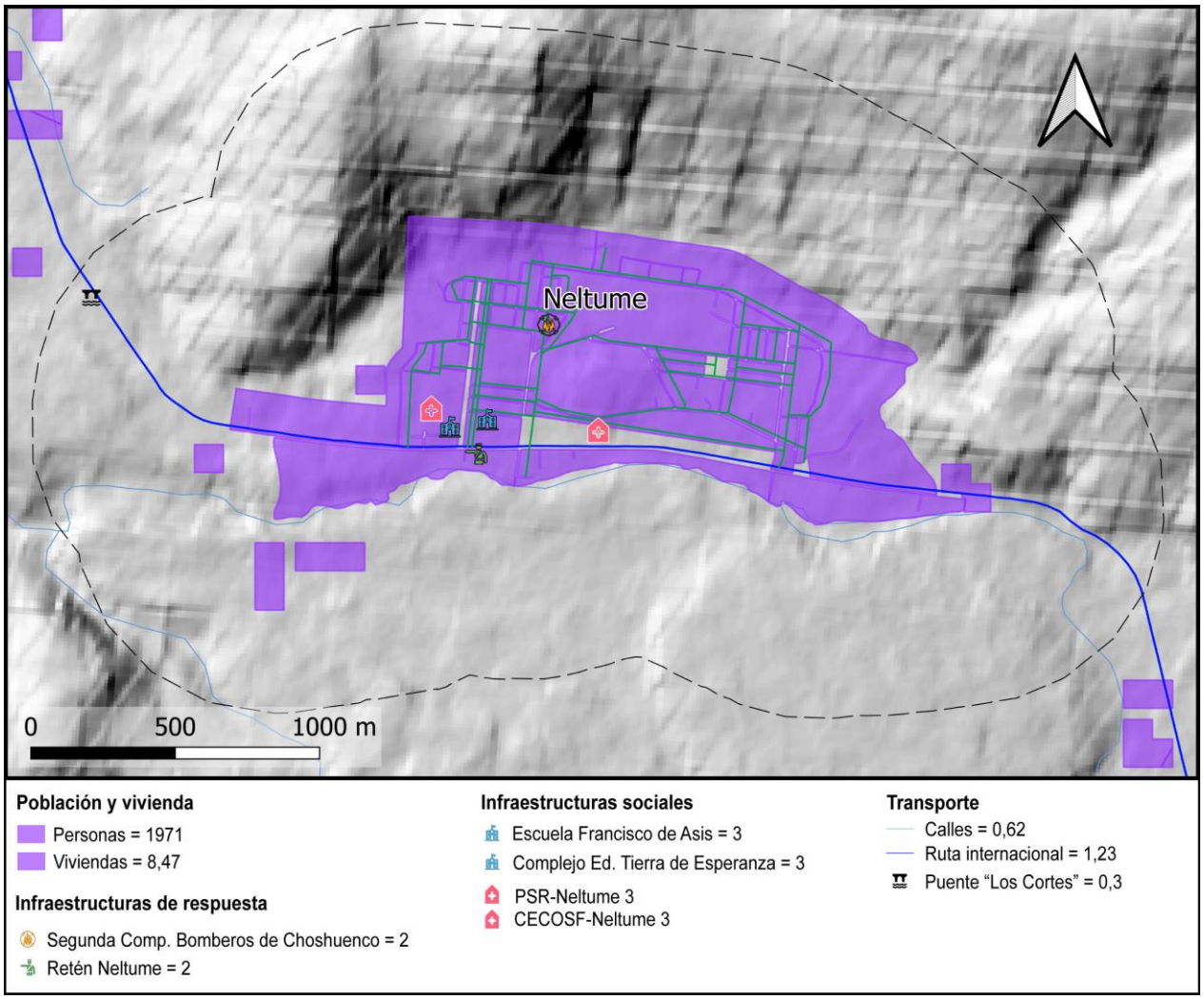


Figura 5.4. **Ejemplo de elementos que componen un poblado de acuerdo al método del buffer**. Los elementos están ponderados por sus respectivos factores de exposición (F_{exp}) de la tabla 4.3. Elaboración propia

Las ecuaciones para calcular la amenaza y exposición totales de un poblado tienen la misma forma que las ecuaciones descritas para volcanes en la sección anterior (Subcapítulo 5.3.). Sin embargo, la amenaza normalizada ($A_{pob/norm}$) es diferente, pues, en el caso de los poblados, esta corresponde al peligro ponderado en el área dentro de los límites del *buffer* independientemente si está en zona de peligro o no.

La amenaza de personas en un poblado ($AP_{poblado}$) es igual a la sumatoria de los valores de amenaza de toda el área poblada dentro del *buffer*.

$$AP_{poblado} = \sum_j AP_j \in poblado \quad (26)$$

Mientras que la amenaza de personas normalizada de un poblado es igual a su amenaza de personas total dividida por el número de personas dentro del poblado. Cabe destacar que, en el caso de los poblados, el denominador de la ecuación (27) incluye a todas las personas dentro del poblado, sin discriminar si están en zona de peligro o no. Las implicancias de esta diferencia serán tratadas en detalle en el Capítulo 7 (Discusión).

$$AP_{poblado/normalizada} = \frac{AP_{poblado}}{EP_{poblado}} (27)$$

La amenaza de infraestructuras de un poblado se calcula de acuerdo a la ecuación (28).

$$AI_{poblado} = \ AV_{poblado} + AIc_{poblado} + AR_{poblado} + AB_{poblado} \quad (28)$$

Para calcular la amenaza de infraestructuras normalizada de un poblado se debe dividir la amenaza de infraestructuras del mismo por el total de infraestructuras dentro de él, ponderadas por sus respectivos factores de exposición, lo que expresado matemáticamente resulta en la ecuación (29).

$$AI_{pob/norm} = \frac{AI_{poblado}}{EI_{poblado}} \quad \in \quad poblado (29)$$

Finalmente, el valor de amenaza total de un poblado va a estar dado por la suma euclidiana de las amenazas de personas e infraestructuras del mismo, tal como se muestra en la ecuación (30).

$$AT_{pob} = \sqrt{AP_{poblado}{}^2 + AI_{poblado}{}^2} \quad (30)$$

Por lo tanto, el valor de amenaza normalizada total del poblado (o simplemente, la amenaza normalizada del poblado) queda expresada por la ecuación (31).

$$AT_{pob/norm} = \frac{AT_{poblado}}{ET_{poblado}} \qquad (31)$$

En esta sección fueron expuestos los cálculos necesarios para llegar a los valores totales y más representativos de acuerdo al método propuesto en este trabajo. Sin embargo, esto no excluye la posibilidad de calcular valores exposición o amenaza para categorías específicas, en el caso de que resultados detallados sean de interés. Por ejemplo, si se quisiera llegar a valores de amenaza absoluta y normalizada sólo de rutas, esto sería perfectamente posible con las ecuaciones descritas, con la salvedad de utilizar solo los valores correspondientes a rutas (*ER* y *AR*).

6. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE AMENAZA VOLCÁNICA

Se elaboraron mapas de peligro y exposición detallada para cada uno de los volcanes estudiados. Como se utilizaron mapas de peligro integrado y mapas de peligro de SERNAGEOMIN, cada volcán tiene dos mapas de peligro y exposición, llegando a un total de 12 mapas. A partir de ellos se realizaron los cálculos de amenaza absoluta y normalizada, cuyos resultados se exponen en la sección 6.2.

6.1. Mapas de peligro y exposición de los volcanes estudiados

Para visualizar mejor los activos puntuales, es decir, infraestructuras críticas y puentes, estos fueron representados como *clusters*, como manera de evitar la superposición de símbolos, sin embargo, en el análisis de amenaza se utilizaron las coordenadas exactas de cada elemento. En primer lugar, se exponen los mapas con zonas de peligro integrado y luego los mapas con zonas de peligro de SERNAGEOMIN. Ambos grupos de mapas tienen similitudes y algunas diferencias notables, principalmente en la extensión y distribución de las zonas de peligro, lo que se ve reflejado en los valores de exposición y amenaza de cada volcán. El orden en que se presentan los mapas está en función de la ubicación geográfica de los volcanes de norte a sur. Los mapas presentados en las secciones 6.1.1. y 6.1.2. están disponibles para su revisión detallada en el anexo de esta memoria, donde se encuentran en una calidad superior.

6.1.1. Mapas con zonas de peligro integrado

Las Figuras 6.1. a 6.6. muestran los mapas de peligro y exposición elaborados a partir de mapas de peligro integrado para los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco.

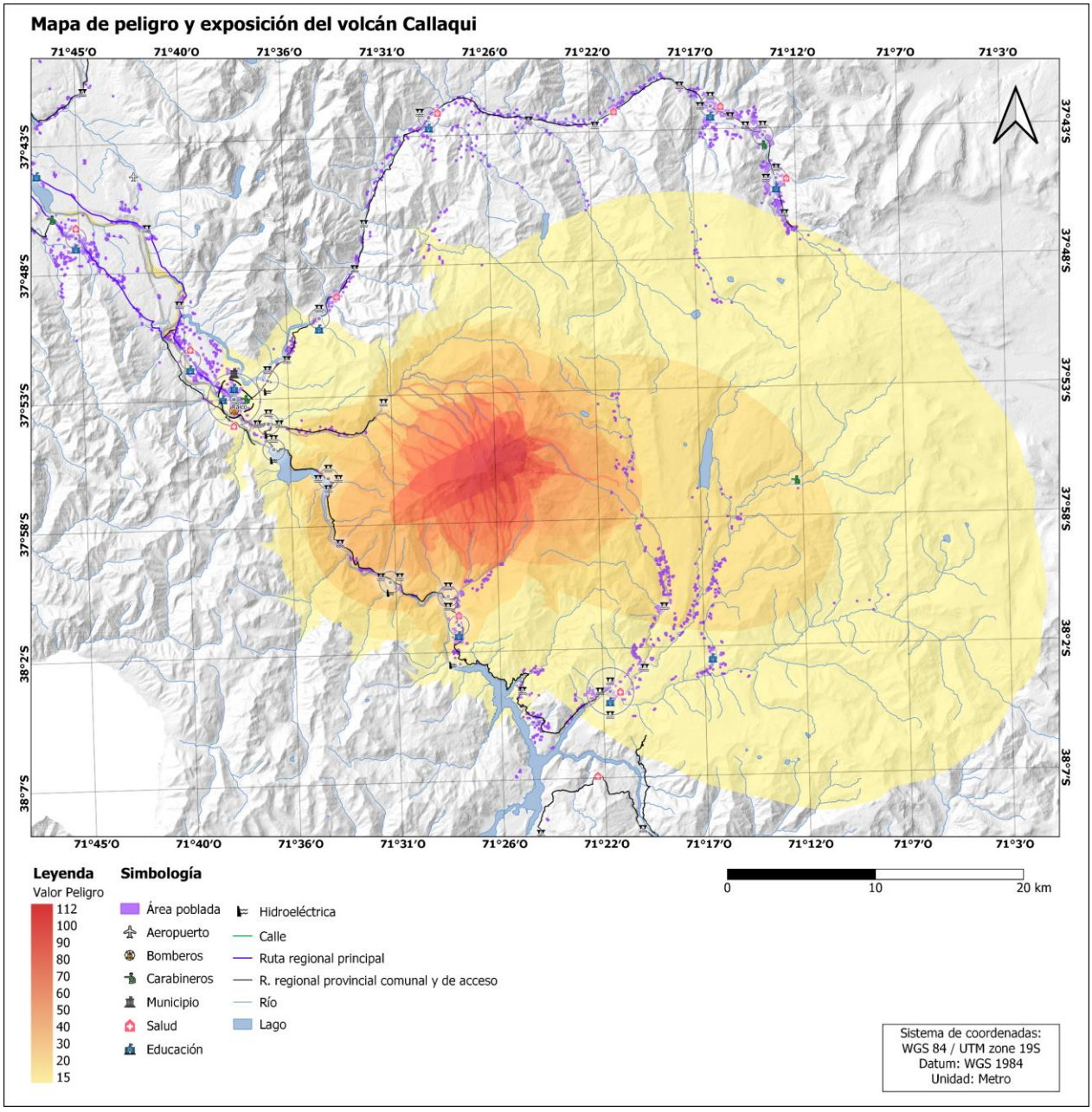


Figura 6.1. **Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Callaqui basado en zonas de peligro integrado.** Elaboración propia.

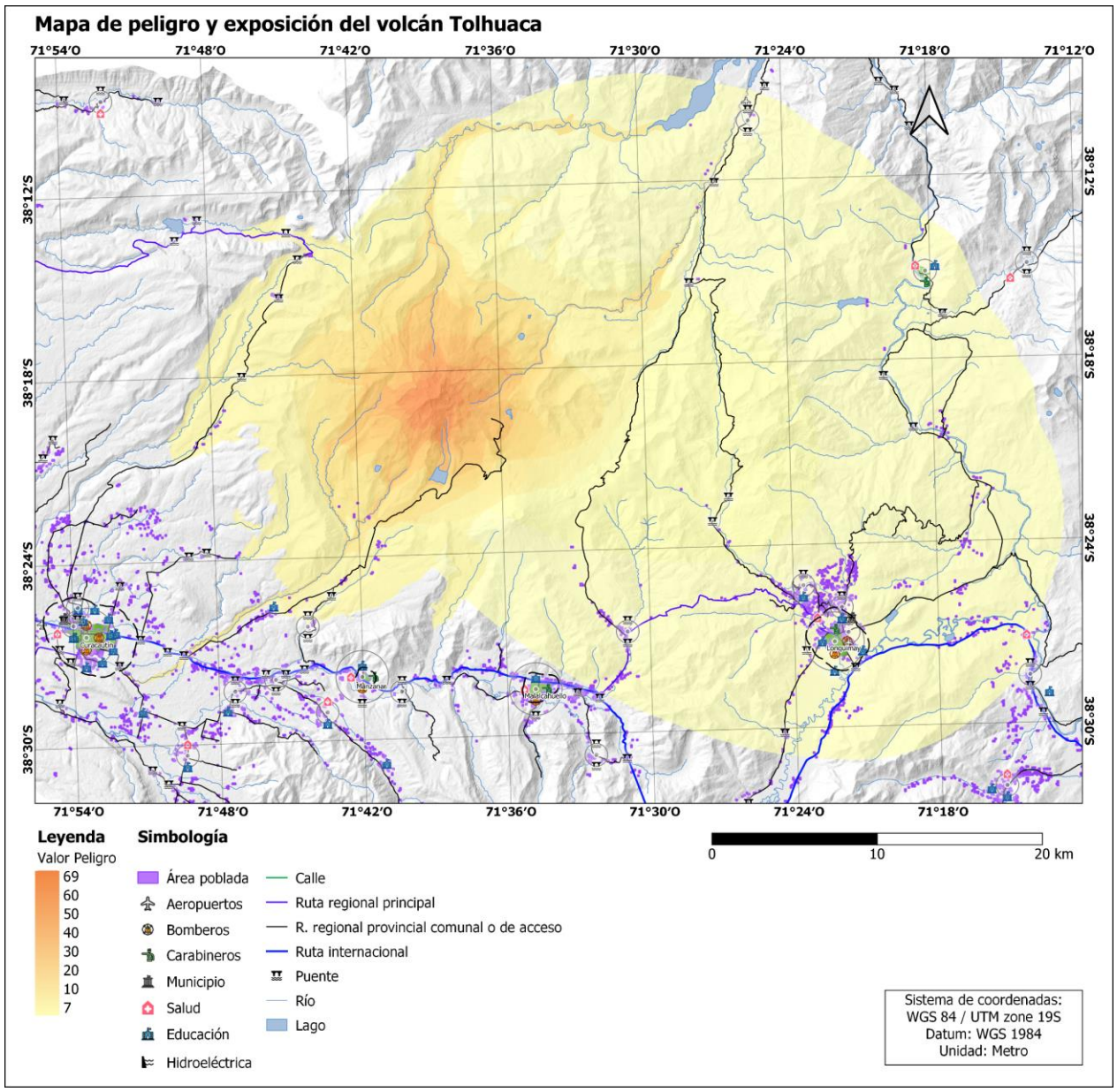


Figura 6.2. **Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Tolhuaca basado en zonas de peligro integrado.** Elaboración propia.

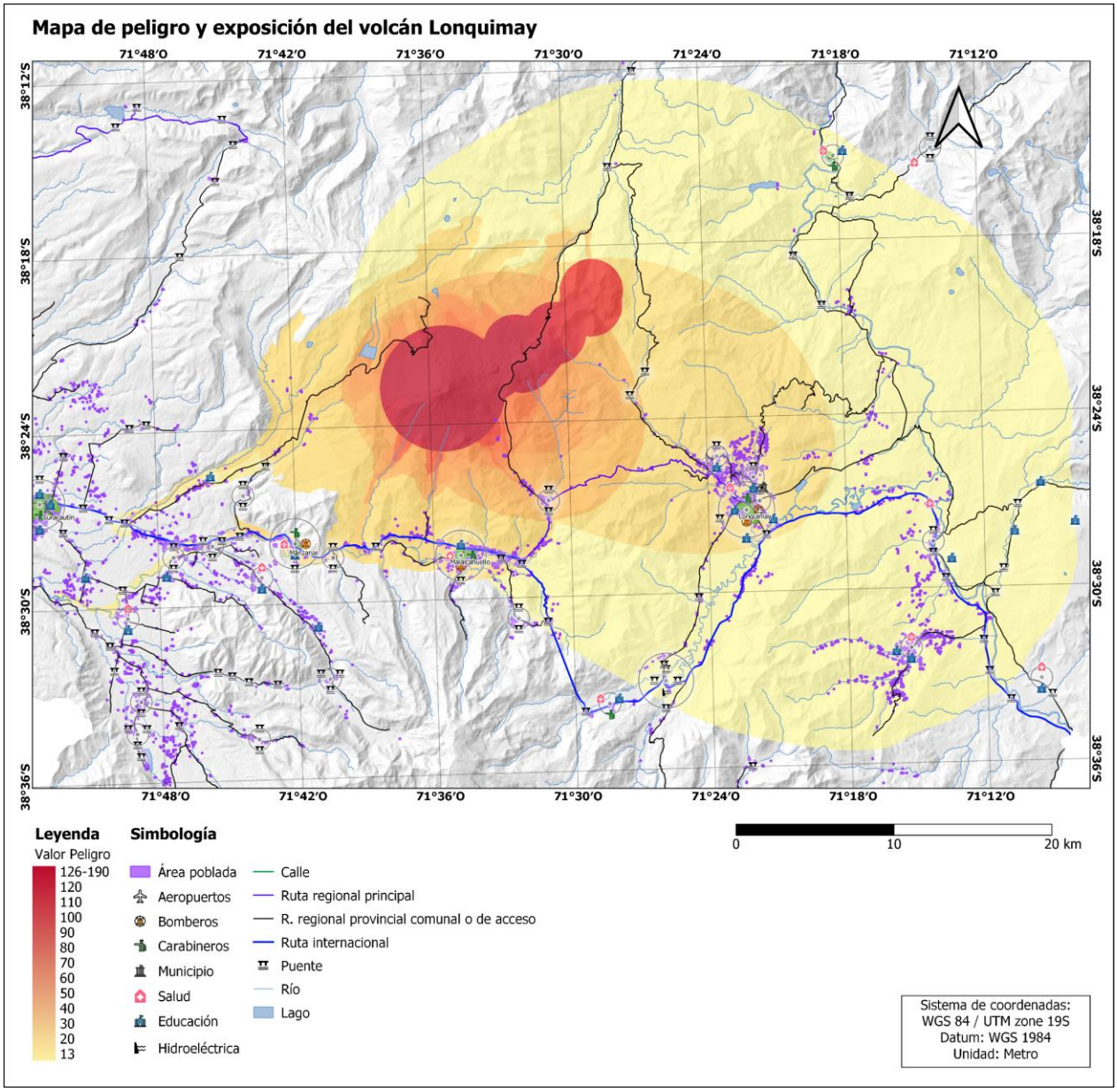


Figura 6.3. **Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Lonquimay basado en zonas de peligro integrado.** Elaboración propia.

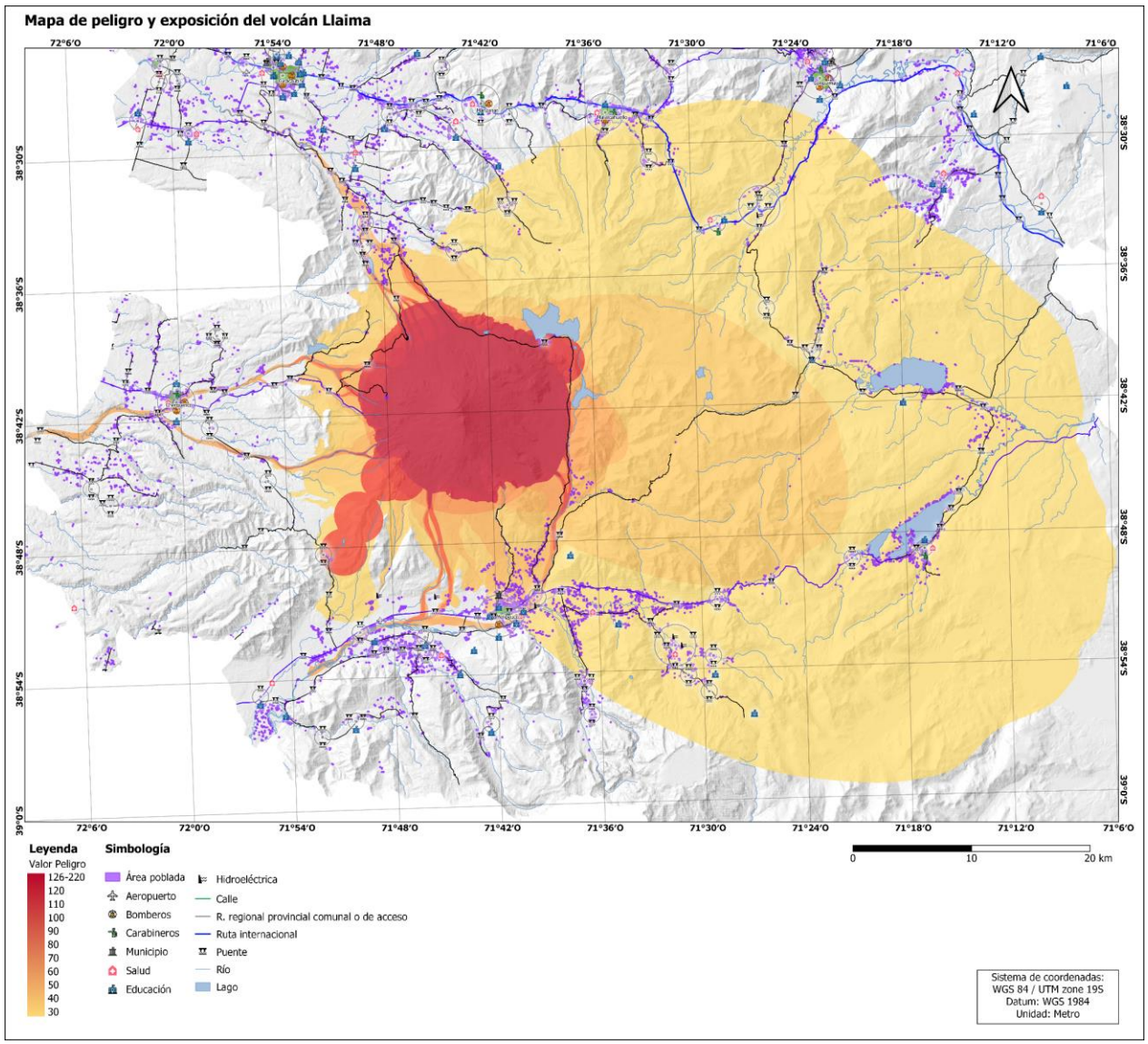


Figura 6.4. **Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Llaima basado en zonas de peligro integrado.** Elaboración propia.

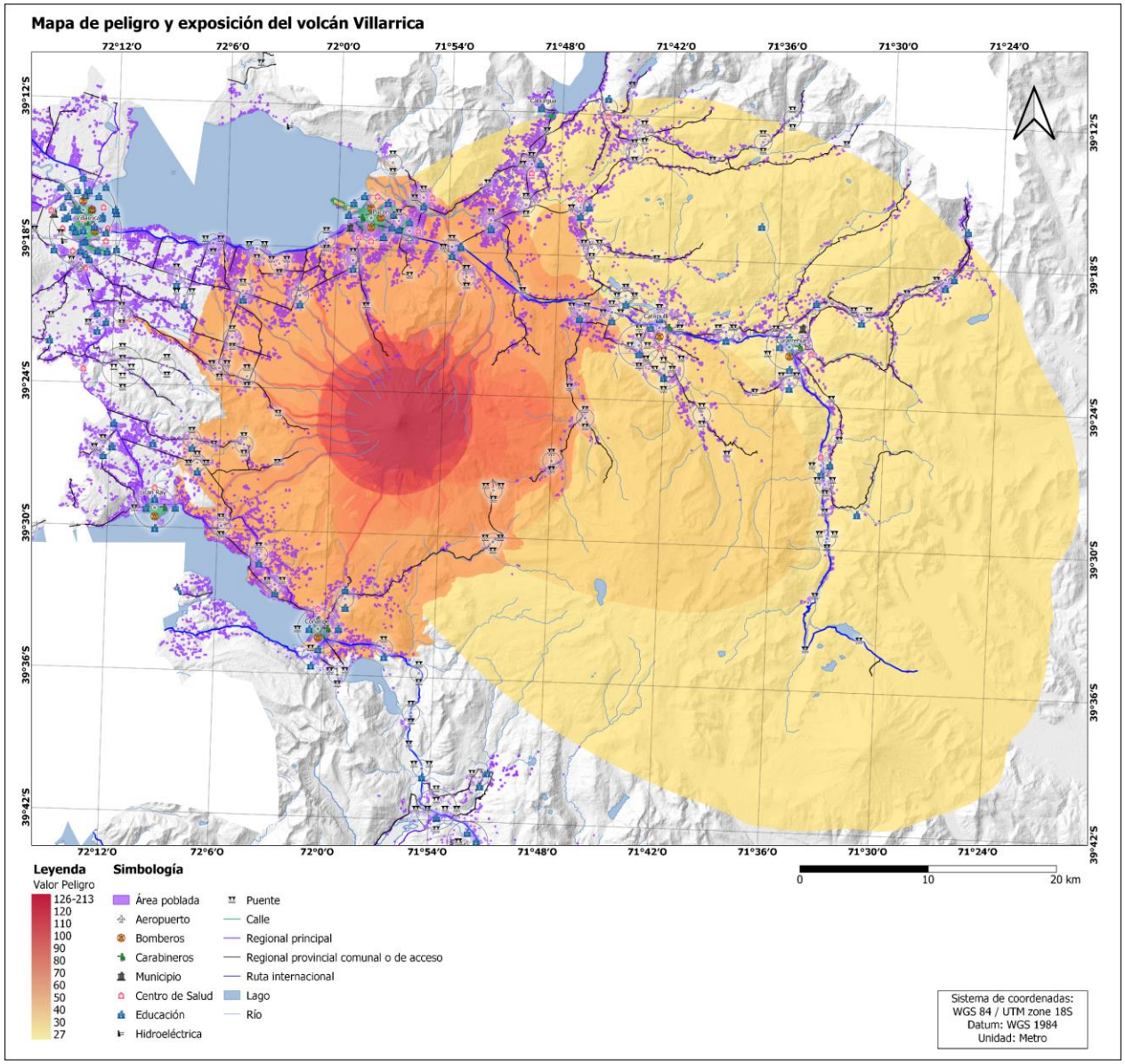


Figura 6.5. **Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Villarrica basado en zonas de peligro integrado.** Elaboración propia.

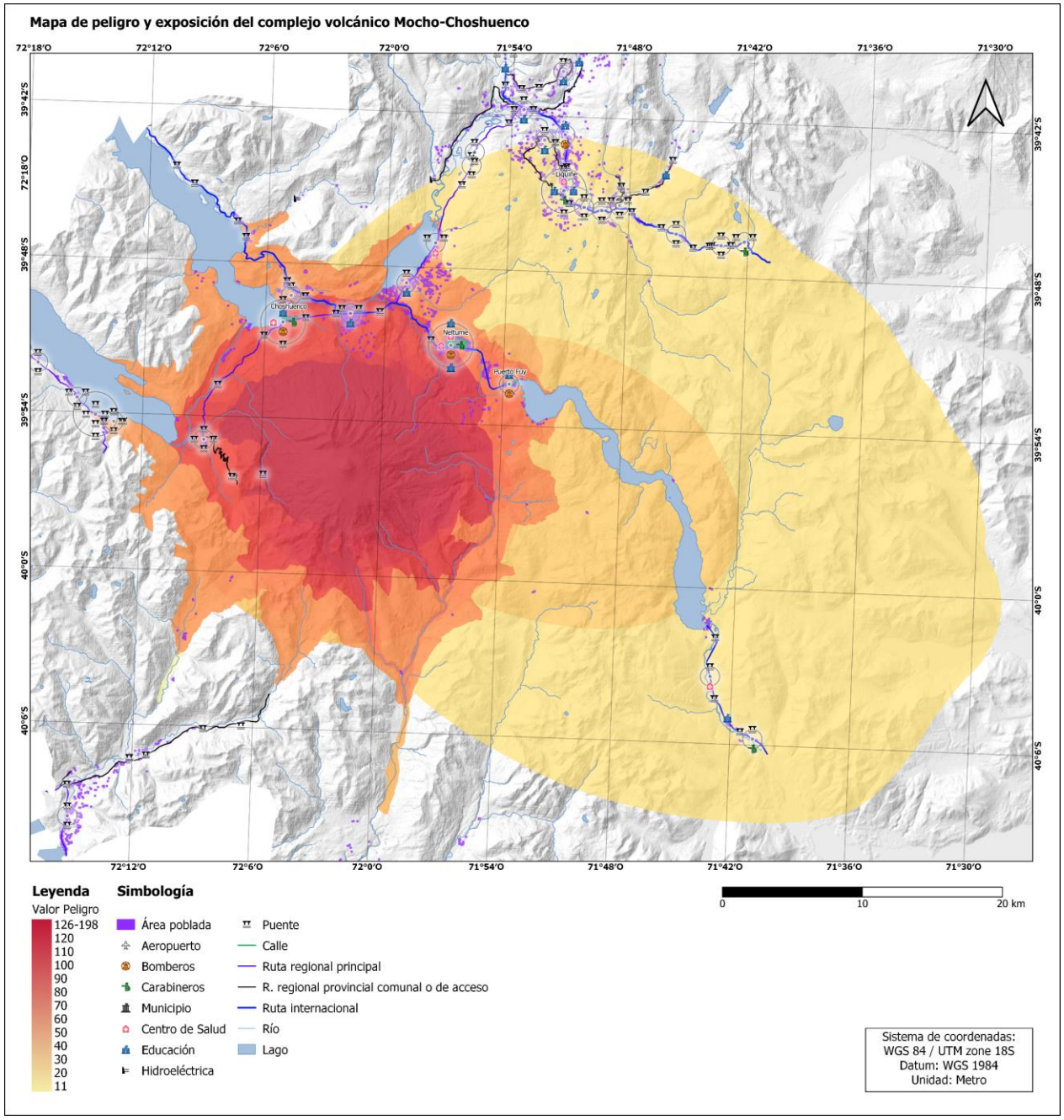


Figura 6.6. **Mapa de peligro y exposición detallada del complejo volcánico Mocho-Choshuenco basado en zonas de peligro integrado**. Elaboración propia.

6.1.2. Mapas con zonas de peligro de SERNAGEOMIN

Las Figuras 6.7. a 6.12. muestran los mapas de peligro y exposición elaborados a partir de mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

Los mapas de peligro volcánico originales de SERNAGEOMIN se construyeron utilizando diferentes metodologías, lo que resultó en representaciones heterogéneas de los fenómenos volcánicos y dificultades en la interpretación de los datos. Para abordar este problema, se adaptaron los mapas de peligro de SERNAGEOMIN para su uso en esta metodología (Subcapítulo 4.2.2.2). La homogenización de las zonas de peligro presentes en cada uno de los mapas fue parte del proceso de adaptación para tener una visión completa y coherente del peligro en la zona de estudio. Como resultado de las adaptaciones realizadas, las zonas de peligro en las Figuras 6.7 a 6.12 se ven ligeramente diferentes con respecto a los mapas originales de SERNAGEOMIN. Los cambios más notorios se refieren a las zonas de caída de ceniza, que en los mapas originales estaban marcadas con isopacas sin estar relacionadas a ningún color o nivel de peligro en particular, mientras que en los mapas adaptados, las zonas de caída de ceniza se marcan con color amarillo, correspondiente a bajo peligro. A pesar de estos cambios, se mantienen los límites de las zonas originales, que se han interpretado de manera transversal para unificar los diferentes criterios presentes en los mapas originales y posibilitar su uso en la evaluación de amenaza.

En casos particulares debieron tomarse algunas consideraciones especiales, por ejemplo, en la parte noreste del mapa de peligro del volcán Villarrica (Moreno, 2000) existe una zona correspondiente a los volcanes Huelemolle que según el mapa original es de alto peligro, pero al mismo tiempo indica una baja probabilidad de ocurrencia y además tiene un color diferente a las zonas de alto peligro en el resto del mapa, por lo que en este caso dicha zona ha sido catalogada como de bajo peligro.

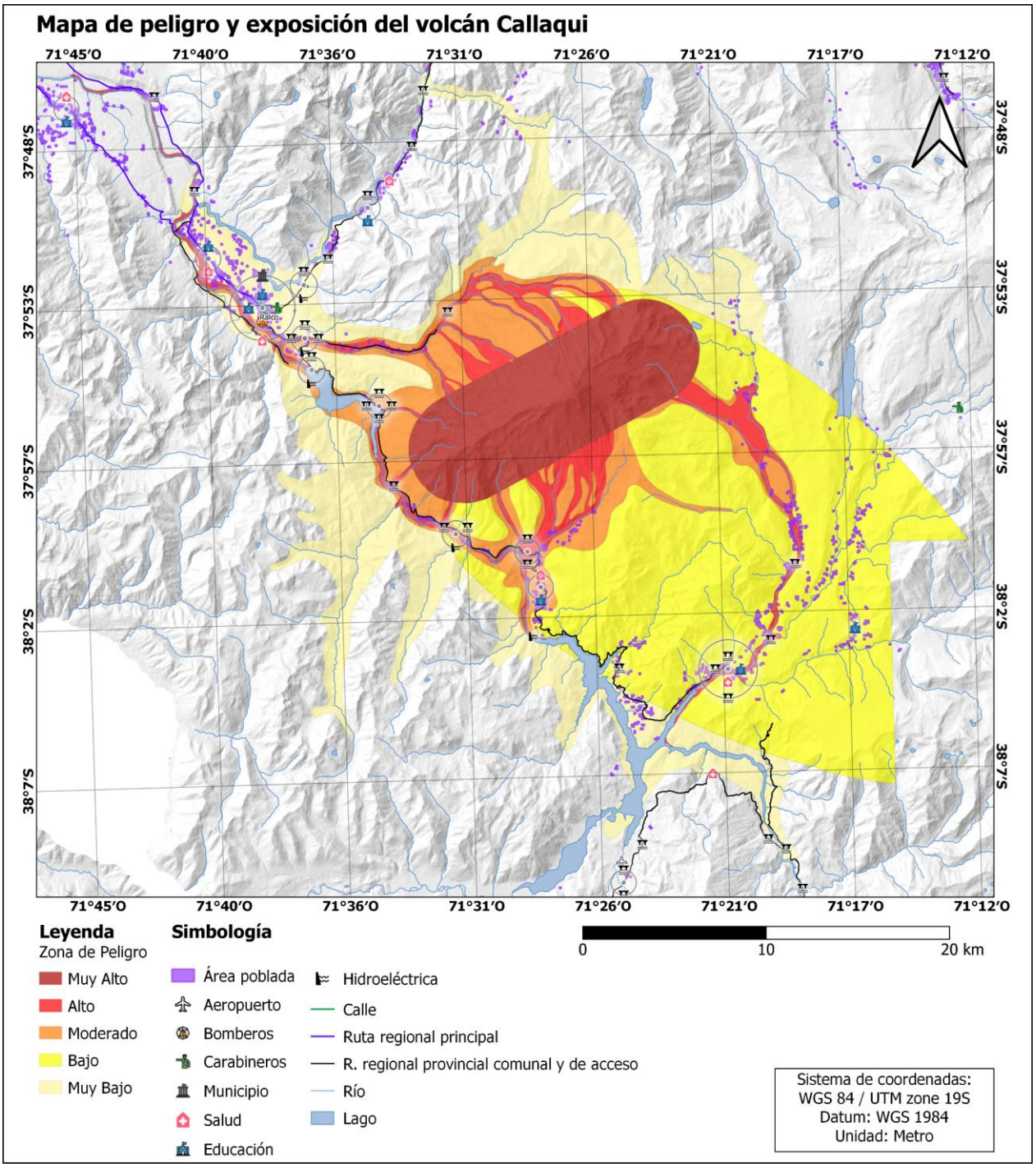


Figura 6.7. Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Callaqui basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN. Elaboración propia.

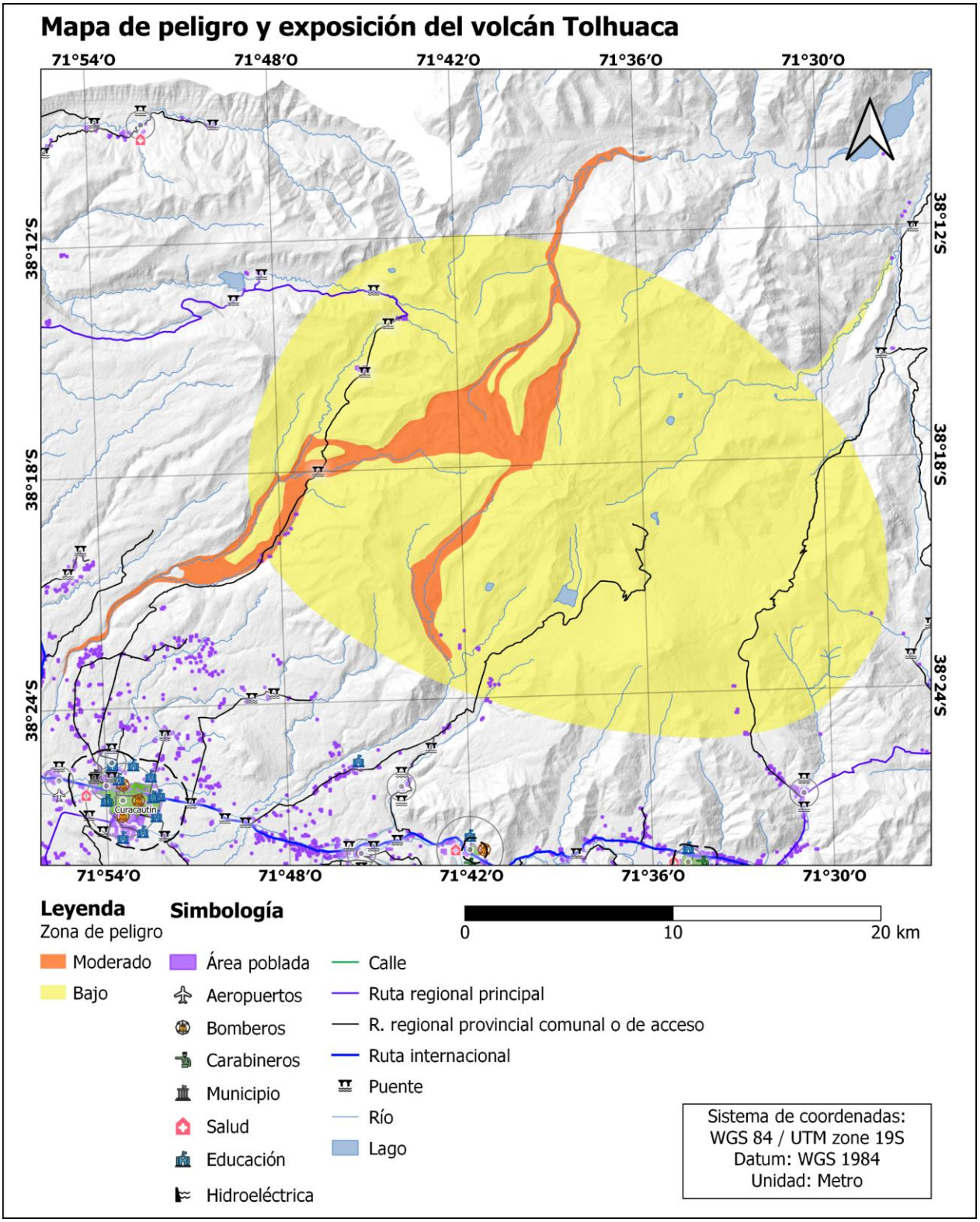


Figura 6.8. **Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Tolhuaca basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN**. Elaboración propia.

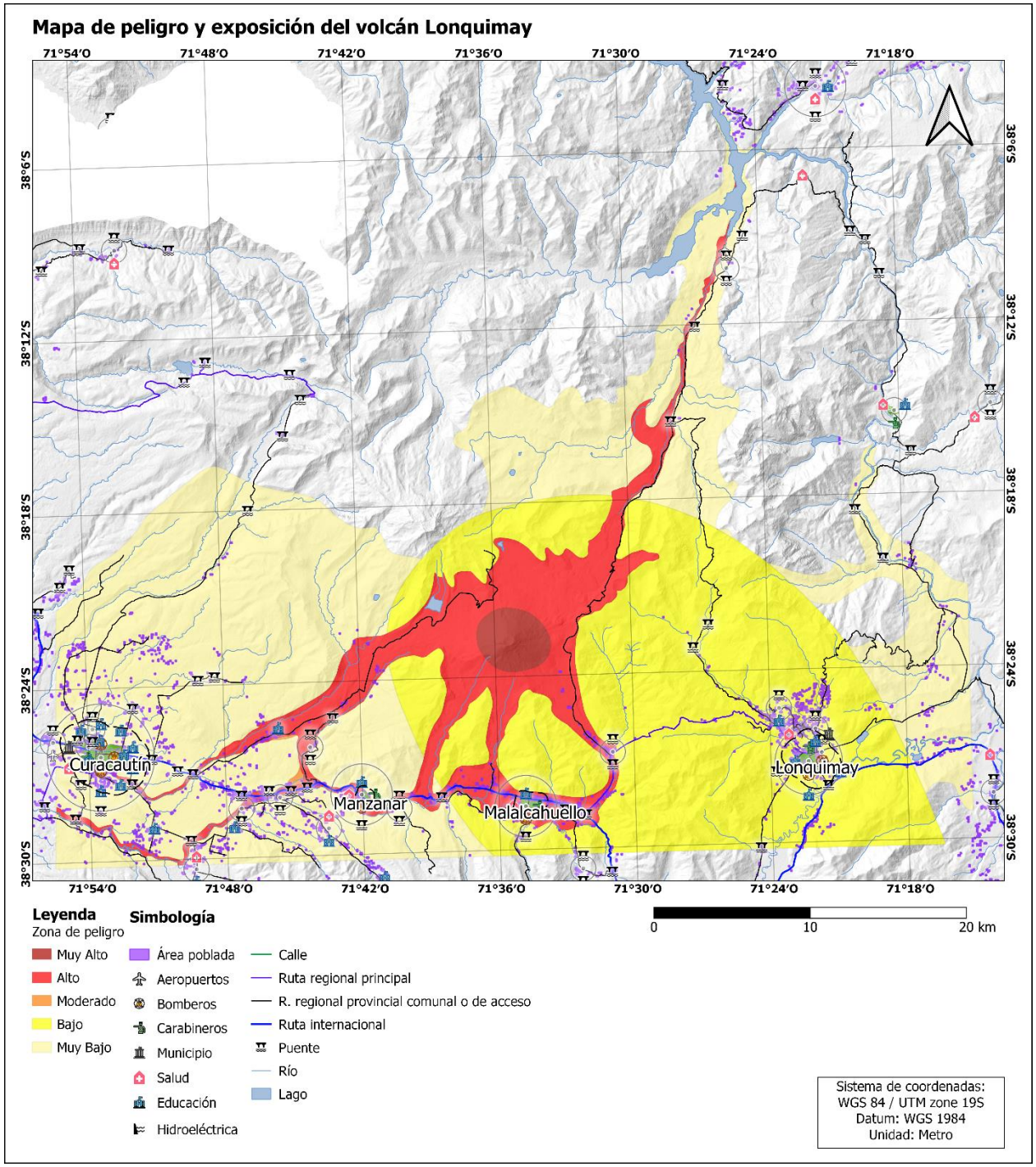


Figura 6.9. Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Lonquimay basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN. Elaboración propia.

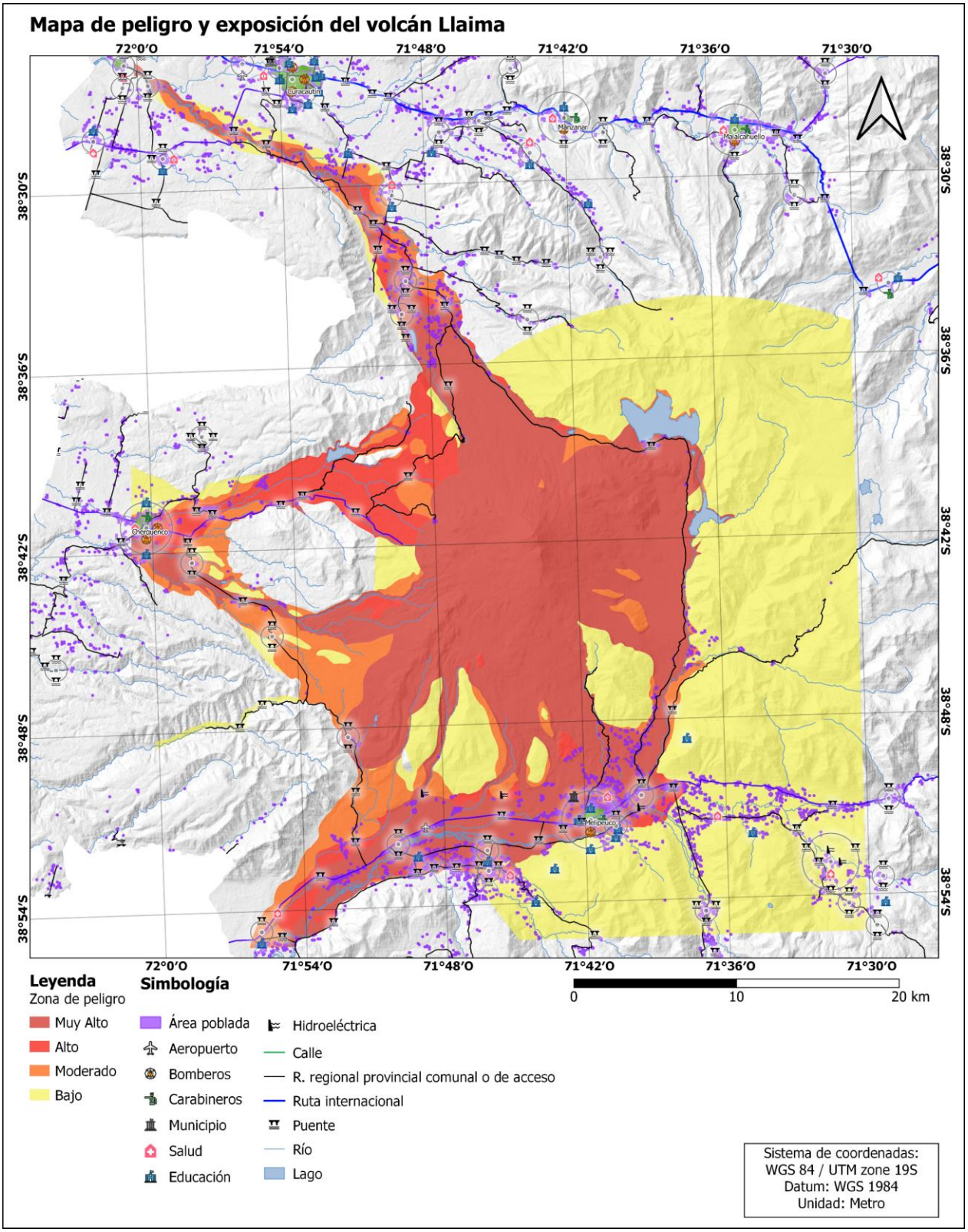


Figura 6.10. Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Llaima basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN. Elaboración propia.

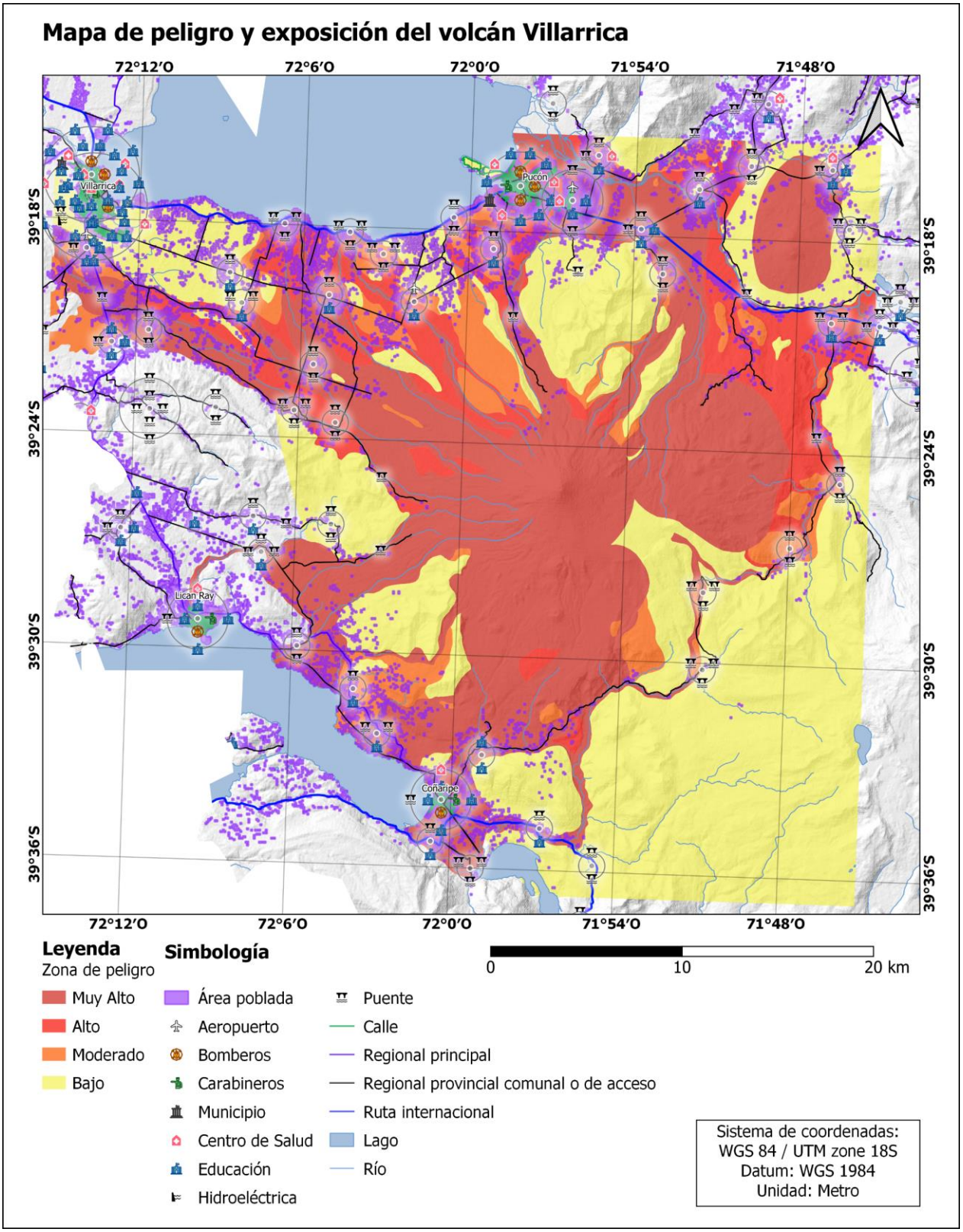


Figura 6.11. Mapa de peligro y exposición detallada del volcán Villarrica basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN. Elaboración propia.

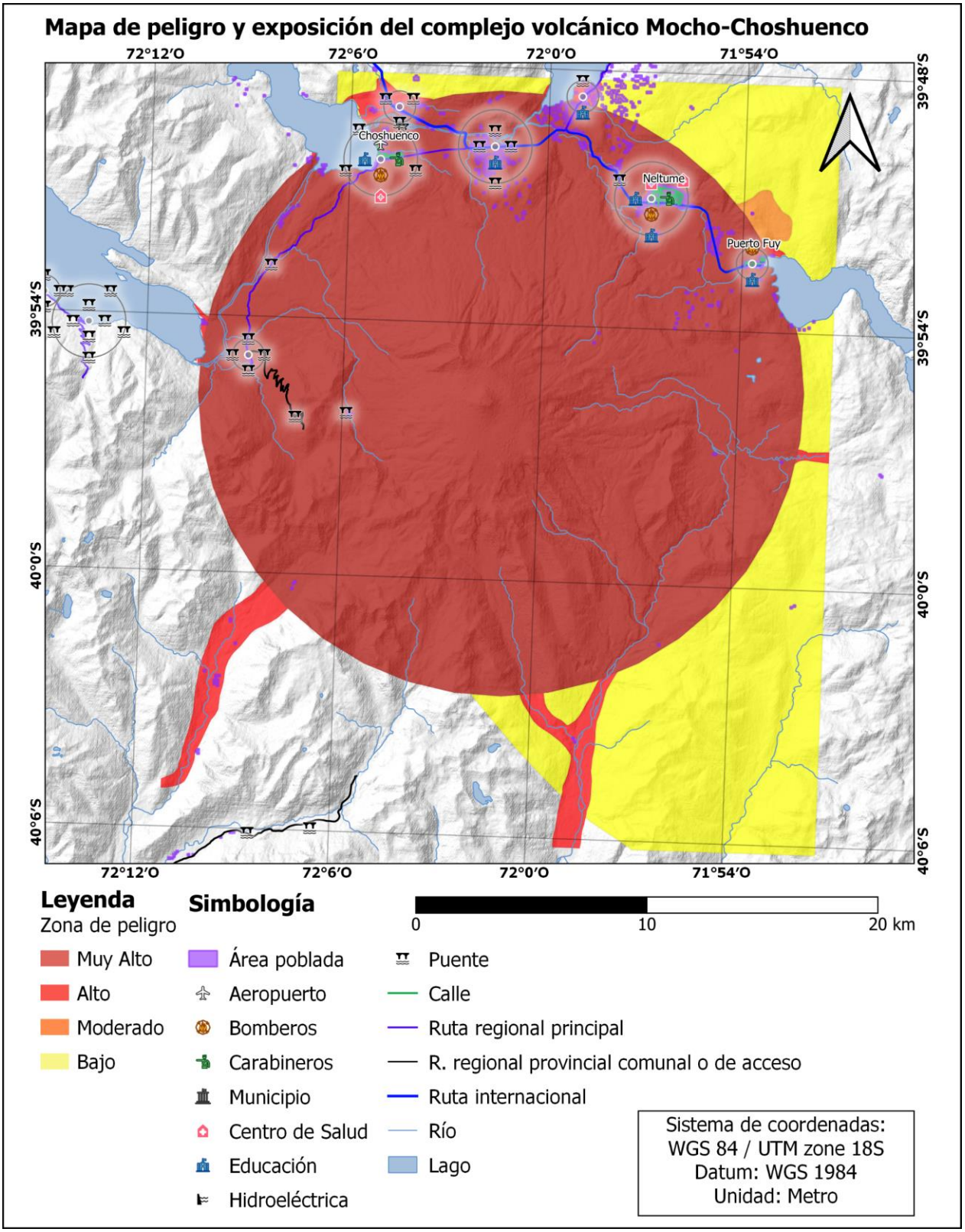


Figura 6.12. **Mapa de peligro y exposición detallada del complejo volcánico Mocho-Choshuenco basado en zonas de peligro de SERNAGEOMIN.** Elaboración propia.

6.2. Resultados de la evaluación de amenaza a nivel volcán

6.2.1. Número de elementos expuestos a cada volcán

La Tabla 6.1. muestra la cantidad de personas, viviendas, infraestructuras críticas, longitud de rutas y puentes dentro de un radio de 30 km en torno a los seis volcanes estudiados. Se consideró este radio para cuantificar los elementos presentes en torno a cada volcán y compararlos con los elementos expuestos de acuerdo a los mapas. La Tabla 6.2. contabiliza los elementos expuestos, es decir, aquellos que se encuentran dentro de las zonas de peligro de estos volcanes, según los mapas de peligro integrado. La Tabla 6.3. muestra el conteo de elementos expuestos, de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN. Comparando la Tabla 6.1. con las tablas 6.2. y 6.3. se comprueba que el número de elementos involucrados en el análisis se reduce significativamente al considerar solo las zonas de peligro de los mapas, con respecto a todos los elementos presentes dentro del radio de 30 km. Esto también remarca el hecho de que este tipo de metodología depende fuertemente de la construcción del mapa de peligros, y, por lo tanto, la importancia de contar con mapas de peligro precisos.

Tabla 6.1. **Elementos vulnerables en torno a los volcanes estudiados.** Se consideró un radio de 30 km desde el cráter principal

Volcán	Elementos dentro de un radio de 30 km				
	n.º de personas	n.º de viviendas	n.º de inf. críticas	longitud de rutas (km)	n.º de puentes
Callaqui	6836	2742	31	196,53	44
Tolhuaca	22204	10334	48	597,82	78
Lonquimay	22018	10305	51	666,77	81
Llaima	13272	6672	53	695,75	120
Villarrica	82604	46601	135	915,87	156
Mocho-Chos	8748	4254	28	211,19	85

Tabla 6.2. **Elementos expuestos a los volcanes estudiados de acuerdo a zonas de mapas de peligro integrado.**

Volcán	Elementos expuestos				
	n.º de personas	n.º de viviendas	n.º de inf. críticas	longitud de rutas (km)	n.º de puentes
Callaqui	3180	1280	18	89,605663	25
Tolhuaca	5497	2415	18	297,375451	26
Lonquimay	7453	3657	30	408,378297	43
Llaima	6855	3356	30	466,462492	84
Villarrica	39825	23995	77	696,438051	124
Mocho-Chos	5732	2717	26	146,426993	68

Tabla 6.3: **Elementos expuestos a los volcanes estudiados de acuerdo a zonas de mapas de peligro de SERNAGEOMIN.**

Volcán	Elementos expuestos				
	n.º de personas	n.º de viviendas	n.º de inf. críticas	longitud de rutas (km)	n.º de puentes
Callaqui	3661	1430	18	103,103407	25
Tolhuaca	29	29	0	57,841882	4
Lonquimay	20013	9054	42	347,660413	47
Llaima	8817	3968	32	388,967794	66
Villarrica	69138	36864	101	578,201509	80
Mocho-Chos	3994	1790	15	70,582594	20

En todos los volcanes existe una notoria diferencia entre el número de elementos dentro de un radio de 30 km y los elementos expuestos a las zonas de los mapas de peligro. La Figura 6.13. muestra una gráfica comparativa entre el número de personas en torno a los volcanes (dentro de un radio de 30 km) y las personas expuestas de acuerdo a ambos mapas de peligro. En general, los mapas de peligro integrado muestran menos población expuesta, en relación a los mapas de SERNAGEOMIN, a excepción de los volcanes Tolhuaca y Mocho-Choshuenco. Estas diferencias tienen que ver con la distribución y extensión de las zonas de los mapas de peligro. A pesar de que las zonas de peligro integrado son más extensas que las zonas de peligro de SERNAGEOMIN, en 4 de los 6 volcanes estudiados los valores de exposición son más altos al realizar la evaluación con mapas de SERNAGEOMIN, esto se explica porque en esto últimos las zonas de peligro alcanzan zonas de mayor densidad poblacional, ubicadas en la mayoría de los casos hacia el flanco oeste de los volcanes, dichas zonas representan flujos de lavas y lahares. Mientras que los mapas de peligro integrado tienen grandes zonas de caída de ceniza que se extienden hacia el este, donde suele haber menor población. La excepción es la ciudad de Lonquimay, que se encuentra al este del volcán del mismo nombre y del volcán Tolhuaca.

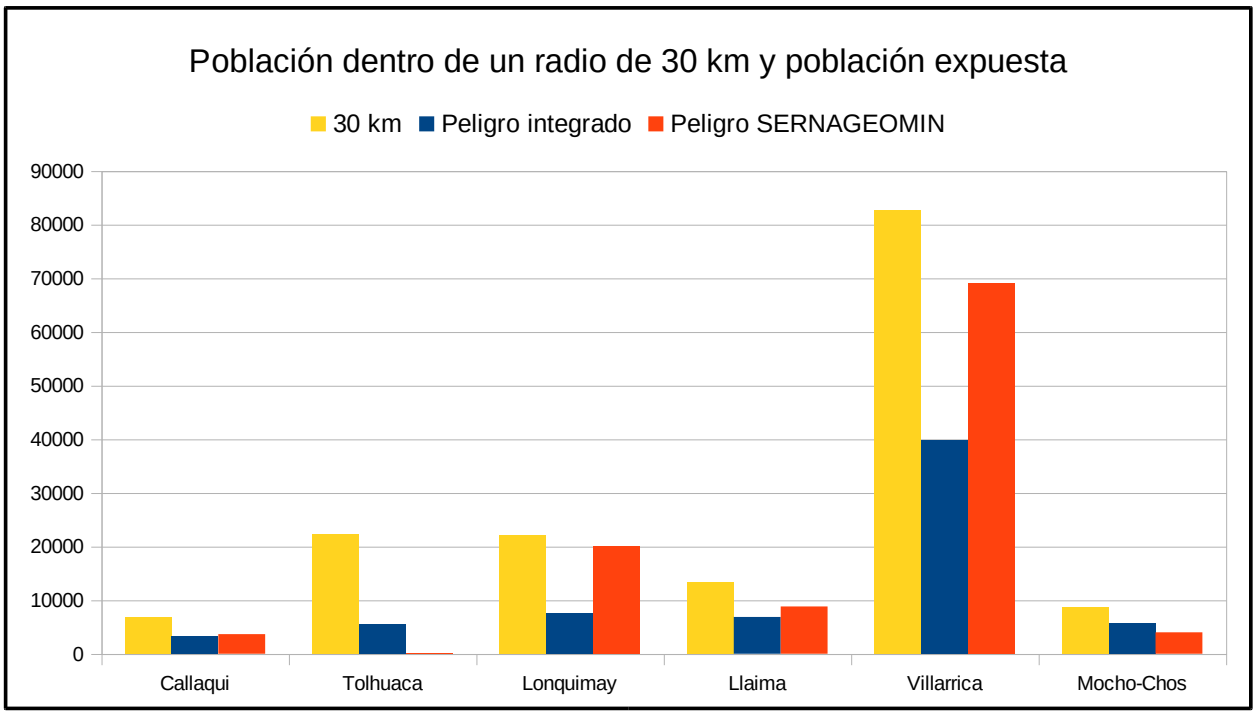


Figura 6.13. **Comparación entre el número de personas dentro de un radio de 30 km de cada volcán y el número de personas dentro de las zonas de los mapas de peligro integrado y de SERNAGEOMIN.**

6.2.2. Valores de exposición ponderados de cada volcán

Cada elemento expuesto fue ponderado por el factor de exposición correspondiente de la Tabla 4.3. Esto le confiere un valor de exposición particular a cada elemento evaluado. La sumatoria de dichos valores dan como resultado valores de exposición para el volcán. Las tablas 6.4. y 6.5. muestran los valores de exposición de cada volcán, de acuerdo a los mapas de peligro integrado y los mapas de peligro de SERNAGEOMIN, respectivamente. En dichas tablas se exponen los valores totales correspondientes a personas ($EP_{volcán}$), viviendas ($EV_{volcán}$), infraestructuras críticas ($EIc_{volcán}$), rutas ($ER_{volcán}$), puentes ($EB_{volcán}$) y exposición total ($ET_{volcán}$) de cada volcán. El uso del factor de exposición permite, además de reflejar más o menos peso, operar con elementos tan diferentes como rutas (medidas en kilómetros), personas (contadas como unidades) e infraestructuras críticas, que de otra forma no sería posible.

Tabla 6.4: **Valores de exposición a nivel volcán según zonas de peligro integrado**. Se muestran los valores de cada tipo de elemento analizado y valor de exposición total asociado a cada volcán, de acuerdo a mapas de peligro integrado.

Volcán	Exposición de elementos vulnerables					
	Exposición de personas	Exposición de viviendas	Exposición de inf. críticas	Exposición de rutas	Exposición de puentes	Valor de exposición total
Callaqui	3180	12,8	55	6,01	18,25	3181,33
Tolhuaca	5497	24,15	52	23,7	11,5	5498,13
Lonquimay	7453	36,57	77	41,17	30,5	7455,3
Llaima	6855	33,56	81	41,53	30,25	6857,53
Villarrica	39825	239,95	202	60,94	68,75	39829,1
Mocho-Chos	5732	27,17	64	28,05	79,5	5735,44

Tabla 6.5. **Valores de exposición a nivel volcán según zonas de peligro de SERNAGEOMIN**. Se muestran los valores de cada tipo de elemento analizado y valor de exposición total asociado a cada volcán, de acuerdo a los mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

Volcán	Exposición de elementos vulnerables					
	Exposición de personas	Exposición de viviendas	Exposición de inf. críticas	Exposición de rutas	Exposición de puentes	Valor de exposición total
Callaqui	3661	14,3	56	6,71	3,5	3661,89
Tolhuaca	29	0,29	0	3,69	0,35	29,32
Lonquimay	20013	90,54	115	34,63	4,95	20014,5
Llaima	8817	36,98	90	28,87	3,9	8818,5
Villarrica	69138	368,64	290	47,59	9,25	69141,7
Mocho-Chos	3994	17,9	38	12,04	4,25	3994,65

La Figura 6.14. muestra una gráfica comparativa entre los valores de exposición totales ($ET_{volcán}$) obtenidos con ambos tipos de mapa de peligro, en ella se observa que el volcán Villarrica tiene una exposición asociada mucho mayor que los demás volcanes. De acuerdo al mapa de peligro integrado, el volcán Villarrica tiene una Exposición Total 5 veces mayor que la del volcán Lonquimay y alrededor de 6 veces mayor que la del volcán Llaima. Mientras que, de acuerdo al mapa de peligro de SERNAGEOMIN, la Exposición Total en el volcán Villarrica es casi 8 veces mayor que la del volcán Llaima y 3 a 4 veces mayor que en el volcán Lonquimay. La diferencia de exposición del Villarrica con los demás volcanes es aún mayor que la que tiene con los volcanes Llaima y Lonquimay.

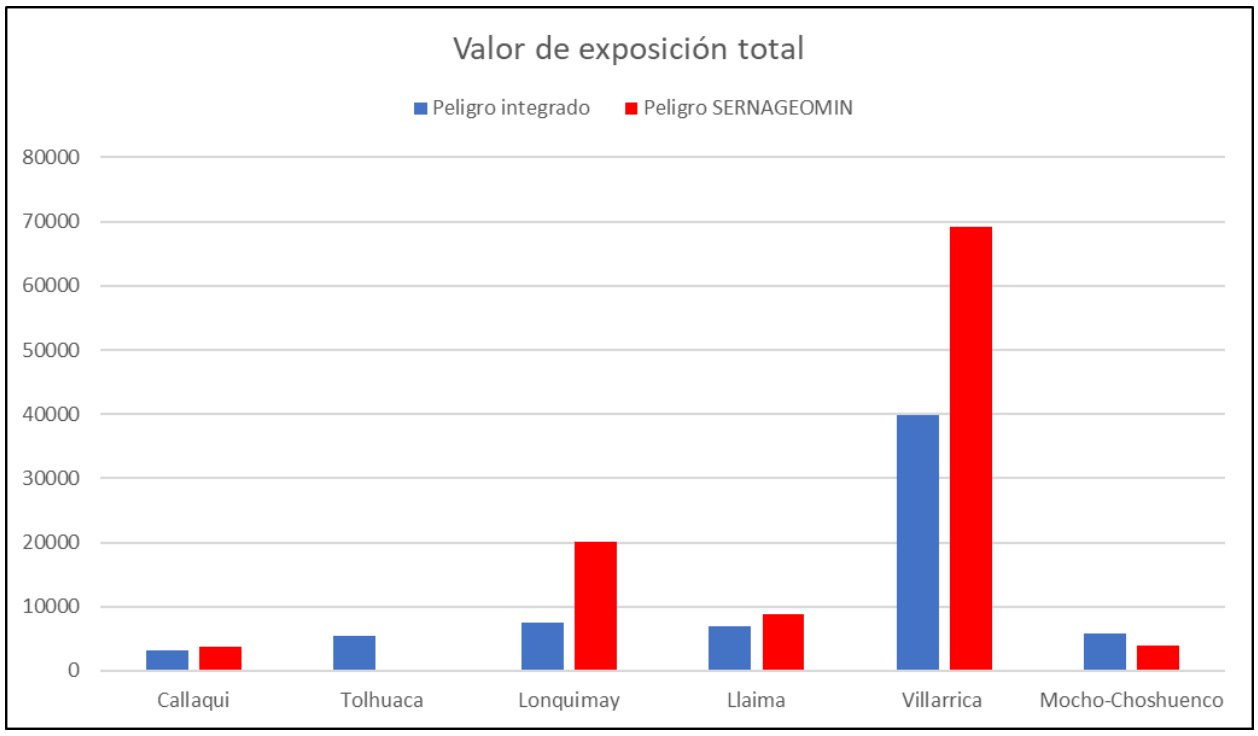


Figura 6.14: **Comparación entre valores de exposición total de acuerdo a mapas de peligro integrado y mapas de SERNAGEOMIN.** Elaboración propia.

En general, la Figura 6.14. indica que los volcanes tienen valores de exposición mayores de acuerdo a los mapas de SERNAGEOMIN. Las excepciones son los volcanes Tolhuaca y Mocho-Choshuenco. Según el mapa de peligro de SERNAGEOMIN, el volcán Tolhuaca afecta muy pocas zonas pobladas, por lo que su exposición asociada es muy baja. En el caso de Mocho-Choshuenco, la diferencia está en la extensión de las zonas de peligro, ya que en el mapa de peligro integrado las zonas de caída de ceniza afectan hasta el poblado de Liquiñe, mientras que en el mapa de SERNAGEOMIN no es posible saber hasta donde llegan las zonas de peligro, ya que están cortadas por los bordes del mapa.

La relación entre la cantidad de personas expuestas y el valor de exposición total de los volcanes será revisada en detalle en el Capítulo 7 de esta memoria.

6.2.3. Amenaza absoluta de los volcanes estudiados

Las tablas 6.6. y 6.7. muestran los valores de amenaza absoluta de cada volcán. En este caso los valores de amenaza no pueden ser presentados en una misma gráfica comparativa, pues, tal como fue indicado en el Capítulo 5, los mapas de SERNAGEOMIN tienen una construcción y criterios diferentes a los mapas de peligro integrado, por lo cual fueron adaptados para cuantificar el peligro en ellos representado (Subcapítulo 4.2.2.). Por lo tanto, no es posible comparar directamente los valores de amenaza obtenidos con mapas de peligro diferentes. Lo que sí se puede comparar es la posición de los volcanes en cada uno de los rankings y que tanto varía la amenaza de un puesto a otro, dependiendo del insumo de peligro utilizado (mapas). La Figura 6.15. muestra los rankings de amenaza volcánica con mapas de peligro integrado y mapas de SERNAGEOMIN, donde además se muestra gráficamente los puntajes de amenaza del Ranking de Riesgo Específico de SERNAGEOMIN.

Tabla 6.6: **Valores de amenaza absoluta a nivel volcán según zonas de peligro integrado.** Valores a nivel volcán de cada tipo de elemento analizado y valor de amenaza total asociado a cada volcán, de acuerdo a mapas de peligro integrado.

Volcán	Valores de amenaza absoluta					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Valor de amenaza total
Callaqui	69388	289,81	1285	170,34	728,5	69432,08
Tolhuaca	41230	183,41	436	224,34	139,5	41241,72
Lonquimay	197253	974,8	1857	1054,06	706,25	197306,45
Llaima	262032	1285,57	3127	1772,71	1268,25	262137,99
Villarrica	2186323	13304,24	9937	2868,38	3368,75	2186521,72
Mocho-Chos	406575	1890,2	4605	1761,24	4271	406767,95

Tabla 6.7: **Valores de amenaza absoluta a nivel volcán según zonas de peligro SERNAGEOMIN.** Valores nivel volcán de cada tipo de elemento analizado y valor de amenaza total asociado a cada volcán, de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

Volcán	Valores de amenaza absoluta					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Valor de amenaza total
Callaqui	1530080	6414,4	33920	3784,65	2624	1530793,82
Tolhuaca	5280	56	0	692,24	72	5343,33
Lonquimay	6910880	36017,6	49600	26068,95	4984	6911864,75
Llaima	22311300	98417	206580	66568,16	9724	22314557,78
Villarrica	124190110	751511,2	542110	112889,82	27335,5	124198387,02
Mocho-Chos	12329290	55035,4	122740	37632,77	12663,5	12331399,30

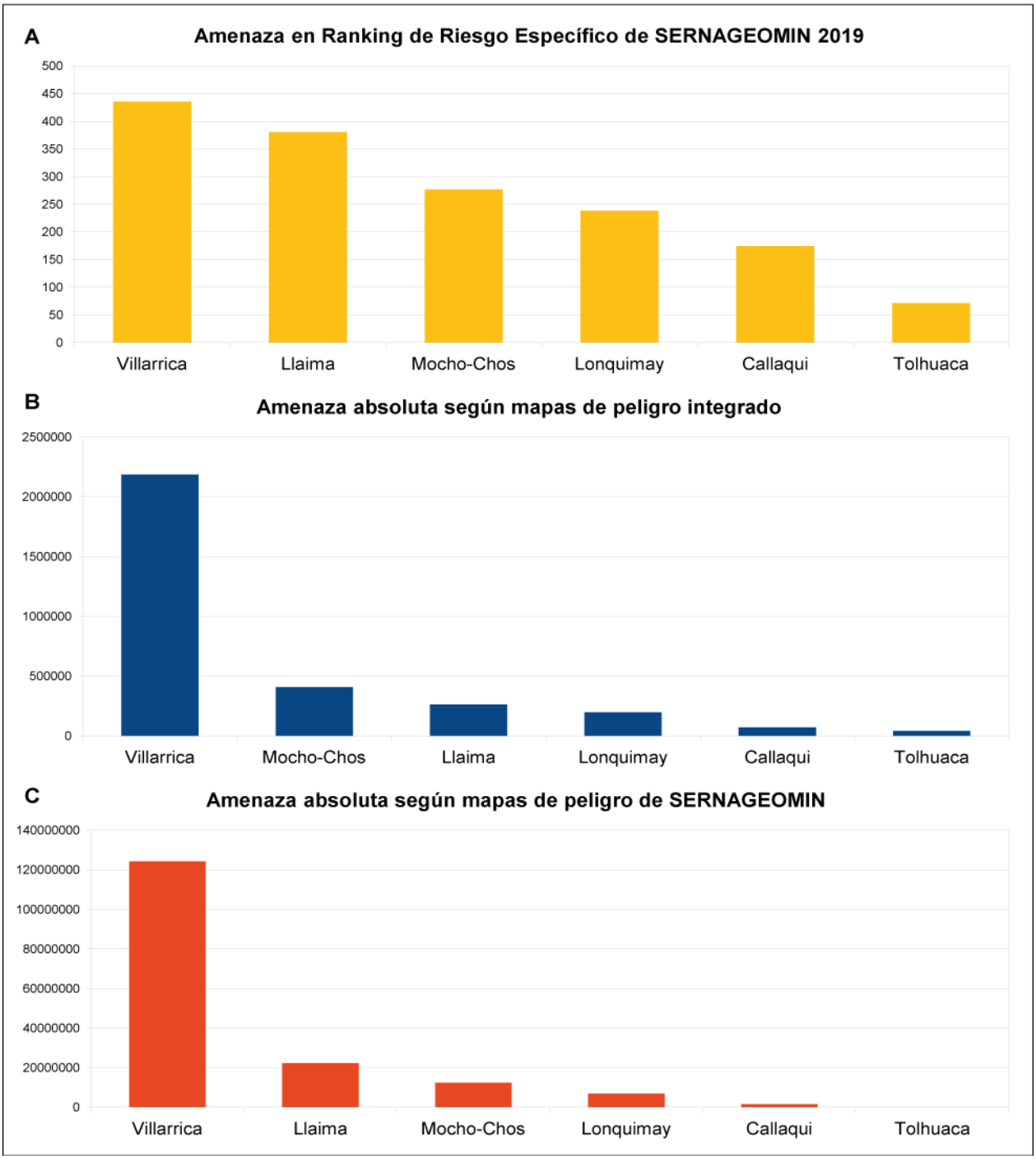


Figura 6.15. **Valores de amenaza absoluta de los volcanes estudiados**. A: valores de amenaza absoluta. De acuerdo al Ranking de Riesgo Específico de SERNAGEOMIN del año 2019. B: Valores de amenaza absoluta de acuerdo a mapas de peligro integrado, usando la metodología propuesta en este trabajo. C: Valores de amenaza absoluta de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN, usando la metodología propuesta en este trabajo. Elaboración propia.

El Villarrica es el volcán que indiscutiblemente posee la mayor amenaza absoluta, ocupando la primera posición del ranking con amplia diferencia, según ambos tipos de mapa. La diferencia más notable entre ambos grupos está en el volcán que ocupa la segunda posición. El complejo volcánico Mocho-Choshuenco se ubica en el segundo puesto de acuerdo a mapas de peligro integrado, mientras que, según los mapas de SERNAGEOMIN, este lugar lo ocupa el volcán Llaima. Los volcanes Lonquimay, Callaqui y Tolhuaca se ubican de forma decreciente en los puestos 4°, 5° y 6°. La abultada brecha entre el volcán Villarrica y todos los demás volcanes se explica por la gran exposición asociada a este volcán (Figura 6.14.), lo cual no se ve reflejado de forma tan notoria en el Ranking de Riesgo Específico. Esta notable diferencia radica en que el Ranking de Riesgo Específico (método NVEWS) utiliza el logaritmo del número de personas expuestas en su evaluación y en la metodología propuesta en este trabajo se cuenta cada persona expuesta de forma directa. Mientras que la diferencia entre los valores de amenaza del volcán Villarrica entre ambos tipos de mapa se le puede atribuir a dos hechos concretos: i) la extensión de las zonas de peligro hacia el oeste del volcán, en el caso del mapa de SERNAGEOMIN, abarcan hasta la ciudad de Villarrica, incrementando fuertemente la exposición y ii) la distribución de las zonas de peligro, ya que en el mapa de peligro integrado la mayoría de los elementos están expuestos a un nivel moderado de peligro, mientras que en el mapa de SERNAGEOMIN estos se encuentran mayoritariamente en zonas de alto a muy alto peligro, incluyendo a la ciudad de Pucón.

6.2.4. Amenaza normalizada de los volcanes estudiados

El valor de amenaza normalizada corresponde al peligro ponderado entre los elementos expuestos, es decir, relaciona el valor de amenaza absoluta con el valor de exposición total de cada volcán. Las tablas 6.8. y 6.9. muestran los valores de amenaza normaliza de cada categoría de elementos analizados y la amenaza total normalizada de cada volcán, para los mapas de peligro integrado y los mapas de peligro de SERNAGEOMIN, respectivamente. La figura 6.16. expone los valores de amenaza normalizada ordenados de mayor a menor, para mapas de peligro integrado y mapas de SERNAGEOMIN.

Tabla 6.8. **Valores de amenaza normalizada a nivel volcán según zonas de peligro integrado.** Se muestran los valores de cada tipo de elemento analizado y valor de amenaza total normalizada asociado a cada volcán, de acuerdo a mapas de peligro integrado.

Volcán	Valores de amenaza normalizada según peligro integrado					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Total
Callaqui	21.82	22.64	23.36	28.34	39.92	21.82
Tolhuaca	7.50	7.59	8.38	9.47	12.13	7.50
Lonquimay	26.47	26.66	24.12	25.60	23.16	26.47
Llaima	38.22	38.31	38.60	42.69	41.93	38.23
Villarrica	54.90	55.45	49.19	47.07	49.00	54.90
Mocho-Chos	70.93	69.57	71.95	62.78	53.72	70.92

Tabla 6.9. **Valores de amenaza normalizada a nivel volcán según zonas de peligro SERNAGEOMIN**. Se muestran los valores de cada tipo de elemento analizado y valor de amenaza total normalizada asociado a cada volcán, de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

Volcán	Valores de amenaza normalizada según peligro SERNAGEOMIN					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Total
Callaqui	417.94	448.56	605.71	564.16	749.71	418.03
Tolhuaca	182.07	193.10	0.00	187.68	205.71	182.23
Lonquimay	345.32	397.81	431.30	752.72	1006.87	345.34
Llaima	2530.49	2480.27	2295.33	2306.07	2493.33	2530.43
Villarrica	1796.26	2038.60	1869.34	2372.01	2955.19	1796.29
Mocho-Chos	3086.95	3074.60	3230.00	3125.04	2979.65	3086.98

El complejo volcánico Mocho-Choshuenco es el que tiene mayor amenaza normalizada, según ambos tipos de mapa. Esto se explica porque en este complejo volcánico tiene zonas de alto a muy alto peligro que son extensas (Figuras 6.6. y 6.12.) y en proporción tiene mayor exposición relacionadas a zonas de elevado peligro, con respecto a los demás volcanes. Estas zonas corresponden a eventos explosivos, en concreto, a fenómenos de corrientes de densidad piroclástica (CDP) y caída de piroclastos balísticos.

El segundo y tercer lugar lo ocupan los volcanes Villarrica y Llaima. De acuerdo a los mapas de peligro integrado, el segundo volcán con mayor amenaza normalizada es el volcán Villarrica, el cual tiene una elevada exposición asociada y donde la mayoría de los elementos expuestos están en zonas de moderado peligro.

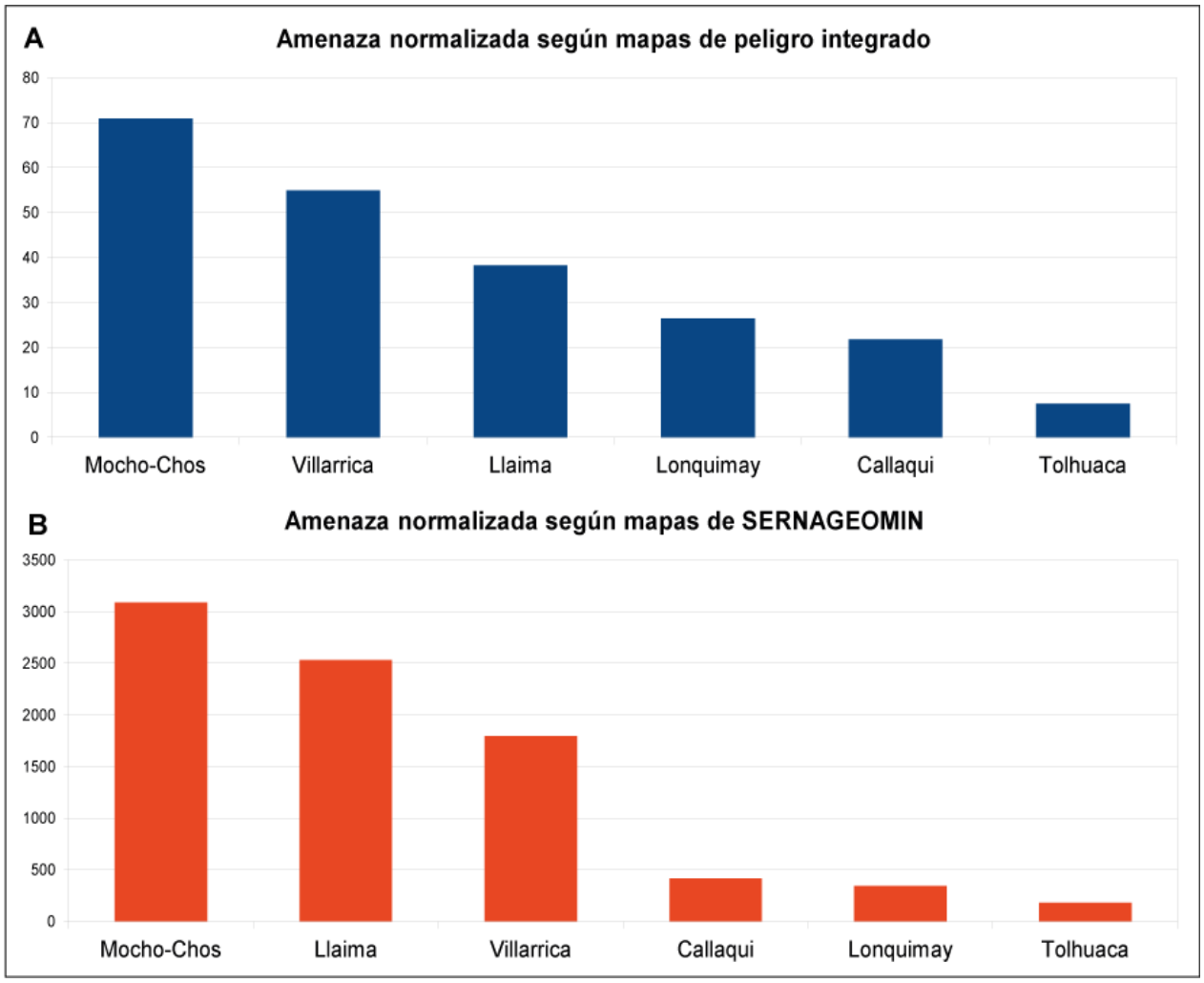


Figura 6.16. **Valores de amenaza total normalizada de los volcanes estudiados.** A: Resultados de acuerdo a mapas de peligro integrado. B: Resultados de acuerdo a mapas SERNAGEOMIN. Elaboración propia.

Según las zonas de peligro de SERNAGEOMIN, el volcán Llaima es el segundo con mayor amenaza normalizada, ya que tal como se observa en el mapa (Figura 6.8.) las zonas de muy alto peligro cubren áreas con numerosa población e infraestructura, como la ciudad de Melipeuco. Mientras que el volcán Villarrica queda en el tercer lugar, ya que, a pesar de tener una distribución de peligro comparable a la del mapa del volcán Llaima, una porción importante de la exposición está en la ciudad de Villarrica, que en este caso está cubierta, casi en su totalidad, por una zona de bajo peligro.

Los volcanes Lonquimay, Callaqui y Tolhuaca ocupan las 3 posiciones más bajas, dado que alcanzan niveles de peligro menores en comparación a los 3 volcanes que encabezan la lista.

6.3. Mapas de peligro y exposición de los poblados en torno a los volcanes

Esta metodología no solo posibilita obtener un valor de amenaza representativo de un volcán, sino que también permite analizar zonas de interés específicas en torno a los centros volcánicos estudiados. La mayor parte de la población asentada en torno a los volcanes se ubica en ciudades y poblados, por lo cual es importante evaluar la situación de estos centros urbanos con respecto al peligro y, por ende, calcular su amenaza volcánica es de suma importancia.

Según el análisis realizado en base a mapas de peligro de SERNAGEOMIN, 14 poblados se encuentran amenazados, donde el volcán Villarrica es el que más poblados amenaza, con un total de 4 poblados.

6.3.1. Mapas con zonas de peligro integrado

De acuerdo a los mapas de peligro integrado, un total de 17 poblados se encuentran amenazados por los 6 volcanes estudiados, siendo el volcán Villarrica el que amenaza a la mayor cantidad de ellos, con un total de 6. Las figuras 6.17. a 6.35. muestran los mapas de peligro y exposición detallada elaborados a partir de mapas de peligro integrado para los poblados amenazados por los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco. En el título de cada mapa se indica el nombre del poblado y el volcán al que se encuentra expuesto. Para los poblados expuestos a más de un volcán, se muestra su situación individual respecto a las zonas de peligro de cada volcán. Este es el caso de Lonquimay, amenazado por el volcán Lonquimay y el volcán Tolhuaca; y de Malalcahuello, amenazado por el Lonquimay y el volcán Llaima.

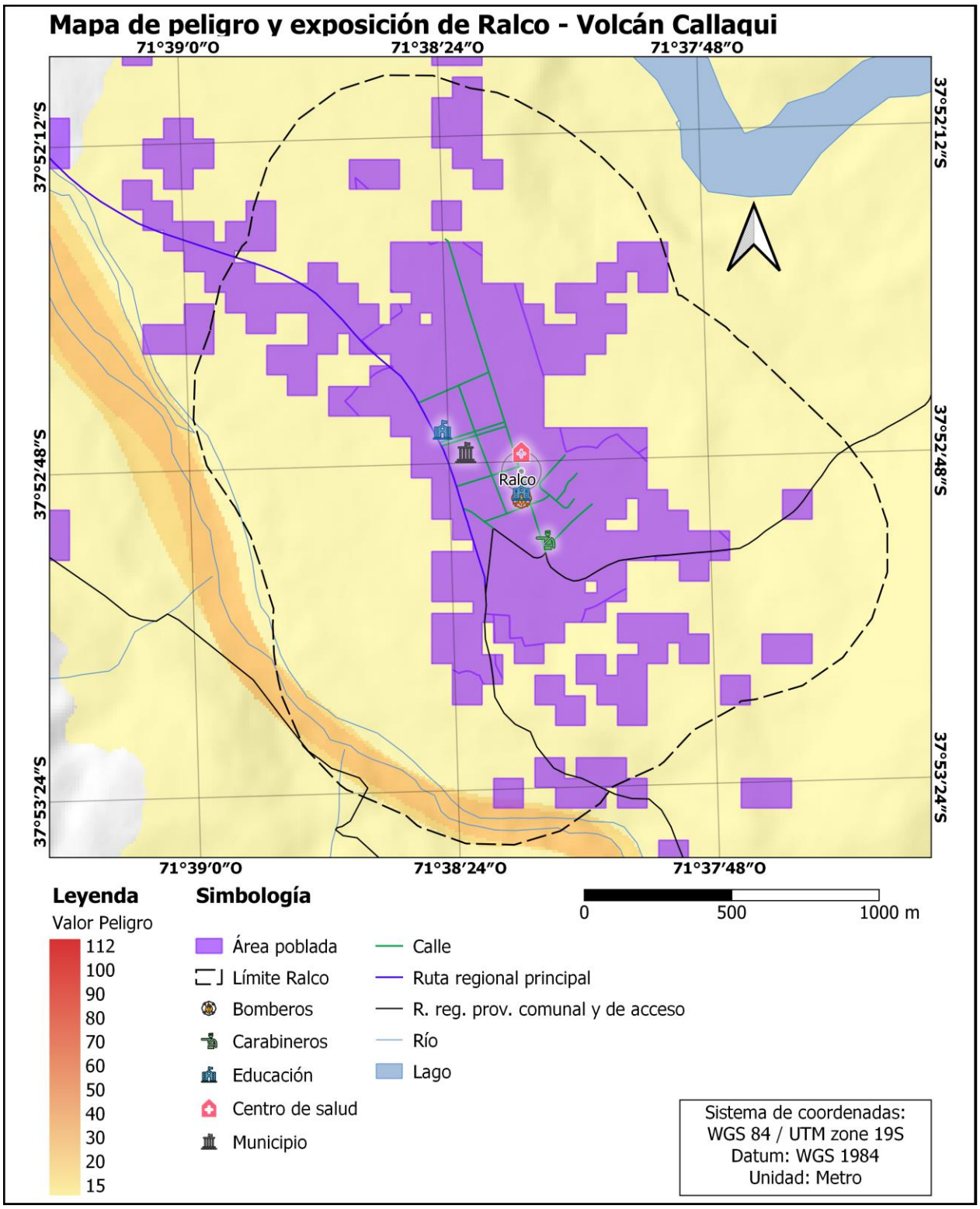


Figura 6.17. Mapa de peligro y exposición detallada de la ciudad de Ralco de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Callaqui. Elaboración propia.

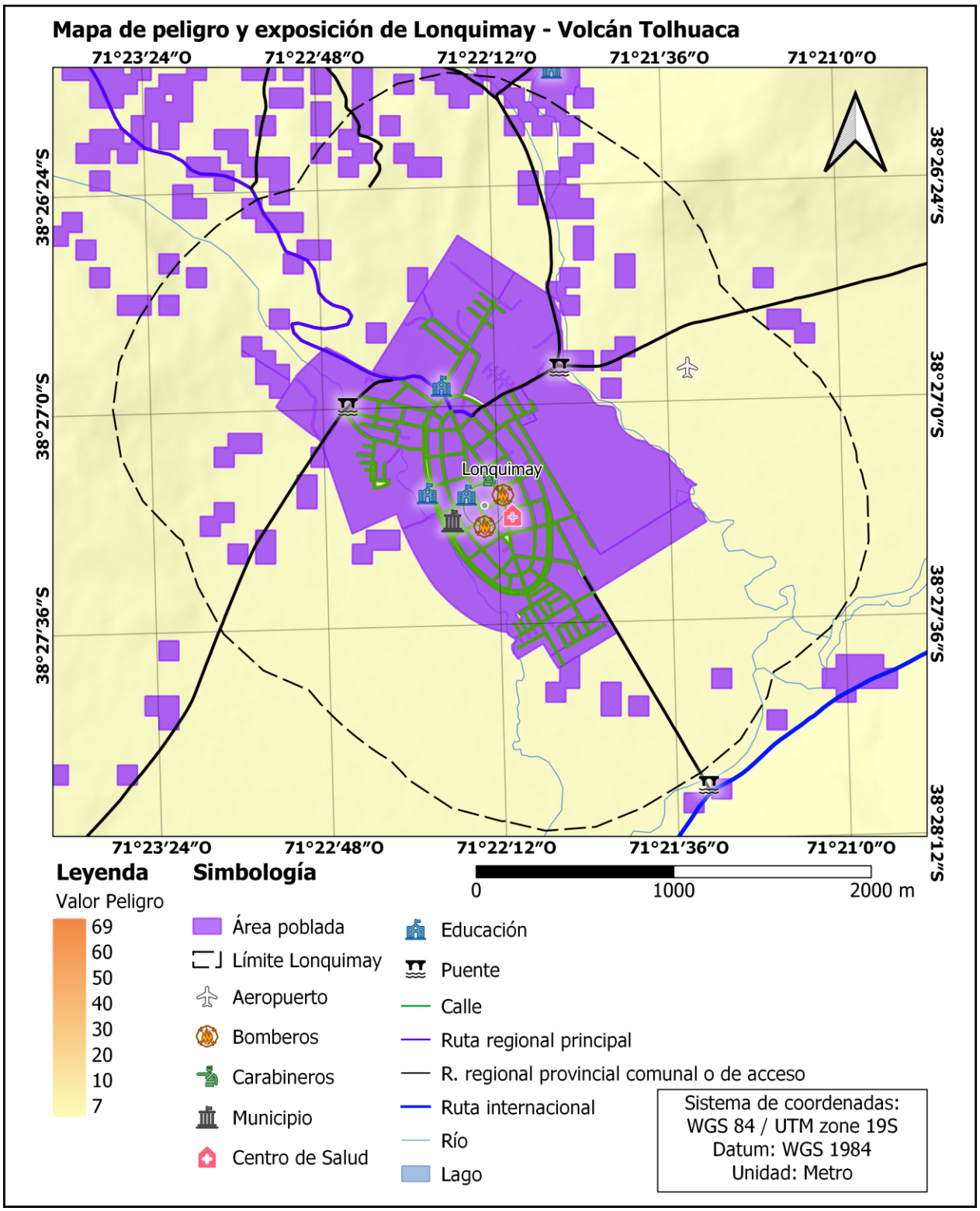


Figura 6.18. Mapa de peligro y exposición detallada de la ciudad de Lonquimay de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Tolhuaca. Elaboración propia.

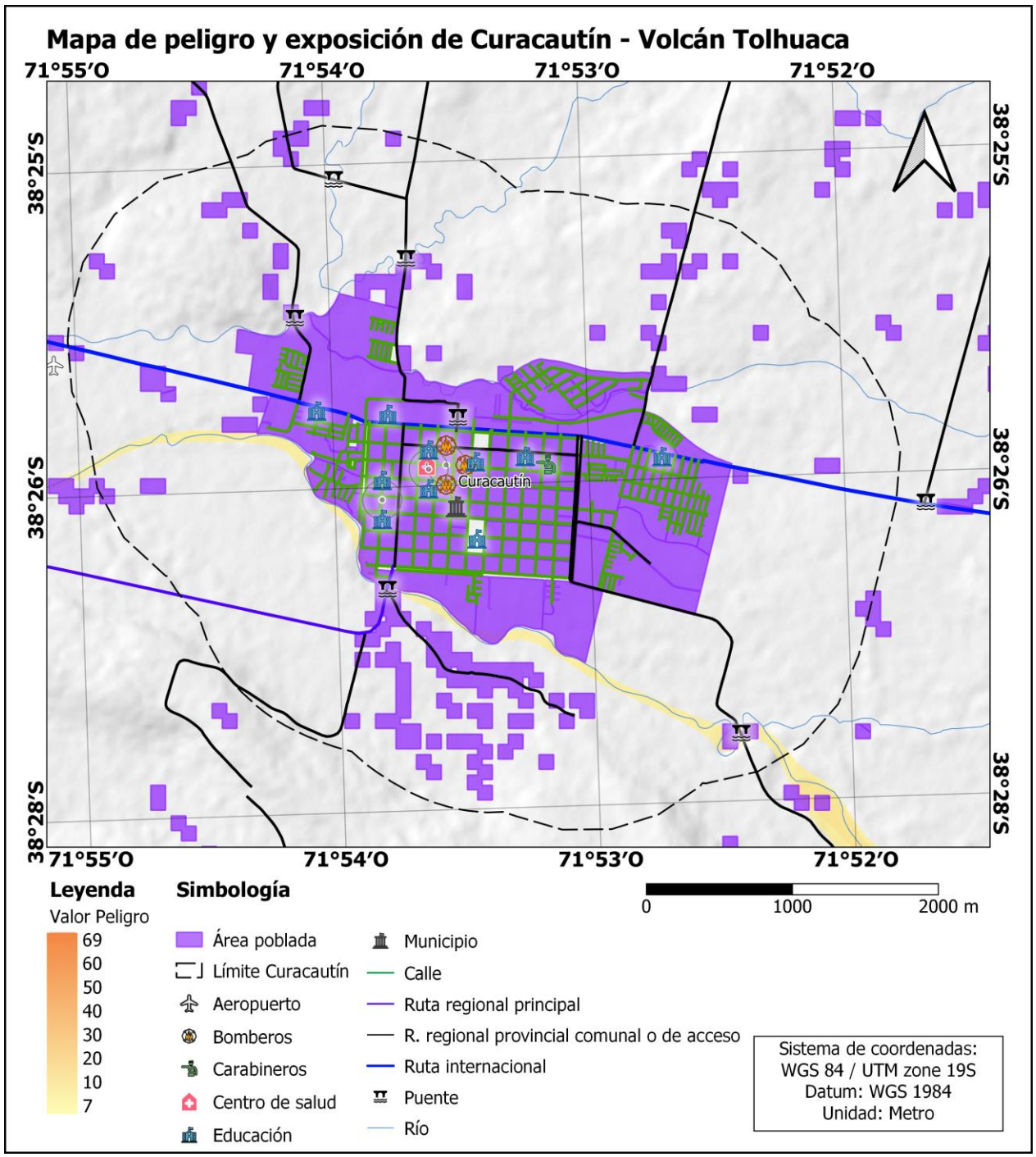


Figura 6.19. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Curacautín de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Tolhuaca**. Elaboración propia.

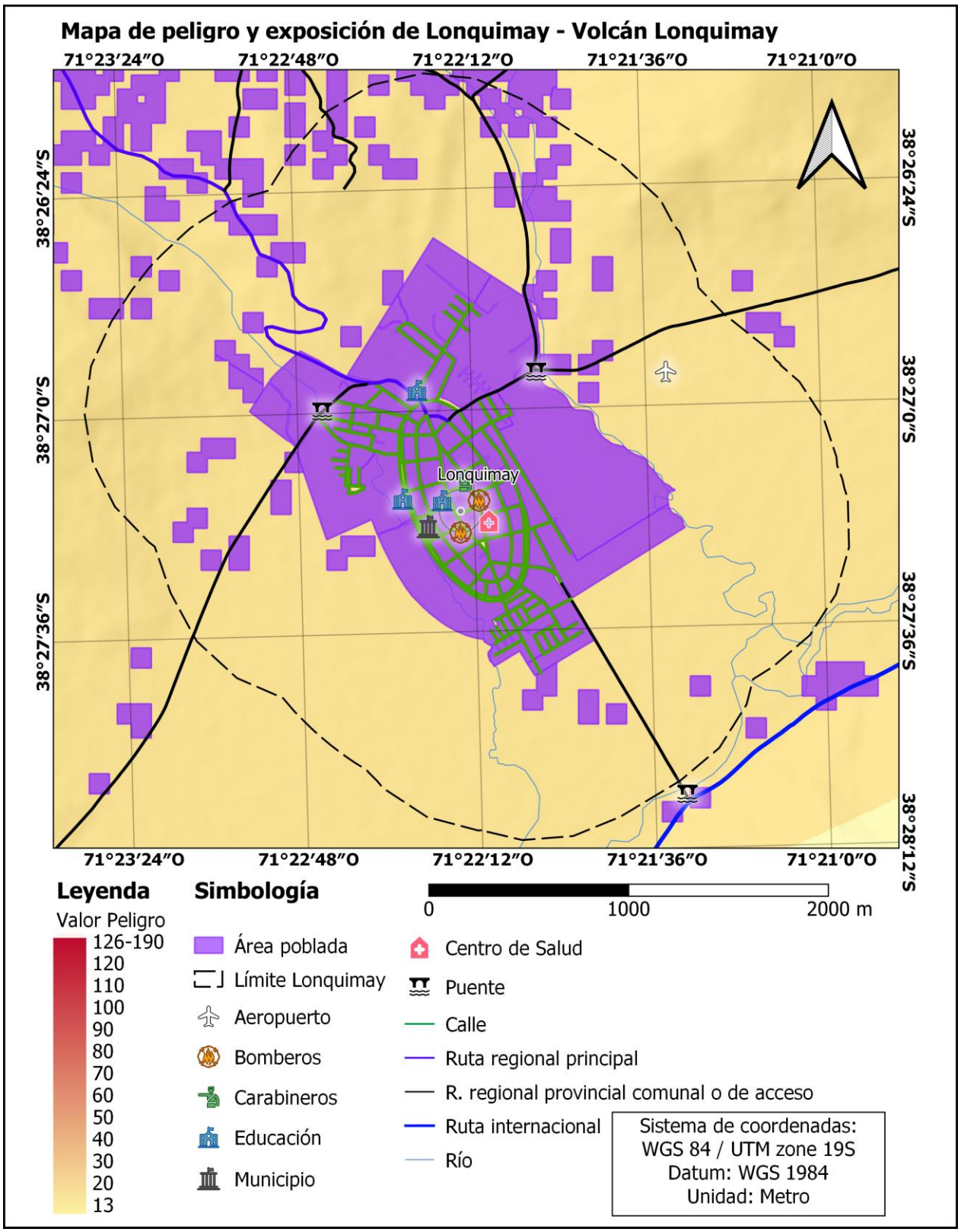


Figura 6.20. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Lonquimay de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Lonquimay.** Elaboración propia.

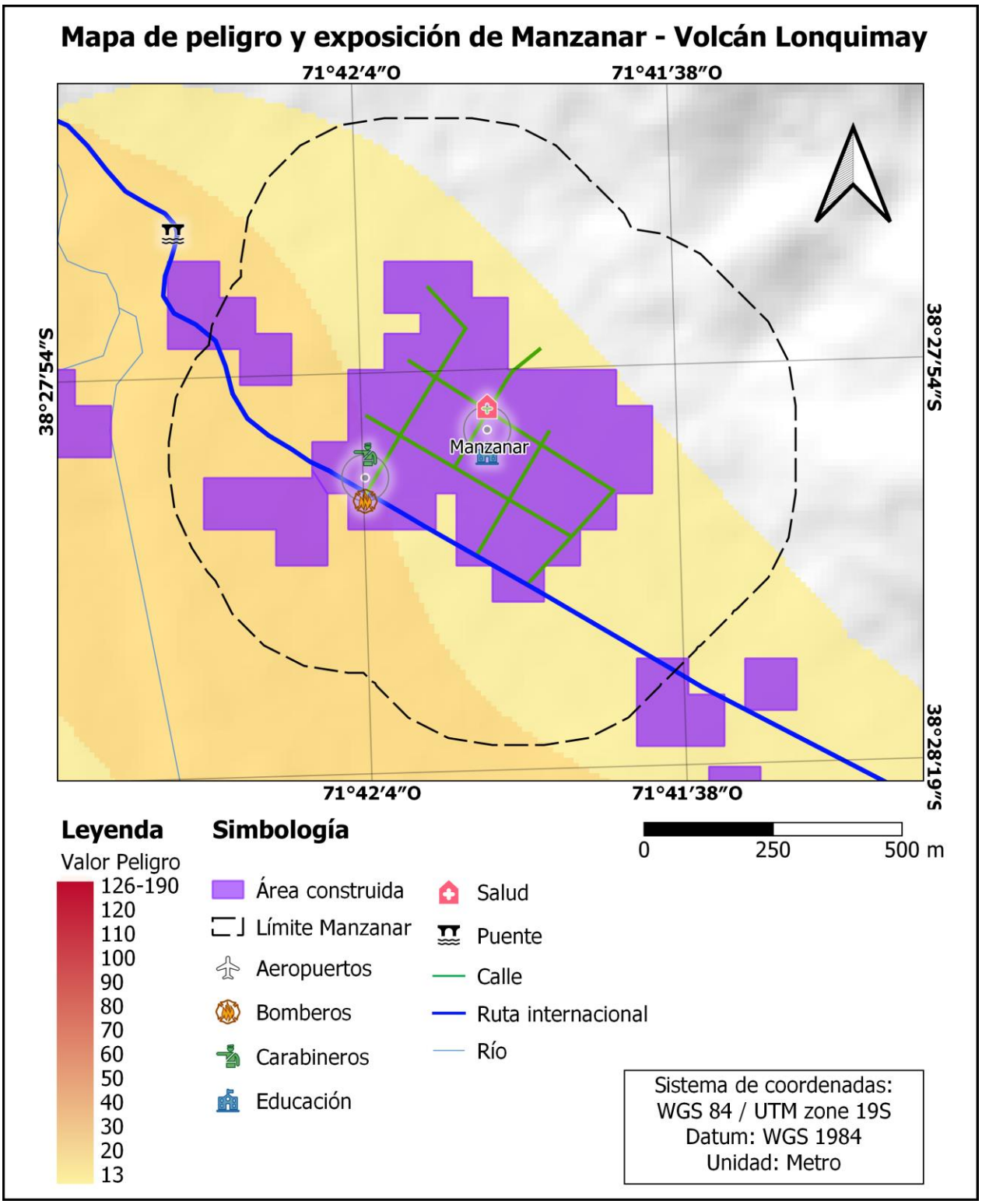


Figura 6.21. **Mapa de peligro y exposición del poblado de Manzanar de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Lonquimay**. Elaboración propia.

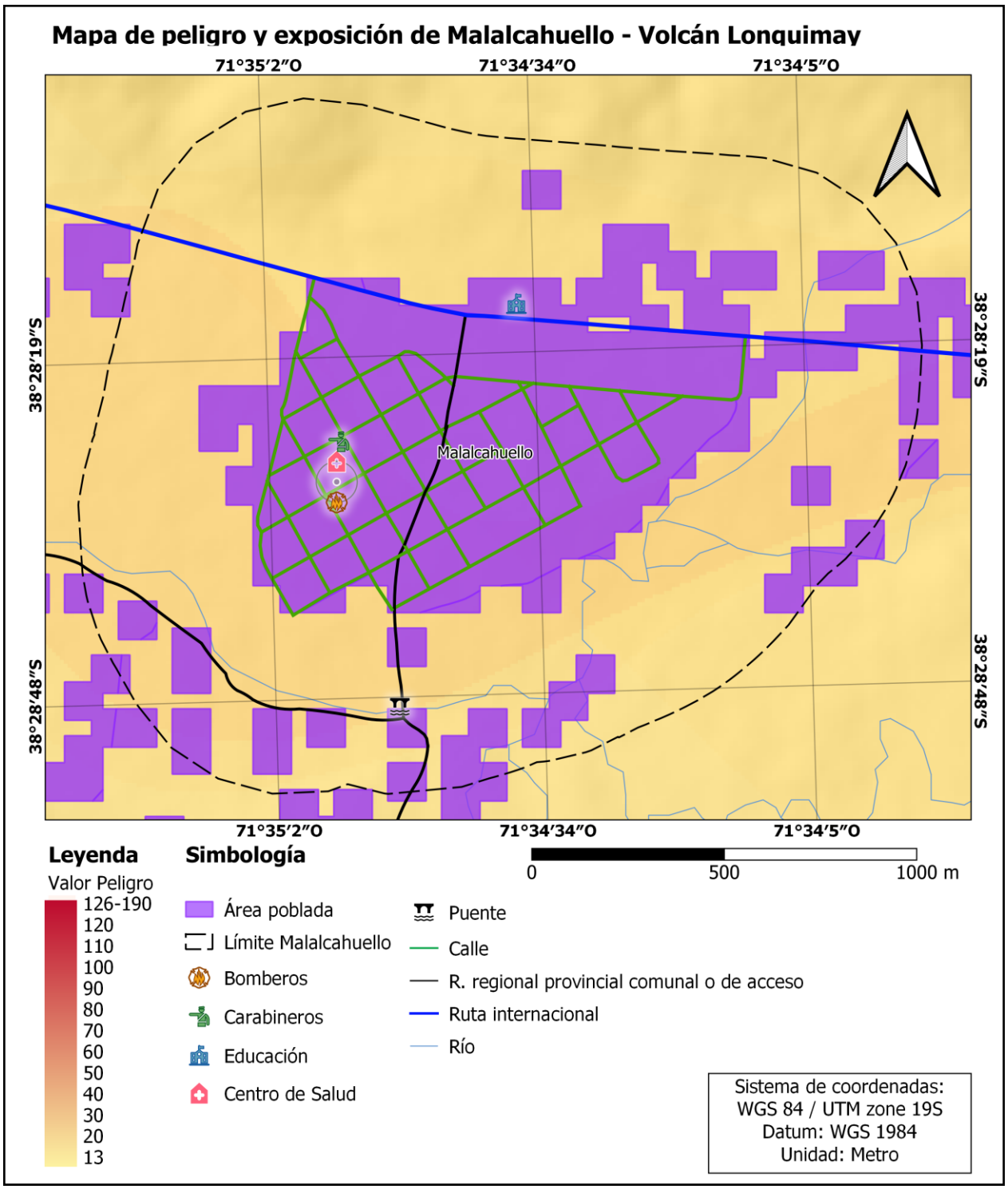


Figura 6.22. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Malalcahuello de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Lonquimay.** Elaboración propia.

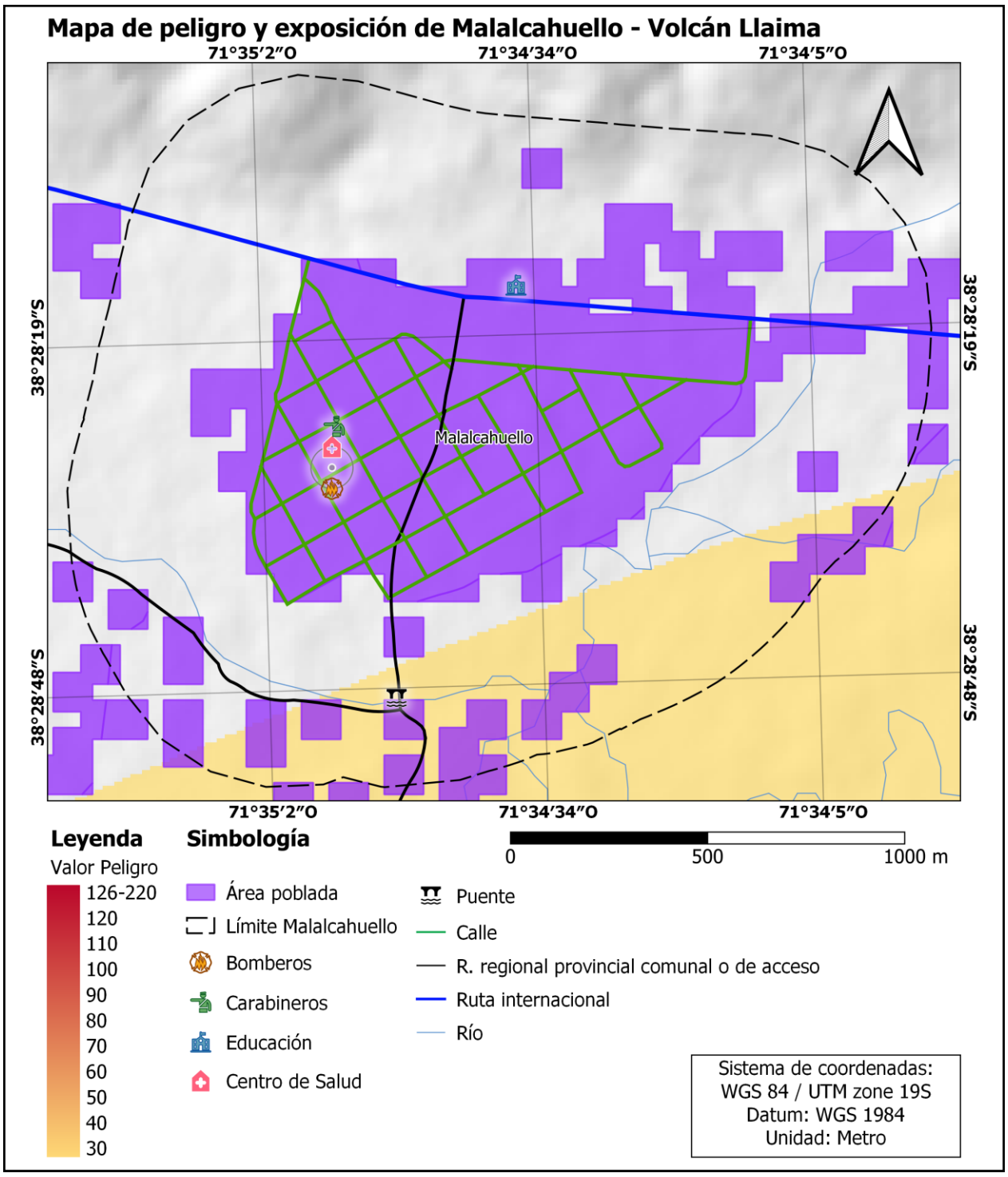


Figura 6.23. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Malalcahuello de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Llaima**. Elaboración propia.

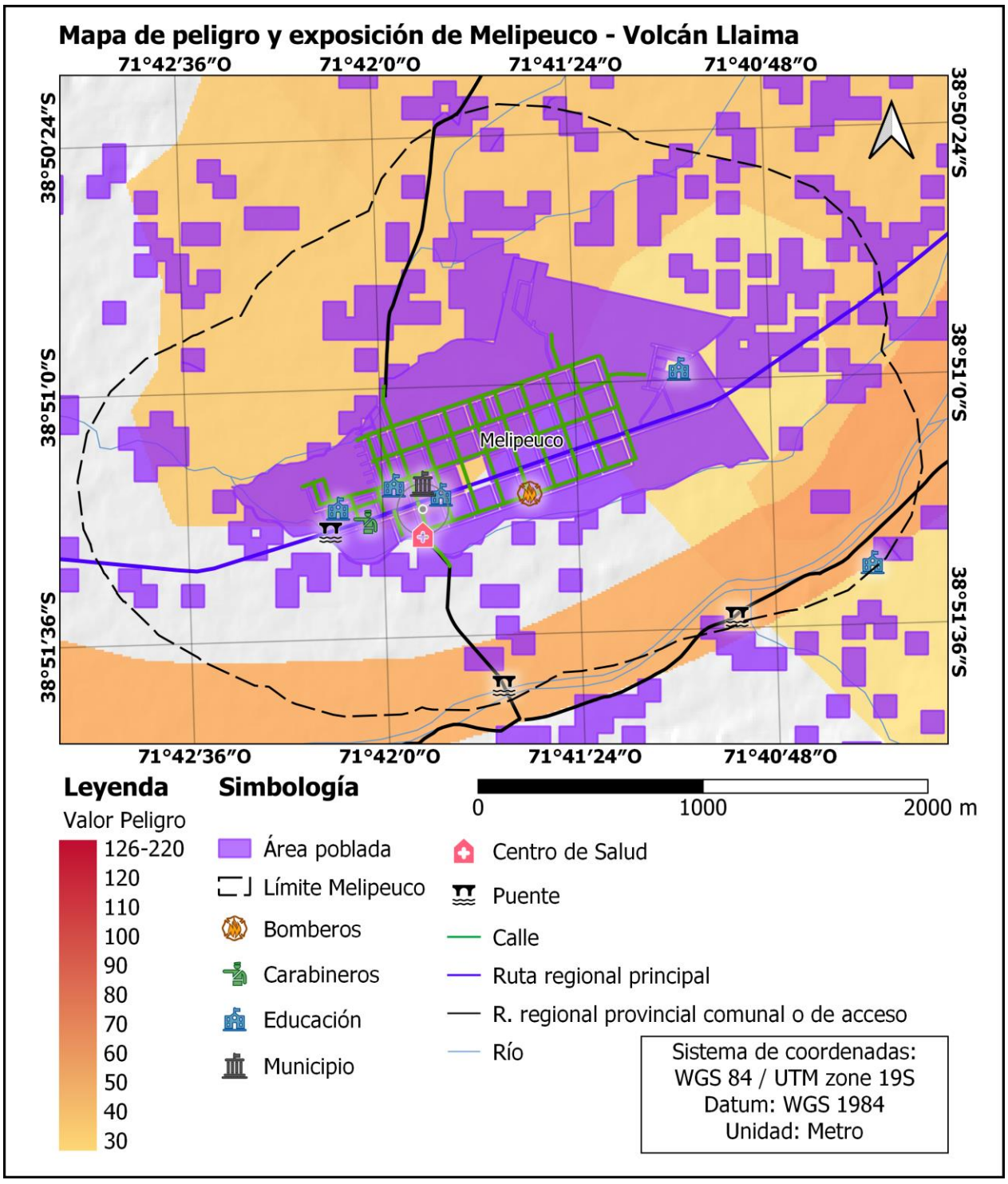


Figura 6.24. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Melipeuco de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Llaima. Elaboración propia.

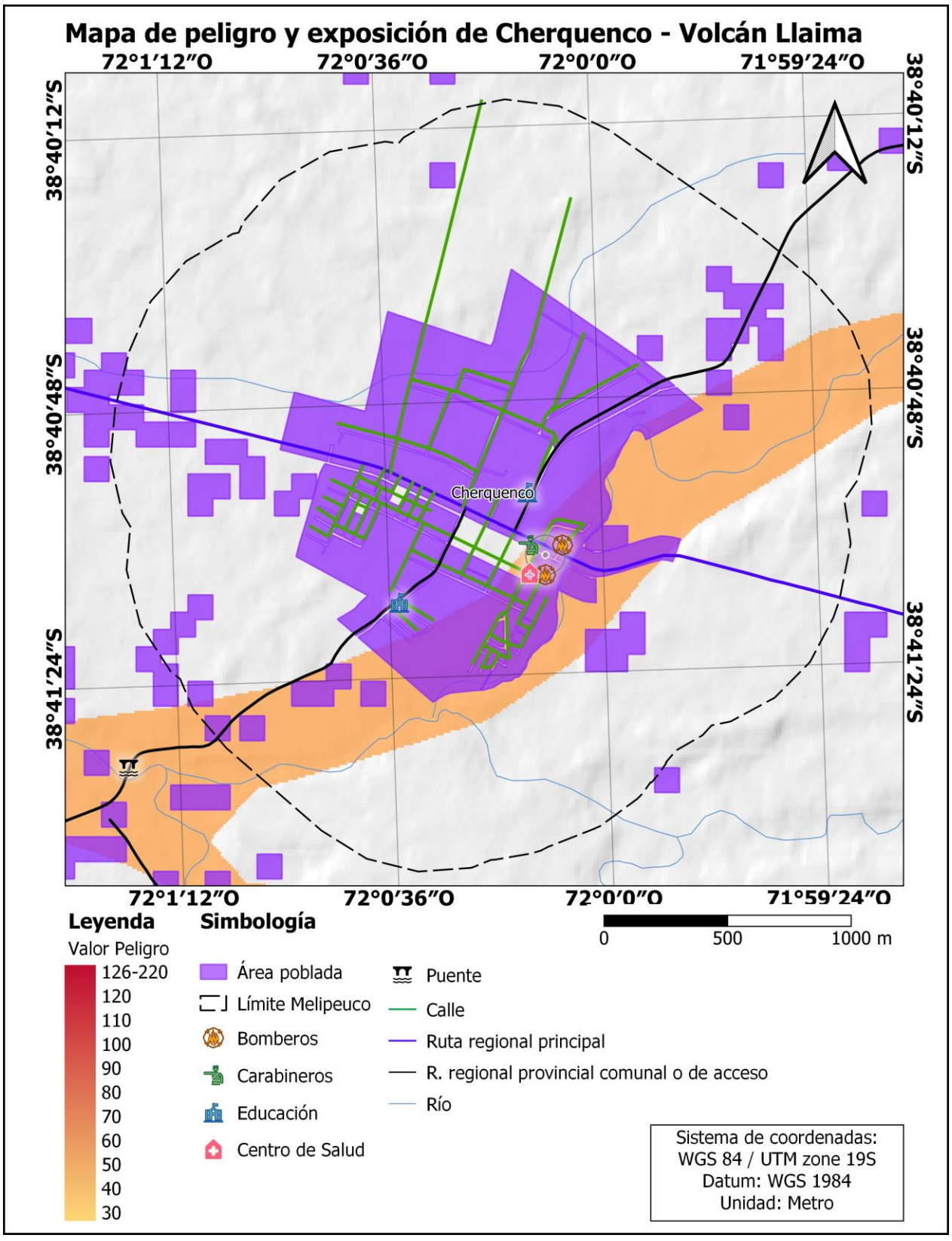


Figura 6.25. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Cherquenco de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Llaima. Elaboración propia.

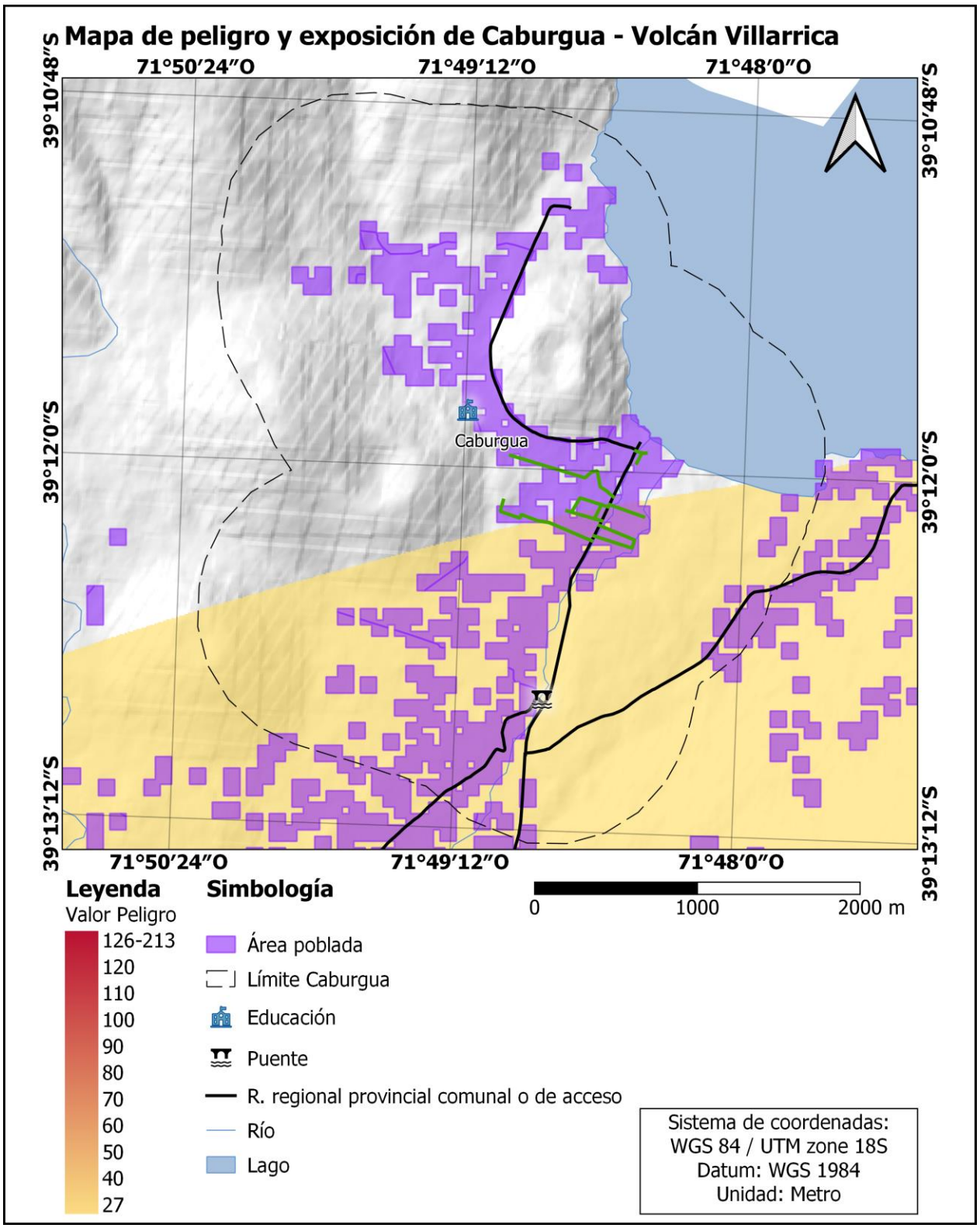


Figura 6.26. Mapa de peligro y exposición del poblado de Caburgua de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica. Elaboración propia.

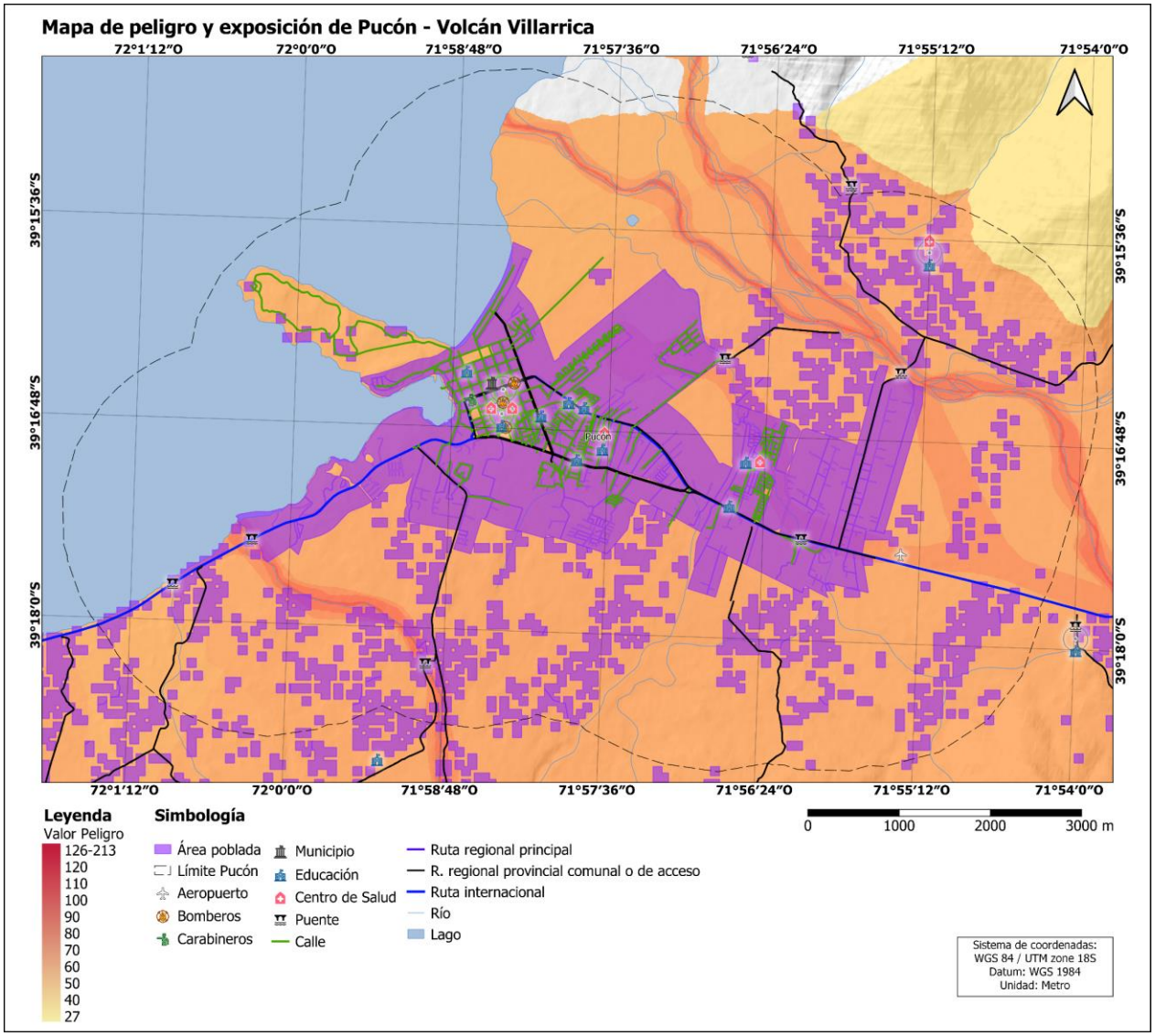


Figura 6.27. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Pucón de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica. Elaboración propia.

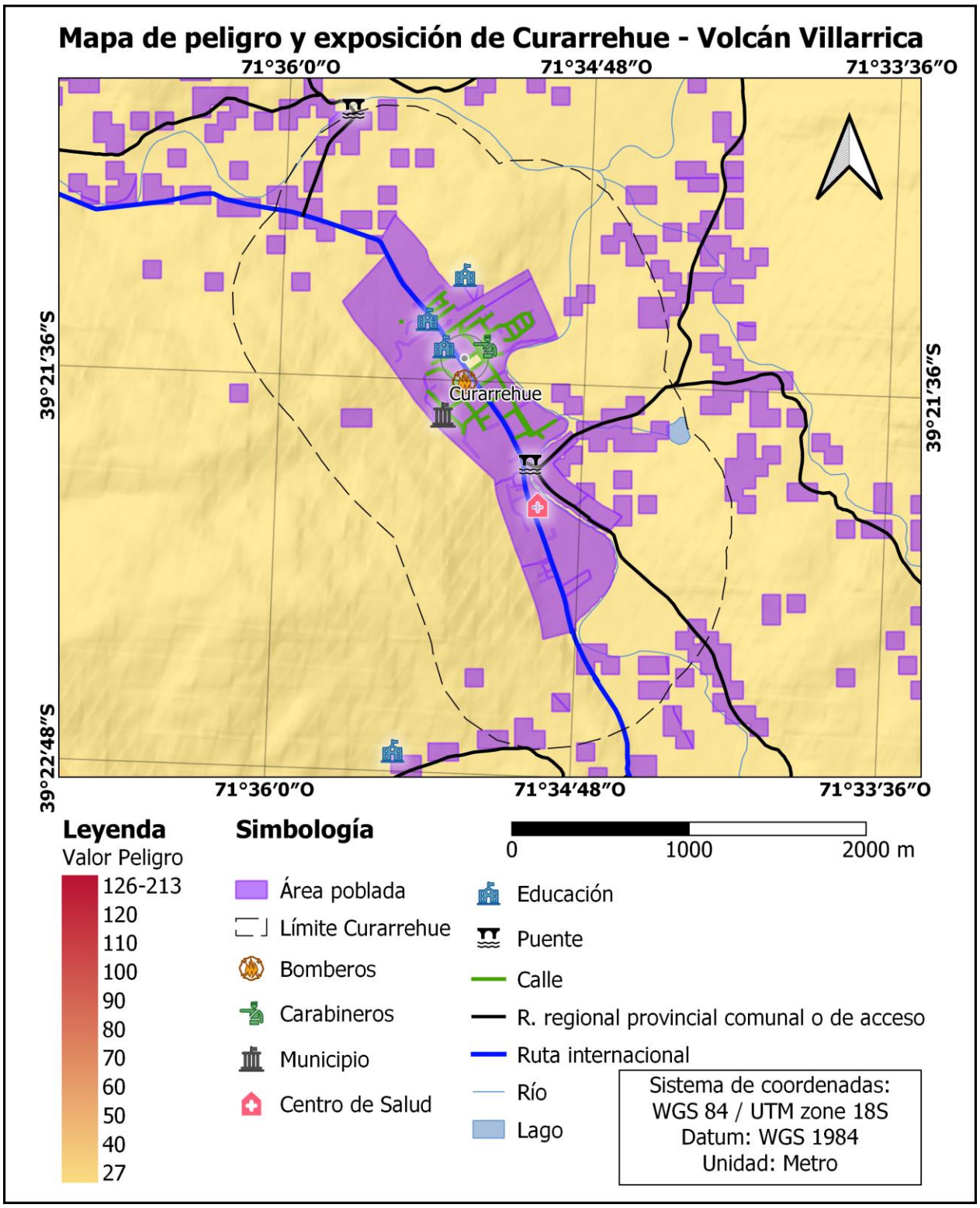


Figura 6.28. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Curarrehue de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica**. Elaboración propia.

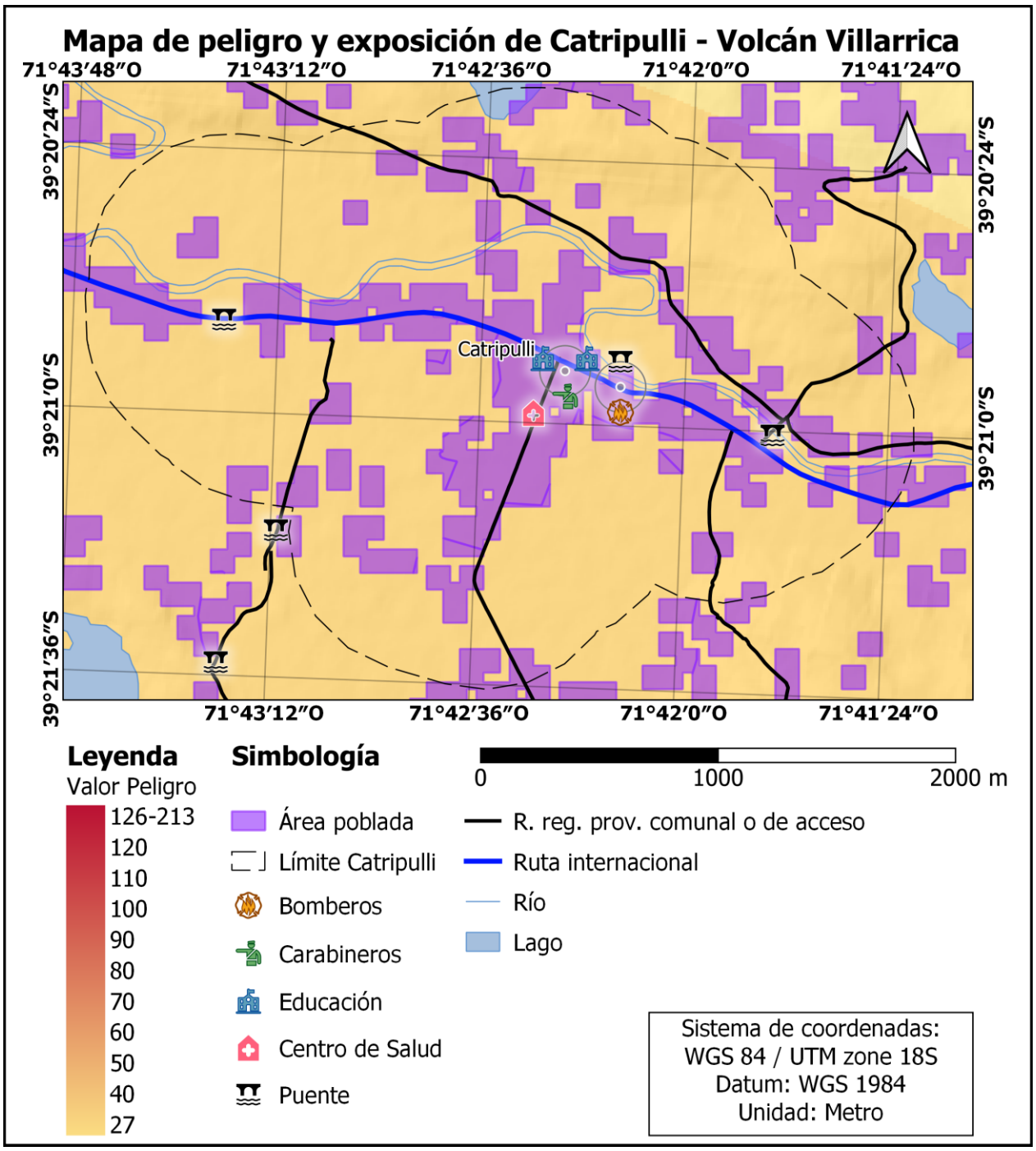


Figura 6.29. **Mapa de peligro y exposición del poblado de Catripulli de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica.** Elaboración propia.

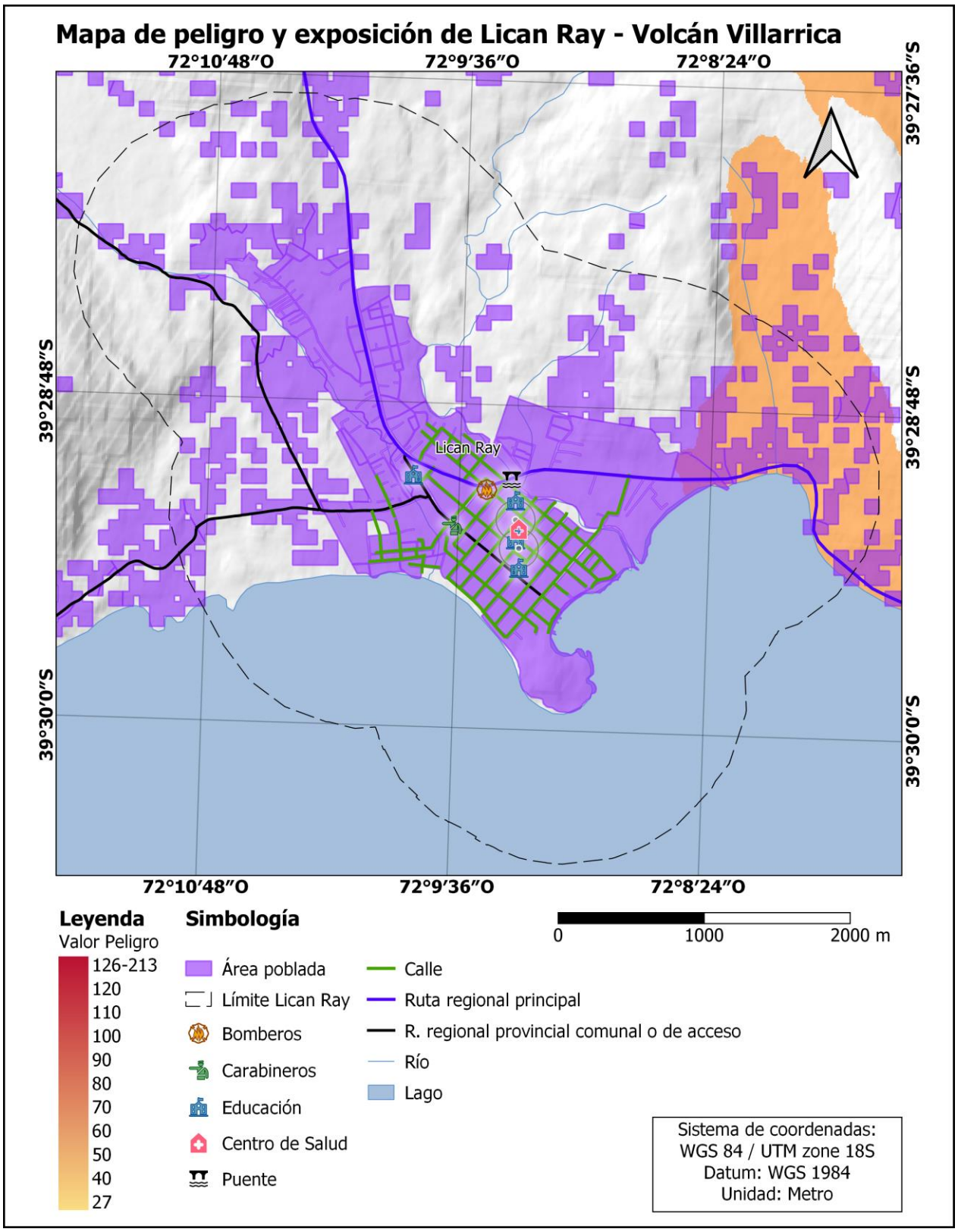


Figura 6.30. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Lican Ray de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica.** Elaboración propia.

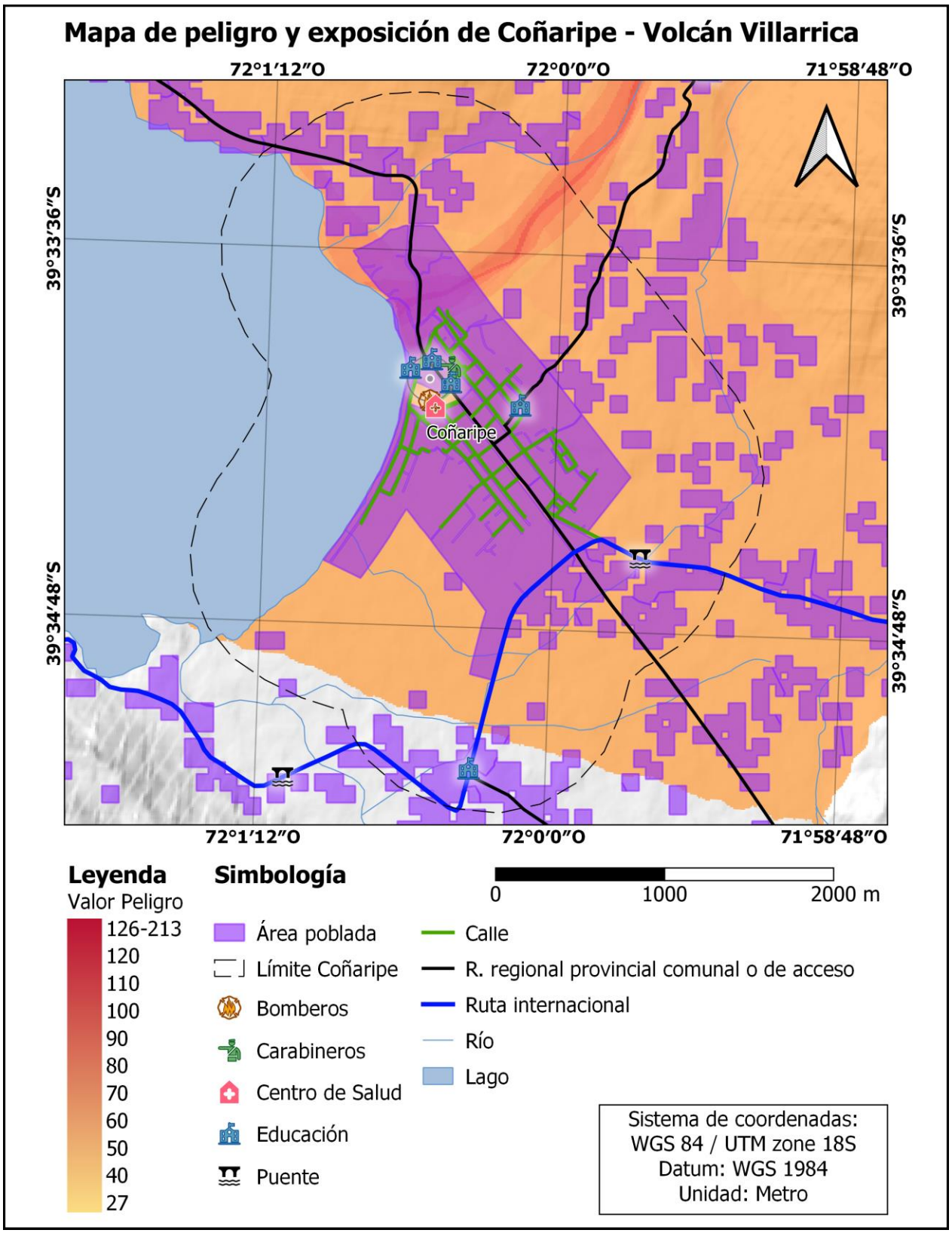


Figura 6.31. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Coñaripe de acuerdo a mapa de peligro integrado del volcán Villarrica. Elaboración propia.

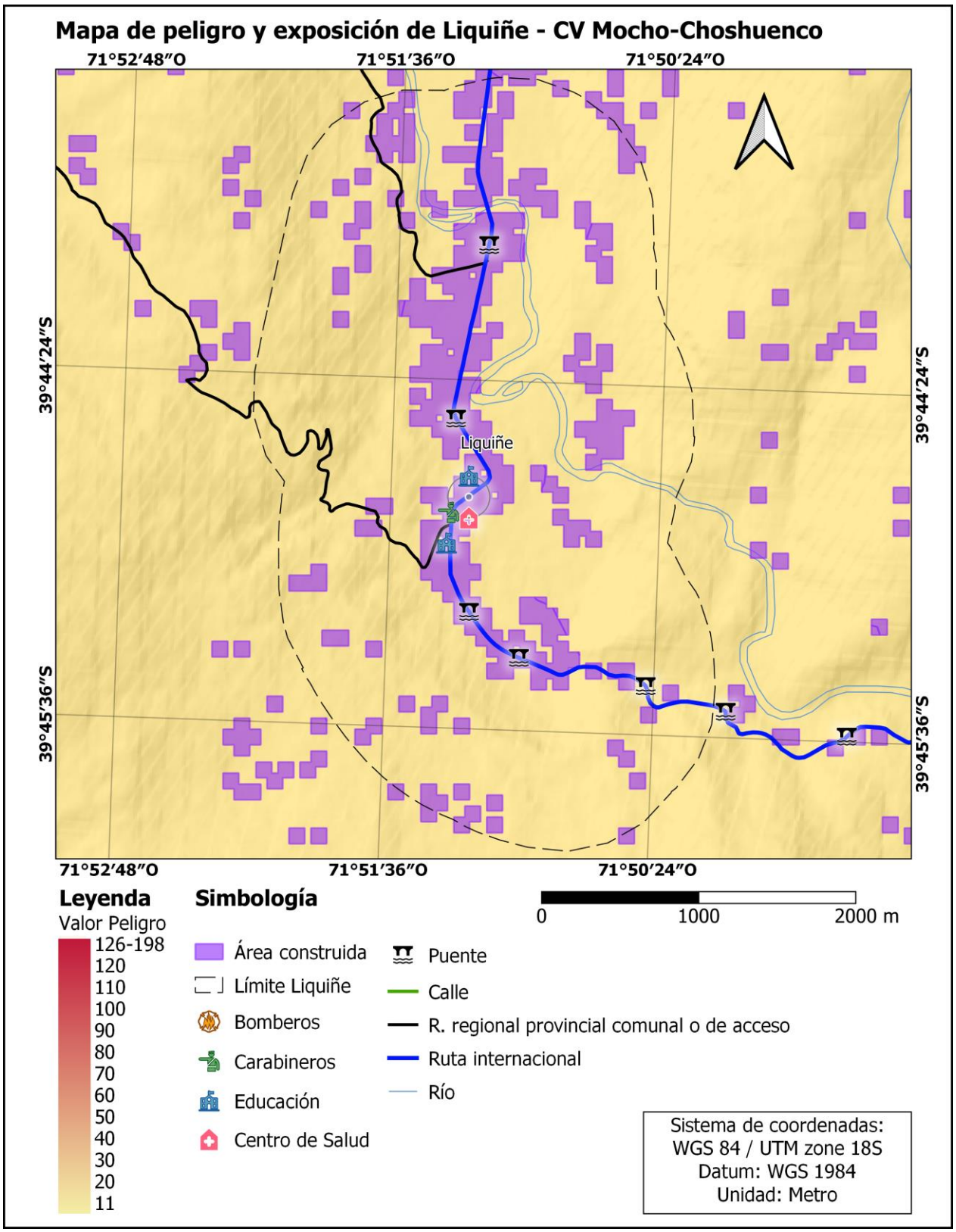


Figura 6.32. Mapa de peligro y exposición del poblado de Liquiñe de acuerdo a mapa de peligro integrado del complejo volcánico Mocho-Choshuenco. Elaboración propia.

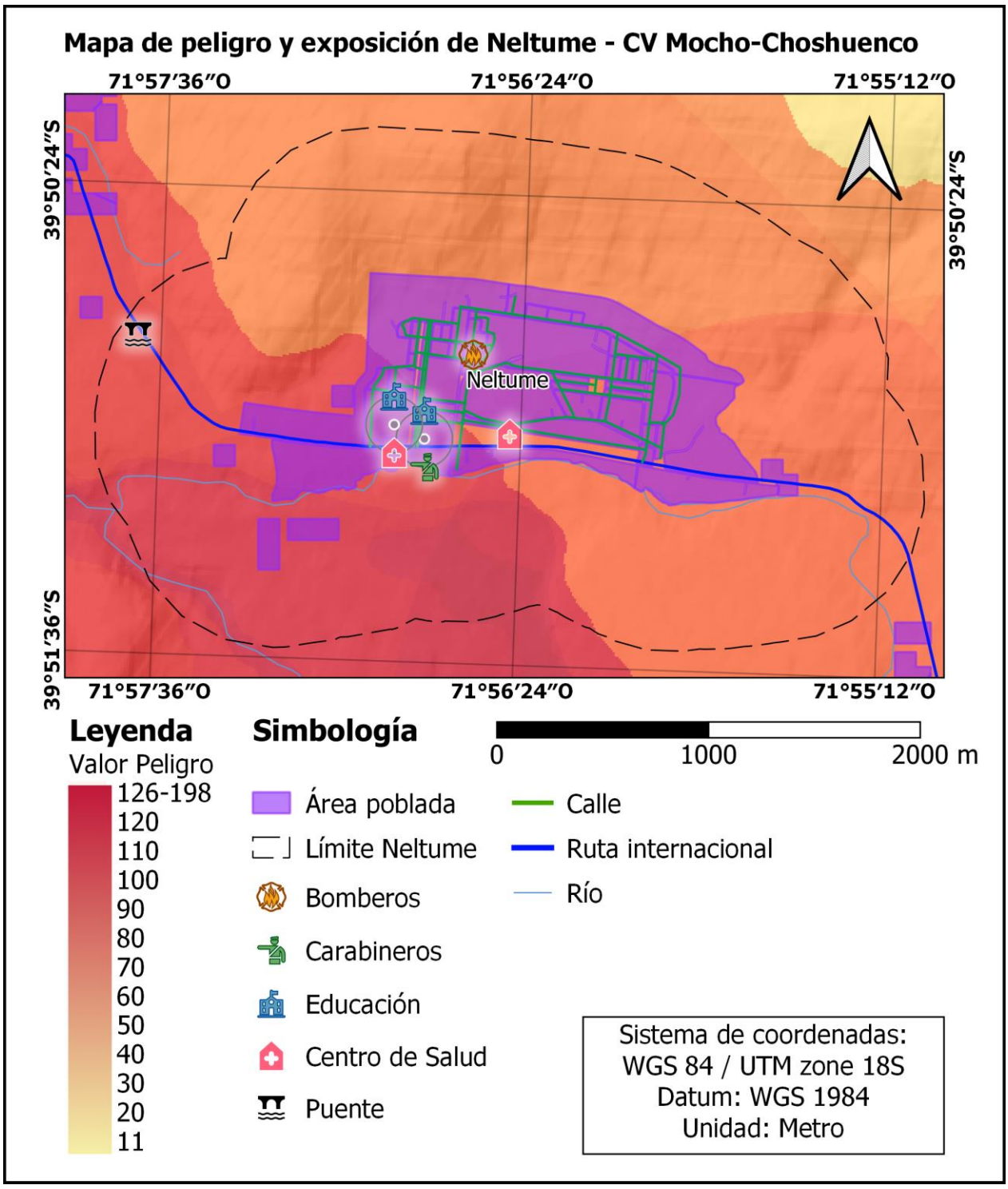


Figura 6.33. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Neltume de acuerdo a mapa de peligro integrado del complejo volcánico Mocho-Choshuenco**. Elaboración propia.

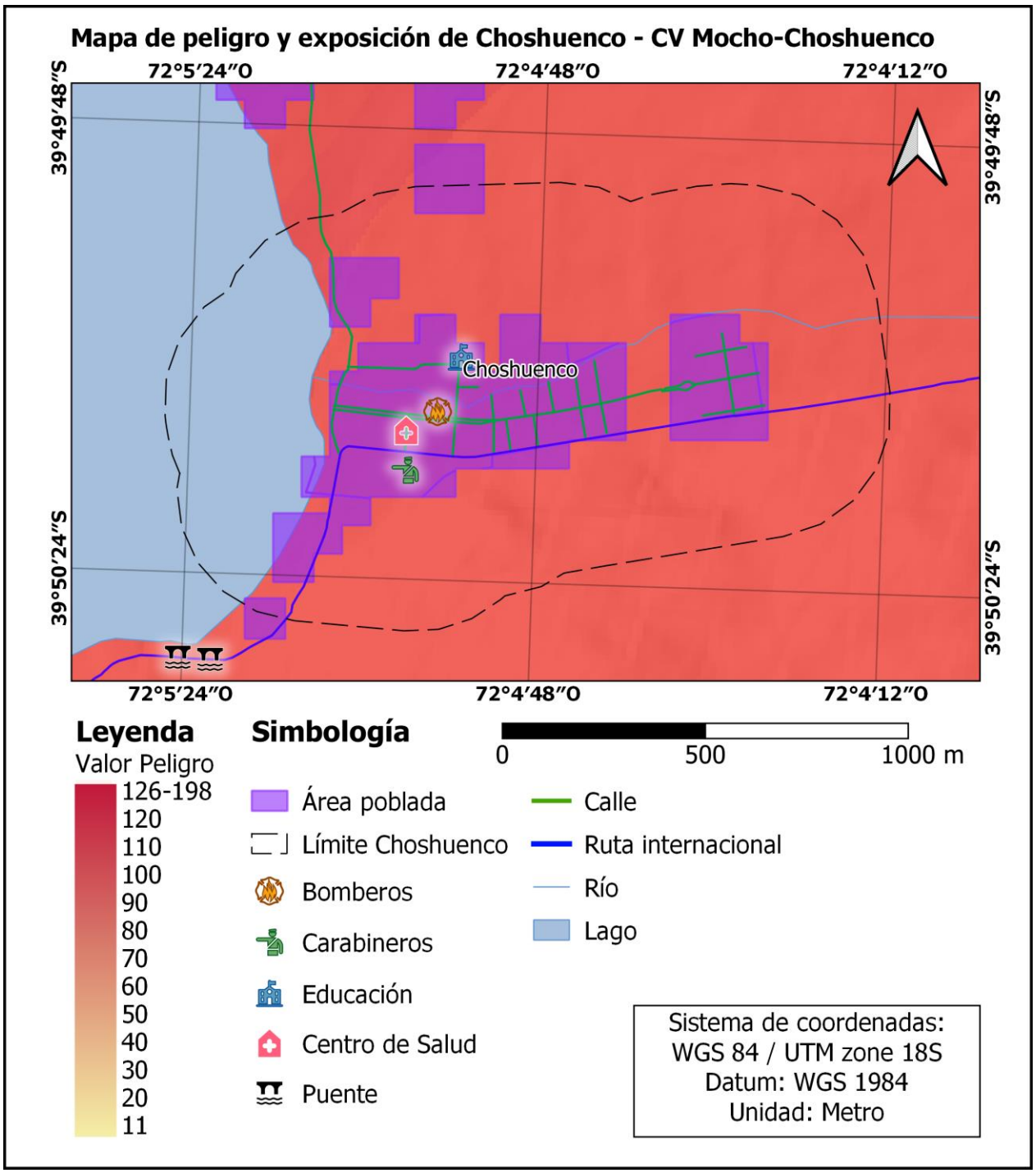


Figura 6.34. Mapa de peligro y exposición del poblado de Choshuenco de acuerdo a mapa de peligro integrado del complejo volcánico Mocho-Choshuenco. Elaboración propia.

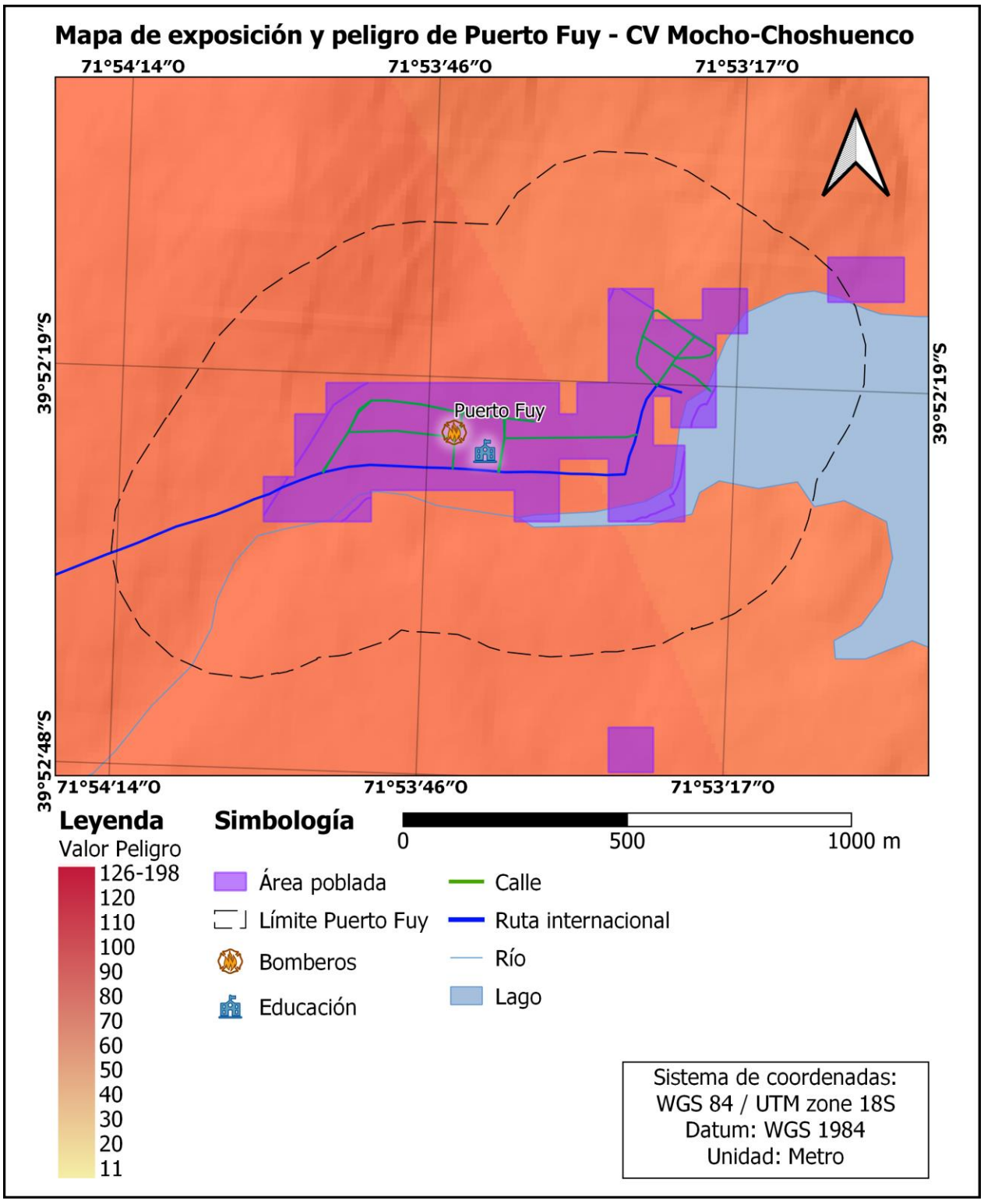


Figura 6.35. Mapa de peligro y exposición del poblado de Puerto Fuy de acuerdo a mapa de peligro integrado del complejo volcánico Mocho-Choshuenco. Elaboración propia.

6.3.2. Mapas con zonas de peligro de SERNAGEOMIN

Las figuras 6.36. a 6.49. corresponden a los mapas de peligro y exposición de los poblados amenazados por los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco acorde a los mapas de SERNAGEOMIN. Según estos mapas, estos 6 volcanes amenazan, en total, a 14 poblados. Al igual que en los mapas de peligro integrado, el volcán Villarrica es que más poblados expuestos tiene, con un total de 4. Cabe destacar que, en este grupo de mapas, el volcán Tolhuaca no amenaza a ninguna ciudad ni poblado. Además, a diferencia de los mapas de peligro integrado, en este caso, ningún poblado está expuesto a más de un volcán de manera simultánea.

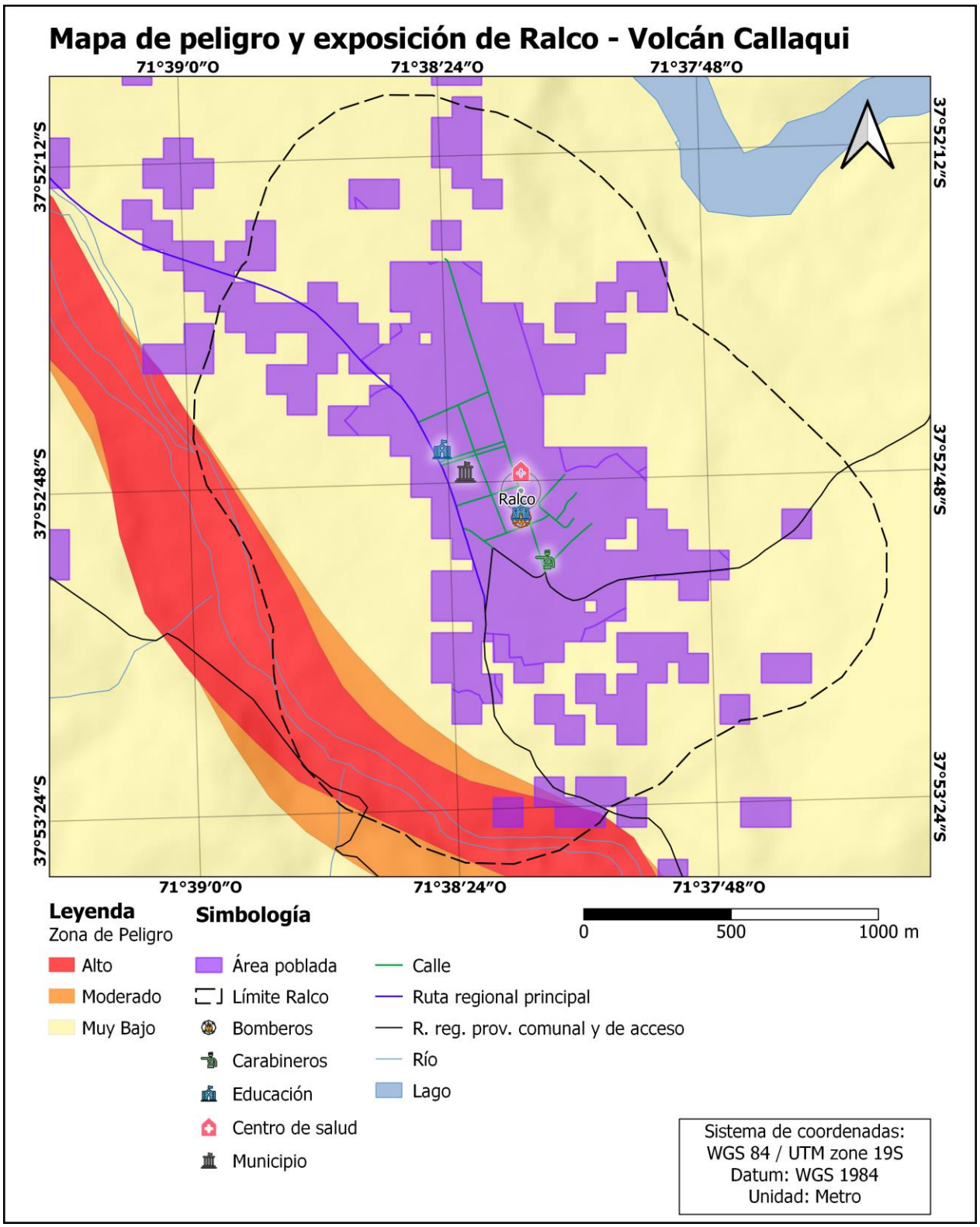


Figura 6.36. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Ralco de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Callaqui**. Elaboración propia.

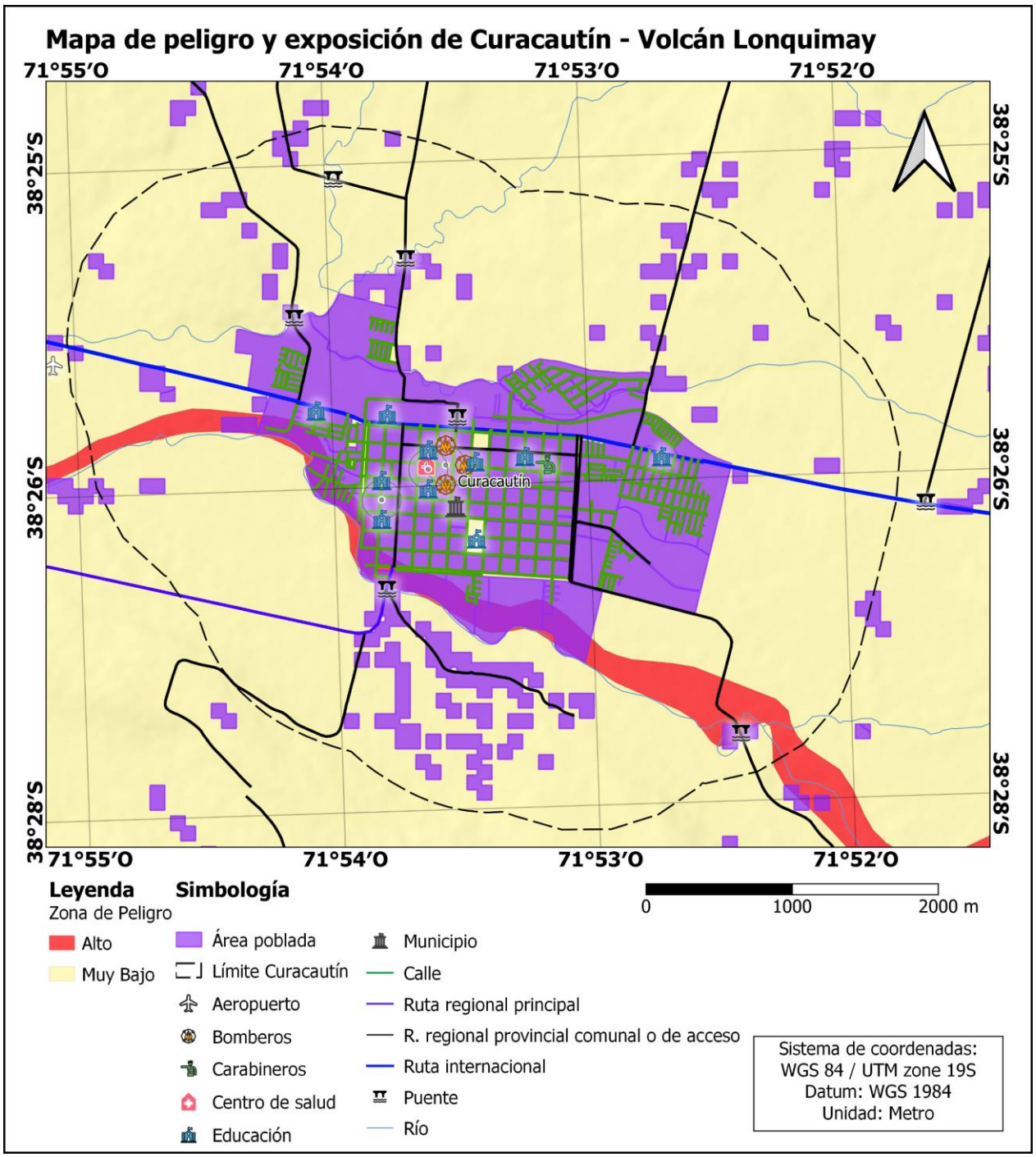


Figura 6.38. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Curacautín de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Lonquimay. Elaboración propia.

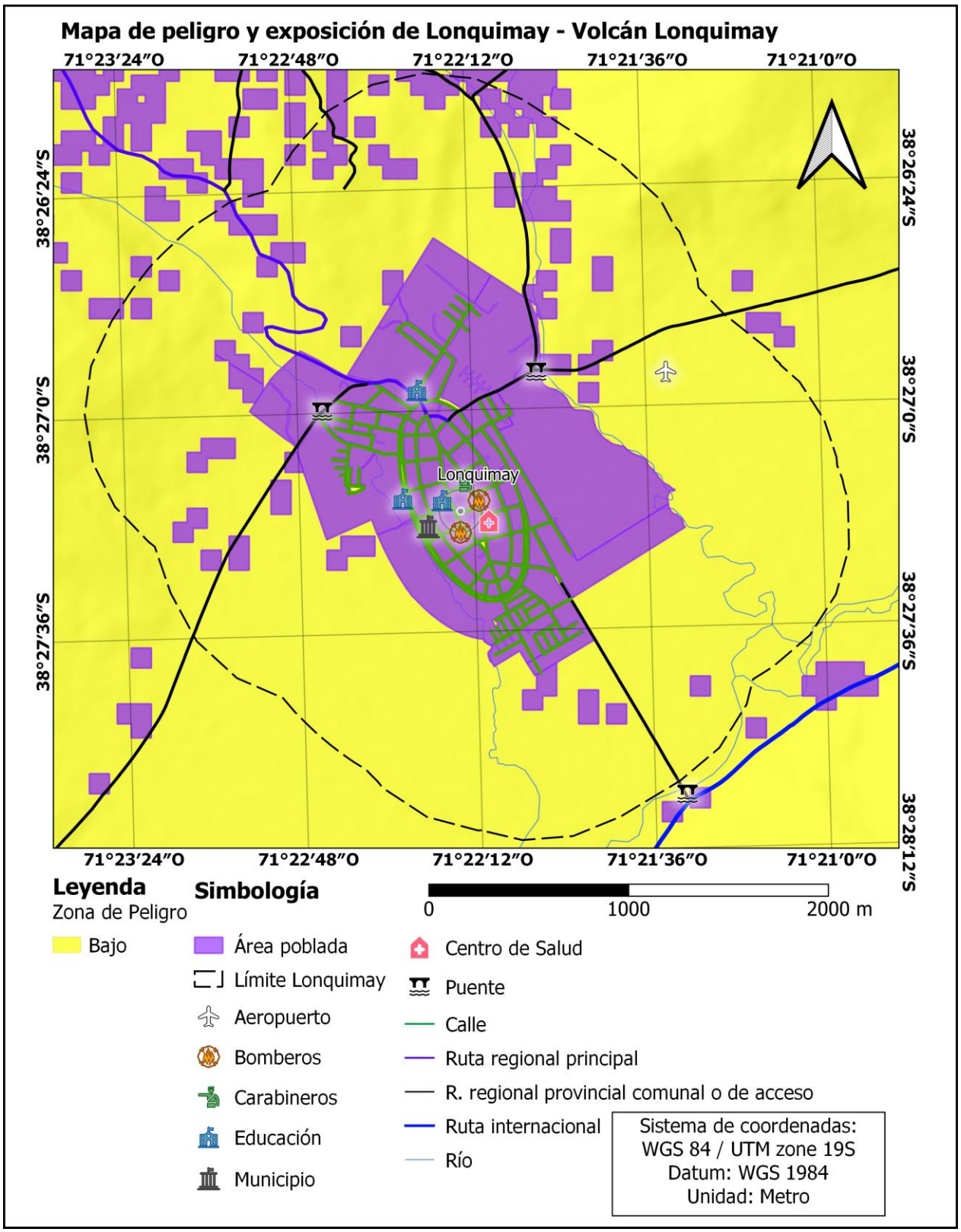


Figura 6.38. **Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Lonquimay de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Lonquimay.** Elaboración propia.

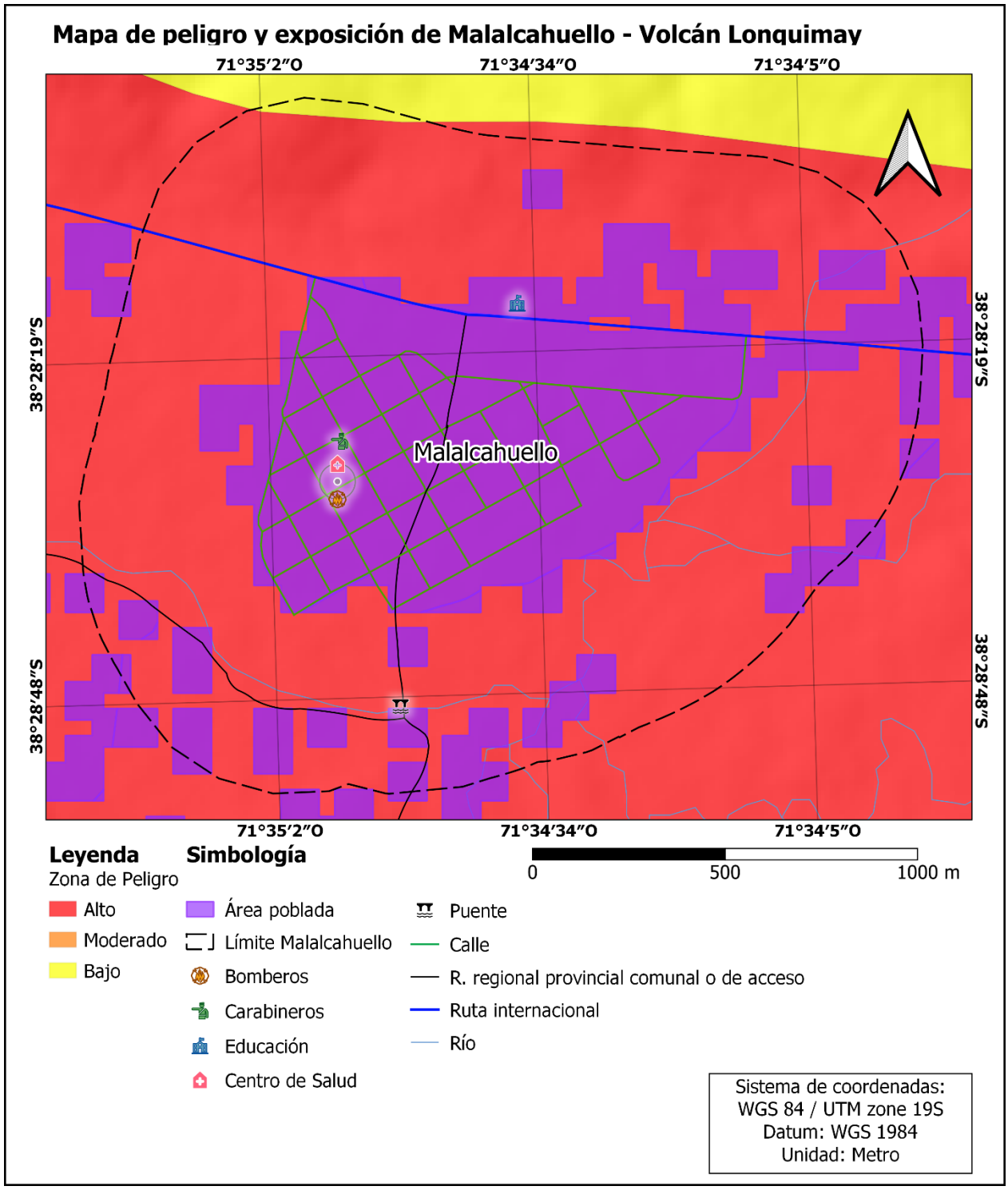


Figura 6.39. Mapa de peligro y exposición del poblado de Malalcahuello de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Lonquimay. Elaboración propia.

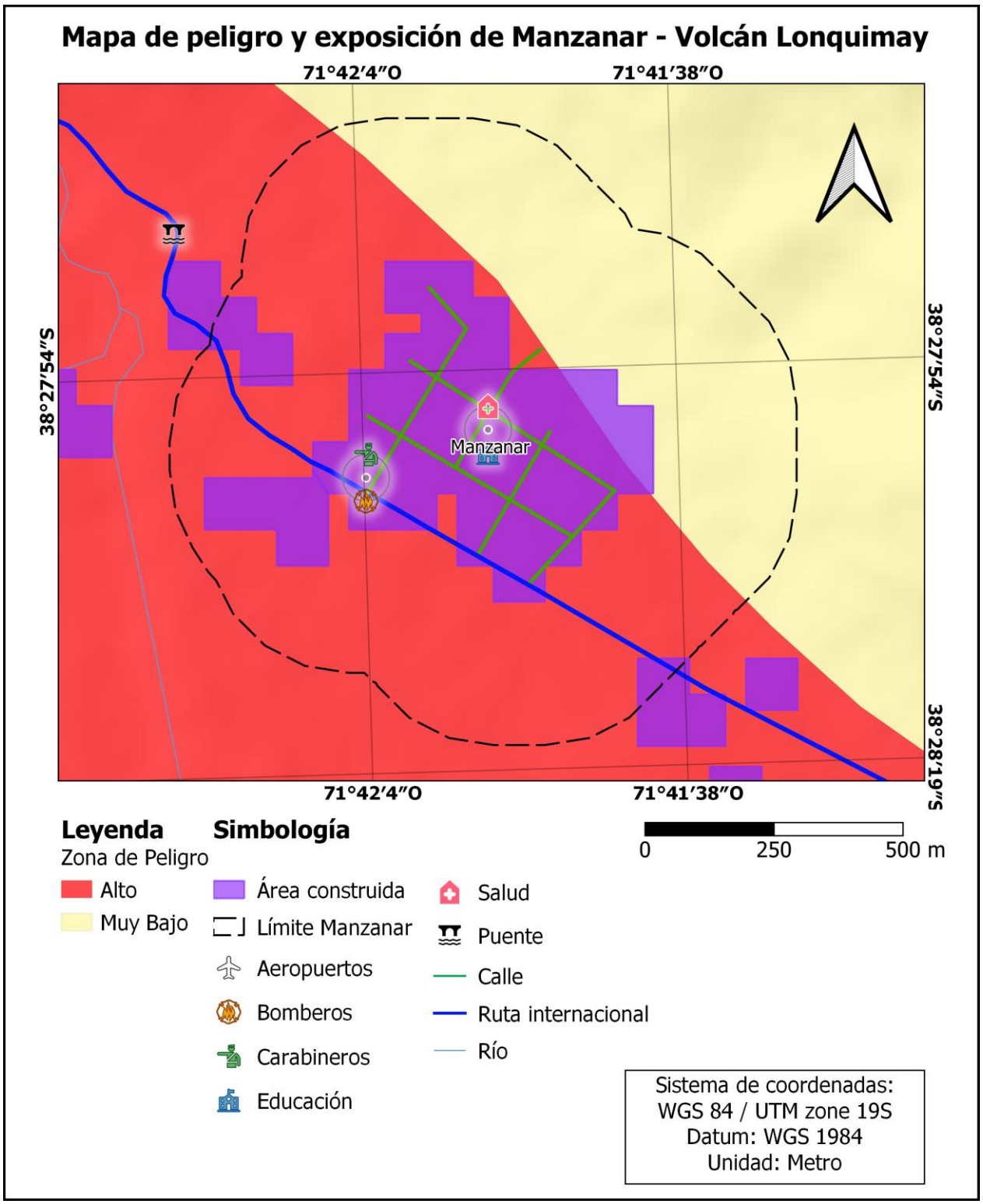


Figura 6.40. **Mapa de peligro y exposición del poblado de Manzanar de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Lonquimay.** Elaboración propia.

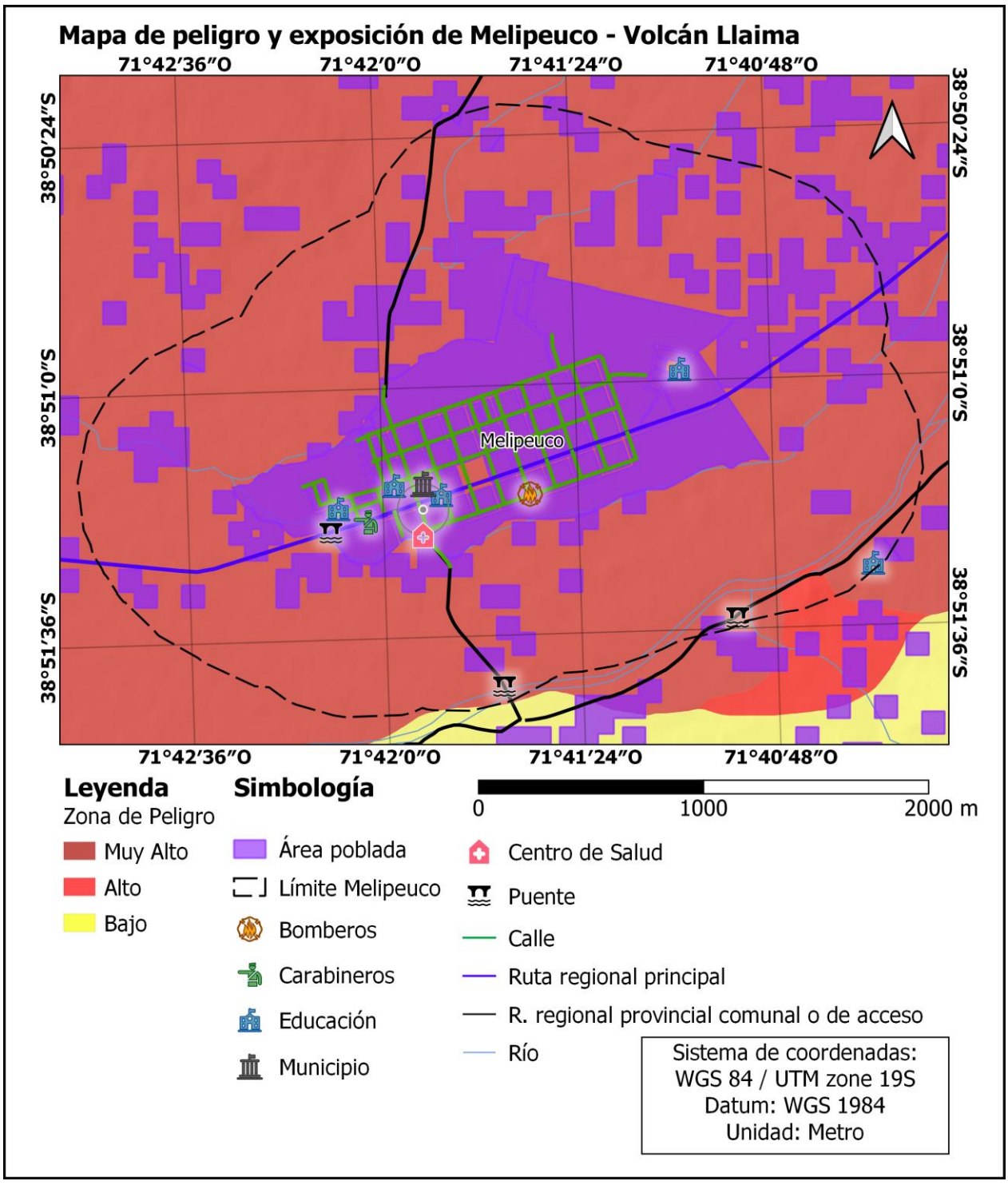


Figura 6.41. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Melipeuco de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Llaima. Elaboración propia.

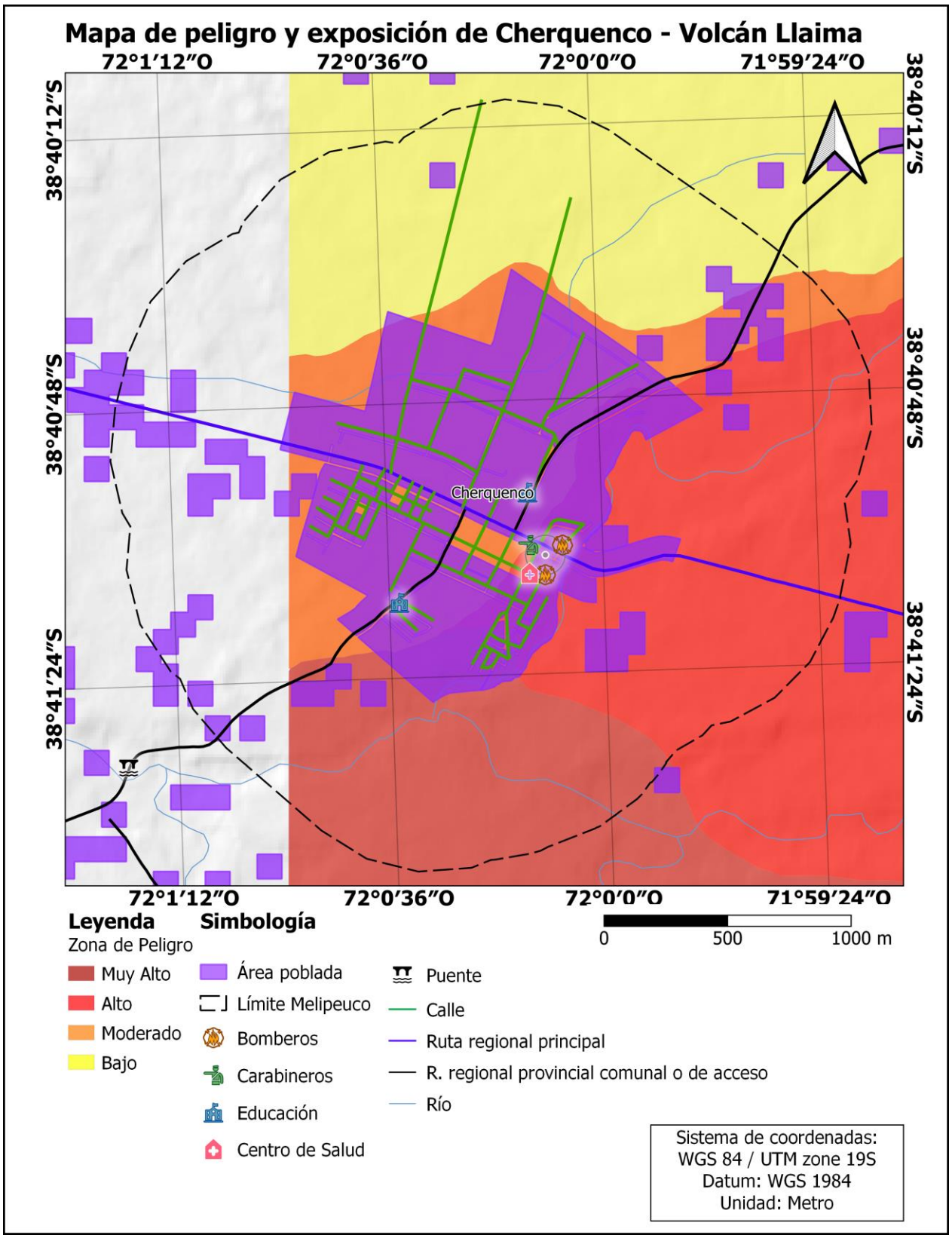


Figura 6.42. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Cherquenco de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Llaima. Elaboración propia.

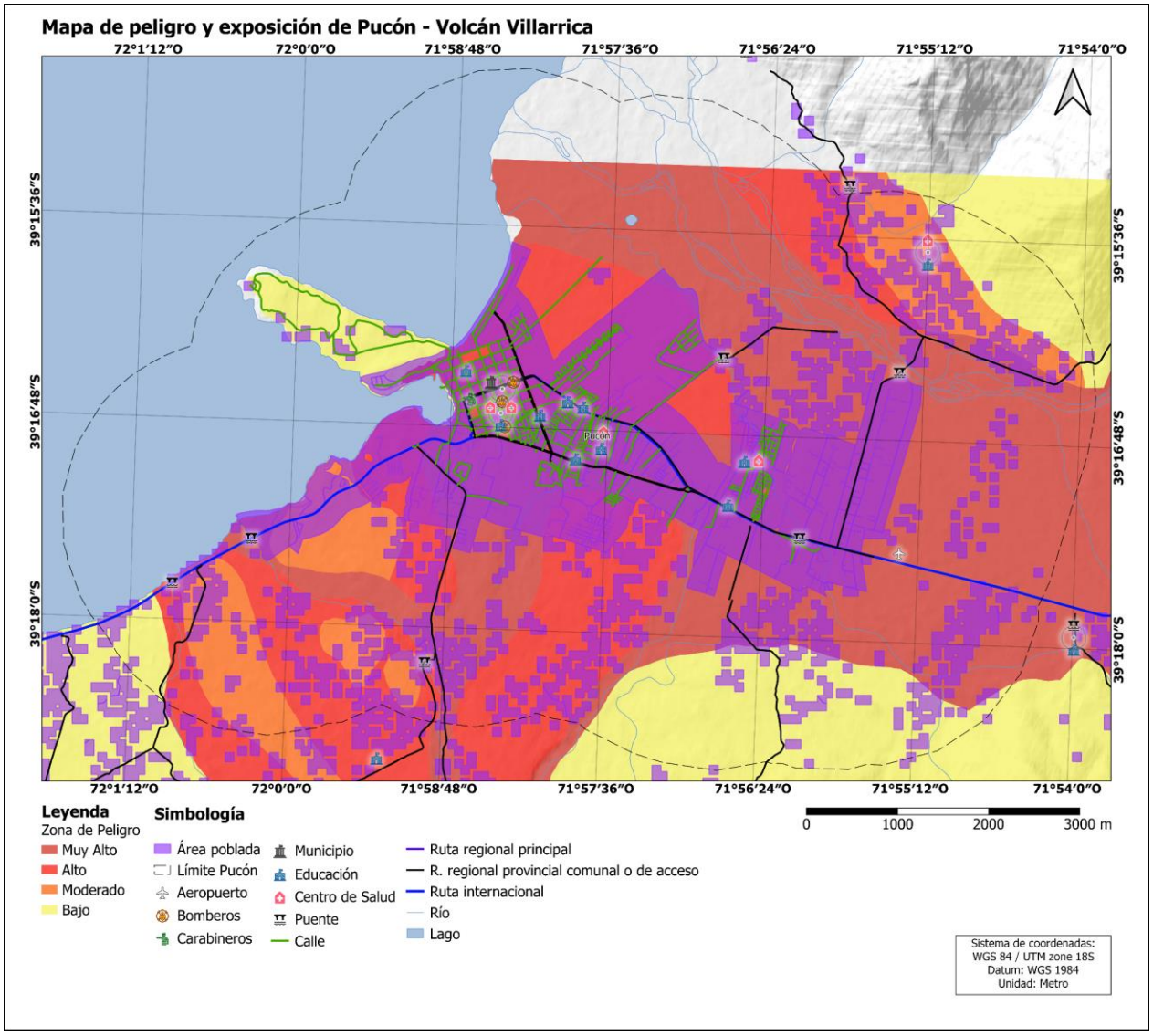


Figura 6.43. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Pucón de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Villarrica. Elaboración propia.

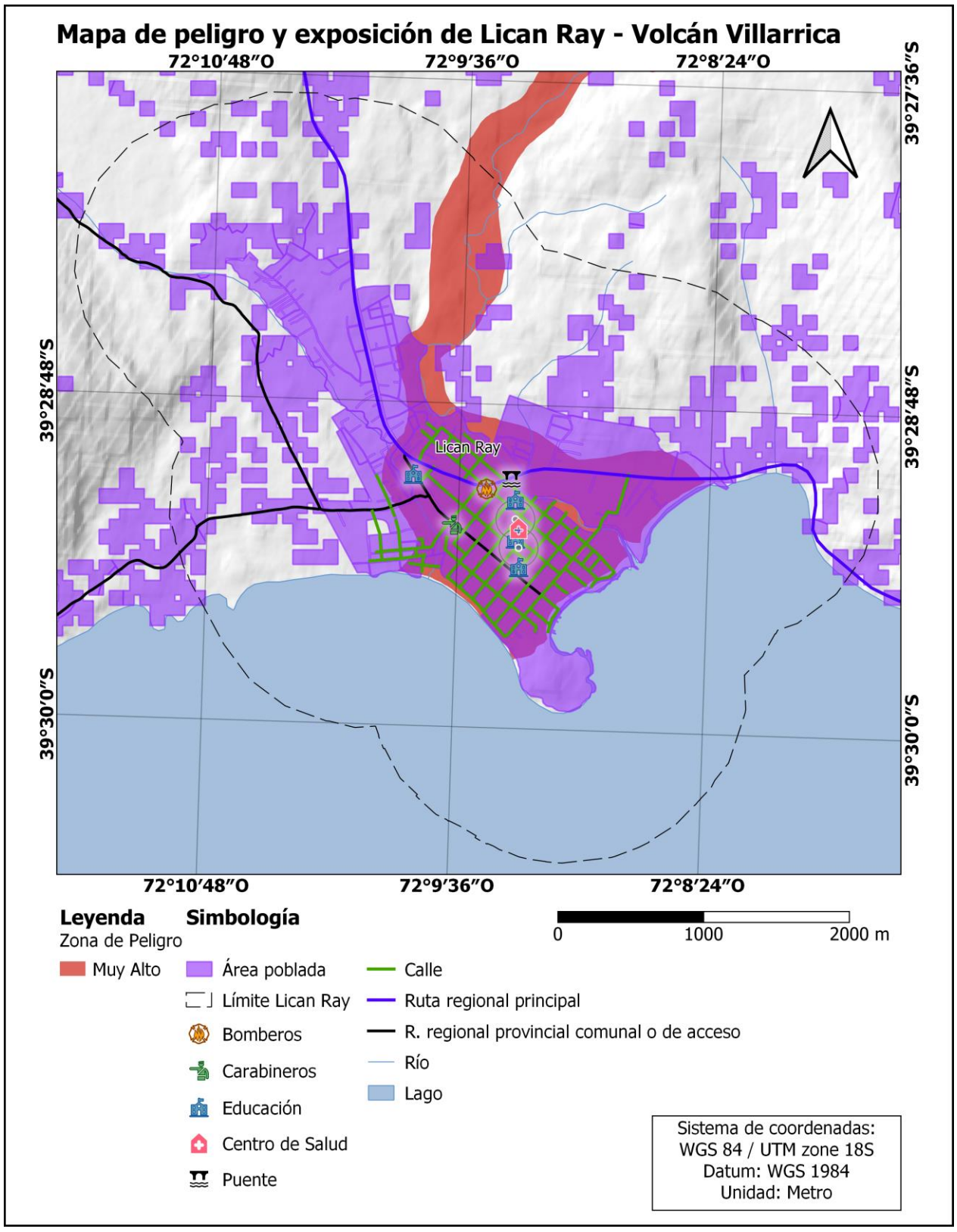


Figura 6.44. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Lican Ray de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Villarrica. Elaboración propia.

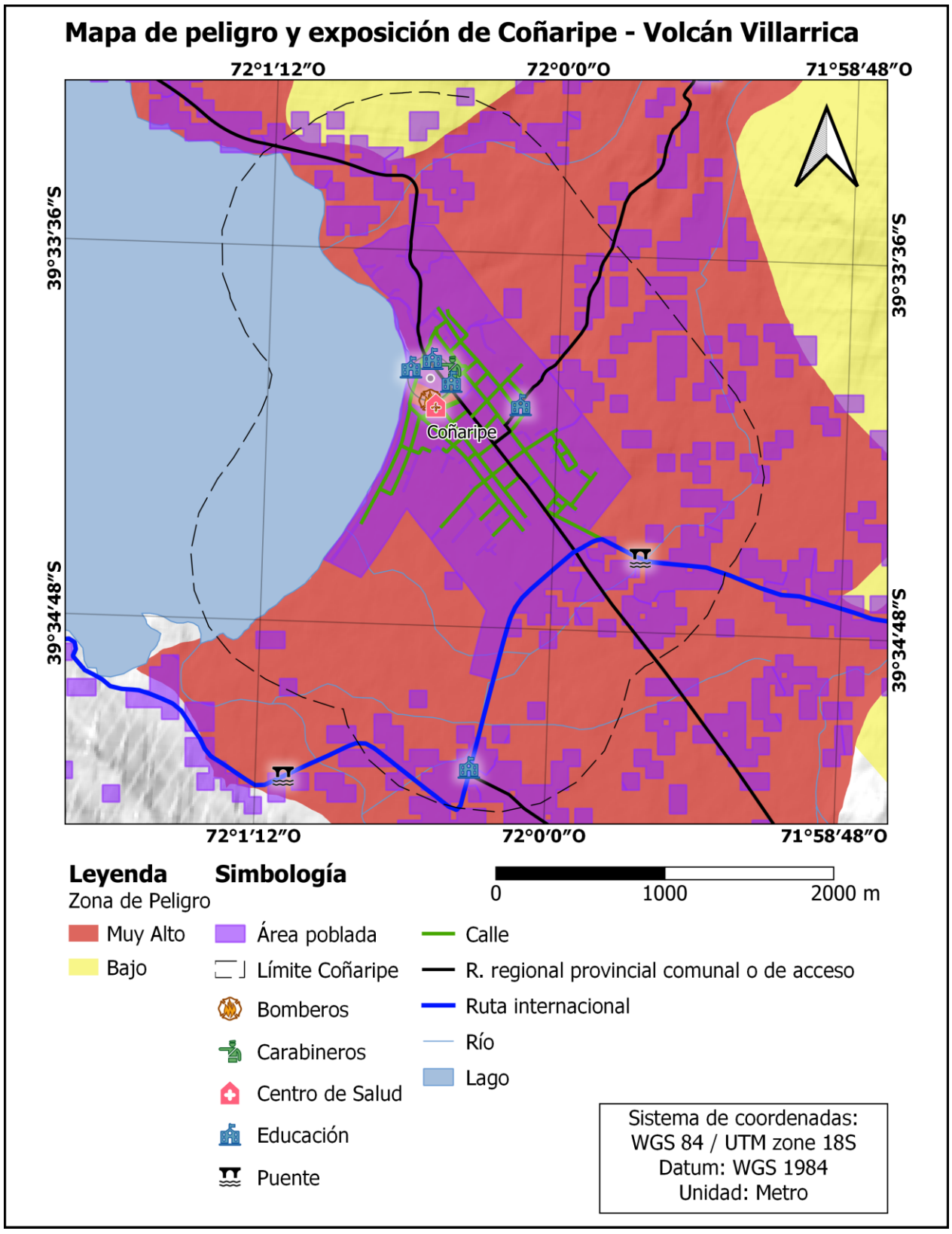


Figura 6.45. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Coñaripe de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Villarrica. Elaboración propia.

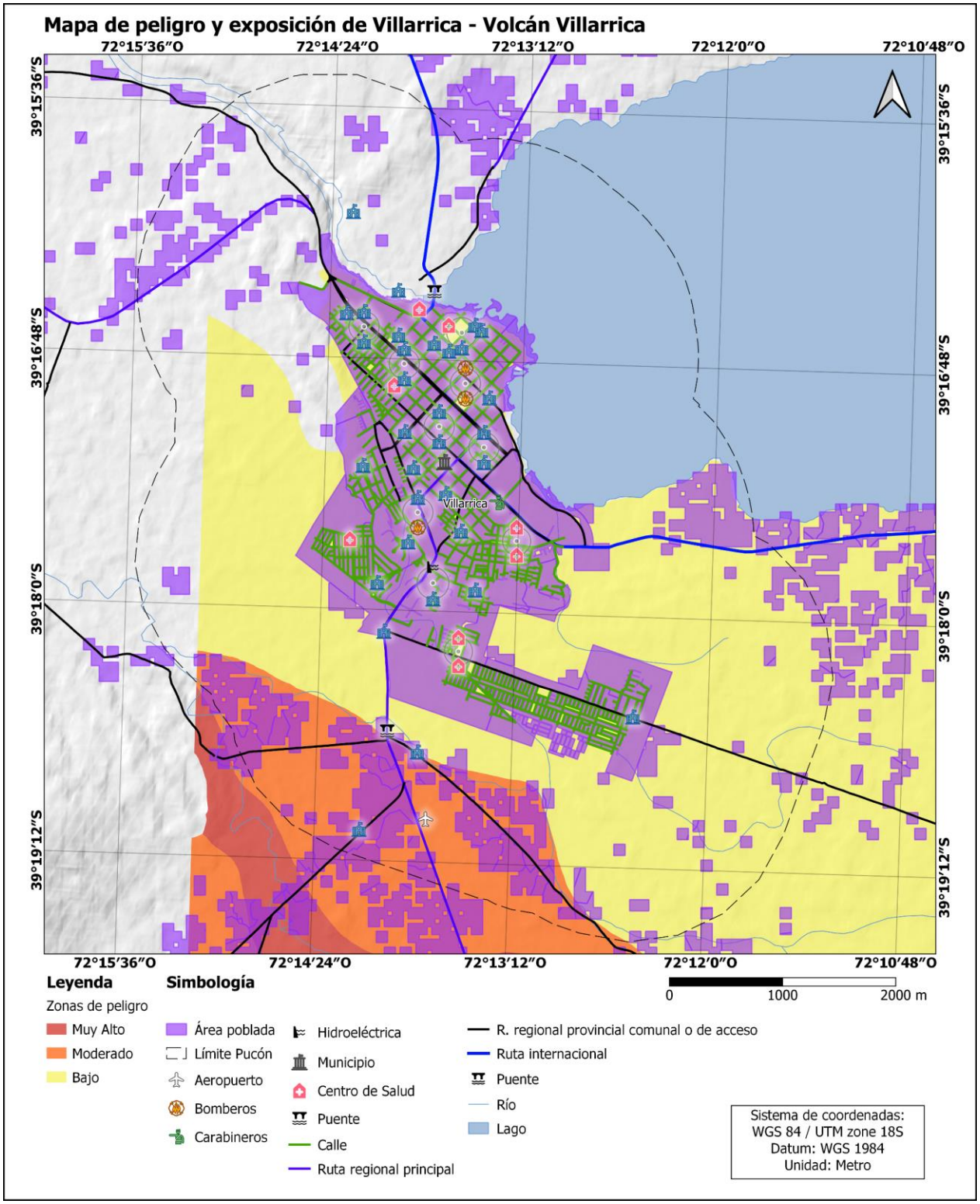


Figura 6.46. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Villarrica de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del volcán Villarrica. Elaboración propia.

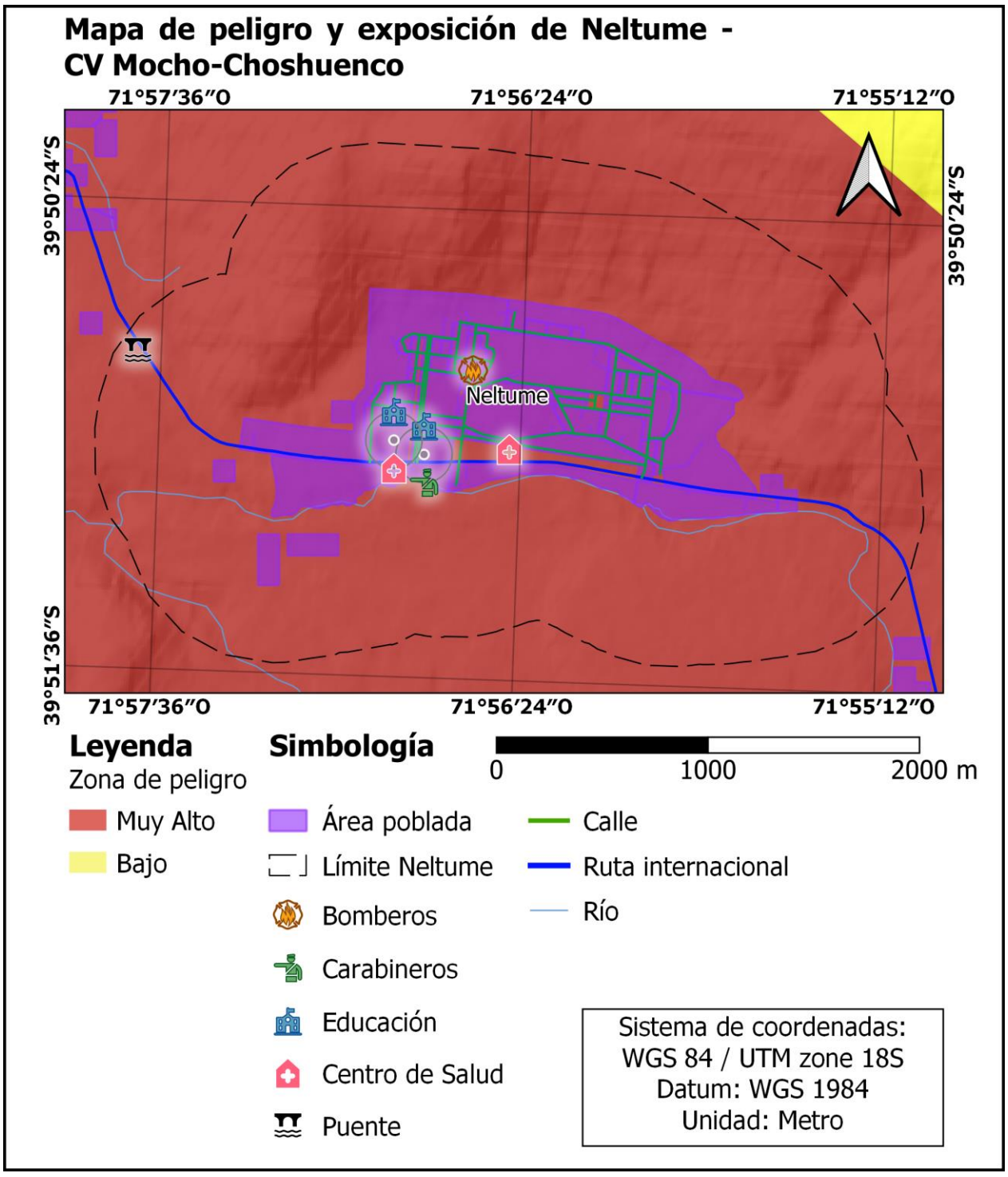


Figura 6.47. Mapa de peligro y exposición de la ciudad de Neltume de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del complejo volcánico Mocho-Choshuenco. Elaboración propia.

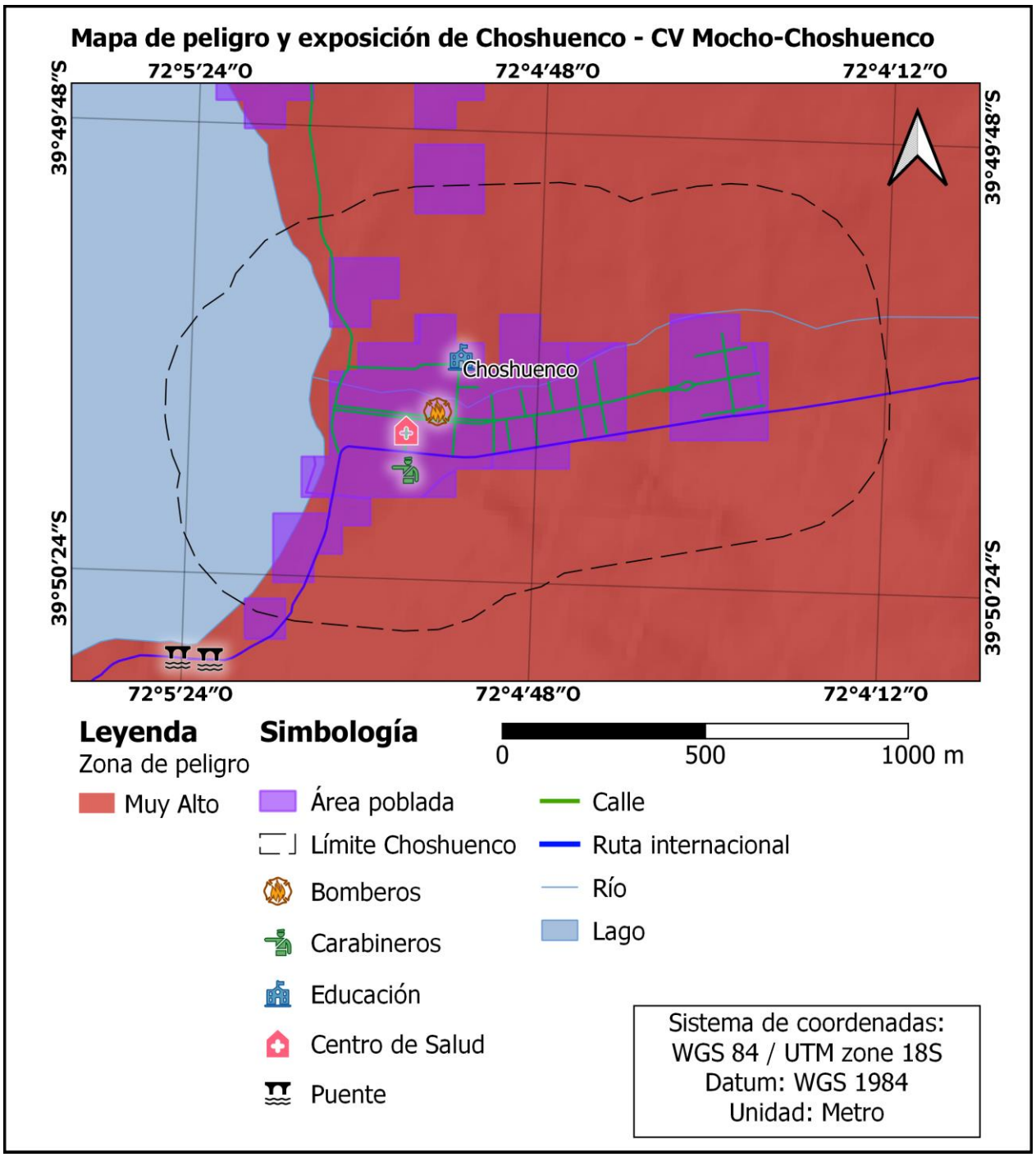


Figura 6.48. Mapa de peligro y exposición del poblado de Choshuenco de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del complejo volcánico Mocho-Choshuenco. Elaboración propia.

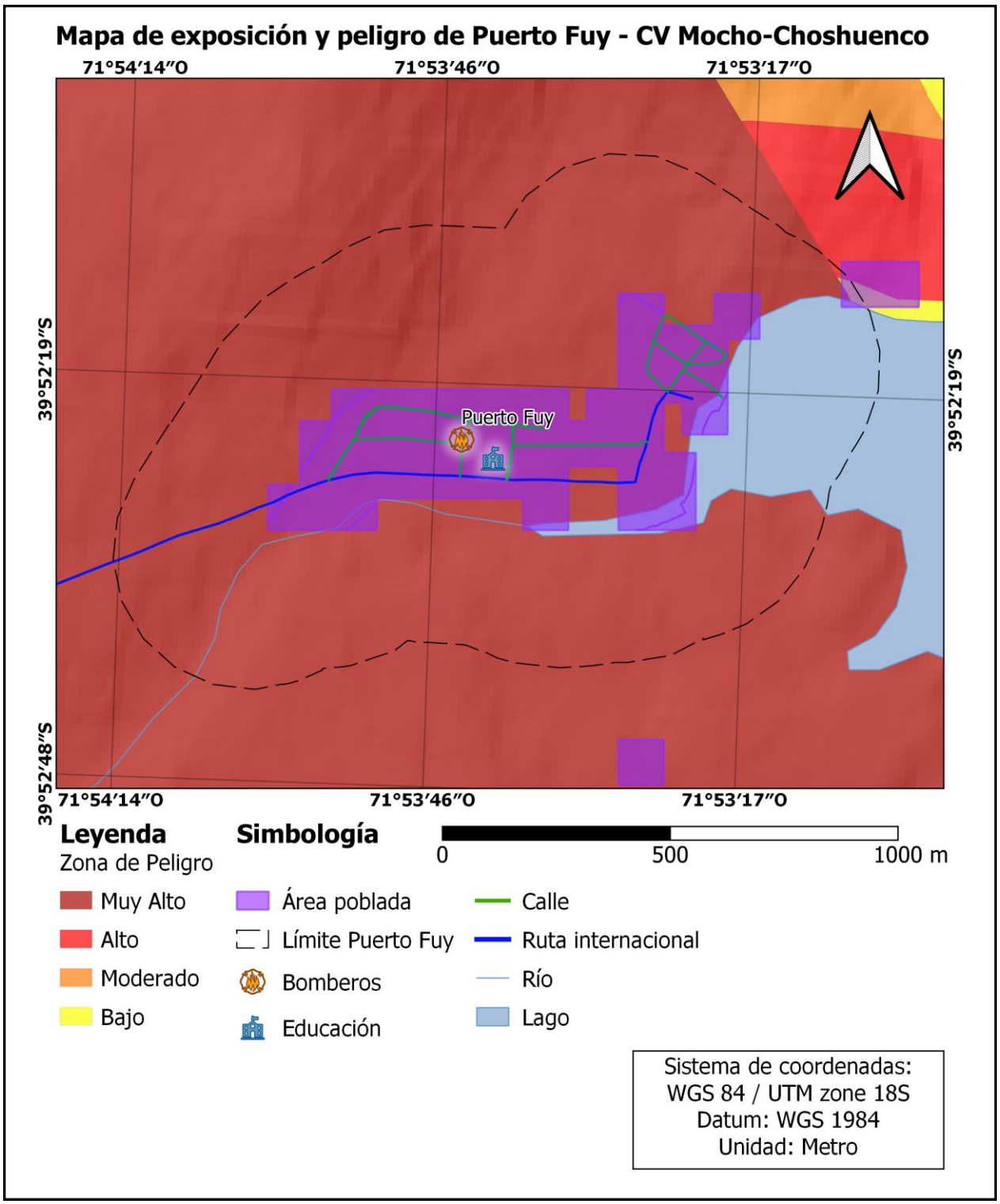


Figura 6.49. Mapa de peligro y exposición del poblado de Puerto Fuy de acuerdo a mapa de peligro de SERNAGEOMIN del complejo volcánico Mocho-Choshuenco. Elaboración propia.

6.4. Resultados de la evaluación de amenaza a nivel de poblados

6.4.1. Cantidad de elementos presentes en cada poblado

La tabla 6.10. contiene el total de elementos que conforman cada poblado, es decir, el número de personas, viviendas, infraestructuras críticas, puentes y la longitud de rutas dentro del *buffer* de cada uno. En dicha tabla se incluyen los poblados amenazados según ambos tipos de mapa de peligro.

Tabla 6.10. Elementos que conforman cada uno de los poblados amenazados por los volcanes estudiados. Se cuentan todos los elementos dentro del buffer generado para cada poblado.

Poblado	Elementos dentro del poblado				
	n.º de personas	n.º de viviendas	n.º de inf. críticas	longitud de rutas (km)	n.º de puentes
Ralco	1099	478	6	7.90	0
Lonquimay	3769	1589	9	28.50	2
Curacautín	12935	5496	16	74.58	6
Cherquenco	2191	922	6	18.70	0
Melipeuco	2946	1187	9	18.83	3
Manzanar	155	150	4	3.36	0
Malalcahuello	465	342	4	14.86	1
Pucón	19396	11328	21	104.75	6
Villarrica	32820	13665	47	124.72	2
Lican Ray	3096	3135	7	22.14	1
Coñaripe	1820	1560	8	21.21	1
Catripulli	615	326	5	10.25	3
Curarrehue	2295	988	7	12.17	1
Caburgua	453	827	1	10.78	1
Liquiñe	1103	590	4	10.02	5
Neltume	1970	845	6	16.48	1
Choshuenco	521	268	4	5.94	0
Puerto Fuy	481	209	2	4.26	0

La Tabla 6.11. muestra la cantidad de elementos expuestos de acuerdo a los mapas de peligro integrado. En aquellos poblados amenazados por más de un volcán (Lonquimay y Malalcahuello) se indica el volcán correspondiente entre paréntesis junto al nombre del poblado.

Tabla 6.11. **Cantidad de elementos expuestos dentro de los poblados según zonas de peligro integrado.** Se cuentan todos los elementos amenazados por los volcanes estudiados dentro del buffer de cada poblado, de acuerdo a mapas de peligro integrado.

Poblado	Elementos expuestos				
	n.º de personas	n.º de viviendas	n.º de inf. críticas	longitud de rutas (km)	n.º de puentes
Ralco	1099	478	6	7.90	0
Lonquimay (Vn. Tolhuaca)	3769	1589	9	30.23	2
Lonquimay (Vn. Lonquimay)	3769	1589	9	30.23	2
Curacautín	148	67	0	0.37	2
Cherquenco	671	277	4	3.32	0
Melipeuco	2383	958	11	13.20	2
Manzanar	154	150	4	0.83	0
Malalcahuello (Vn.	466	344	4	14.86	1
Malalcahuello (Vn. Llaima)	14	11	0	0.56	1
Pucón	19396	11326	21	106.70	6
Lican Ray	113	132	0	1.71	0
Coñaripe	1751	1516	7	19.71	1
Catripulli	615	326	5	10.25	3
Curarrehue	2295	988	7	12.17	1
Caburgua	243	378	0	6.46	1
Liquiñe	1103	590	4	10.02	5
Neltume	1971	847	6	16.48	1
Choshuenco	521	268	4	5.94	0
Puerto Fuy	481	209	2	4.26	0

La Tabla 6.12. contiene el número de elementos expuestos dentro de cada poblado acorde a las zonas de peligro de los mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

Tabla 6.12. **Cantidad de elementos expuestos dentro de los poblados según zonas de peligro de SERNAGEOMIN.** Se cuentan todos los elementos amenazados por los volcanes estudiados dentro del buffer de cada poblado, de acuerdo a mapas de peligro SERNAGEOMIN.

Poblado	Elementos expuestos				
	n.º de personas	n.º de viviendas	n.º de inf. críticas	longitud de rutas (km)	n.º de puentes
Ralco	1099	479.00	6	7.90	0
Curacautín	12935	5496.00	16	74.58	6
Lonquimay	3769	1589.00	9	30.23	2
Manzanar	155	150.00	4	3.36	0
Malalcahuello	465	342.00	4	14.86	1
Melipeuco	2946	1187.00	9	18.32	3
Cherquenco	2172	911.00	6	17.61	0
Villarrica	32820	13665.00	45	118.10	1
Pucón	19393	11322.00	21	105.05	6
Lican Ray	1899	1770.00	7	19.14	1
Coñaripe	1820	1560.00	8	21.21	1
Choshuenco	521	268.00	4	5.94	0
Neltume	1970	845.00	6	16.48	1
Puerto Fuy	481	209.00	2	4.26	0

6.4.2. Valores de exposición de cada poblado

Las tablas 6.13. y 6.14. muestran los valores de exposición de los elementos expuestos dentro de los poblados amenazados. La tabla 6.13. contiene los resultados correspondientes a mapas de peligro integrado y la Tabla 6.14., los resultados obtenidos mediante la evaluación realizada con mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

Tabla 6.13. **Valores de exposición de los elementos dentro de cada poblado según zonas de peligro integrado.** Se presentan los valores de todos los elementos amenazados por los volcanes estudiados dentro del buffer de cada poblado, de acuerdo a mapas de peligro integrado.

Poblado	Exposición de elementos vulnerables					
	Exposición de personas	Exposición de viviendas	Exposición de inf. críticas	Exposición de rutas	Exposición de puentes	Valor de exposición total
Ralco	1099	4.78	18	0.62	0	1099.25
Lonquimay (Vn. Tolhuaca)	3769	15.89	28	1.85	0.1	3769.28
Lonquimay (Vn. Lonquimay)	3769	15.89	28	1.85	0.1	3769.28
Curacautín	148	0.67	0	0.03	0.25	148.00
Cherquenco	671	2.77	9	0.25	0	671.11
Melipeuco	2383	9.58	24	0.97	0.1	2383.25
Manzanar	154	1.50	9	0.13	0	154.37
Malalcahuello (Vn. Lonquimay)	466	3.44	9	1.26	0.05	466.20
Malalcahuello (Vn. Llaima)	14	0.11	0	0.03	0.05	14.00
Pucón	19396	113.26	66	8.40	1.05	19396.92
Lican Ray	113	1.32	0	0.34	0	113.01
Coñaripe	1751	15.16	18	1.53	0.3	1751.35
Catripulli	615	3.26	12	1.41	0.65	615.24
Curarrehue	2295	9.88	20	1.55	0.3	2295.22
Caburgua	243	3.78	0	0.32	0.05	243.04
Liquiñe	1103	5.90	10	1.87	1.5	1103.17
Neltume	1971	8.47	16	1.85	0.3	1971.18
Choshuenco	521	2.68	11	0.53	0	521.19
Puerto Fuy	481	2.09	4	0.58	0	481.05

La Figura 6.50. muestra una gráfica que compara los valores de exposición total de cada poblado, en ella se indica el volcán correspondiente en caso de que el poblado esté amenazado por más de un volcán. Cabe destacar que Curacautín se encuentra amenazado por volcanes diferentes, pero esto depende del mapa que se utilice para la evaluación. De acuerdo a mapa de peligro integrado esta ciudad está amenaza por el volcán Tolhuaca, mientras que, según el mapa de SERNAGEOMIN, lo está por el volcán Lonquimay. Por lo tanto, este caso es diferente a la situación de Malalcahuello y Lonquimay, que se encuentran amenazados simultáneamente por dos volcanes con mapas del mismo tipo.

Tabla 6.14. **Valores de exposición de los elementos dentro de cada poblado según zonas de peligro SERNAGEOMIN.** Se presentan los valores de todos los elementos amenazados por los volcanes estudiados dentro del buffer de cada poblado, de acuerdo a mapas de peligro SERNAGEOMIN.

Poblado	Exposición de elementos vulnerables					
	Exposición de personas	Exposición de viviendas	Exposición de inf. críticas	Exposición de rutas	Exposición de puentes	Valor de exposición total
Ralco	1099	4.79	18	0.62	0	1099.25
Curacautín	12935	54.96	45	5.45	0.45	12935.43
Lonquimay	3769	15.89	28	1.85	0.1	3769.28
Manzanar	155	1.5	7	0.45	0	155.26
Malalcahuello	465	3.42	9	1.26	0.05	465.20
Melipeuco	2946	11.87	26	1.48	0.15	2946.26
Cherquenco	2172	9.11	15	1.24	0	2172.15
Villarrica	32820	136.65	138	7.66	0.2	32821.22
Pucón	19393	113.22	66	8.31	1.05	19393.92
Lican Ray	1899	17.7	20	1.29	0.2	1899.40
Coñaripe	1820	15.6	20	1.89	0.3	1820.39
Choshuenco	521	2.68	11	0.57	0	521.19
Neltume	1970	8.45	16	1.85	0.3	1970.18
Puerto Fuy	481	2.09	4	0.58	0	481.05

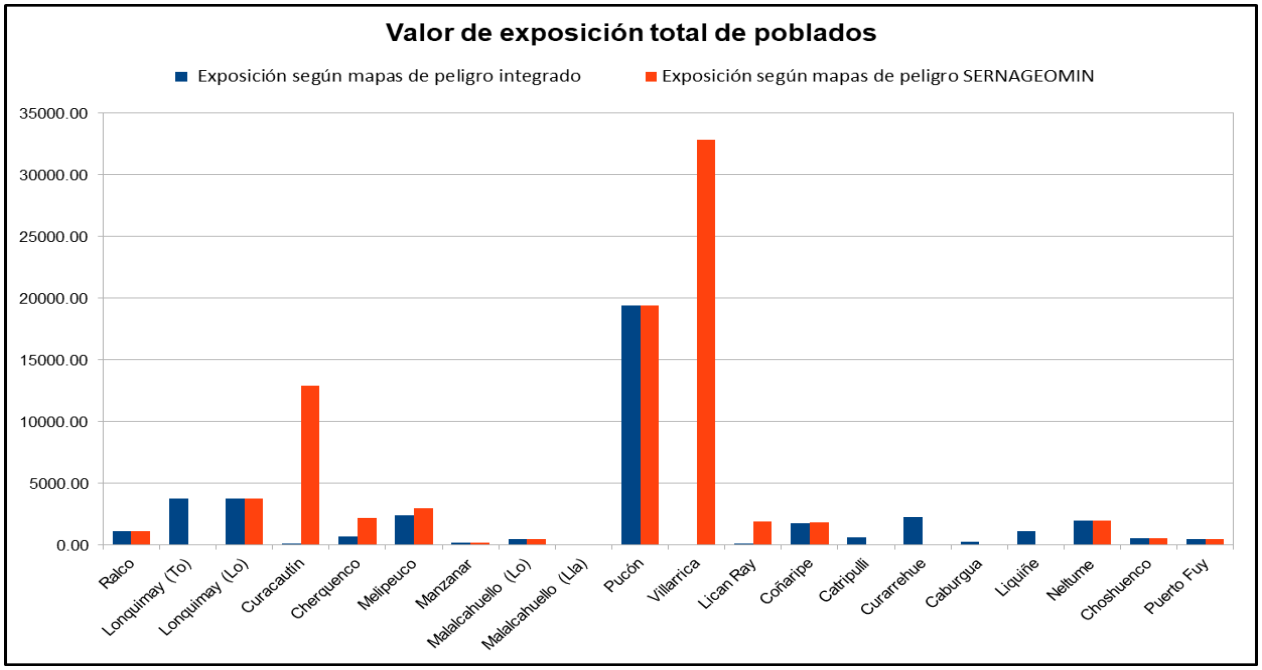


Figura 6.50. **Gráfica comparativa de valores de exposición total de poblados.** Las barras azules representan los valores de exposición de cada poblado de acuerdo a mapas de peligro integrado y las barras rojas, de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

6.4.3. Amenaza absoluta de los poblados estudiados

Las tablas 6.15. expone los valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados, según mapas de peligro integrado. En dicha tabla se muestran los valores de cada poblado con respecto a cada volcán de manera individual, es decir, Malalcahuello y Lonquimay aparecen dos veces, ya que son amenazadas por dos volcanes cada una. En dichos poblados la amenaza fue tratada de manera aditiva, se sumaron los valores de amenaza impartidos por cada volcán, para llegar a un valor único de amenaza, los cuales se exponen en la Tabla 6.16. Los demás poblados conservan los valores mostrados en la Tabla 6.15.

Tabla 6.15. **Valores de amenaza absoluta de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro integrado**. Se presentan los valores de todos los elementos amenazados por los volcanes estudiados dentro del buffer de cada poblado, de acuerdo a mapas de peligro integrado. Se consideró la relación individual de cada poblado con cada volcán.

Poblado	Valores de amenaza absoluta según peligro integrado					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Valor de amenaza total
Ralco	16504	71.70	270	9.42	0	16507.73
Lonquimay (Vn. Tolhuaca)	26383	111.23	196	12.34	0.7	26384.94
Lonquimay (Vn. Lonquimay)	109301	460.81	725	53.58	2.9	109308.06
Curacautín	3108	14.07	0	0.62	5.25	3108.06
Cherquenco	39589	163.43	531	14.90	0	39595.35
Melipeuco	93203	374.71	1012	38.69	5.9	93213.99
Manzanar	3468	33.45	241	4.23	0	3479.18
Malalcahuello (Vn. Lonquimay)	16077	118.53	321	43.18	1.85	16084.30
Malalcahuello (Vn. Llaima)	420	3.30	0	0.85	1.5	420.04
Pucón	1252263	7255.44	4206	538.01	81.25	1252321.27
Lican Ray	6780	79.20	0	20.47	0	6780.73
Coñaripe	105994	920.93	1080	92.81	18	106015.03
Catripulli	22755	120.62	444	52.31	24.05	22764.03
Curarrehue	61965	266.76	540	41.78	8.1	61970.92
Caburgua	6561	102.06	0	8.73	1.35	6561.96
Liquiñe	29781	159.30	270	50.59	40.5	29785.55
Neltume	168566	729.74	1607	171.66	31.8	168585.14
Choshuenco	54209	278.82	1144	55.62	0	54229.16
Puerto Fuy	40474	175.84	344	48.78	0	40477.99

Tabla 6.16. **Valores de amenaza absoluta de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro integrado**. Se presentan los valores de todos los elementos amenazados por los volcanes estudiados dentro del buffer de cada poblado, de acuerdo a mapas de peligro integrado. Se consideró la amenaza total de los poblados amenazados por múltiples volcanes.

Poblado	Valores de amenaza absoluta según peligro integrado					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Valor de amenaza total
Ralco	16504	71.70	270	9.42	0	16507.73
Lonquimay	135684	572.04	921	65.92	3.6	135693.00
Curacautín	3108	14.07	0	0.62	5.25	3108.06
Cherquenco	39589	163.43	531	14.90	0	39595.35
Melipeuco	93203	374.71	1012	38.69	5.9	93213.99
Manzanar	3468	33.45	241	4.23	0	3479.18
Malalcahuello	16497	121.83	321	44.02	3.35	16504.28
Pucón	1252263	7255.44	4206	538.01	81.25	1252321.27
Lican Ray	6780	79.20	0	20.47	0	6780.73
Coñaripe	105994	920.93	1080	92.81	18	106015.03
Catripulli	22755	120.62	444	52.31	24.05	22764.03
Curarrehue	61965	266.76	540	41.78	8.1	61970.92
Caburgua	6561	102.06	0	8.73	1.35	6561.96
Liquiñe	29781	159.30	270	50.59	40.5	29785.55
Neltume	168566	729.74	1607	171.66	31.8	168585.14
Choshuenco	54209	278.82	1144	55.62	0	54229.16
Puerto Fuy	40474	175.84	344	48.78	0	40477.99

La Figura 6.51. muestra un gráfico de dispersión en el que se representa la amenaza absoluta según dos tipos de mapas de peligro geológico, considerando los valores de las tablas 6.16. y 6.17. En el eje Y se encuentra la amenaza absoluta según mapas de peligro integrado, mientras que en el eje X se encuentra la amenaza absoluta según mapas de peligro de SERNAGEOMIN. Cada punto en el gráfico representa una ubicación específica y la posición del punto en los ejes indica el nivel de amenaza absoluta según los dos tipos de mapas de peligro. Por lo tanto, se pueden identificar ubicaciones donde los niveles de amenaza son similares según ambos tipos de mapas, así como ubicaciones donde existe una discrepancia significativa en los niveles de amenaza. Se puede ver que la ciudad de Pucón es la que acumula mayor amenaza absoluta, dado que combina una elevada exposición y alto nivel de peligro, quedando muy por encima de los demás poblados. Otros poblados que destacan por sobre los demás son Neltume, Melipeuco y Coñaripe.

Tabla 6.17: **Valores de amenaza absoluta de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro de SERNAGEOMIN**. Se presentan los valores de todos los elementos amenazados por los volcanes estudiados dentro del buffer de cada poblado, de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

Poblado	Valores de amenaza absoluta según peligro SERNAGEOMIN					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Valor de amenaza total
Ralco	188160	832	2880	120.53	0	188199.03
Curacautín	1747600	7500	3600	587.08	72	1747639.56
Lonquimay	1206080	5084.8	8960	591.20	32	1206169.19
Manzanar	232160	2241.6	11200	725.61	0	232591.86
Malalcahuello	744000	5472	14400	2011.49	80	744324.12
Melipeuco	11018040	44393.8	97240	5522.79	561	11019030.17
Cherquenco	3795440	15859.8	27720	1997.97	0	3795713.65
Villarrica	16152440	68314.6	69000	3981.60	92	16153058.80
Pucón	63438600	356060.7	206770	24310.32	3542	63441349.89
Lican Ray	7425090	69207	78200	5036.82	782	7426670.83
Coñaripe	7064450	60168	78200	7389.18	1173	7065977.80
Choshuenco	1689290	8721	35530	1834.97	0	1689918.52
Neltume	6359870	27293.5	51680	5984.54	969	6360450.45
Puerto Fuy	1560090	6879.9	12920	1859.56	0	1560240.35

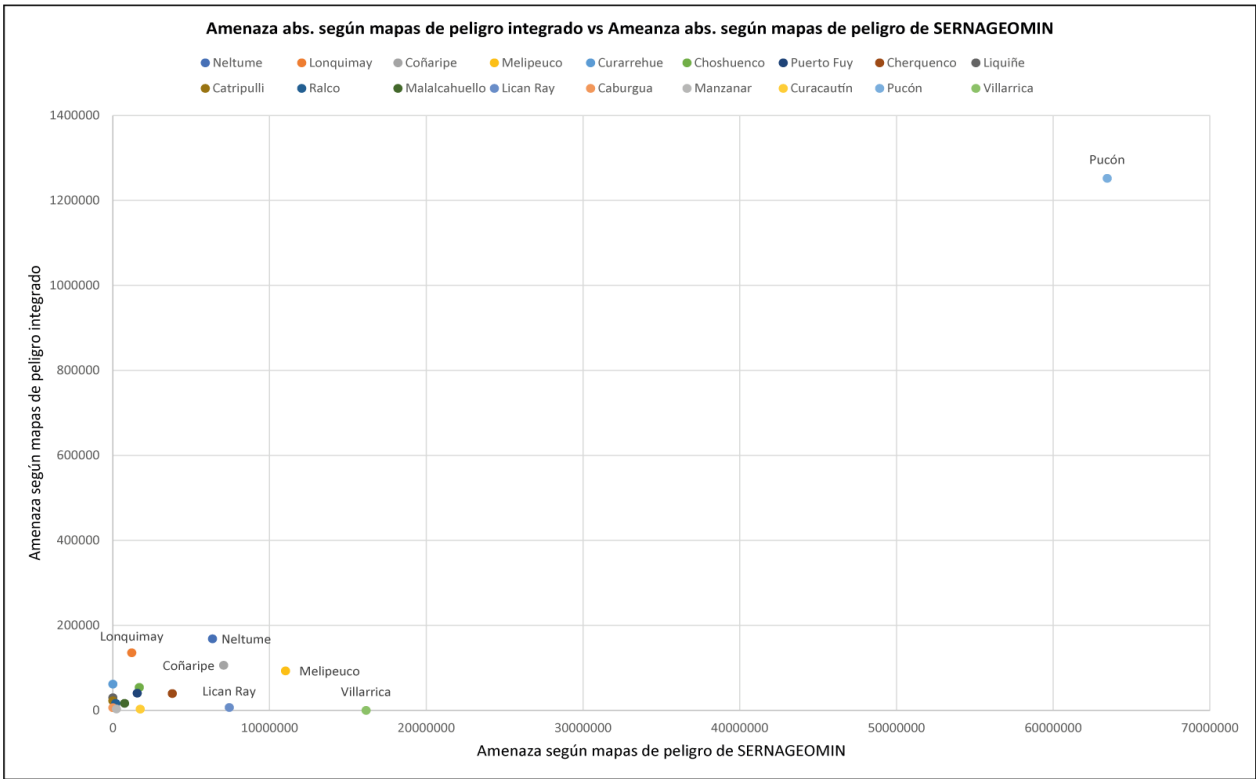


Figura 6.51. **Valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro integrado vs Valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN.** Elaboración propia.

La Figura 6.52. muestra un gráfico de dispersión en el que se representa la amenaza absoluta según dos tipos de mapas de peligro geológico, pero en esta versión los ejes están en escala logarítmica. En el eje Y se encuentra la amenaza absoluta según mapas de peligro integrado, mientras que en el eje X se encuentra la amenaza absoluta según mapas de peligro de SERNAGEOMIN. La escala logarítmica permite visualizar una mayor gama de valores sin tener que extender demasiado el eje. Esta representación puede resultar útil para resaltar las diferencias en los niveles de amenaza en una amplia gama de valores, permitiendo una visualización más clara de los poblados que se acumulan cerca del origen en la Figura 6.51.

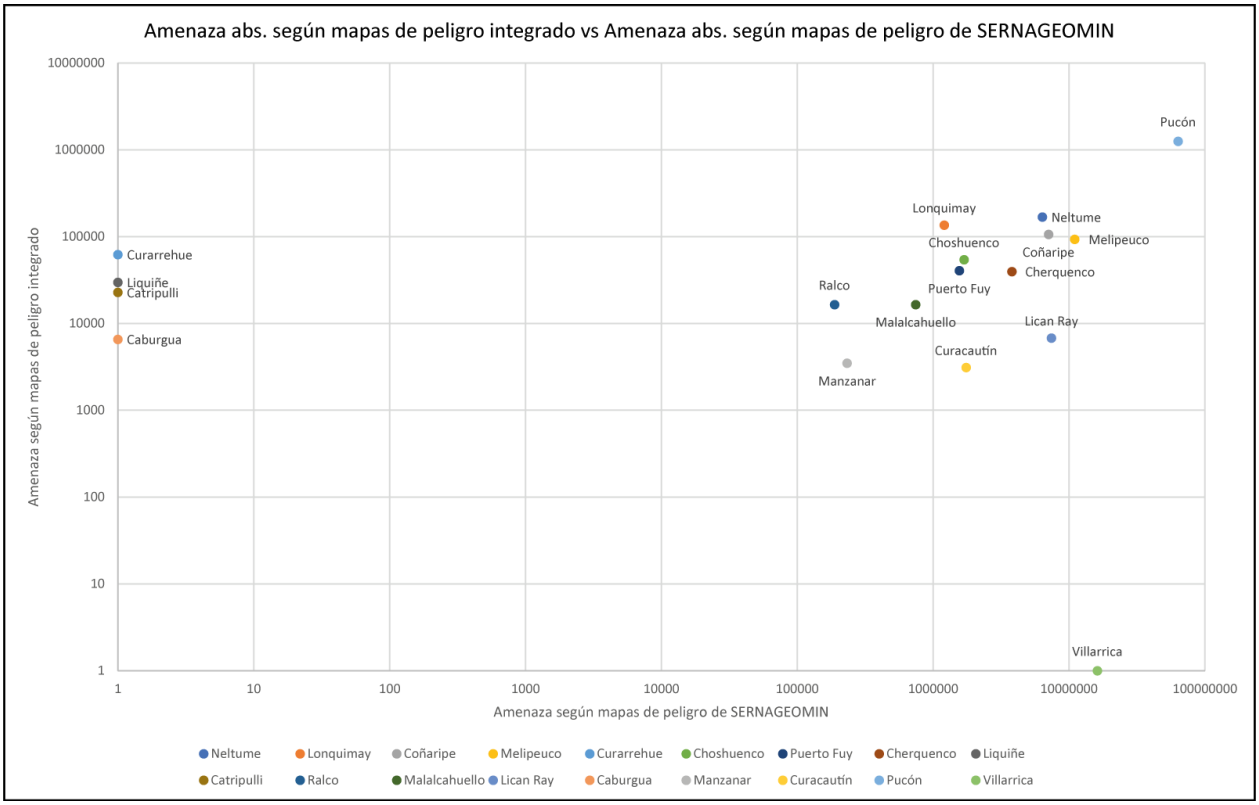


Figura 6.52. **Valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro integrado vs Valores de amenaza absoluta de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN con ejes en escala logarítmica.** Ambos ejes han sido representados en escala logarítmica para una mejor visualización de los datos. Elaboración propia.

6.4.4. Amenaza normalizada de los poblados estudiados

El valor de amenaza normalizada de poblados es ligeramente diferente al valor de amenaza normalizada de volcanes. Mientras que la amenaza normalizada de volcanes corresponde al

cociente entre la amenaza absoluta y el valor de exposición relacionado al volcán, la amenaza normalizada de poblados es el cociente de la amenaza absoluta del mismo y el total de elementos del poblado ponderados por el factor de exposición correspondiente. La Tabla 6.18 muestra los valores obtenidos de la ponderación de los elementos de cada poblado por el factor de exposición, independiente de si están en zona de peligro o no. Las tablas 6.19. y 6.20. muestran los valores de amenaza normalizada de cada poblado ordenados de mayor a menor, para mapas de peligro integrado y mapas de SERNAGEOMIN, respectivamente.

Tabla 6.18. **Valores totales de los elementos que conforman cada poblado.** Los elementos están ponderados por el factor de exposición correspondiente en la Tabla 4.4. independiente si están o no en zona de peligro.

Poblado	Elementos de un poblado ponderados por factor de exposición					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	TOTAL
Ralco	1099	4.78	18	0.79	0	1099.25
Lonquimay	3769	15.89	28	1.58	0.1	3769.28
Curacautín	12935	54.96	47	8.07	0.45	12935.47
Cherquenco	2191	9.22	15	2.03	0	2191.16
Melipeuco	2946	11.87	26	1.58	0.15	2946.27
Manzanar	155	1.5	9	0.56	0	155.39
Malalcahuello	465	3.42	9	1.78	0.05	465.22
Pucón	19396	113.28	66	12.03	1.05	19396.95
Villarrica	33264	139.17	143	9.35	0.5	33265.28
Lican Ray	3096	31.35	20	1.35	0.2	3096.45
Coñaripe	1820	15.6	20	2.48	0.3	1820.40
Catripulli	615	3.26	12	1.38	0.65	615.24
Curarrehue	2295	9.88	20	1.81	0.3	2295.22
Caburgua	453	8.27	2	0.69	0.05	453.13
Liquiñe	1103	5.9	10	1.87	1.5	1103.17
Neltume	1970	8.45	16	2.47	0.3	1970.19
Choshuenco	521	2.68	11	0.77	0	521.20
Puerto Fuy	481	2.09	4	0.72	0	481.05

La Figura 6.53. muestra una gráfica de dispersión de los valores de amenaza normalizada para los mapas de peligro integrado y de SERNAGEOMIN. En contraste con las gráficas de amenaza absoluta (Figuras 6.51 y 6.52), se observa una distribución distinta en esta gráfica. Los poblados con alta amenaza normalizada según ambos tipos de mapa se sitúan en la esquina superior derecha del gráfico e incluyen Coñaripe, Pucón, Neltume, Puerto Fuy y Choshuenco. Además, Melipeuco destaca con una alta amenaza normalizada según el mapa de SERNAGEOMIN y una moderada

amenaza normalizada según el mapa de peligro integrado. Por otro lado, Caburgua, Liquiñe y Curarrehue comparten la misma ubicación en el gráfico, ya que tienen valores de amenaza normalizada similares según el mapa de peligro integrado y no aparecen en los mapas de peligro de SERNAGEOMIN, por lo que su valor en el eje respectivo es cero.

De acuerdo a mapas de SERNAGEOMIN, los poblados con los valores de amenaza normalizada más altos son Coñaripe y Melipeuco, amenazados por los volcanes Villarrica y Llaima, respectivamente. Esto no es sorpresivo, ya que, como se puede comprobar en los mapas de cada uno (Figura 6.41. y Figura 6.45.), ambos poblados están cubiertos casi en su totalidad por zonas de muy alto peligro. Tras los dos primeros puestos se ubican, con valores muy similares, Pucón, Puerto Fuy, Choshuenco y Neltume, compartiendo el tercer lugar.

Tabla 6.19. Valores de amenaza normalizada de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro integrado.

Poblado	Valores de amenaza normalizada de poblados según peligro integrado					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Valor de amenaza total
Ralco	15.02	15.00	15.00	11.90	0.00	15.02
Lonquimay	36.00	36.00	32.89	41.79	36.00	36.00
Curacautín	0.24	0.26	0.00	0.08	11.67	0.24
Cherquenco	18.07	17.73	35.40	7.36	0.00	18.07
Melipeuco	31.64	31.57	38.92	24.45	39.33	31.64
Manzanar	22.37	22.30	26.78	7.49	0.00	22.39
Malalcahuello	35.48	35.62	35.67	24.69	67.00	35.48
Pucón	64.56	64.05	63.73	44.71	77.38	64.56
Lican Ray	2.19	2.53	0.00	15.17	0.00	2.19
Coñaripe	58.24	59.03	54.00	37.37	60.00	58.24
Catripulli	37.00	37.00	37.00	37.83	37.00	37.00
Curarrehue	27.00	27.00	27.00	23.04	27.00	27.00
Caburgua	14.48	12.34	0.00	12.71	27.00	14.48
Liquiñe	27.00	27.00	27.00	27.01	27.00	27.00
Neltume	85.57	86.36	100.44	69.47	106.00	85.57
Choshuenco	104.05	104.04	104.00	71.81	0.00	104.05
Puerto Fuy	84.15	84.13	86.00	68.12	0.00	84.15

Tabla 6.20. **Valores de amenaza normalizada de los poblados expuestos a los volcanes estudiados según zonas de peligro de SERNAGEOMIN.**

Poblado	Valores de amenaza normalizada de poblados según peligro SERNAGEOMIN					
	Personas	Viviendas	Infraestructura crítica	Rutas	Puentes	Valor de amenaza total
Ralco	171.21	174.06	160.00	152.29	0.00	171.21
Curacautín	135.11	136.46	76.60	72.74	160.00	135.10
Lonquimay	320.00	320.00	320.00	374.86	320.00	320.00
Manzanar	1497.81	1494.40	1244.44	1285.40	0.00	1496.78
Malalcahuello	1600.00	1600.00	1600.00	1128.23	1600.00	1599.95
Melipeuco	3740.00	3740.00	3740.00	3489.36	3740.00	3740.00
Cherquenco	1732.29	1720.15	1848.00	986.57	0.00	1732.29
Villarrica	485.58	490.87	482.52	425.74	184.00	485.58
Pucón	3270.71	3143.19	3132.88	2020.40	3373.33	3270.69
Lican Ray	2398.28	2207.56	3910.00	3732.41	3910.00	2398.45
Coñaripe	3881.57	3856.92	3910.00	2975.54	3910.00	3881.54
Choshuenco	3242.40	3254.10	3230.00	2369.05	0.00	3242.36
Neltume	3228.36	3230.00	3230.00	2421.89	3230.00	3228.35
Puerto Fuy	3243.43	3291.82	3230.00	2596.98	0.00	3243.42

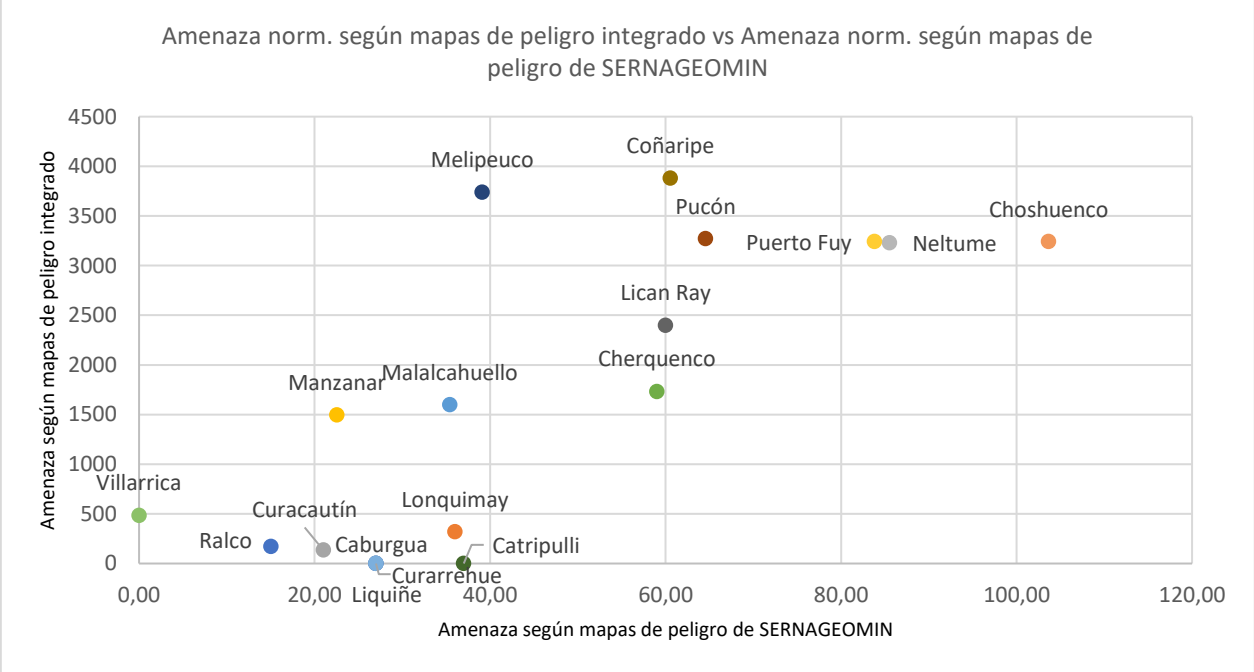


Figura 6.53. **Valores de amenaza normalizada de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro integrado vs Valores de amenaza normalizada de los poblados estudiados de acuerdo a mapas de peligro de SERNAGEOMIN.** Elaboración propia.

7. DISCUSIÓN

7.1. Una nueva metodología de evaluación de la amenaza volcánica

La principal base conceptual de este trabajo es el sistema NVEWS (Ewert, 2007), donde se define la *Amenaza* como el riesgo cualitativo que supone un volcán para las personas y los bienes, independientemente de los esfuerzos de mitigación. La cualidad principal de dicha metodología es su objetividad y simpleza, que permiten una fácil ejecución en múltiples volcanes. SERNAGEOMIN ha adoptado este método en su Ranking de Riesgo Específico (2019). Sin embargo, NVEWS (Ewert, 2007) no incorpora la vulnerabilidad de los elementos expuestos entre los factores que evalúa, razón por la cual no habla de Riesgo, sino que, de Amenaza volcánica, como traducción directa de la palabra *Threat*.

Se pueden encontrar definiciones de amenaza en otras áreas del conocimiento, como las ciencias militares, donde los factores de peligro son diferentes, pero existe la similitud de un ente con potencial de afectar elementos potencialmente vulnerables. Steinberg (2005) plantea que una situación de amenaza es aquella en la que existe cierta probabilidad de que se produzcan ciertos tipos de eventos potenciales (por ejemplo, ataques) por parte de algún agente (que puede ser o no una persona o agencia humana) contra entidades amenazadas (que a menudo incluyen personas o sus posesiones).

La metodología propuesta en esta memoria, permite llegar a valores de amenaza de una forma más detallada. En la metodología NVEWS, la amenaza se obtiene a través de la combinación de una serie de factores de peligro (Figura 7.1.) y exposición (Figura 7.2.) que caracterizan a un volcán. La exposición de personas es incorporada como el Log_{10} del VPI (*Volcano Population Index*), índice que, en este caso, considera la población dentro de un radio de 30 km en torno al volcán. En cambio, la metodología aquí propuesta considera a cada persona de forma directa, lo cual explica por qué se ve reflejada la gran diferencia del Volcán Villarrica, mientras que, en el Ranking de Riesgo Específico de SERNAGEOMIN, dicha diferencia no es tan marcada (Figura 6.15.)

Hazard and exposure factors used in threat assessment of U.S. volcanoes for the National Volcano Early Warning System.
See appendix text for discussion and explanation of abbreviations.

Hazards Factors	Score
Volcano type If volcano type is cinder cone, basaltic field, small shield, or fissure vents: Score = 0 If volcano type is stratocone, lava domes, complex volcano, maar or caldera: Score = 1	
Maximum Volcano Explosivity Index (VEI) If maximum known VEI ≤ 2: Score = 0 If maximum known VEI = 3 or 4: Score = 1 If maximum known VEI = 5 or 6: Score = 2 If maximum known VEI ≥ 7: Score = *3* If no maximum VEI is listed by GVP and if volcano type = 0: Score = 0 If no maximum VEI is listed by GVP but volcano type = 1: Score = 1 If no known Holocene eruptions and the volcano is *not* a silicic caldera system: Score = 0	
Explosive activity If explosive activity (VEI ≥ 3) within the last 500 years: Score = 1	
Major explosive activity If major explosive activity (VEI ≥ 4) within last 5000 years: Score = 1	
Eruption recurrence If eruption interval is 1-99 years: Score = 4 If eruption interval is 100 – 1,000 years: Score = 3 If eruption interval is 1,000 to several thousand years: Score =2 If eruption interval is 5,000-10,000 years, or if no Holocene eruptions but it is a large-volume restless silicic system that has erupted in the last 100,000 years: Score = 1 If no known Holocene eruption: Score = 0	
Holocene pyroclastic flows? If yes: Score = 1	
Holocene lava flows? If Holocene lava flows have traveled beyond the immediate eruption site or flanks and reached populated areas: Score =1	
Holocene lahars? If Holocene lahars have traveled beyond the flanks and reached populated areas: Score =1	
Holocene tsunami(s)? Has it produced a tsunami within the Holocene? If yes: Score = 1	
Hydrothermal explosion potential? If the volcano has had Holocene phreatic explosive activity, and/or the volcano has thermal features that are extensive enough to pose a potential for explosive activity: Score =1	
Sector collapse potential? If the volcano has produced a sector collapse in Quaternary-Holocene time *and* has re-built its edifice, *or*, has high relief, steep flanks and demonstrated or inferred alteration: Score = 1	
Primary lahar source? If volcano has a source of permanent water/ice on edifice, water volume > 10^6 m^3: Score = 1	

Figura 7.1. **Factores de peligro de la metodología NVEWS.** La mayoría de los factores son binarios, puntuando 0-1, de acuerdo a la presencia o ausencia de una determinada característica. Tomado de NVEWS (Ewert, 2007).

Historical Unrest Factors	
Observed seismic unrest Since the last eruption, in the absence of eruptive activity, within 20 km of the volcanic edifice? If yes: Score = 1	
Observed ground deformation Since the last eruption, in the absence of eruptive activity, inflation or other evidence of magma injection? If yes: Score = 1	
Observed fumarolic or magmatic degassing Since the last eruption, in the absence of eruptive activity, either heat source or magmatic gases? If yes: Score = 1	
Total of Hazard Factors	
Exposure Factors	
Log_{10} of Volcano Population Index (VPI) at 30 km Calculated with LandScan population database. Visitor statistics for volcanoes in National Parks and other destination recreation areas are added to the VPI factor where available.	
Log_{10} of approximate population downstream or downslope Population outside the 30 km VPI circle included within the extent of Holocene flow deposits or reasonable inundation modeling. This factor to be used only with volcanoes that have a primary lahar hazard (e.g. Cascade stratovolcanoes) or significant lava flow hazard (e.g. Mauna Loa).	
Historical fatalities? If yes, and a permanent population is still present: Score = 1	
Historical evacuations? If yes, and a permanent population is still present: Score = 1	
Local aviation exposure If any type volcano is within 50 km of a jet-service airport, score = 1; if a *Type 1* volcano is within 300 km of a jet-service airport, score = 1; if a *Type 1* volcano is within 300 km of a major international airport, score = 2; if none of these criteria are met, score = 0.	
Regional aviation exposure This score is based on the log_{10} of approximate daily passenger traffic in each region. At present, in the U.S., this score ranges from 4 to 5.15. The regional risk code is applied only to *type 1* volcanoes and those *type 0* volcanoes that have produced explosive eruptions.	
Power infrastructure Is there power infrastructure (e.g., power generation/transmission/distribution for electricity, oil, or gas) within flowage hazard zones, or in an area frequently downwind of the volcano and close enough to considered at some risk? If yes, score =1	
Transportation infrastructure Is there transportation infrastructure (e.g. port facilities, rail lines, major roads) within flowage hazard zones, or in an area frequently downwind of the volcano and close enough to considered at some risk? If yes, score = 1	
Major development or sensitive areas Are there major developments or sensitive areas threatened (e.g., National Park facilities, flood control projects, government facilities, developed tourist/recreation facilities, manufacturing or other significant economic activity)? If yes, score =1	
Volcano is a significant part of a populated island Holocene volcanic deposits cover >25% of land mass. If yes, score = 1	
Total of Exposure Factors	
Sum of all hazard factors x Sum of all exposure factors = Relative Threat Ranking	

Figura 7.2. **Factores de exposición de la metodología NVEWS.** La mayoría de los factores son binarios, puntuando 0-1, de acuerdo a la presencia o ausencia de una determinada característica. Tomado de NVEWS (Ewert, 2007).

En esta propuesta, los factores de peligro fueron incorporados en mapas detallados y cuantificados, mientras que los factores de exposición, por medio de un análisis minucioso de las áreas potencialmente amenazadas (según los mapas de peligro). De esta forma se pueden capturar aspectos tales como la distribución de la población e infraestructuras y su relación con el peligro, lo cual difícilmente se puede observar valiéndose simplemente de índices de exposición, como se hace actualmente con NVEWS y su versión adaptada a Chile. Los factores de exposición fueron seleccionados para ajustarlos al contexto local, procurando que los datos estuviesen disponibles para la mayoría de los volcanes estudiados, con tal de no subestimar volcanes por la no disponibilidad de los datos requeridos. Esta metodología realiza un análisis y cuantificación más detallada y precisa de la amenaza volcánica o riesgo específico, cómo lo llama SERNAGEOMIN

7.2. Base de datos espaciales

Este es el componente fundamental para la evaluación de amenaza y uno de los productos más importantes de este trabajo, dada la cantidad de información que contiene, la que además está pensada para seguirse nutriendo de datos de los otros volcanes de Chile. El objetivo principal de la información recopilada es la evaluación de amenaza, sin embargo, existe la posibilidad de ser utilizada de la manera que se estime conveniente, para obtener otro tipo de resultados de interés. Por ejemplo, en el caso de los mapas de peligro integrado, se cuenta con la información desagregada de todos los escenarios modelados para dar origen a dichos mapas, lo que abre la posibilidad de realizar análisis de amenaza para cada peligro en específico.

Para poder llevar a cabo una evaluación lo más completa e integral posible, la BDE incorpora múltiples elementos vulnerables. Al mismo tiempo, mientras mayor es la diversidad de elementos involucrados en el análisis, mayor es la dificultad para compararlos y evaluarlos con una misma escala. Por ejemplo, si entre los factores de exposición se incluyera el uso de suelos, cuyo valor es mayormente económico, sería difícil equipararlo con zonas protegidas, tales como parques y reservas nacionales, ya que estas áreas tienen una valoración diferente, ligadas a la preservación de la naturaleza, donde justamente se aplican restricciones para la realización de actividades económicas. Por lo cual, aunque se quiera realizar una evaluación lo más transversal posible, las valoraciones puestas sobre los elementos evaluados siempre estarán sujetas a los objetivos del

análisis. La Tabla 4.4. indica los factores de exposición válidos para este trabajo, los cuales podrían ser diferentes si la evaluación realizada tuviese un enfoque distinto al indicado en los objetivos de esta memoria. Teniendo en cuenta lo anterior, la BDE fue construida como un repositorio flexible y versátil, ya que los elementos en ella almacenados pueden ser utilizados de la manera que sea necesaria y con las consideraciones pertinentes para el análisis que se requiera, por ejemplo, modificando los factores de la Tabla 4.4. para llevar a cabo una evaluación específica. Lo anterior se traduce en la posibilidad que abre la BDE para analizar la relación de un peligro en particular con el o los elementos más propensos a ser afectados por dicho peligro. Un caso interesante a desarrollar, es la relación entre los lahares y los puentes expuestos a ellos, ya que son uno de los elementos más susceptibles a ser afectados por este peligro volcánico, sobre todo en el sur de Chile.

Para los elementos que forman parte del análisis de exposición se priorizó el uso de información pública. Si bien de esta forma fue posible recopilar una cantidad de datos suficientes, en el futuro la BDE debería contar aún más datos, en lo que refiere a elementos expuestos, sobre todo en lo que refiere a suministros y servicios básicos donde solo fueron incluidas las centrales hidroeléctricas, dado que, datos sobre redes de transmisión eléctrica (cableado aéreo, por ejemplo) es limitada y no se encuentra disponible para todas las zonas analizadas.

Las redes de transmisión de agua potable son elementos deseables en un análisis como el presentado en este trabajo, pero dada la poca disponibilidad de datos públicos estas no fueron incluidas. Estas últimas presentan, además, una dificultad extra, pues en general, se encuentran bajo tierra, lo que significa que no se puede asumir que sean afectadas directamente por peligros volcánicos, o bien, dependiendo del fenómeno volcánico, el impacto podría ser totalmente distinto, por ejemplo, tal como cualquier elemento que se encuentre bajo tierra, difícilmente será afectado por fenómenos de caída de piroclastos, pero si podría llegar a ser afectado de algún modo por otro tipo de fenómenos como corrientes de densidad piroclástica o flujos de lava, aunque independiente de lo anterior, tampoco se puede asumir un daño nulo en ningún caso (Scaini et al., 2014).

La agrupación de los elementos de manera operacional permite la realización de los análisis de forma eficiente y ordenada (Capítulo 4). Es importante distinguir entre la categorización hecha en función de las actividades a las que se relacionan los elementos expuestos (social, transporte,

respuesta, etc.) y la agrupación de los elementos según la forma en que están presentados los datos (puntos, lineas, polígonos).

7.2.1. Análisis de distribución de construcciones

El análisis de distribución de construcciones fue efectuado para refinar los datos proporcionados por el Censo de Población y Vivienda 2017. Este paso fue ideado para ser lo más simple y objetivo posible. Se realizo un análisis punto a punto, en lugar de hacerlo directamente con una cuadrícula poligonal, porque trabajar y editar puntos supone un costo computacional menor, lo que se traduce en trabajo más eficiente y mayores posibilidades de replicar el mismo trabajo en diferentes áreas con casi cualquier tipo de computador.

La separación entre los puntos de la cuadrícula y el *buffer* aplicado a los mismos (Capítulo 4), fueron elegidos para lograr un equilibrio entre un ajuste lo suficientemente detallado a las zonas donde fueron reconocidas construcciones, de manera tal que el área construida no sea sobredimensionada y que a al mismo tiempo, sea visible a la escala del mapa, este fue un proceso de ensayo y error. Los puntos están separados cada 70 m, mientras que el buffer aplicado sobre cada uno de ellos fue de 50 m, lo que generó áreas cuadradas de 100x100 m (10.000 m²). En consecuencia, cada cuadrado comparte una porción de su área total con los cuadrados adyacentes, lo que va a depender de cuantos sean, por ejemplo, si son 2 cuadrados, cada uno comparte el 30% de su área total con el cuadrado adyacente y si son 9 cuadrados, el cuadrado formado a partir del punto central comparte el 84% de su área total con los 8 cuadrados que lo rodean. Si bien este traslape existe, en las áreas formadas luego de la aplicación del buffer los límites de cada cuadrado no son visibles, porque fueron fundidos en un solo polígono, de esta manera se asegura la continuidad del área.

Este preprocesamiento resulta beneficioso, ya que permite trabajar con un área mucho más acotada con respecto a las entidades censales, lo que tiene especial relevancia cuando se trata de zonas expuestas a peligros cuya extensión está altamente influenciada por el relieve, como es el caso de flujos canalizados (lahares, lavas y partes distales de CDPs).

7.3. Análisis de exposición

Esta evaluación de amenaza, fue pensada desde el primer momento como una herramienta para la priorización de recursos y esfuerzos para la prevención de una posible emergencia volcánica, con especial enfoque en la seguridad de la población, por lo cual, el elemento de exposición principal, en todo momento, son las personas. Por lo mismo, se optó por trabajar directamente con el número estimado de personas expuestas a cada volcán. Las infraestructuras también se incluyen directamente desde el análisis espacial respecto a zonas de peligro, contabilizándolas de manera precisa. Sin embargo, no todos los elementos contabilizados son iguales, por lo tanto, no basta solo con saber cuántas infraestructuras están expuestas, sino que cada una debe tener una ponderación adecuada.

Dada la diversidad de elementos expuestos, establecer cuáles son los más importantes no es una tarea sencilla, más aún, si se considera que no se realizaron valoraciones monetarias, sino más bien, sobre la importancia estratégica de las infraestructuras. Para abordar esta problemática se tomó en cuenta su relevancia, tanto en tiempos normales (sin emergencia), como durante y después de la emergencia. Dicho esto, la separación de los elementos en categorías y subcategorías es un buen punto de partida para establecer su importancia en la cuantificación de exposición y amenaza. Habiendo categorizado los elementos, es más fácil compararlos y ordenarlos en base a su importancia o jerarquía dentro de una misma categoría. Con todo lo anterior en mente, se elaboró la Tabla 4.4.

El criterio fue diferente para cada categoría y, a grandes rasgos, se rige por la cantidad de personas que involucra cada tipo de infraestructura. Por ejemplo, dentro de la categoría social, donde se encuentran establecimientos educativos y centros de salud, los primeros fueron ordenados en base a la matrícula de cada uno, en otras palabras, a la cantidad de alumnos que asisten a cada colegio. Un colegio con más alumnos debiese también involucrar más profesores y funcionarios en general, con respecto a un colegio donde asisten menos alumnos. Los centros de salud, por su parte, fueron ordenados en base a su nivel de atención, considerando que un nivel de atención mayor, supone mayor complejidad y especialización. En términos prácticos, un hospital base debiese tener una ponderación mayor que un consultorio general y este a su vez, una ponderación mayor que una

posta. Las demás categorías (respuesta, suministro y transporte), fueron valoradas de forma similar, es decir, estableciendo un orden jerárquico, donde los elementos más importantes o complejos valen más que los más básicos, o bien, que dependen de los más importantes. Visto de otra forma, los elementos más básicos de cada categoría suelen ser los más abundantes y tienen una valoración menor. Las viviendas fueron valoradas con un factor de 0,01, principalmente por dos razones: i) no deberían tener una valoración mayor que las personas, ya que, si bien son importantes, no pueden ser más importantes que sus habitantes ii) son la infraestructura más abundante, por lo que darle una ponderación elevada podría dejarlas sobre representadas con respecto a otras infraestructuras donde se desempeñan labores complejas o se prestan servicios esenciales.

En la categoría de respuesta, el elemento de mayor peso es el municipio, considerando su relevancia como centro de decisión, donde se espera que se coordine el actuar de los equipos de emergencia, representados en este caso por carabineros y bomberos. Estos últimos que tienen el mismo peso, sin hacer distinción entre los tipos de establecimiento (por ejemplo, retenes, comisarías, etc.).

La categoría de transporte tiene elementos puntuales (puentes y aeropuertos) y lineales (rutas). En los aeropuertos se distingue entre aeropuertos propiamente tal, que en el caso de este estudio no hay ninguno, y aeródromos. Los primeros atienden un mayor flujo de pasajeros y reciben aeronaves de mayor magnitud, mientras que los segundos son de menor magnitud en todo sentido. La clasificación de las rutas se hizo en función de su rol según el Ministerio de Obras Públicas. Este criterio es conveniente ya que se tiene el respaldo de ser una categorización utilizada por el organismo estatal, en términos prácticos, el factor de exposición de una ruta longitudinal (como la Ruta 5) debiese ser mayor que una Ruta regional principal y esta a su vez debiese ser mayor que una Ruta regional, provincial, comunal o de acceso, ya que mientras mayor es la importancia de la ruta, más personas dependen de ella. De este modo, mientras más rutas, o más kilómetros de ruta se encuentren en zona de peligro, mayor será el puntaje de exposición de rutas.

La categoría de energía y suministros también se siguió el criterio de la magnitud y complejidad de las infraestructuras evaluadas, desde centrales hidroeléctricas pequeñas hasta los grandes embalses.

Además de las consideraciones tomadas dentro de cada categoría, siempre se tuvo en cuenta que los elementos potencialmente expuestos forman parte de un todo, por lo tanto, debe existir un equilibrio en las valoraciones que se les atribuyan. Aunque no se intentó en ningún momento establecer equivalencias entre los factores de exposición otorgados a elementos diferentes, se procuró mantener un balance entre los diferentes elementos, de modo que ninguna infraestructura tenga un peso desmesurado con respecto a las demás.

Todos los elementos potencialmente expuestos están relacionados entre sí, pues son los componentes involucrados en el correcto funcionamiento de la sociedad. En conjunto, funcionan como un sistema interconectado, donde la falla de un componente (al verse afectado por un peligro) podría a su vez afectar a otros, que no necesariamente se vean impactados de forma directa. Por ejemplo, la falla del sistema de generación o transmisión eléctrica podría provocar dificultades en el sistema de salud y otros establecimientos que dependen de este suministro. Esta es una pincelada del concepto de "vulnerabilidad sistémica" (Scaini, 2014). Sin embargo, esto va más allá de los alcances de este trabajo y se considera que dicho tópico debe ser tratado por un grupo multidisciplinario que evalúe en profundidad las vulnerabilidades (física, social, económica, etc.) de la sociedad, vista como sistema. La aproximación a la que se llegó en los resultados de este trabajo se considera suficiente como un primer paso para la estimación de la exposición y amenaza de los volcanes estudiados.

7.3.1. Personas vs Infraestructuras

A lo largo del desarrollo de esta metodología de evaluación de amenaza, en todo momento se ha tenido en cuenta que las personas y las infraestructuras no deberían mezclarse, es decir, no debiesen ser trabajadas de forma aditiva, por lo cual, se buscó una forma de integrar los resultados de ambos grupos (personas e infraestructuras) en base a la relación existente entre ellos. Para ello se construyeron gráficas que enfrenten los valores de exposición de personas y de infraestructuras (Figura 7.3.), donde se puede comprobar que la relación entre ellos, a nivel volcán, es lineal. Esta relacional lineal significa que a medida que una variable aumenta, la otra lo hace en igual medida, por lo tanto, se puede concluir que, en general, una variable predice a la otra.

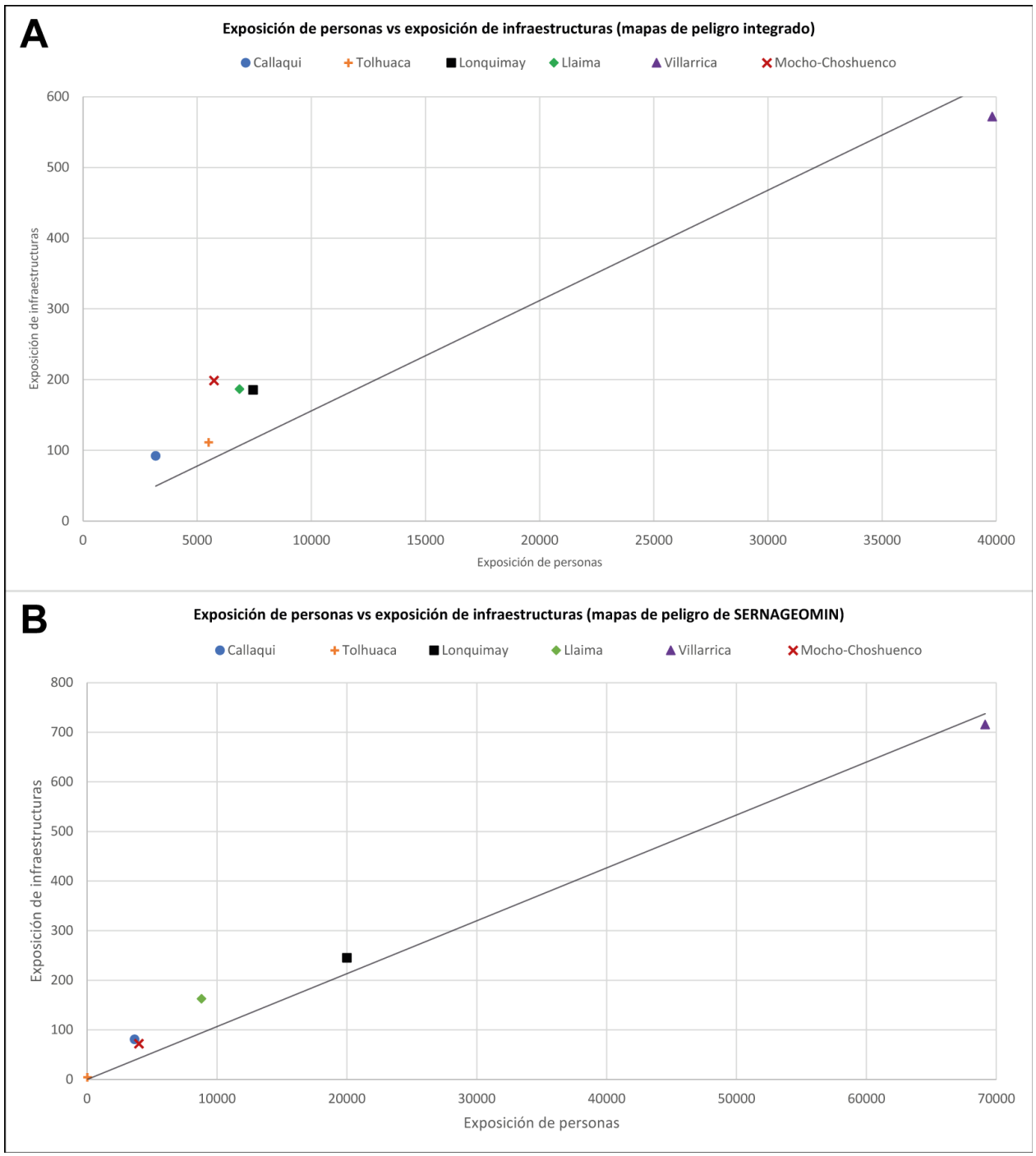


Figura 7.3. **Exposición de personas vs exposición de infraestructuras a nivel volcán.** A: Gráfica segúnresultados obtenidos con mapas de peligro integrado. B: Gráfica según resultados obtenidos con mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

Esta relación lineal entre personas e infraestructuras confirma lo que podría ser una suposición lógica: mientras más personas viven en lugar, más infraestructuras debiesen haber. Esta tendencia lineal hace que la manera adecuada de integrar ambos grupos sea a través de la suma euclidiana

(Capítulo 5). Además de eso indica que, si lo que se quiere es solo construir un ranking, bastaría con evaluar una de las dos variables, como pueden ser, por ejemplo, las personas. Lo anterior resulta conveniente, ya que permite realizar una evaluación de amenaza con resultados confiables utilizando menos recursos, lo que a su vez significa que se pueden realizar evaluaciones rápidas que permitan identificar donde es necesario realizar un trabajo más profundo.

En la gráfica A de la Figura 7.3. se destaca el volcán Villarrica, el cual se desvía de la tendencia dominante. Este volcán presenta una mayor exposición de personas en comparación con su exposición de infraestructuras. En la gráfica B de la Figura 7.3., en cambio, no se observa algún volcán que se escape demasiado de la tendencia general.

Este ejercicio también se realizó a nivel de poblados (Figura 7.4.), donde se repite la tendencia vista a nivel de volcanes. En ambas gráficas, construidas para los dos tipos de mapas de peligro utilizados, se observa que la mayoría de los poblados se concentran cerca del origen, mientras que las ciudades más grandes se escapan, tal es el caso de Curacautín, Villarrica y Pucón.

Al observar y comparar los valores de los ejes X e Y de las Figuras 7.3. y 7.4. se comprueba que los valores de exposición de personas son mucho más grandes que los de infraestructuras, lo mismo ocurre con los resultados de amenaza, tal como se puede comprobar en el capítulo 6, donde los valores totales de exposición y amenaza son muy similares a los valores obtenidos solo para personas.

En general, las gráficas de dispersión ayudan a visualizar la relación entre la exposición de personas y la exposición de infraestructuras en diferentes volcanes, y destaca la importancia de considerar estos factores al evaluar la amenaza volcánica, ya que cada volcán tiene características particulares tanto en el aspecto de peligro, como en la exposición que está asociada a cada uno.



Figura 7.4. **Exposición de personas vs exposición de infraestructuras a nivel pob*l*ado.** A: Gráfica segúnresultados obtenidos con mapas de peligro integrado. B: Gráfica según resultados obtenidos con mapas de peligro de SERNAGEOMIN.

La baja influencia que tienen las infraestructuras en los valores finales no significa que los análisis realizados con ellas no sean provechosos. Al contrario, estos datos debiesen ser trabajados por separados ya que, si bien bajo una mirada generalizada un volcán puede tener valores bajos, ya sea de exposición o amenaza, en algunas categorías específicas pueden destacar por sobre los demás,

por lo que en ellos ese aspecto debiese ser tratados con atención. Tal es el caso del volcán Callaqui, el cual tiene puntajes generales bajos, tanto en exposición como en amenaza, pero que sin embargo es el único que destaca respecto a la exposición de centrales hidroeléctricas, abarcando buena porción del puntaje final de este volcán, principalmente porque las centrales Pangue y Ralco (además de otras) se encuentran amenazadas por este macizo (Figura 7.5.). Esta situación vuelve a plantear la interrogante de cuánto debiese pesar la presencia de estructuras como estas en una evaluación de amenaza o una eventual evaluación de riesgo completa, ya que, a pesar de que representan una buena porción de los puntajes de infraestructura de este volcán, al ser estructuras de tal magnitud, su falla podría desencadenar otros problemas graves, que, en el peor de los casos, si se llegasen a destruir, tienen el potencial de generar daños aguas abajo, aún más grandes que los provocados por el fenómeno volcánico en sí mismo.

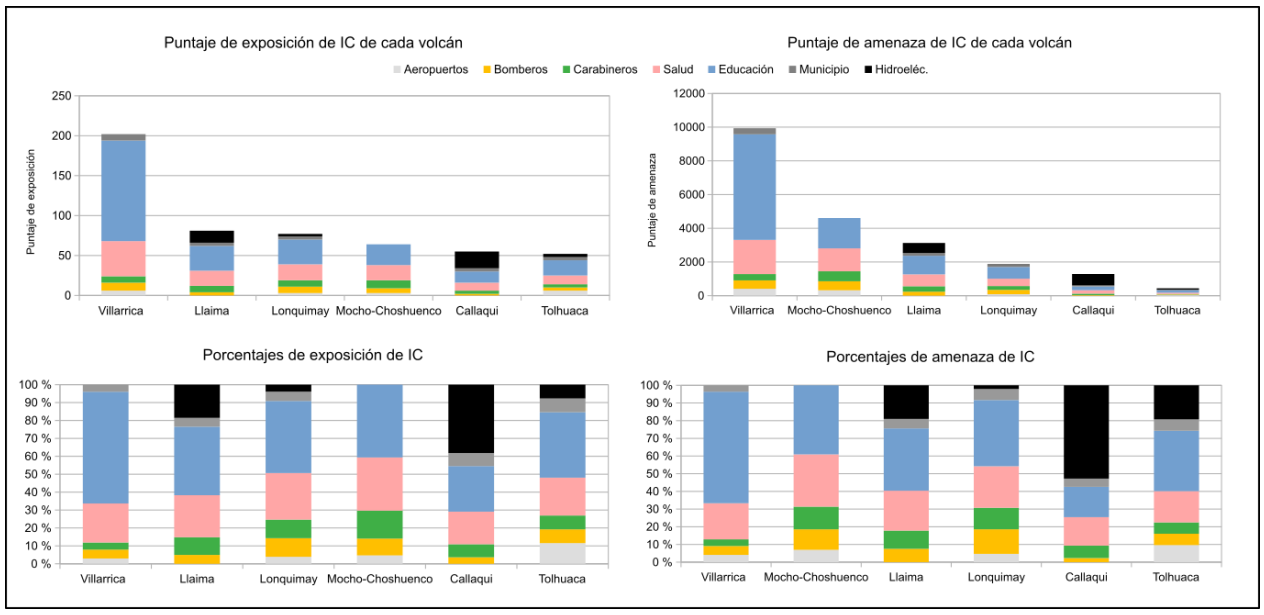


Figura 7.5. **Valores totales de exposición y amenaza de infraestructuras críticas y porcentajes de exposición y amenaza de infraestructuras críticas.** Resultados de acuerdo a mapas de peligro integrado. Elaboración propia.

Otro ejemplo de lo beneficiosa que es la posibilidad de analizar una categoría de exposición en particular es la categoría de transporte del complejo volcánico Mocho-Choshuenco, el cual no tiene una gran longitud de rutas expuestas al peligro (quinto), pero la mayoría de estas corresponden a rutas internacionales y además involucran una cantidad considerable de puentes, por lo que, tras

ponderarlas por sus factores de exposición, alcanzan valores elevados dentro de su categoría (Figura 7.6.).

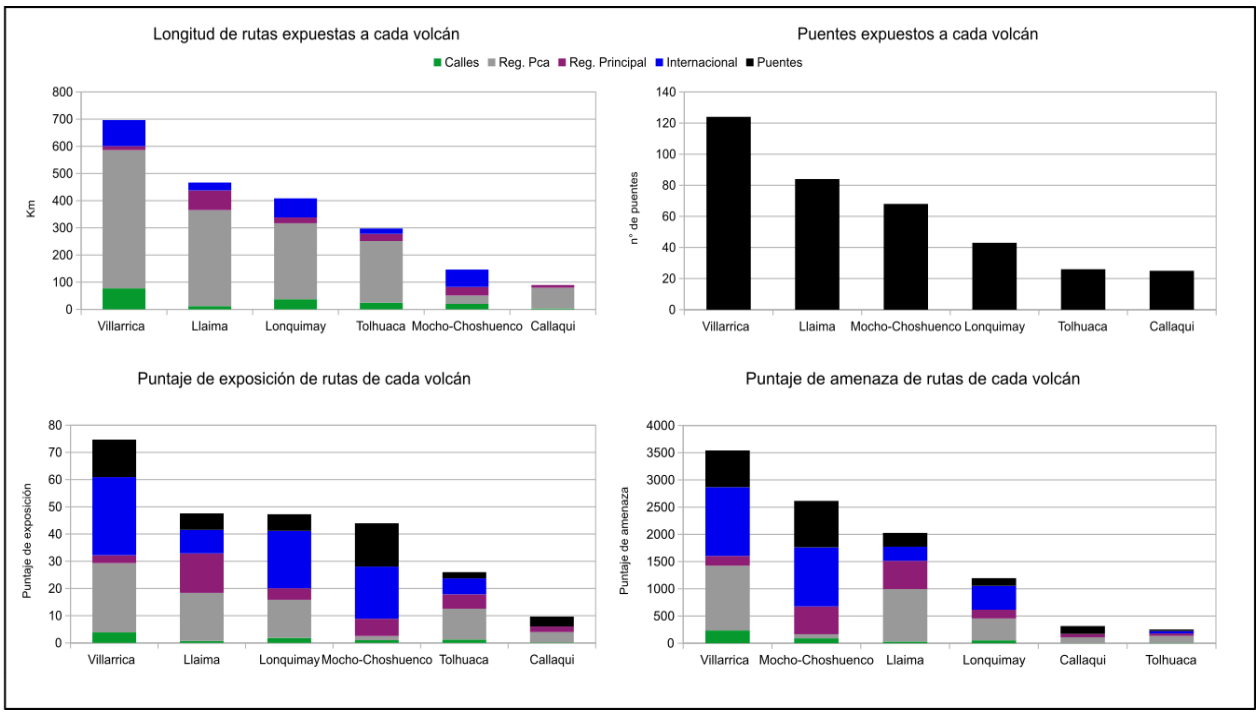


Figura 7.6. **Valores de exposición y amenaza de rutas acorde a los mapas de peligro integrado**. Elaboración propia.

Trabajando las infraestructuras de forma separada, es claro que se pueden identificar situaciones como las que han sido ejemplificadas, lo cual indica que al menos debiese ponerse atención en aquellos ámbitos, independiente del peso que tengan con respecto a la valoración dada a las personas.

El Mocho-Choshuenco queda segundo en el ranking de amenaza en base a los mapas de peligro integrado, pero si se considera que las rutas y puentes amenazadas por este complejo volcánico también quedan en segunda posición del ranking de la categoría de transporte, con una diferencia relativamente baja al volcán Villarrica, que tiene un volumen mucho mayor de elementos de transporte expuestos, lo convierte en un factor que en situación de emergencia podría agravar la situación de la población expuesta, al ser las rutas terrestres la principal vía de evacuación. A lo anterior se le suma que los aeródromos de la zona también se encuentran en zonas de peligro elevado. Esta situación deja de manifiesto que con esta metodología se pueden realizar

aproximaciones preliminares relativamente simples, pero a la vez valiosas, ya que con pocos insumos se pueden identificar problemas que debiesen ser estudiados a mayor profundidad, lo que se traduce en la optimización del trabajo y priorización de los recursos.

7.4. Amenaza volcánica y Ranking de Riesgo Específico de SERNAGEOMIN

Los resultados de la evaluación de amenaza realizada en este trabajo son comparables al Ranking de Riesgo Específico de SERNAGEOMIN. Tal como se puede ver en la Figura 6.15. los rankings obtenidos con la metodología propuesta tienen las mismas posiciones que el actual Ranking de Riesgo Específico de SERNAGEOMIN del año 2019, con dos diferencias importantes. En primer lugar, la diferencia más evidente está en que, si bien, en los tres rankings es el volcán Villarrica el que ocupa el primer lugar, según la evaluación realizada en este trabajo, este supera por mucho a los otros 5 volcanes, de hecho, posee una amenaza absoluta 5 o 6 veces mayor que el volcán en segundo lugar, que dependiendo del tipo de mapa de peligro involucrado en el análisis puede ser el volcán Llaima (según mapas de peligro de SERNAGEOMIN) o el complejo volcánico Mocho-Choshuenco (según mapas de peligro integrado). La marcada diferencia entre el volcán Villarrica y los demás volcanes, presente en la evaluación realizada con mapas tiene que ver con las diferencias metodológicas de ambos métodos, en concreto, en la forma de evaluar la exposición. La metodología NVEWS Chile evalúa la población expuesta de forma logarítmica, mientras que en este trabajo fue evaluada de forma lineal, es decir, se tomó en cuenta cada una de las personas evaluadas, por eso es que se refleja de forma tan evidente cuan grande es la exposición asociada al volcán Villarrica, con respecto a los demás volcanes.

La segunda diferencia radica, precisamente, en el volcán que ocupa la segunda posición del ranking, lo que depende del tipo de mapa involucrado en el análisis de amenaza. Las diferencias en los resultados de los análisis y evaluación de amenaza volcánica obtenidas con los mapas de peligro integrado y los mapas de peligro de SERNAGEOMIN, tienen su origen, principalmente, en la construcción de los mapas, lo que a su vez determina la distribución y extensión de sus zonas de peligro. Las diferencias observadas en los resultados de exposición dependen principalmente de la extensión de las zonas de peligro en los diferentes mapas. Mientras que las diferencias en los puntajes de amenaza se deben a la distribución de las zonas de peligro.

Los mapas de peligro integrado fueron construidos en trabajos previos (Jorquera, 2018; Arias, 2020 y Álvarez 2020) mediante una metodología semicuantitativa e innovadora que compara e integra diversos peligros volcánicos (por caída de tefra, PBV, CDP, lavas y lahares) en los diferentes volcanes en estudio. La integración de los análisis de peligros volcánicos se basó en los informes "Estudio de Riesgo de Volcán Mocho-Choshuenco" (EULA-CHILE, 2017) y "Estudio de Identificación de Riesgos en la Comuna de Curacautín" (EULA-CHILE, 2018), la cual más tarde es modificada y aplicada por Jorquera (2018) y que consiste en la asignación de puntajes a diferentes categorías predefinidas para cada zona de peligro determinada con anterioridad. Las categorías generales en las cuáles se basa esta metodología son: i) la recurrencia de los peligros en las zonas determinadas, ii) El alcance de los peligros expresados en términos de su velocidad y de la dificultad que puede tener una persona para evadir el peligro, iii) el potencial de impacto que tiene cada peligro cuando éste alcanza poblados e infraestructura. Los ítems fueron escogidos por su significancia en la preparación de un plan de emergencia y plan de manejo del riesgo por emergencia volcánica. Para el caso de los ítems de recurrencia, estos dependen del tipo de peligro y de la zona analizada; el alcance también puede tener esta dependencia, aunque en muchos casos el total de alcance será igual para cada zona en un peligro determinado. El impacto, sin embargo, es el mismo para todas las zonas y depende solamente del tipo de peligro (EULA-CHILE, 2018).

Los mapas de peligro oficiales de SERNAGEOMIN están basados principalmente en la geología. Si bien entregan una gran cantidad de información, también presentan algunas deficiencias. Los mapas de rastros peligro se basan directamente en la ocurrencia pasada de tipos específicos de eventos. Una limitación importante de este tipo de mapas es que el registro geológico es un catálogo incompleto de eventos, de modo que la distribución y la extensión pueden reflejar eventos anteriores, pero no todos los posibles eventos futuros. Además, el registro geológico también puede estar sesgado por conservar preferentemente los depósitos de las erupciones más grandes y porque algunos depósitos de erupciones muy violentas, como los formados por eventos explosivos, se erosionan fácilmente (Loughlin *et al*., 2015).

Este trabajo fue realizado desde la base de los mapas de peligro integrado, donde el peligro fue previamente cuantificado, mediante una metodología objetiva, que permite comparar entre zonas de peligro de un mismo volcán y entre diferentes volcanes (ver tabla de integración de peligros).

Sin embargo, la metodología propuesta no está estrictamente ligada a los mapas de peligro integrado, por lo tanto, para demostrar su flexibilidad en cuanto al insumo de peligro (mapa) necesario para llevarla a cabo se decidió usar los mapas de peligro de SERNAGEOMIN, en otras palabras, mientras se cuente con mapas de peligro, se debería poder realizar el análisis de amenaza, en combinación a la base de datos de exposición. En este caso para poder usar los mapas de SERNAGEOMIN, fue necesario adaptarlos para poder cuantificar las zonas de peligro, tal como fue visto en el Capítulo 4.

La adaptación de los mapas de SERNAGEOMIN no estuvo exenta de limitaciones. Para poder llegar a darle valores de peligro cuantificados a las zonas representadas en los mapas, lo primero que se debió hacer fue homogenizar los mapas, encontrar puntos en común entre las zonas de peligro para poder darles el mismo valor. La primera dificultad está en que los criterios con los cuales fueron definidos los niveles de peligro de cada zona de peligro son individuales para cada volcán, es decir, no existe una equivalencia entre zonas del mismo nivel de peligro entre dos volcanes, por ejemplo, una zona de alto peligro del volcán Llaima no es comparable a una zona de alto peligro del volcán Callaqui. Además, algunas zonas de peligro debieron ser descartadas porque sus descripciones son imprecisas o bien están presentes solo en algunos mapas, como, por ejemplo, zonas de “peligro remoto” o “muy remoto” del mapa de peligros volcánicos de Alto Biobío. También fueron descartadas aquellas zonas en las que se señala que “todo el mapa podría ser afectado por flujos piroclásticos”, como en el volcán Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco.

Los mapas de peligro integrado tienen zonas más extensas que los mapas de SERNAGEOMIN, aunque esto tiene que ver con que, en estos últimos los bordes del mapa cortan las zonas de peligro, por lo que no se tiene certeza de su extensión total (Figura 7.7.).

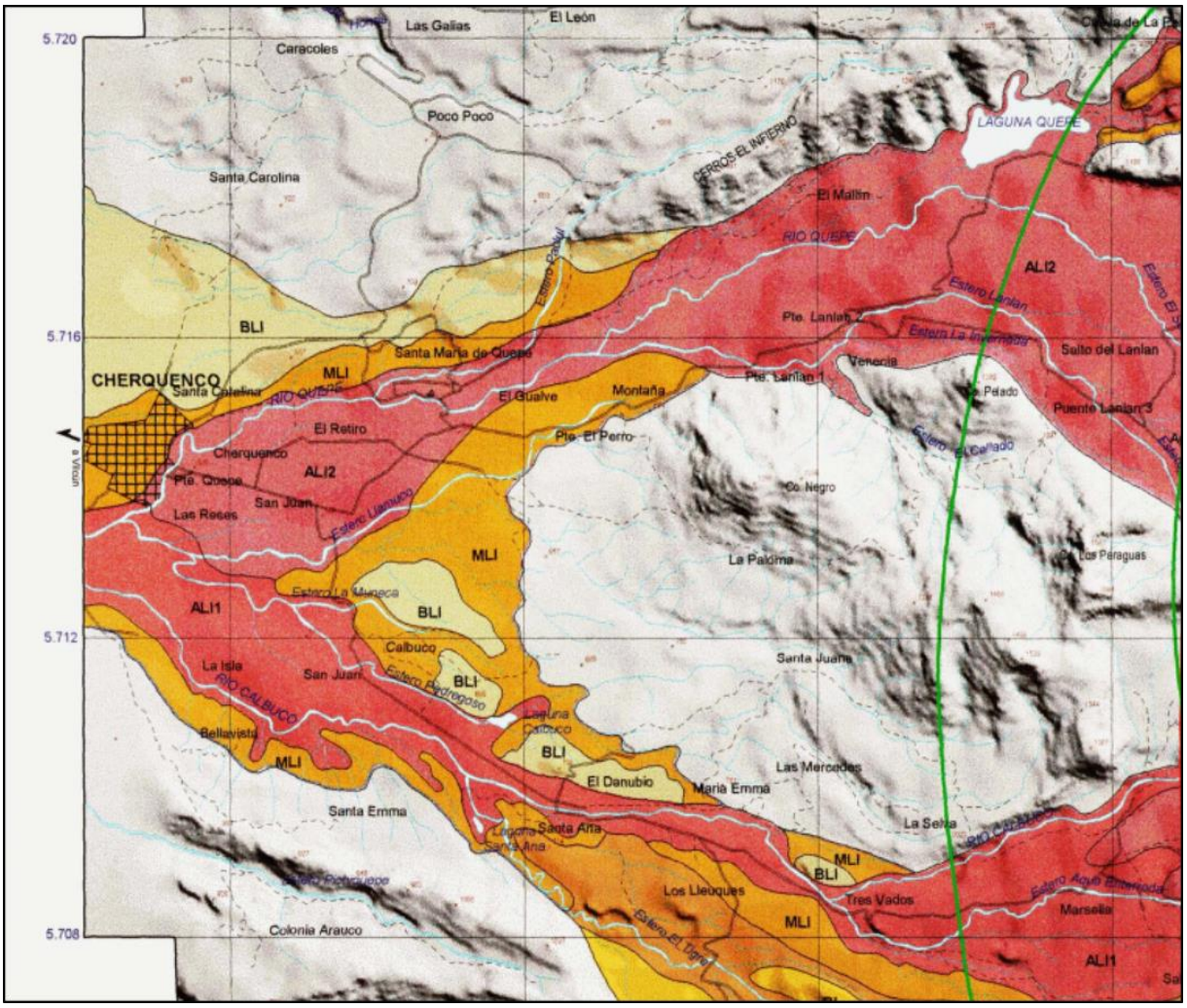


Figura 7.7. Ejemplo de borde del mapa cortando zonas de peligro volcánico en mapa de SERNAGEOMIN. Tomado de mapa de peligros del volcán Llaima (Moreno y Naranjo, 2003).

En los mapas de peligro de SERNAGEOMIN (Figuras 6.7. a 6.12.) se puede observar que lo que más destaca, a excepción del Mocho-Choshuenco, son las zonas que podrían ser afectadas por lahares y lavas. En especial en los volcanes Llaima y Villarrica, las zonas de lavas y lahares poseen gran extensión y además la mayoría de ellas están catalogadas como alto y muy alto peligro.

La Figura 7.8. muestra la comparación entre las áreas de las zonas de peligro. Se observa que en los mapas integrados existe una relación inversa entre peligrosidad y extensión de las zonas, las zonas de menor peligro son más extensas que las de mayor peligrosidad. Por el contrario, en los mapas de SERNAGEOMIN la distribución de las zonas depende del volcán. Villarrica, Llaima y

Mocho-Choshuenco tienen una alta presencia de alto y muy alto peligro. Es notable la baja cantidad de zonas de moderado peligro en los mapas de SERNAGEOMIN.

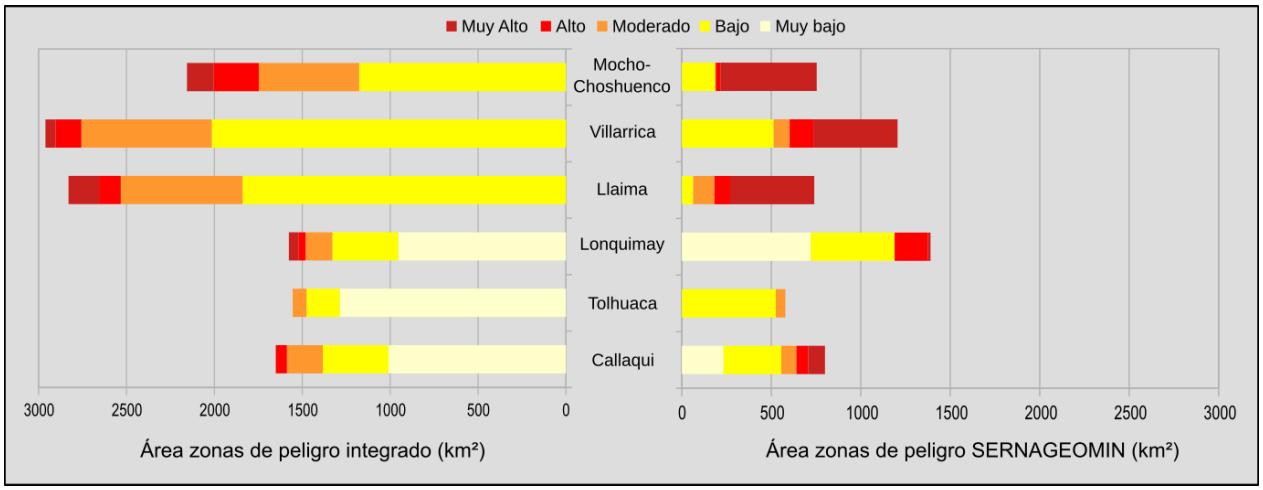


Figura 7.8. **Áreas de las zonas de peligro de los mapas de peligro integrado vs mapas de peligro de SERNAGEOMIN.** Elaboración propia.

Como la ubicación de los elementos de exposición se mantiene, la distribución de las zonas de peligro es determinante en la relación entre el peligro y exposición que da como resultado en los valores de amenaza. Como fue discutido anteriormente, la población se puede utilizar como *proxy* de la exposición total.

En los mapas de peligro integrado, el único volcán con una cantidad considerable de personas en zona de alto peligro, es el Mocho-Choshuenco. El Villarrica, por su parte, es el que amenaza a la mayor cantidad de personas, donde la mayoría se encuentra en zonas de moderado peligro. Llaima y Lonquimay amenaza a un número similar de personas, donde el segundo, amenaza a más personas, pero con un peligro menor. Tolhuaca amenaza más personas que Callaqui, pero con menor peligro.

Por otro lado, acorde a los mapas de SERNAGEOMIN, aun habiendo descartado algunas zonas de peligro, Villarrica, Llaima, Lonquimay y Callaqui amenazan más personas con respecto a los mapas de peligro integrado y además lo hacen con mayor peligro. La diferencia más significativa está en que, mientras en los mapas de peligro integrado, ningún volcán tiene personas en zona de muy alto peligro, según los mapas de SERNAGEOMIN, tres volcanes tienen gran parte de su población

expuesta en zonas de muy alto peligro. Prácticamente toda la población amenazada por el Mocho-Choshuenco está en zona de muy alto peligro. En el Villarrica son más de 20.000 personas en zonas de muy alto peligro y en en Llaima más de la mitad de las personas amenazadas. Esto obviamente hace que los puntajes de amenaza obtenidos con estos mapas sean mucho más elevados con respecto a los mapas de peligro integrado (Figura 7.9.).

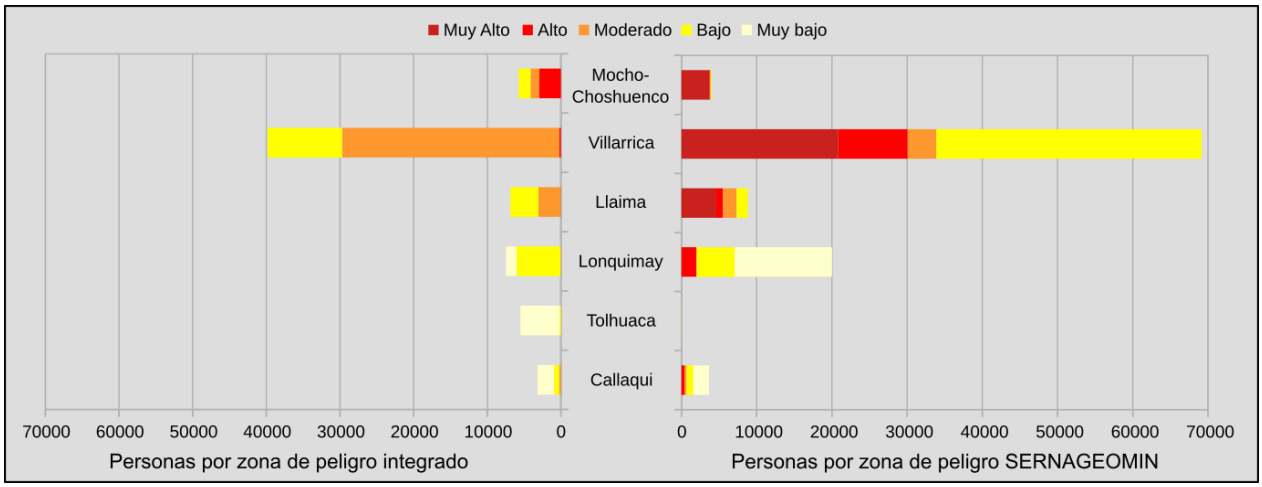


Figura 7.9. Cantidad de personas amenazadas por zonas de peligro acorde a mapas de peligro integrado y de SERNAGEOMIN. Elaboración propia.

7.4.1. Factor de peligro

Cabe mencionar que las gráficas presentadas en las figuras 7.8. y 7.9. corresponden a los niveles de peligro observadas en los mapas y se muestran como una representación de la distribución de las zonas de peligro y su relación con los elementos expuestos. Sin embargo, para poder realizar la evaluación con los mapas de SERNAGEOMIN y, de algún modo, lograr que dichos mapas sean comparables, fue necesario recurrir al factor de peligro (Capítulo 4), para lograr plasmar que hay volcanes que, dado su comportamiento, son más peligrosos que otros y, por ende, sus zonas de peligro debiesen representar esa diferencia.

7.4.2. Análisis de amenaza volcánica a escala de poblados

Una de las características más importantes de esta metodología es que brinda la posibilidad de realizar evaluaciones a distintas escalas, y aún más, permite evaluar y comparar la amenaza en distintas zonas de interés en torno a un volcán. Dicha posibilidad fue aprovechada para evaluar la amenaza de los poblados en torno a los centros volcánicos estudiados.

Para evaluar los poblados se debieron tomar algunas consideraciones, como fue la inclusión del *buffer* que busca incorporar parte de la población rural en torno a las ciudades, ya que, en la realidad la población que vive en las zonas aledañas depende fuertemente del poblado principal y podría considerarse como parte de él, aun estando fuera de los límites físicos de este.

7.5. Amenaza absoluta y amenaza normalizada

En el Capítulo 6 se presentaron dos tipos de resultados de amenaza, la amenaza absoluta y la amenaza normalizada. Ambos tipos de resultados entregan una perspectiva diferente, pues la primera es la sumatoria de todos los valores de amenaza de cada elemento expuesto y la segunda corresponde al peligro ponderado, en otras palabras, es una forma de repartir el total de amenaza entre todos los elementos expuestos.

Es importante tener en mente esta diferencia, pues la amenaza absoluta de un volcán o poblado puede ser alta sin necesariamente involucrar altos niveles de peligro, como lo que ocurre con la ciudad de Villarrica, la cual según el mapa de peligro del volcán Villarrica de SERNAGEOMIN (Moreno, 2000) se encuentra expuesta, casi en su totalidad, a una zona de bajo peligro. Villarrica, al ser la ciudad más populosa de todas las evaluadas, acumula una amenaza absoluta relativamente alta. Sin embargo, si se evalúa la amenaza normalizada, es bastante baja, ya que, si bien tiene una alta exposición, casi toda el área corresponde a bajo peligro.

A nivel de volcán también se pueden analizar situaciones similares. En la Figura 7.10. se exponen gráficas que enfrentan los valores de amenaza absoluta y normalizada de los volcanes en estudio,

en ella se puede observar que el volcán Villarrica se escapa del grupo, dada su alta amenaza absoluta, la cual está influenciada en gran medida por su alta exposición asociada.

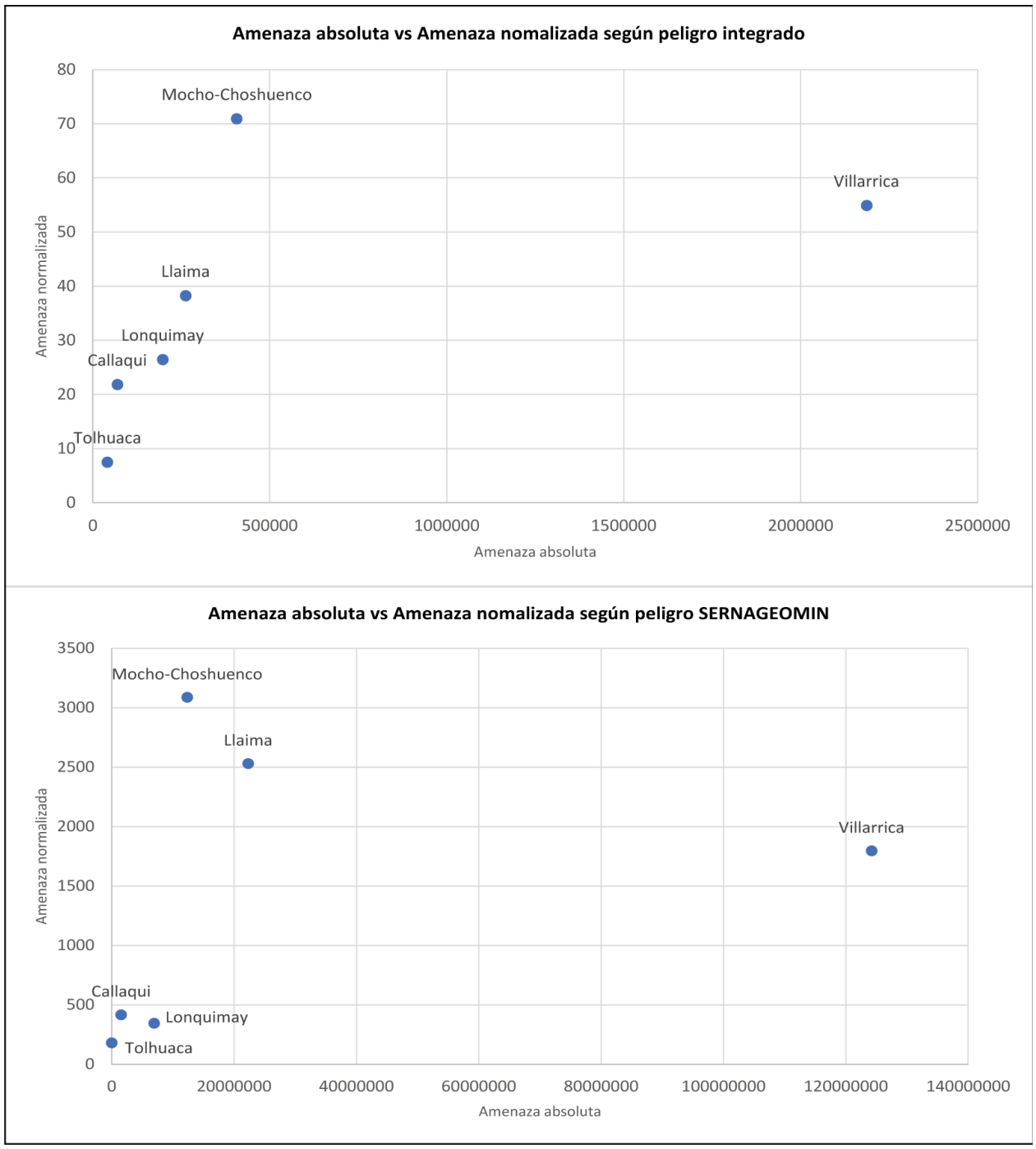


Figura 7.10. **Amenaza absoluta vs Amenaza normalizada a nivel de volcanes.** A: Gráfica de acuerdo a mapas a evaluación realizada con mapas de peligro integrado. B: Gráfica de acuerdo a mapas a evaluación realizada con mapas de peligro de SERNAGEOMIN. Elaboración propia.

Sin embargo, el complejo volcánico Mocho-Choshuenco destaca por su elevada amenaza normalizada, según ambos tipos de mapa. Esta elevada amenaza normalizada asociada al complejo volcánico Mocho-Choshuenco indica que, en caso de erupción, es bastante probable que la población expuesta sufra grandes consecuencias.

La Figura 7.11. muestra las mismas gráficas de la Figura 7.10., pero esta vez el eje de la amenaza absoluta ha sido expresado en escala logarítmica. Esto permite visualizar mejor la situación de los volcanes distintos al Villarrica. Además, se agregó un fondo con un gradiente rojo que se hace más intenso a medida que se aleja del origen, pues hacia esa zona aumentan los dos tipos de amenaza. Los volcanes que se ubican en la parte del gráfico con alta amenaza absoluta y normalizada deberían considerarse como prioritarios. En el caso de los mapas de peligro integrado, los volcanes que se separan del resto son el Villarrica y Mocho-Choshuenco. Mientras que, en los mapas de SERNAGEOMIN, a estos dos volcanes se une también el volcán Llaima. Los volcanes Callaqui, Tolhuaca y Lonquimay se ubican en las posiciones más bajas, según ambos tipos de mapa. Sin embargo, esto no significa que en ellos no sea necesario tomar mayores consideraciones, pues, al analizar otros aspectos de manera individual, se pueden encontrar puntos interesantes, como en el caso del volcán Callaqui lo es la cercanía de las grandes centrales hidroeléctricas Pangue y Ralco, ambas dentro de zonas de peligro.

La Figura 7.12. muestra gráficas de amenaza absoluta vs amenaza normalizada a nivel de poblados, donde además se indica el volcán que amenaza a cada uno. En dichas gráficas se puede comprobar que la posición de los poblados varía según el tipo de mapa utilizado. Cabe mencionar que la amenaza absoluta está en escala logarítmica, por lo que Pucón se escapa por mucho del resto del grupo, tal como ocurre con el volcán Villarrica en la Figura 7.10. Pucón es, a todas luces, la ciudad donde es prioridad realizar mayores esfuerzos para el manejo del riesgo. Luego, las siguientes ciudades depende del tipo de mapa utilizado.



Figura 7.11. **Amenaza absoluta vs Amenaza normalizada a nivel de volcanes.** A: Gráfica de acuerdo a mapas a evaluación realizada con mapas de peligro integrado. B: Gráfica de acuerdo a mapas a evaluación realizada con mapas de peligro de SERNAGEOMIN. La amenaza absoluta se muestra en escala logarítmica. Elaboración propia.

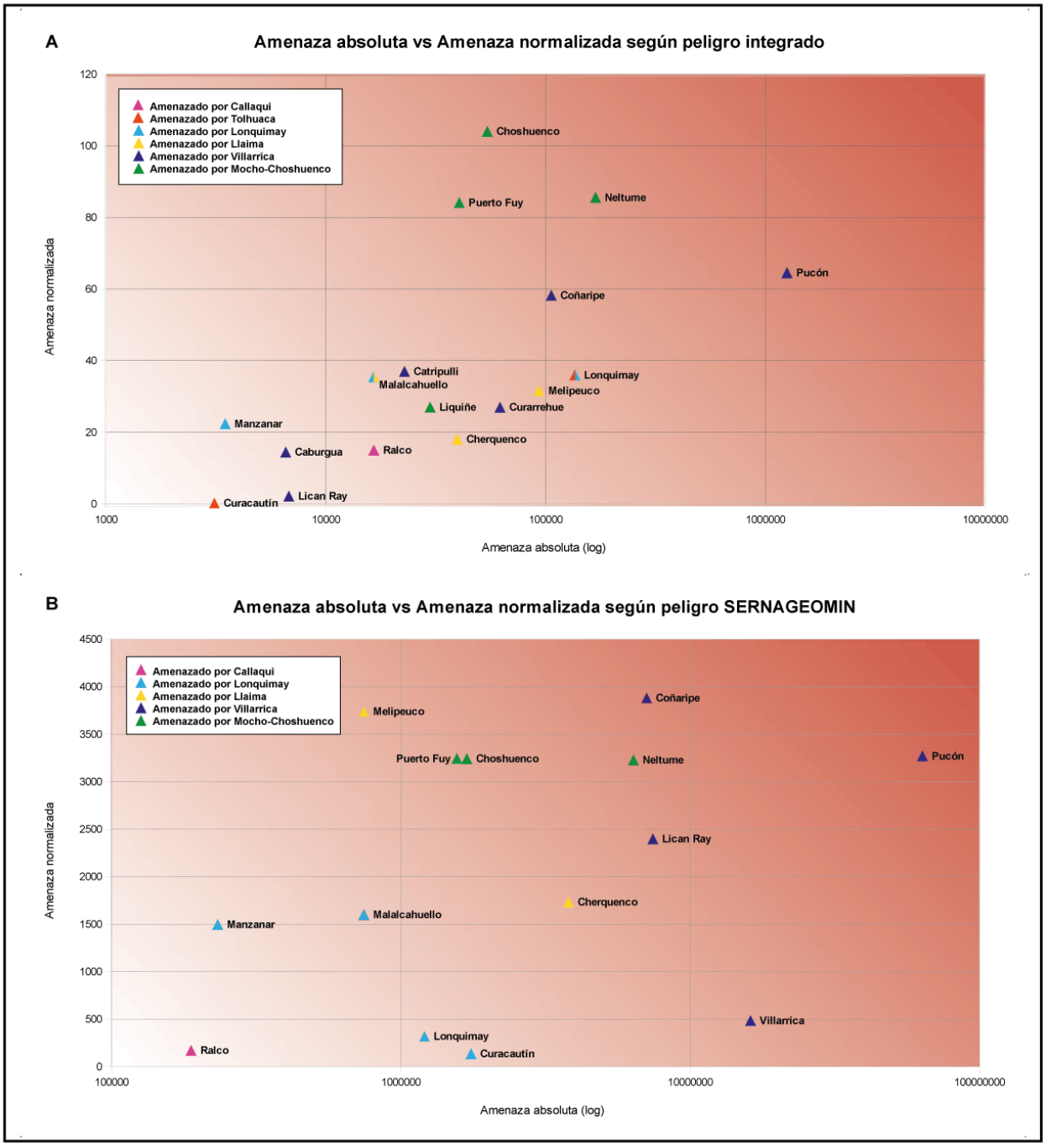


Figura 7.12. **Amenaza absoluta vs Amenaza normalizada a nivel de poblados.** A: Gráfica de acuerdo a mapas a evaluación realizada con mapas de peligro integrado. B: Gráfica de acuerdo a mapas a evaluación realizada con mapas de peligro de SERNAGEOMIN. La amenaza absoluta se muestra en escala logarítmica. Elaboración propia.

Si bien existen diferencias entre ambos mapas, hay ciudades que se repiten en las partes altas del gráfico, lo que es indicativo de que en ellas es donde debiesen enfocarse los esfuerzos por preparar a la población para que las comunidades sean resilientes y las emergencias volcánicas no signifiquen una potencial catástrofe. Considerando las gráficas A y B de la Figura 7.12. las ciudades prioritarias para estudios más profundos debiesen ser, Pucón, Neltume, Coñaripe, Choshuenco, Melipeuco y Puerto Fuy.

7.6. Importancia de un sistema unificado de evaluación de amenaza

La realización de la metodología con los mapas de SERNAGEOMIN dejan de manifiesto varias dificultades con respecto a estos mapas, no solo para la metodología en sí misma, sino que las mismas limitaciones antes mencionadas, dificultan el uso de los mapas e incluso la comprensión de ellos por personas que no tengan una formación en el área de las ciencias de la tierra, como usualmente es el caso de las personas que deben tomar decisiones basadas en lo que dicen los mapas (organismos de emergencia, autoridades, etc.). Además, los mapas y el ranking riesgo específico de SERNAGEOMIN no parecen estar relacionados, al menos no directamente.

Los mapas de peligro integrado, al estar construidos bajo un criterio unificado y al ser comparables entre sí, brindan ventajas para realizar evaluaciones de amenaza, o futuras evaluaciones de riesgo. Al menos en este sentido, se puede decir que estos mapas son más objetivos y entregan información precisa y de mayor detalle sobre el peligro y su distribución. A su vez, estas características los hacen de gran utilidad para implementarlos en una evaluación de este tipo, mientras menos subjetividades tengan los mapas y las metodologías, mejores y más fidedignos serán los resultados.

8. CONCLUSIONES

Este trabajo nace con el objetivo de crear una metodología para evaluar la amenaza volcánica objetiva y unificada, que sea una contribución en la planificación de emergencias y la priorización de los recursos para este mismo fin, con un enfoque local y que pueda ser replicado con facilidad. Se pone en marcha en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco. La base de la evaluación de amenaza está en obtener valores numéricos a partir de la combinación de factores de peligro y exposición, previamente cuantificados. Se incorpora la componente espacial, en forma de mapas de peligro volcánico y su relación con los elementos expuestos al peligro, en forma de mapas de exposición. Se crea además la base de datos espaciales donde se almacena la información de estos datos territoriales, los que abren las puertas para su utilización de manera flexible en estudios de detalle.

8.1. Base de datos espaciales

La base de datos espaciales está dividida en los datos referentes a factores de peligro (mapas de peligro) y los elementos expuestos. La parte destinada a los elementos expuestos contiene la información básica y la distribución de la diversidad de elementos colectados en este trabajo. Además, los elementos potencialmente amenazados fueron ponderados por factores de exposición, asignados en función de las características que hacen a algunos elementos más importantes que otros (Tabla 4.4.). Se considera que los datos colectados son suficientes para la correcta realización de la evaluación, sin embargo, existe la posibilidad de seguir actualizando y expandiendo la base de datos en el futuro.

Una posibilidad importante que abre la base de datos, al contar con las modelaciones de peligro individuales de cada fenómeno, es realizar evaluaciones de amenaza por peligro. Lo que sería beneficioso en aquellas zonas donde un peligro sea recurrente, como es el caso de los lahares en el sur de Chile.

8.2. Análisis de exposición y amenaza

Cruzando los datos espaciales de peligro (mapas de peligro) y de exposición, se obtuvieron una serie de resultados, los cuales fueron analizados en detalle y que en su conjunto configuran los valores totales de amenaza de cada uno de los volcanes estudiados.

El análisis de distribución de construcciones funciona como una herramienta que permite obtener, de manera sencilla, resultados territoriales de población permanente mucho más detallados que los proporcionados por el Censo.

Los resultados indican que existe una relación de proporción directa entre los puntajes de amenaza (y exposición) de bienes y de personas, por lo cual, los valores de personas pueden ser utilizados como *proxy* de la amenaza total de un volcán o poblado. Esto es relevante, ya que permite hacer estimaciones, rápidas y acertadas con relativamente pocos insumos (Subcapítulo 7.4.).

Los volcanes Llaima, Lonquimay y Villarrica pueden afectar de forma directa o indirecta a zonas con altos valores de exposición, por su alta población y gran cantidad de infraestrucutras, en estas zonas se encuentran centros urbanos importantes, tales como Cherquenco, Melipeuco (Llaima), Curacautín, Lonquimay (Lonquimay), Pucón, Villarrica, Coñaripe (Villarrica), entre otros. De estos volcanes, el Villarrica es el que notoriamente tiene más población expuesta, lo que, sumado a su alta peligrosidad, se traduce en ser el volcán de más alta amenaza de los 6 estudiados, y probablemente, tal como indican otras evaluaciones similares, el volcán que más amenaza imparte de Chile. Esto debe ser tomado en cuenta en la construcción de planes de emergencia y reducción del riesgo en estas comunas. Es de suma importancia, que, en dichas zonas, los factores volcánicos sean tratados con la mayor responsabilidad e información posible.

El complejo volcánico Mocho-Choshuenco es el que entrega los resultados de amenaza más notables, ya que, a diferencia del Lonquimay, Llaima y Villarrica, la exposición asociada al Mocho-Choshuenco es relativamente baja, aunque también amenaza a varios centros urbanos, el más importante de ellos, la ciudad de Neltume. En el Mocho-Choshuenco, las zonas de más alto peligro cubren áreas más extensas que en los demás volcanes, por lo que, a pesar de tener menos exposición

asociada, una buena porción de su exposición se relaciona a alto peligro, lo que en sumatoria hace que su puntaje de amenaza sea elevado, superando incluso al Llaima en la evaluación de mapas peligro integrado (Subcapítulo 7.5.).

En base a los resultados de las evaluaciones realizadas con ambos tipos de mapa (peligro integrado y SERNAGEOMIN) se puede concluir que los volcanes Villarrica, Llaima y Mocho-Choshuenco son los volcanes de más alta amenaza, donde el Villarrica destaca muy por encima de todos los demás. Entre Llaima y Mocho-Choshuenco está el segundo lugar, lo que depende del mapa de peligro con el que se haga la evaluación. Esto es interesante, ya que el Llaima es un volcán con una mayor frecuencia eruptiva, mientras que del Mocho-Choshuenco, con menor frecuencia eruptiva y pocos eventos históricos se espera que en caso de una nueva erupción, sea un evento de alta explosividad, por lo que más allá del lugar que ocupe en el ranking, debiesen tomarse las medidas necesarias para preparar a la población ante un evento futuro. Al comparar estos resultados con los del actual ranking de riesgo específico de SERNAGEOMIN, se observa que acorde a los mapas (tanto de peligro integrado como del mismo SERNAGEOMIN) el Mocho-Choshuenco debiese ocupar un lugar más en dicho ranking, en el que actualmente está sexto.

8.3. Poblados amenazados

Los resultados de referentes a poblados entregan dos tipos de resultados importantes, sus valores de amenaza absoluta (o acumulada) y los valores de peligro ponderado. A partir de estos resultados se puede concluir que los poblados con más exposición pueden dar puntajes de amenaza absoluta altos a pesar de estar en zonas de bajo o muy bajo peligro. Al contrario, el peligro ponderado muestra cómo se distribuye el peligro entre los elementos expuestos que conforman cada poblado. Un ejemplo donde destaca la amenaza absoluta es en la ciudad de Villarrica, la cual, según el mapa de SERNAGEOMIN, acumula una alta amenaza, opacando a otras localidades que no tienen una exposición tan alta, como es el caso de Choshuenco, Puerto Fuy, etc. Estos últimos, sin embargo, tienen puntajes de peligro ponderado altos, mientras que Villarrica tiene un bajo peligro ponderado. Estos dos factores deben tomarse en cuenta en la toma de decisiones y la planificación de emergencia. El alto peligro ponderado de las localidades pequeña se puede traducir en que, de ser afectadas, los daños podrían ser muy significativos y la totalidad del poblado se vería perjudicado,

por lo que las medidas en esas localidades deberían enfocarse a evacuaciones preventivas. En poblados grandes, pero de bajo peligro ponderado, las medidas podrían ser diferentes, aunque no se puede descartar nunca que los efectos en dichas zonas afecten una gran cantidad de personas.

8.4. Mapas de peligro volcánico

Los mapas de peligro volcánico integrado son la entrada de datos de peligro utilizada en esta metodología. Pero, para demostrar que para la implementación de la metodología solo hace falta contar con un mapa de peligro, se llevó a cabo además con los mapas de SERNAGEOMIN. Como los mapas de SERNAGEOMIN no tienen las mismas características que los integrados, estos fueron adaptados para poder uso de ellos. Al adaptar los mapas y analizarlos, saltan a la vista las limitaciones que tienen, la principal es lo poco comparables que son entre sí. Los niveles de peligro de relativo son válidos dentro de un mismo volcán, pero estos niveles de peligro difícilmente son equivalentes entre volcanes. Esto queda de manifiesto en sus descripciones, donde se encuentran diferencias en los rangos de tiempo con las que se define el peligro de cada zona e incluso algunas descripciones son imprecisas. Además, dependiendo del mapa, la terminología usada cambia, lo cual contribuye a la subjetividad con la que se interpreta la información entregada. La simbología con la que se representan los fenómenos peligrosos también es variable entre los mapas, lo que dificulta su comprensión. Todo lo anterior resalta la necesidad de contar con mapas que tengan un criterio unificado y objetivo, que sean comparables, lo cual es sumamente importante para poder comunicar la información sobre el peligro que representan los volcanes de manera eficaz.

8.5. Proyección

La metodología está estructurada de tal manera que los pasos a seguir puedan replicados en otros volcanes, con la intención de cubrir la mayor cantidad de volcanes evaluados y así construir un ranking de amenaza volcánica a nivel nacional. Además, esta metodología está pensada para que en un futuro pueda ser complementada con evaluaciones de vulnerabilidad de los elementos expuestos, de manera tal, que se pueda contar con un análisis completo de riesgo, realizado bajo una metodología objetiva y unificada.

Finalmente, los pasos a seguir en la evaluación son metódicos, en todos los volcanes donde se desee emplear deben seguirse los mismos pasos, siempre y cuando se hayan preparado los insumos necesarios de manera adecuada, esto es, mapas de peligro cuantificados y capas de exposición cuantificadas. De esta forma, la proyección futura es que la evaluación sea programada para obtener resultados de manera rápida, donde el trabajo sea realizado por un software dedicado. Además, la base de datos debiese ser continuamente actualizada para contar con resultados precisos y así hacer un seguimiento de la amenaza volcánica a nivel nacional.

9. REFERENCIAS

AMIGO, A. 2021. “Volcano monitoring and hazard assessments in Chile”, Volcanica, 4(S1), pp. 1–20.

ARIAS, D. 2020. Análisis de peligro volcánico por caída de tefra y proyectiles balísticos volcánicos en los volcanes Callaqui, Tolhuaca, Lonquimay, Llaima, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra: 181 pp. Concepción.

AUKER, M.; SPARKS, S.J.S.; SIEBERT, L.; CROSWELLER, H.S. Y EWERT, J. 2013. A statistical analysis of the global historical volcanic fatalities record. *Journal of Applied Volcanology* Vol. **2** (2): 24 pp.

ÁLVAREZ, N. 2020. Evaluación del peligro de inundación por lahares en los volcanes Callaqui, Llaima, Lonquimay, Mocho-Choshuenco, Tolhuaca y Villarrica, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra: 167 pp. Concepción.

ASPINALL, W.; AUKER, M.; HINCKS, T.; MAHONY, S.; NADIM, F.; POOLEY, J.; SPARKS, R. Y SYRE, E. 2011. Volcano Hazard and Exposure in Track II Countries and Risk Mitigation Measures - GFDRR Volcano Risk Study. *Bristol University Cabot Institute and NGI Norway for the World Bank: NGI Report,* 20100806 (3): 309 pp.

BLONG, R.J. 1984. Hazards produced by volcanic eruptions. Volcanic Hazards: a source book on the effects of eruptions. Academic Press: 424 pp. Orlando.

BONADONNA, C. Y HOUGHTON, B.F. 2005. Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bulletin of Volcanology*. Vol. **67** (5): 441-456 pp

BUSTAMANTE, A. 2013. Dispersión de tefra de erupciones explosivas holocenas del Complejo Volcánico Lonquimay, Región de la Araucanía, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile. Departamento de Geología (inédito): 138 pp. Santiago.

CAMPOS, A.; MORENO, H.; MUÑOZ, J.; ANTINAO, J.L.; CLAYTON, J. Y MARTIN, M. 1998. Mapa geológico del área de Futrono-Lago Ranco, Región de Los Lagos. Escala 1:100.000. Serie Mapas Geológicos. Servicio Nacional de Geología y Minería. N° **8**. Santiago.

CLAPPERTON, C. 1993. Quaternary geology and geomorphology of South America. *Elsevier Science Publishers*: 779 pp. Amsterdam.

CLAVERO, J. 1996. Ignimbritas andesítico-basálticas postglaciales del volcán Villarrica, Andes del Sur (39º25’S). Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, mención Geología. Universidad de Chile. Departamento de Geología (inédito): 112 pp. Santiago.

CLAVERO, J. Y MORENO, H. 1994. Ignimbritas Licán y Pucón: Evidencias de erupciones explosivas andesítico-basálticas postglaciales del volcán Villarrica, Andes del Sur, 39º25' S. Congreso Geológico Chileno Nº **7**. Actas **1**: 250-254. Concepción.

CLAVERO, J. Y MORENO, H. 2004. Evolution of Villarrica volcano. Villarrica Volcano (39,5° S), Southern Andes, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín N° **61**: 17-27.

CONSTANTINI, L.; PIOLI, L.; BONADONNA, C.; CLAVERO, J. Y LONGCHAMP, C. 2011. A Late Holocene explosive mafic eruption of Villarrica volcano, Southern Andes: The Chaimilla deposit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* Vol. **200**: 143-158.

DE LA CRUZ-REYNA, S. Y TILLING, R. 2008. Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatépetl Volcano, Mexico: Importance of an effective hazards-warning system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*Vol. **170**: 121-134.

EULA-CHILE Centro de Ciencias Ambientales. 2017. Estudio de Riesgos Volcán Mocho-Choshuenco. Informe Final, Etapa N° **2**. Universidad de Concepción (inédito): 111 pp. Concepción.

EWERT, J.W.; GUFFANTI, M. Y MURRAY, T.L. 2005. An assessment of volcanic threat and monitoring capabilities in the United States: Framework for a National Volcano Early Warning System. U.S. *Geological Survey*. 62 pp.

EWERT, J.W. 2007. System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes. *Natural Hazards Review.* Vol. **8** (4): 112-124.

EWERT, J. W. Y HARPEL, C. J. 2004. In harm's way: population and volcanic risk. *Geotimes.* Vol. **49**: 14-17.

FUCHS, S.; KEILER, M. Y ZISCHG, A. 2015. A spatiotemporal multi-hazard exposure assessment based on property data. *Natural Hazards and Earth System Sciences.* Vol. **15**: 2127-2142.

GARDEWEG, M. Y SELLÉS, D. 2010. Los volcanes Chanchán y el Grupo Volcánico Fui: volcanes monogenéticos al norte del CV Mocho-Choshuenco, Región de los Ríos, sur de Chile. AURUM Consultores-Servicios Geológicos y Mineros Ldta: (Inédito) 3 pp. Santiago.

GAYTÁN, D.; CLAVERO, J. Y RIVERA, A. 2005. Actividad eruptiva explosiva del volcán Villarrica, Andes del Sur (39,5ºS), durante la Glaciación Llanquihue. Congreso Geológico Argentino N° **16**. Actas. La Plata.

GAYTÁN, D., 2006. Volcanismo explosivo en el volcán Villarrica, Andes del Sur, durante la glaciación Llanquihue. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile. Departamento de Geología (inédito): 126 pp. Santiago.

GEHL, P.; QUINET, C.; LE COZANNET, G.; KOUOKAM, E Y THIERRY, P. 2013. Potential and limitations of risk scenario tools in volcanic areas through an example at Mount Cameroon *Natural Hazards and Earth System Sciences.* Vol. **13**: 2409-2424.

GILBERT, D.; FREUNDT, A.; KUTTERLOF, S. Y BURKET, C. 2012. Post-glacial time series of explosive eruptions and associated changes in the magma plumbing systems of Lonquimay volcano, south central Chile. *International Journal of Earth Sciences*. Vol. **103**, (7): 2043-2062.

GLOBAL VOLCANISM PROGRAM. 2013. Volcanoes of the World, v. 4.7.7. Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution. https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013.

GONZÁLEZ-FERRÁN, O. 1995. Volcanes de Chile. Instituto geográfico militar: 635 pp. Santiago.

HICKEY-VARGAS, R.; ROA, H.M.; ESCOBAR, L.L. Y FREY, F.A. 1989. Geochemical variations in Andean basaltic and silicic lavas from the Villarrica-Lanin volcanic chain (39.5 S): an evaluation of source heterogeneity, fractional crystallization and crustal assimilation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. Vol **103**, (3): 361-386.

JIMÉNEZ, D.; BECERRIL, L.; CARBALLO, A.; BAIRES, S. Y MARTÍ, J. Estimating exposure around San Miguel Volcano, El Salvador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* Vol. **386** (106675).

JORQUERA, C. 2018. Análisis de peligro volcánico por flujos de lava y corrientes de densidad piroclástica en los estratovolcanes activos Callaqui, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. Memoria para optar al Título de Geóloga. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 187 pp. Concepción.

KING, A. Y BELL, R. 2006. Regional RiskScape: A multi-hazard loss modelling tool. En: Proceedings: International Disater Reduction Conference 2006. Davos, Switzerland.

LARA, L.E.; CLAVERO, J.; HINOJOSA, M.; HUERTA, S.; WALL, R. Y MORENO, H. 2006. NVEWS-Chile: sistema de clasificación semicuantitativa de la vulnerabilidad volcánica. Congreso Geológico Chileno N°**11**. Actas **2**: 487-490. Antofagasta.

LOUGHLIN, S.; SPARKS, S.; BROWN, S.; JENKINS, S. Y VYE-BROWN, C. 2015. Global volcanic hazards and risk. Cambridge University Press: 388 pp. Cambridge.

MARTI, J.; SPENCE, R.; CALOGERO, E.; ORDOÑEZ, A.; FELPETO, A. Y BAXTER, P. 2008. Estimating building exposure and impact to volcanic hazards in Icod de los Vinos, Tenerife (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **178** (3): 553-561 pp

MARTÍ, J. 2017. Assessing volcanic hazard: a review. Oxford Handbooks Online. Vol.: 73 pp.

MORENO, H. Y NARANJO, J.A. 1991a. Actividad Explosiva Postglacial en el Volcán Llaima, Andes del Sur, 38°45'S. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **18**, (1): 69-80.

MORENO, H. 1992. Estudio preliminar del Riesgo Volcánico del área de Ralco. INGENDESA (Inédito): 118p

MORENO, H. 1993. Volcán Villarrica: Geología y evaluación del riesgo volcánico, regiones IX y X, 39° 25′ S. Informe Final Proyecto FONDECYT (inédito): 112 pp. Santiago.

MORENO, H. 2000. Mapa de Peligros del Volcán Villarrica, Regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Escala 1:75.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. N° 17. Santiago

MORENO, H. Y CLAVERO, J. 2006. Geología del volcán Villarrica, Regiones de La Araucanía y de Los Lagos. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. Servicio Nacional de Geología y Minería. N° 98: 35 pp. Santiago.

MORENO, H.; NARANJO, J.A.; PEÑA, P.; MUÑOZ, J.; BASUALTO, D.; DELGADO, C.; GALLEGOS, C.; DUNGAN, M. Y BOUVET DE MAISONNEUVE, C. 2009. El ciclo eruptivo 2007-2009 del Volcán Llaima, Andes del sur. Congreso Geológico Chileno N° **12**. Acta **3**: 1-4. Santiago.

MORENO, H. Y GARDEWEG, M.C. 1989. La Erupción reciente del Complejo Volcánico Lonquimay (diciembre 1988) Andes del Sur. *Revista Geológica de Chile*. Vol. **16**, (5): 93-117.

MORENO, H. Y LARA, L. 2007. Geología del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco, Región de los Ríos. Escala 1:50.000. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica. Servicio Nacional de Geología y Minería N° **107**: 31 pp. Santiago

MORENO, H.: NARANJO, J. Y POLANCO, E. 2012. Geología del Complejo Volcánico Lonquimay-Tolguaca. Regiones de la Araucanía y del Biobío. Escala 1:50.000. Carta Geológica de Chile. Serie Geológica Básica. Servicio Nacional de Geología y Minería. N° **7**. Santiago

MORENO, H. Y NARANJO, J.A. 2003. Mapa de Peligros del Volcán Llaima. Escala 1:75.000. Carta Geológica de Chile. Serie Geología Ambiental Servicio Nacional de Geología y Minería. N.º **7**. Santiago.

MORENO, H. Y NARANJO, J.A. 2006. Peligros del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco, Región de Los Lagos. Escala 1:50.000. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental Servicio Nacional de Geología y Minería. N° **9**. Santiago.

MORENO, H.; THIELE, R.; LAHSEN, A.; VARELA, J.; LÓPEZ, L. Y VERGARA, M. 1985. Geocronología de las rocas cuartarias de los Andes del Sur entre las latitudes 37° y 38°S, Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Vol. **40**, No. **3-4**, p. 297-299.

MORENO, H.; THIELE, R., LAHSEN, A.; VARELA, J. Y LÓPEZ-ESCOBAR, L. 1984. Estudio del volcán Callaqui: Geología y riesgo volcánico. ENDESA-Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile.

MUNIZAGA, F.; HERVE, F.; DRAKE, R.; PANKHURST, R.J.; BROOK, M. Y SNELLING, N. 1988. Geochronology of the lake region of south-central Chile (39°-42°): preliminary results. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol. **1**: 309-316.

NARANJO, J. A. Y MORENO, H. 1991. Actividad explosiva postglacial en el Volcán Llaima, Andes del Sur (38 45'S). *Andean Geology.* Vol **18**(1), 69-80.

NARANJO, J.A. Y MORENO, H. 2005. Geología del Volcán Llaima, Región de la Araucanía. Escala 1:50.000. Carta geológica de Chile. Serie Geología Básica. Servicio Nacional de Geología y Minería. N° **88**. Santiago.

NARANJO, J.A.; MORENO, H.; POLANCO, E. Y YOUNG, S. 2000. Mapa de Peligros de los Volcanes del Alto Biobío, Regiones del Biobío y La Araucanía. Mapa a escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. N° **15**. Santiago.

NARANJO, J.A.; POLANCO, E.; LARA, L.; MORENO, H.; STERN, C.R. 2001. Holocene tephra-fall deposits of the southern and austral Andes Volcanic Zones (33-54ºS): eruption recurrence. Simposio Sudamericano de Geología Isotópica N° **3**. Actas **3**: 407-408. Pucón.

NIEMEYER, H. Y MUÑOZ, J. 1983. Geología de la hoja 57 Laguna del Laja, Región de Bíobío. Mapa escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería. N° **16**. Santiago.

PÉREZ, S. 2005. Volcanismo Explosivo Postglacial del Complejo Volcánico Mocho-Choshuenco, Andes del Sur (49°S). Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento Ciencias de la Tierra (inédito): 105 pp. Concepción.

PETIT-BREUILH, M.E. 1994. Contribución al conocimiento de la cronología eruptiva histórica del volcán Villarrica (39°25'S), 1558-1985. *Revista Frontera*. Vol. **13**: 71-85. Temuco.

PETIT-BREUILH, M. E. 2004. La historia eruptiva de los volcanes hispanoamericanos (siglos XVI al XX): El Modelo Chileno. Cabildo insular de Lanzarote: 431 pp. Madrid.

POLANCO, E. 1998. Volcanismo explosivo postglacial en la cuenca del Alto Biobío, Andes del Sur (37°45'-38°30'). Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile. Departamento de Geología (inédito): 107 pp. Santiago.

POLANCO, E. 2010. Volcanoestratigrafía, geoquímica y peligro volcánico del Volcán Lonquimay (38º30'S), Andes del Sur (Chile). Tesis de Doctorado. Universidad de Barcelona (inédito): 256 pp. Barcelona.

POLANCO, E.; NARANJO, J. A.; YOUNG, S. Y MORENO, H. 2000. Volcanismo Explosivo Holoceno en la Cuenca del Alto Biobío, Andes del Sur (37 45'-38 30'S). Congreso Geológico Chileno N° **9**. Actas **2**: 59-61. Puerto Varas.

RAWSON, H.; NARANJO, J.A.; SMITHS, V.; FONTIJN, K.; PYLE, D.M.; MATHER, T.A. Y MORENO, H. 2015. The frequency,and magnitude of post-glacial explosive eruptions at Volcán Mocho-Choshuenco, southern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. Vol. **299**: 103-129.

ROMERO, J. E., VERA, F., POLACCI, M., MORGAVI, D., ARZILLI, F., ALAM, M. A., BUSTILLOS, J., GUEVARA, A., JOHNSON, J. B., PALMA, J. L., BURTON, M., KELLER, W. 2018. Tephra from the 3 of March 2015 lava fountain at Villarrica volcano (Chile). *Frontiers in Earth Science*. Vol. **6** (98).

ROUGIER, J.; HILL, L.; Y SPARKS, R. 2013. Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards. Cambridge University Press: 551 pp. Cambridge.

SCAINI, C.; FELPETO, A.; MARTÍ, J. Y CARNIEL, R. A GIS-based methodology for the estimation of potential volcanic damage and its application to Tenerife Island, Spain. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* Vol. **278-279**: 40-58.

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA (SERNAGEOMIN). 2019. Ranking de los 90 volcanes más activos de Chile. http://sitiohistorico.sernageomin.cl/archivos/Ranking-deVolcanes.pdf

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. 2021. Red Nacional de Vigilancia Volcánica. http://www.sernageomin.cl/red-nacional-de-vigilancia-volcanica/

SIEBERT, L.; SIMKIN, T. Y KIMBERLY, P. 2011. Volcanoes of the World. Univ of California Press: 459 pp. California.

STEINBERG, A. 2005. An approach to threat assessment. En 7th International Conference on Information Fusion. IEEE, 2005. Vol. **2**: 8 pp.

SCOLLO, S.; TARANTOLA, S.; BONADONNA, C.; COLTELLI, M. Y SALTELLI, A. 2008. Sensitivity analysis and uncertainty estimation for tephra dispersal models. *Journal of Geophysical Research*. Vol. **113** (B6): 17 pp.

SIELFELD, G. 2008. Cordón fisural Callaqui: Antecedentes tectónicos de la naturaleza y geometría del volcanismo fisural en el volcán Callaqui, Zona Volcánica Sur, Región del Bío-Bío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 87 pp. Concepción.

SUÁREZ, M. Y EMPARÁN, C. 1997. Hoja Curacautín. Regiones de la Araucanía y del Biobío. Carta Geológica de Chile, 1: 250 000. Servicio Nacional de Geología y Minería. N° **71**: 105 pp. Santiago.

THIELE, R.; LAHSEN, A.; MORENO, H.; VARELA, J.; VERGARA, M. Y MUNIZAGA, F. 1987. Estudio geológico regional a escala 1:100.000 de la hoya superior y curso medio del río Biobío. ENDESA (inédito): 304 pp. Santiago.

VAN DAELE, M.; MOERNAUT, J.; SILVERSMIT, G.; SCHMIDT, S.; FONTIJN, K.; HEIRMAN, K. Y PINO, M. 2014. The 600 yr eruptive history of Villarrica Volcano (Chile) revealed by annually laminated lake sediments. *GSA Bulletin*. Vol. **126** (3-4): 481-498 pp.

VERA, F. Y PALMA, J. L. 2017. Avalanchas mixtas y depósitos proximales generados en la erupción de 2015 del Volcán Villarrica y su interacción con la cubierta glacial. Encuentro Nacional de Estudiantes de Geología, N° **8**. Actas **8**: 28-32 pp. Copiapó.

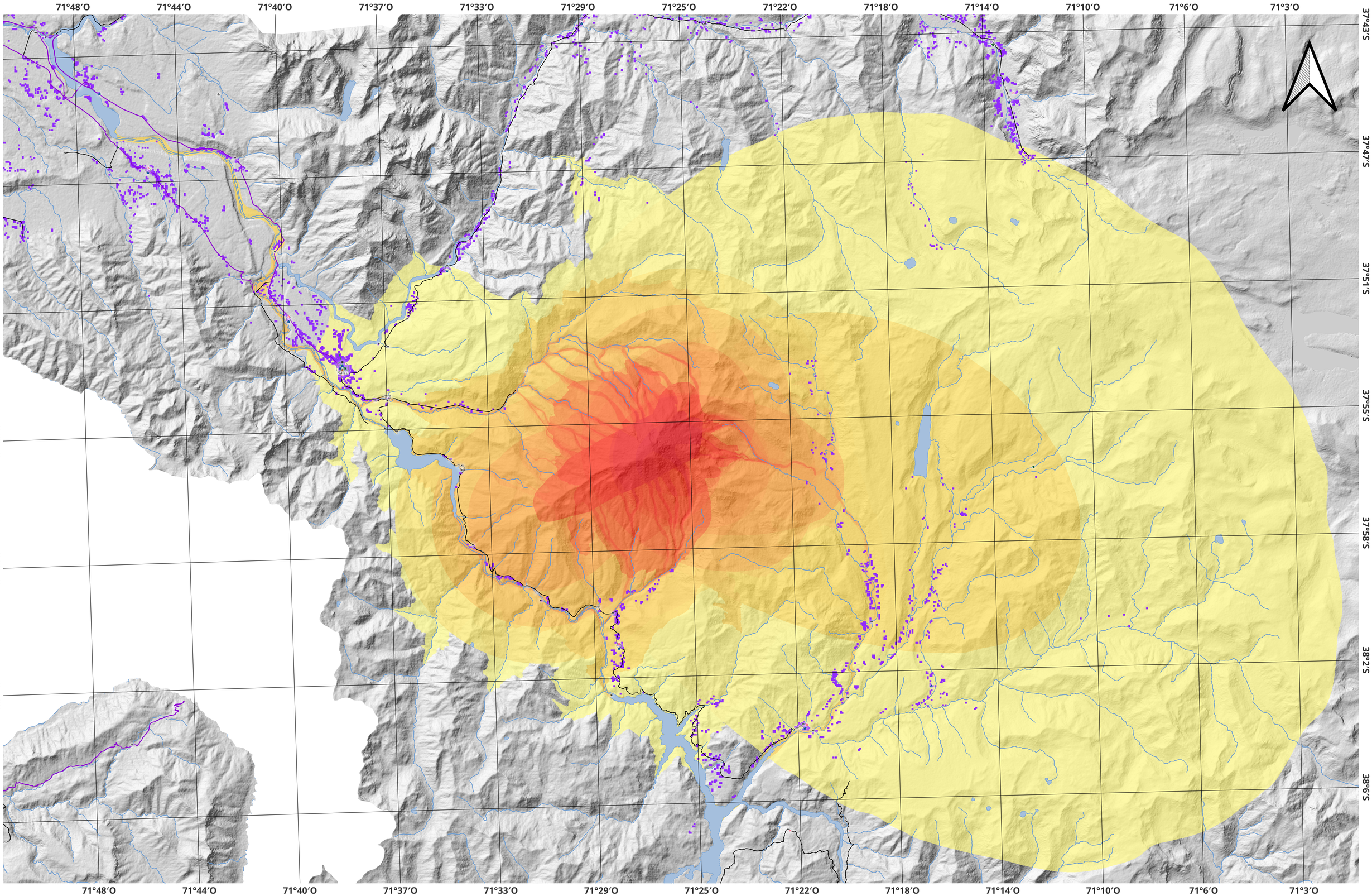
WITHAM, C. 2005. Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* Vol. **148**: 191– 233.

ANEXO

ANEXO: MAPAS DE PELIGRO Y EXPOSICIÓN DETALLADA

PARTE 1: MAPAS DE PELIGRO INTEGRADO Y EXPOSICIÓN DETALLADA

Mapa de peligro y exposición del volcán Callaqui



Leyenda

Valor Peligro

112
100
90
80
70
60
50
40
30
20
15

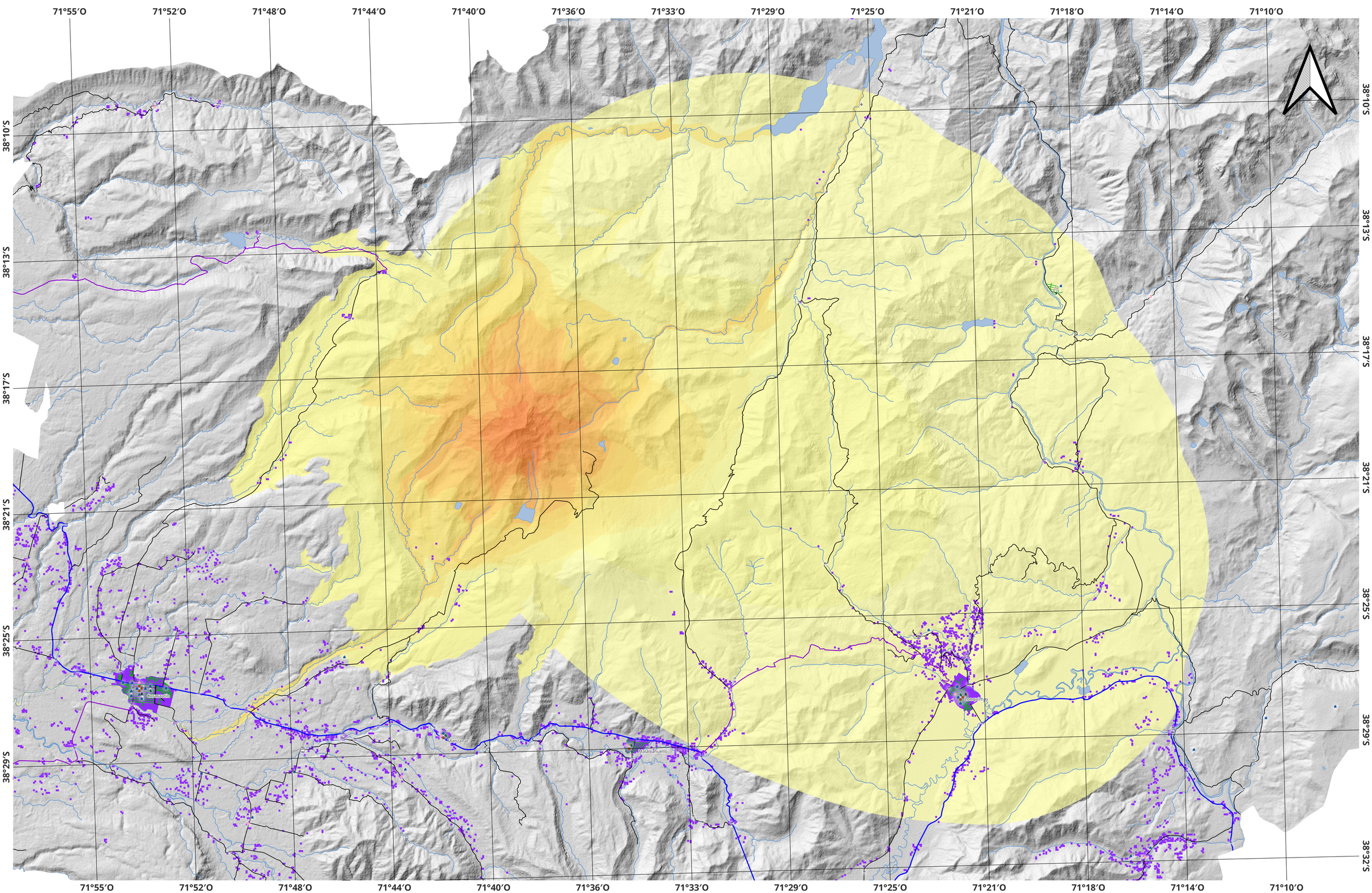
Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Río
- Lago

0 5 10 15 km

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 19S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Tolhuaca



Leyenda

Valor Peligro

69
60
50
40
30
20
10
7

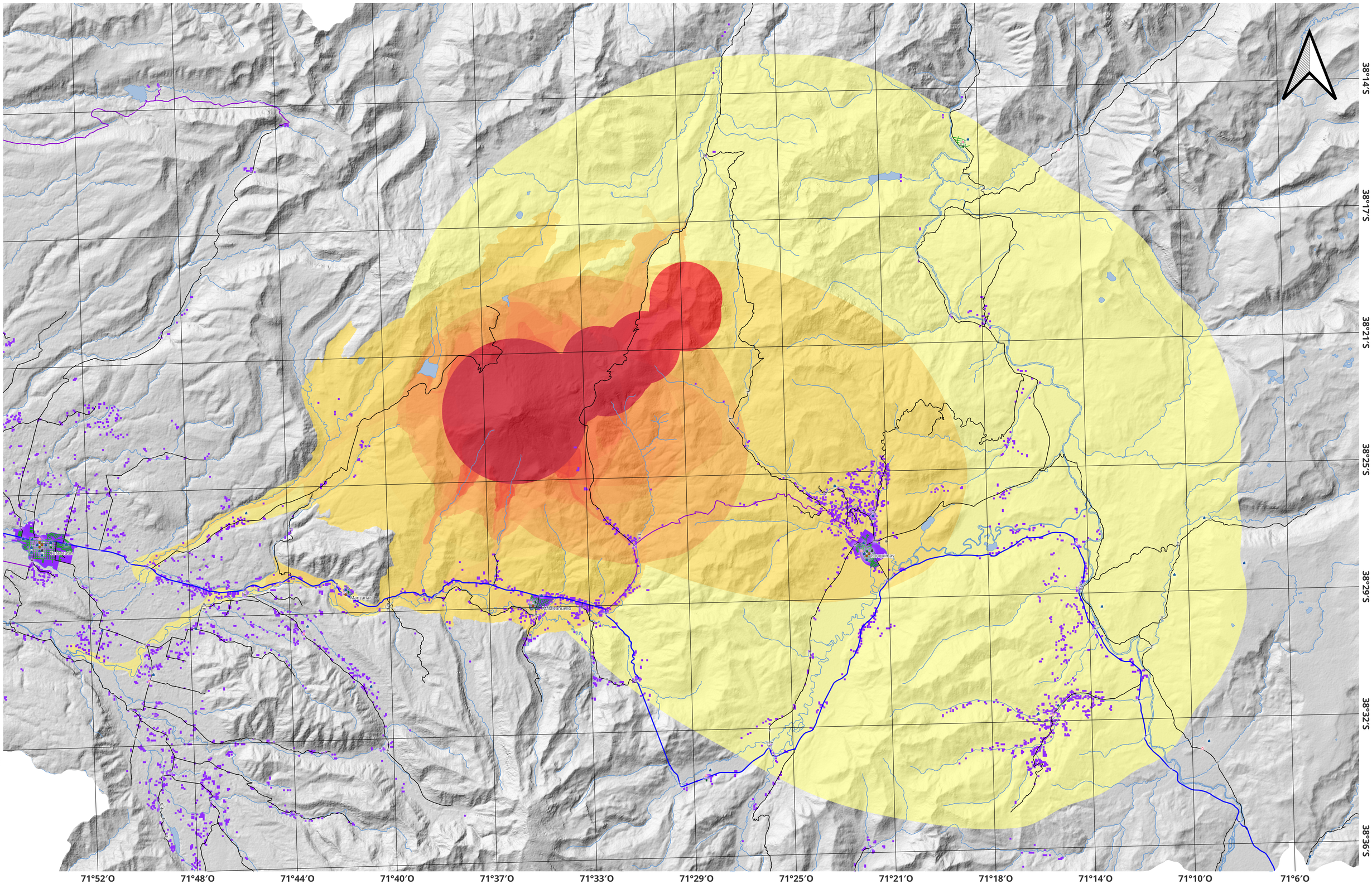
Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Río
- Lago

0 5 10 15 km

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 19S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Lonquimay



Leyenda

Valor Peligro
126-190
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
13

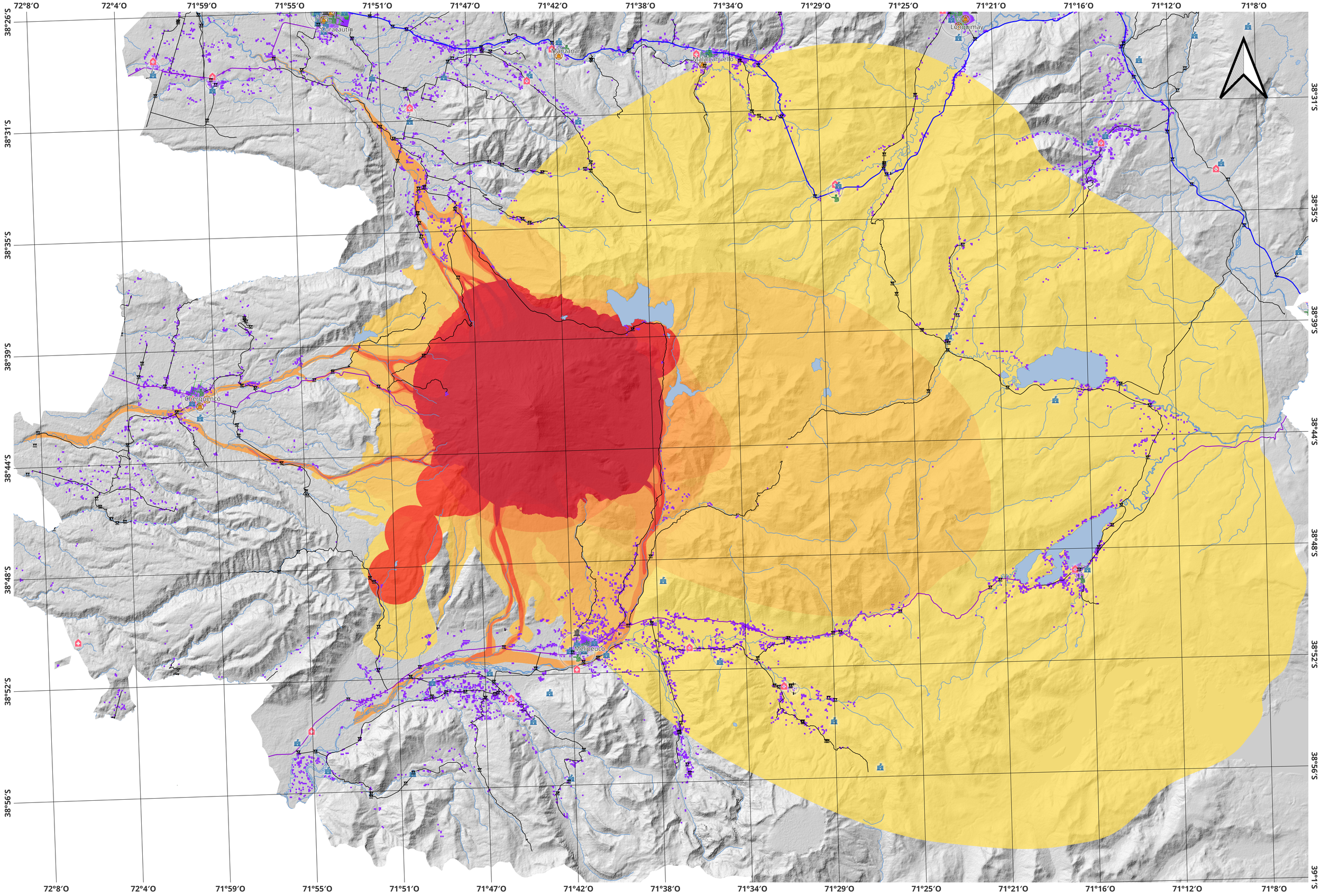
Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Río
- Lago

0 5 10 15 km

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 19S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Llaima



Leyenda

Valor Peligro

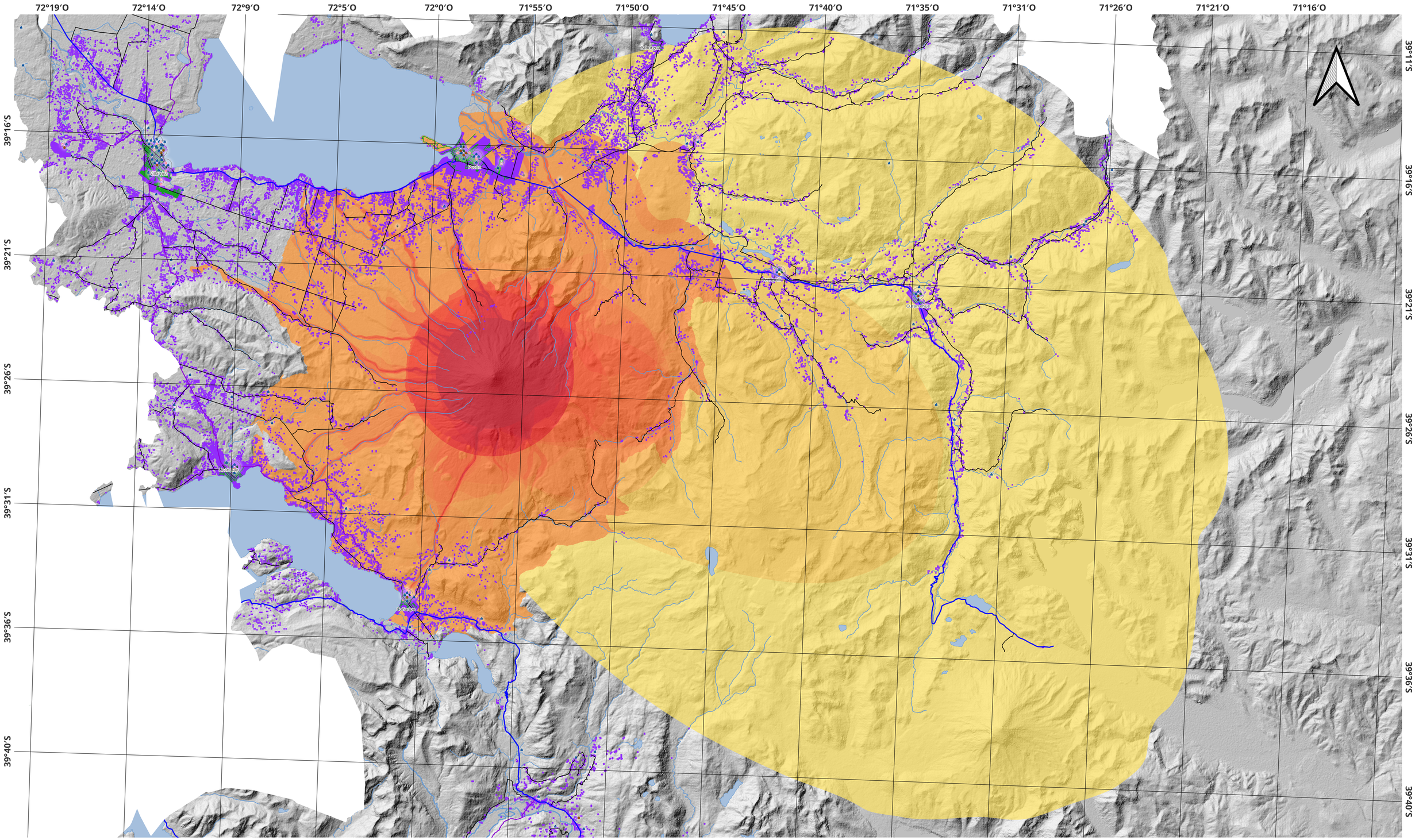
- 126-220
- 120
- 110
- 100
- 90
- 80
- 70
- 60
- 50
- 40
- 30

Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Río
- Lago

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 19S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Villarrica



Leyenda

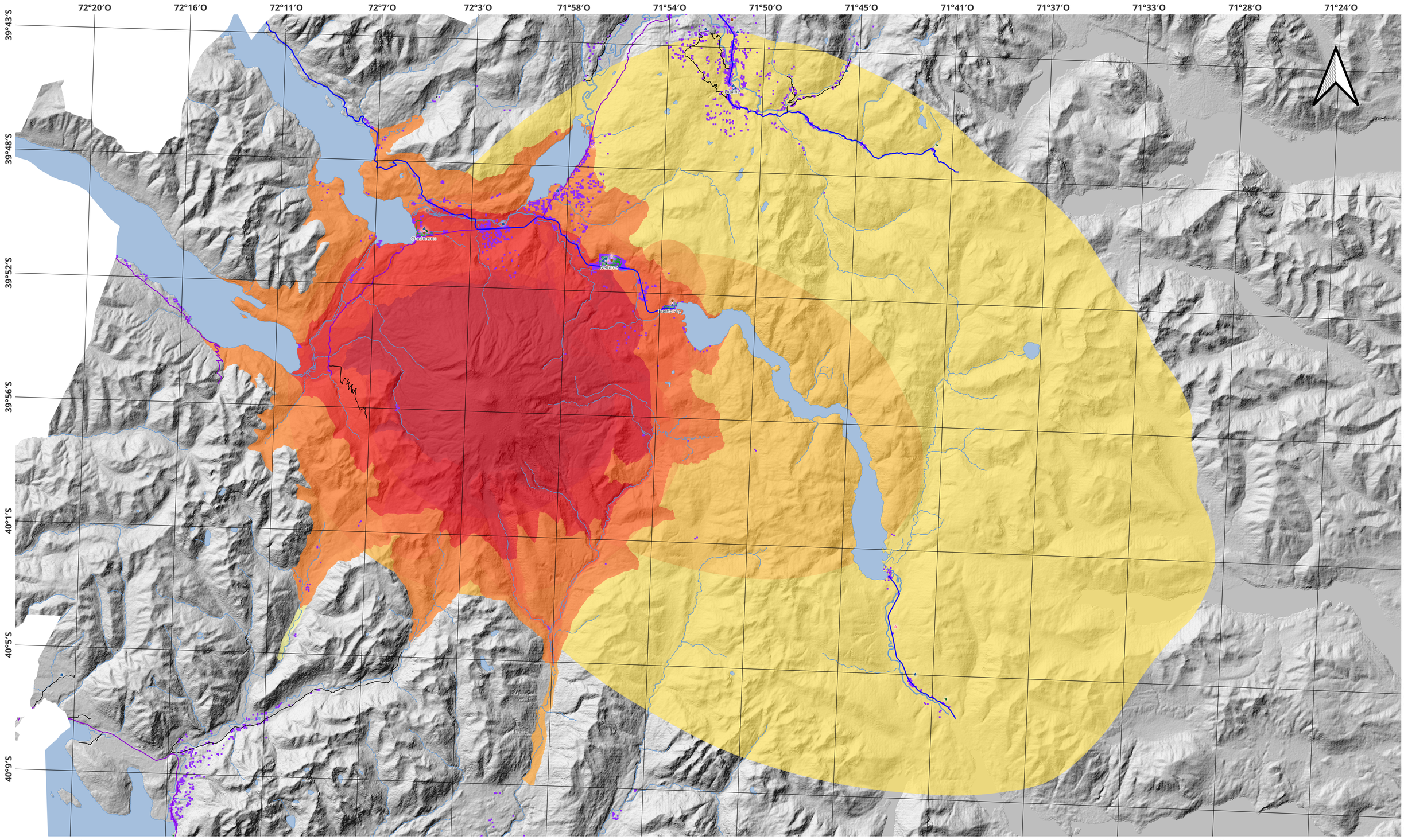
Valor Peligro
- 126-213
- 120
- 110
- 100
- 90
- 80
- 70
- 60
- 50
- 40
- 27

Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Red_Hidrografica
- masas_lacustres

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 18S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Mocho-Choshuenco



Leyenda

Valor Peligro
- 126-213
- 120
- 110
- 100
- 90
- 80
- 70
- 60
- 50
- 40
- 27

Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Red_Hidrografica
- masas_lacustres

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 18S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

PARTE 2: MAPAS DE PELIGRO SERNAGEOMIN Y EXPOSICIÓN DETALLADA

Mapa de peligro y exposición del volcán Callaqui

71°45′O 71°41′O 71°38′O 71°34′O 71°31′O 71°27′O 71°24′O 71°20′O 71°17′O 71°13′O

37°46′S 37°50′S 37°53′S 37°57′S 38°0′S 38°4′S 38°7′S

Ralco

Leyenda

Zona de Peligro
- Muy Alto
- Alto
- Moderado
- Bajo
- Muy Bajo

Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Educación
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Río
- Lago

0 5 10 15 km

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 19S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Tolhuaca

71°53′O 71°50′O 71°46′O 71°43′O 71°40′O 71°37′O 71°33′O 71°30′O 71°27′O

38°9′S 38°12′S 38°15′S 38°19′S 38°22′S 38°25′S 38°28′S

Curacautín

Manzanar

Malalcahuello

71°56′O 71°53′O 71°50′O 71°46′O 71°43′O 71°40′O 71°37′O 71°33′O 71°30′O

Leyenda

Zona de Peligro
- Bajo
- Moderado

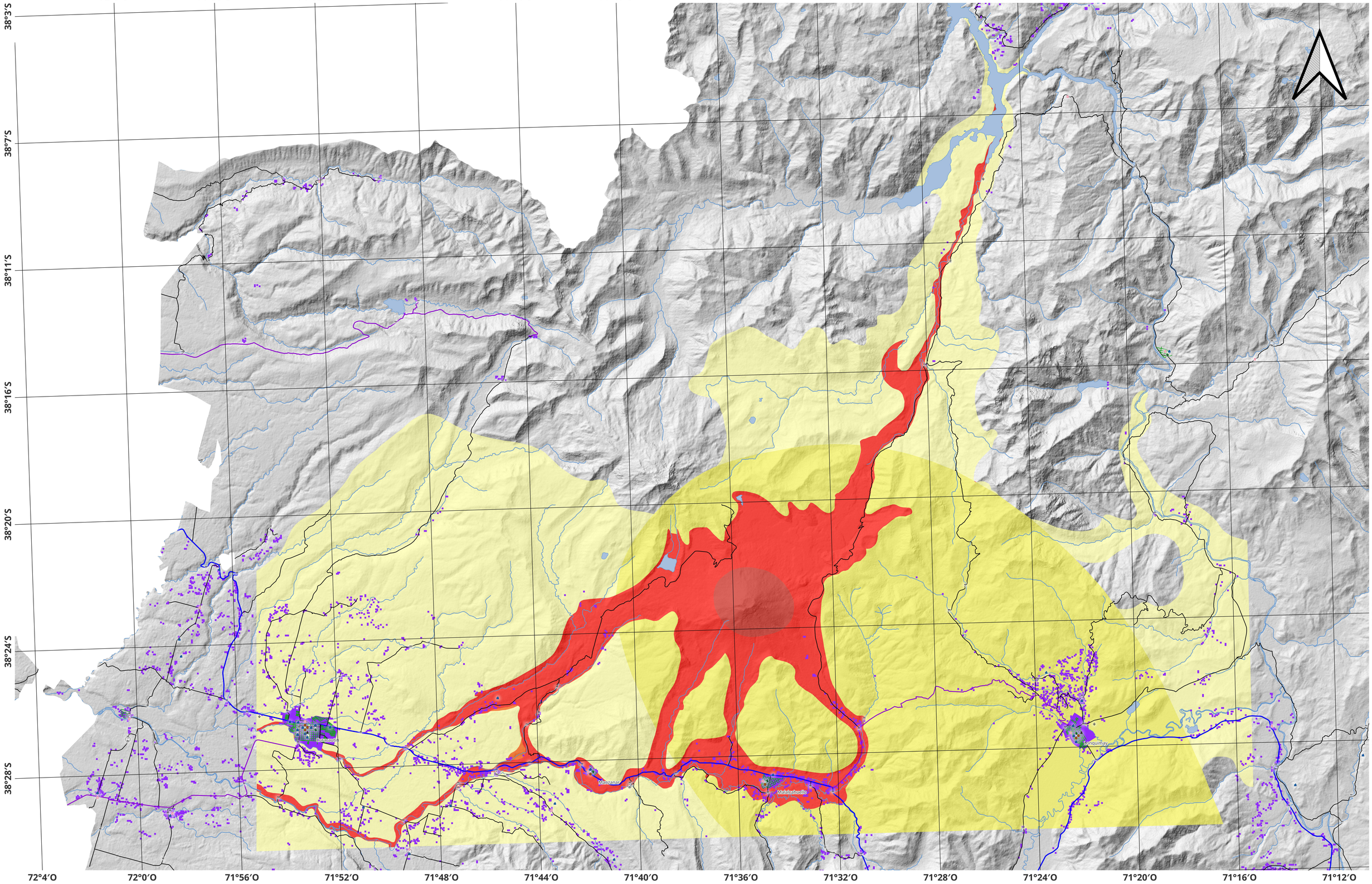
Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Río
- Lago

0 5 10 15 km

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 19S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Lonquimay



Leyenda

Zona de Peligro
- Muy Alto
- Alto
- Moderado
- Bajo
- Muy Bajo

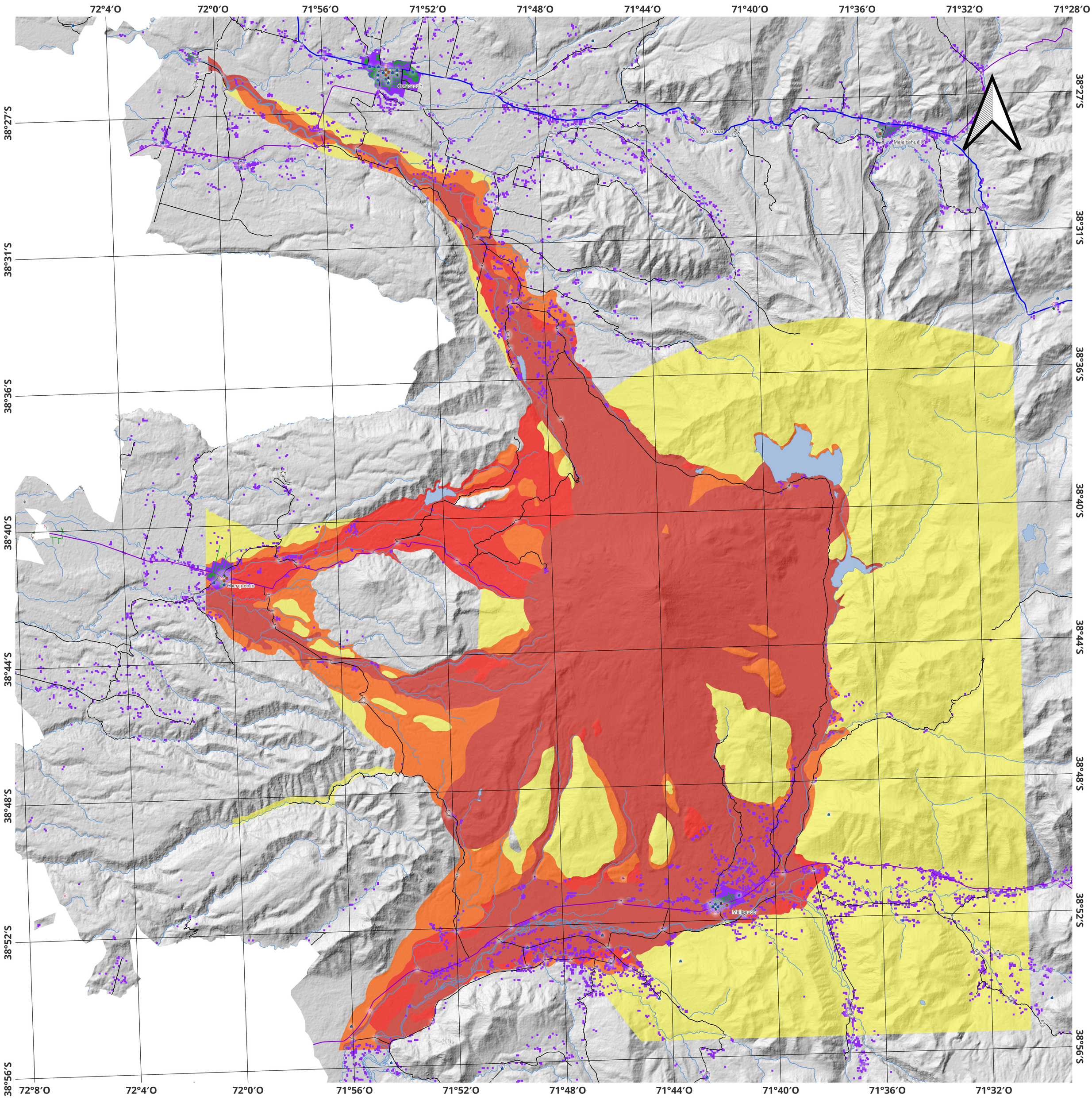
Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Río
- Lago

0 5 10 15 km

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 19S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Llaima



Leyenda

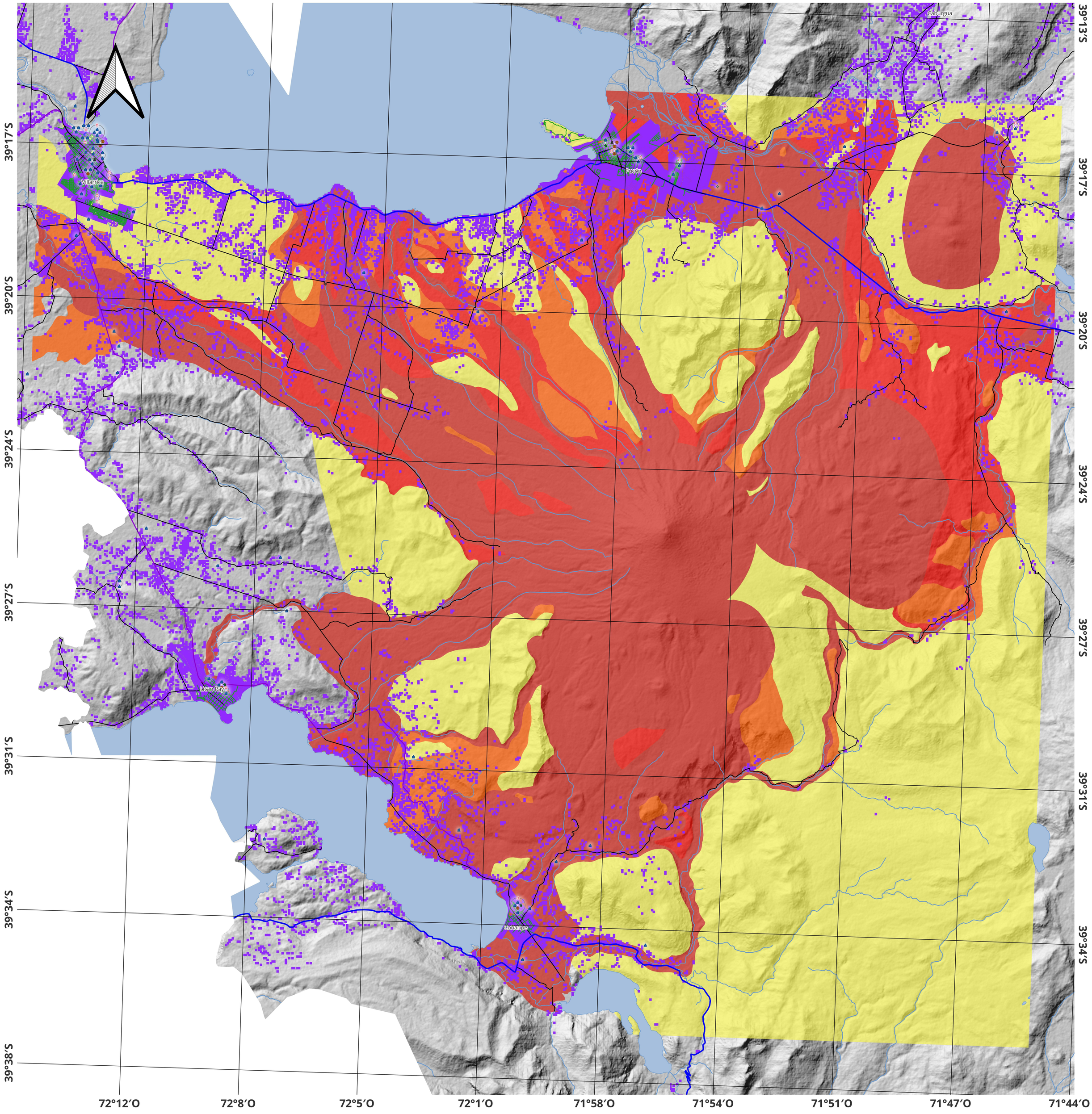
Zona de Peligro
- Muy Alto
- Alto
- Moderado
- Bajo

Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Río
- Lago

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 19S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Villarrica



Leyenda

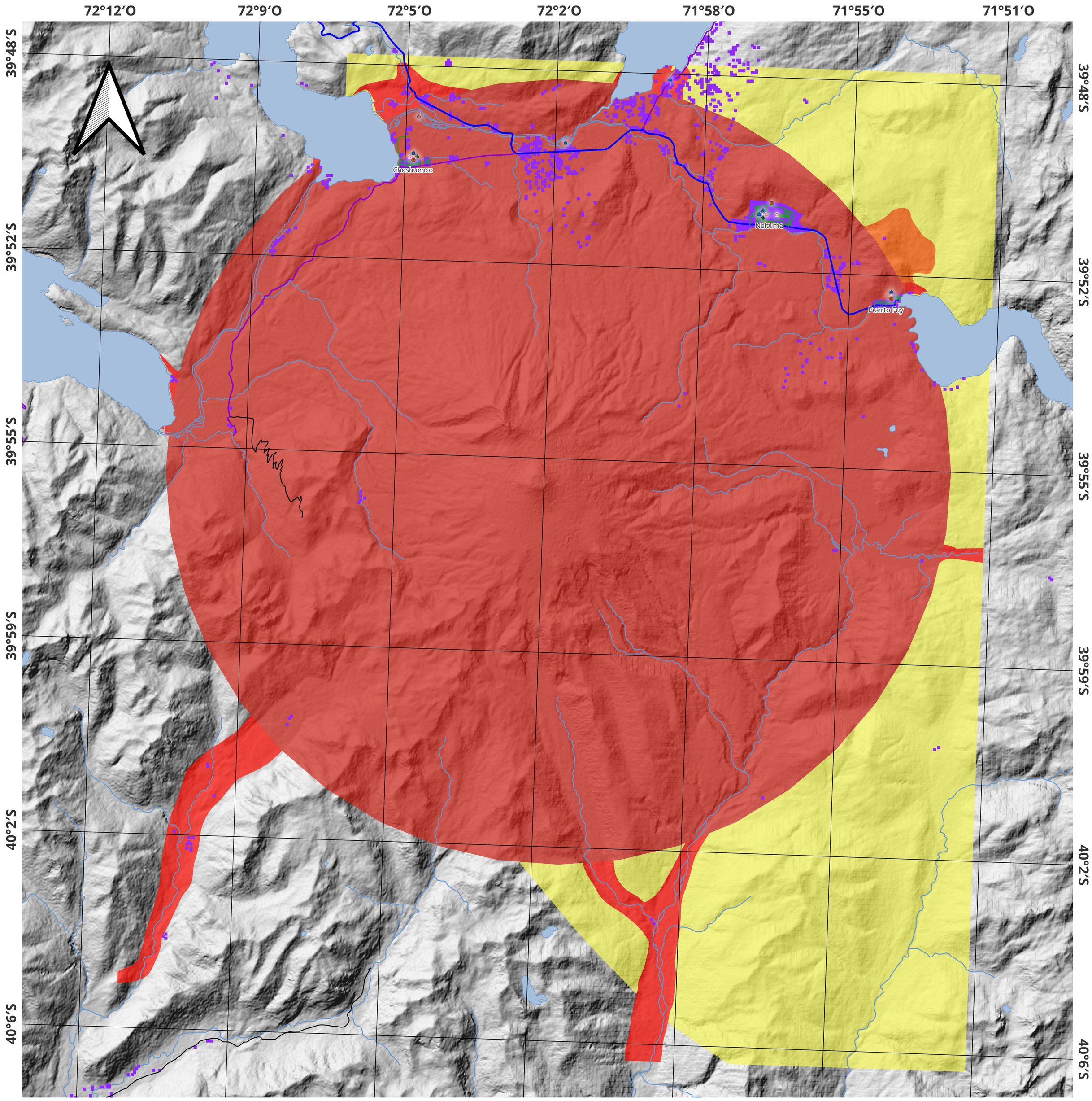
Zona de Peligro
- Alto
- Bajo
- Moderado
- Muy Alto

Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Red_Hidrografica
- masas_lacustres

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 18S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro

Mapa de peligro y exposición del volcán Mocho-Choshuenco



Leyenda

Zona de Peligro
- Alto
- Bajo
- Moderado
- Muy Alto

Simbología

- Área Poblada
- Aeropuertos
- Bomberos
- Carabineros
- Hidroeléctrica
- Municipio
- Salud
- Educación
- Puente
- Calle
- Regional principal
- Regional provincial comunal o de acceso
- Ruta internacional
- Red_Hidrografica
- masas_lacustres

Sistema de coordenadas:
WGS 84 / UTM zona 18S
Datum: WGS 1984
Unidad: Metro