



**Universidad del Desarrollo**  
Facultad de Ingeniería

CÁLCULO DE POBLACIÓN FLOTANTE Y VÍAS DE EVACUACIÓN PARA EL VOLCÁN VILLARRICA  
Uso de datos móviles para simulación de evacuaciones volcánicas

POR: NICOLAS FABIAN GONZALEZ INFANTE

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad del  
Desarrollo para optar al grado académico de Magíster en Data Science

PROFESOR GUÍA:

Dr. LEONARDO FERRES

Enero 2026

SANTIAGO

## AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar mis agradecimientos al profesor Leonardo Ferrés, por su orientación, disponibilidad y aportes metodológicos a lo largo del desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento fue clave para delimitar el alcance del proyecto, fortalecer el enfoque analítico y orientar la toma de decisiones metodológicas en las distintas etapas del estudio.

Asimismo, agradezco a Rosario Valderrama, quien desarrolló en paralelo un trabajo en la misma línea temática. Las instancias de discusión, intercambio de ideas y revisión conjunta de avances permitieron enriquecer el análisis, contrastar enfoques y abordar el problema desde distintas perspectivas, contribuyendo significativamente a la maduración del trabajo final.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE Y MARCO INSTITUCIONAL PARA LA EVACUACIÓN ANTE RIESGO VOLCÁNICO</b>	<b>6</b>
<b>2.1 PLANIFICACIÓN Y PROTOCOLOS OFICIALES EN CHILE PARA EL VOLCÁN VILLARRICA</b>	<b>6</b>
<b>2.2 ENFOQUES INTERNACIONALES PARA LA EVACUACIÓN ANTE DESASTRES</b>	<b>8</b>
<b>2.2.1 MODELOS DINÁMICOS DE EVACUACIÓN</b>	<b>8</b>
<b>2.2.2 USO DE DATOS DE MOVILIDAD Y TELEFONÍA MÓVIL EN SITUACIONES DE DESASTRE</b>	<b>10</b>
<b>2.2.3 SÍNTESIS DEL ESTADO DEL ARTE Y POSICIONAMIENTO DEL ESTUDIO</b>	<b>11</b>
<b>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
<b>3.1 HIPÓTESIS</b>	<b>13</b>
<b>3.2 OBJETIVO</b>	<b>14</b>
<b>4. DATOS Y FUENTES DE INFORMACIÓN</b>	<b>16</b>
<b>4.1 ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>17</b>
<b>4.2 DATOS TERRITORIALES Y DE INFRAESTRUCTURA</b>	<b>18</b>
<b>4.3 POBLACIÓN CONSIDERADA EN EL ESTUDIO</b>	<b>19</b>
<b>4.4 GRILLA POBLACIONAL</b>	<b>21</b>
<b>4.5 PUNTOS DE ENCUENTRO TRANSITORIOS (PET) Y VÍAS DE EVACUACIÓN</b>	<b>22</b>
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>24</b>
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>29</b>
<b>6.1 VISUALIZACIÓN TERRITORIAL</b>	<b>29</b>
<b>6.2 SIMULACIÓN DE EVACUACIÓN</b>	<b>34</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>43</b>
<b>8. PRÓXIMOS PASOS</b>	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>50</b>

## **Resumen**

La planificación de evacuaciones ante riesgo volcánico representa un desafío complejo, especialmente en territorios con alta variabilidad poblacional y fuerte componente turístico. En Chile, el Volcán Villarrica constituye uno de los sistemas volcánicos más activos y expuestos, debido a su cercanía a centros urbanos y a la presencia de población residente y flotante a lo largo del año.

El presente trabajo propone un enfoque progresivo para el análisis de evacuaciones volcánicas, aplicado al área de influencia del Volcán Villarrica, que integra tres etapas principales: visualización territorial, simulación de escenarios de evacuación y proyección hacia la incorporación de datos de movilidad real. En una primera etapa, se construye una base geoespacial consistente que integra red vial, población censal, grilla poblacional, Puntos de Encuentro Transitorios (PET) y vías de evacuación oficiales, permitiendo una representación estructurada del territorio y de la población expuesta.

Sobre esta base, se desarrolla un modelo de simulación de evacuación orientado a estimar tiempos de desplazamiento y analizar escenarios bajo distintos supuestos operativos, utilizando una representación agregada de la población y una activación escalonada de la evacuación. Los resultados permiten identificar diferencias relevantes

entre localidades y establecer tiempos de evacuación orientativos, que constituyen una línea base para la planificación del riesgo.

Finalmente, el trabajo discute las limitaciones del enfoque actual y propone la incorporación futura de datos de movilidad real, como registros agregados de telefonía móvil, con el fin de capturar variaciones temporales de la población y mejorar la calibración de los modelos. De esta forma, el estudio entrega una base metodológica reproducible y escalable, que puede ser extendida progresivamente para apoyar la gestión del riesgo volcánico en contextos dinámicos.

## **1. Introducción**

Chile se caracteriza por una elevada exposición a amenazas naturales, entre las cuales el riesgo volcánico ocupa un lugar central debido a la presencia de numerosos volcanes activos distribuidos a lo largo del territorio. Esta condición geográfica, combinada con la localización de centros urbanos, infraestructura crítica y zonas turísticas en áreas potencialmente expuestas, plantea importantes desafíos para la planificación y gestión de emergencias. En este contexto, la evacuación de la población ante escenarios de erupción volcánica constituye una de las medidas más relevantes para la reducción del riesgo y la protección de la vida humana.

El volcán Villarrica, ubicado en la Región de La Araucanía, representa uno de los casos más complejos del país en términos de gestión del riesgo volcánico. Su actividad persistente, junto con la cercanía de localidades como Pucón, Lican Ray y Coñaripe, configura un escenario donde conviven población residente permanente, población flotante asociada al turismo y una red vial con capacidades y configuraciones heterogéneas. Estas características dificultan la evaluación precisa de los tiempos y dinámicas de evacuación, especialmente cuando se utilizan enfoques estáticos o simplificados.

Tradicionalmente, los procesos de planificación de evacuaciones han estado sustentados en información censal agregada, cartografía básica y supuestos homogéneos sobre el comportamiento de la población. Si bien estos enfoques permiten establecer lineamientos generales, presentan limitaciones importantes para capturar la complejidad espacial y temporal de los desplazamientos reales durante una emergencia. En particular, la ausencia de representaciones dinámicas y la escasa integración entre visualización territorial y simulación limitan la capacidad de analizar escenarios alternativos y de identificar zonas críticas dentro del territorio.

En respuesta a estas limitaciones, en las últimas décadas se ha incrementado el uso de herramientas de visualización geoespacial y de simulación basada en agentes para el análisis de evacuaciones. Estos enfoques permiten representar explícitamente la interacción entre población, infraestructura y territorio, así como explorar distintos supuestos operativos bajo condiciones controladas. Sin embargo, su aplicación a escala local sigue siendo limitada, especialmente en contextos donde no se dispone de datos de movilidad real que permitan calibrar o validar los modelos.

El presente estudio se sitúa en este marco, proponiendo una aproximación metodológica que integra visualización geoespacial y simulación de evacuaciones para el análisis del riesgo volcánico en el entorno del volcán Villarrica. A partir de datos censales, información territorial y supuestos explícitos sobre el comportamiento de la población,

se construye una base de análisis que permite estimar tiempos de evacuación, identificar diferencias espaciales entre localidades y explorar el impacto de distintos modos de desplazamiento.

Es importante destacar que este trabajo no busca predecir comportamientos individuales ni reproducir con exactitud una evacuación real, sino generar un marco exploratorio que facilite la comprensión de las dinámicas territoriales y temporales asociadas a procesos de evacuación. En este sentido, la simulación se utiliza como una herramienta analítica y comparativa, orientada a apoyar la discusión metodológica y a sentar las bases para futuras incorporaciones de datos de movilidad real.

De esta forma, el estudio contribuye a la discusión sobre el uso combinado de visualización y simulación en contextos de gestión del riesgo, ofreciendo un caso aplicado a escala local que permite evaluar tanto los alcances como las limitaciones de este tipo de enfoques en escenarios volcánicos complejos.

## **2. Estado del arte y marco institucional para la evacuación ante riesgo volcánico**

El estudio de evacuaciones ante amenazas volcánicas integra diversos dominios del conocimiento, incluyendo la gestión del riesgo, la geografía, la ingeniería de transporte y la ciencia de datos. La literatura ha documentado enfoques que van desde la planificación territorial estática hasta modelos dinámicos de simulación apoyados por datos reales de movilidad. Esta sección sintetiza los avances metodológicos más relevantes y presenta los protocolos y normativas oficiales aplicables al contexto del volcán Villarrica, combinando perspectivas internacionales con lineamientos nacionales.

### **2.1 Planificación y protocolos oficiales en Chile para el volcán Villarrica**

En Chile, la gestión del riesgo volcánico es responsabilidad de un conjunto de instituciones articuladas bajo el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), con apoyo operativo de la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI). Estas instituciones mantienen un monitoreo continuo de la actividad volcánica y actualizan alertas técnicas y planes de emergencia según la evolución de los parámetros observados.

Para el caso específico del volcán Villarrica, los planos de evacuación oficiales disponibles en plataformas institucionales establecen la cartografía de rutas de evacuación, puntos de reunión y zonas de riesgo. Estos planos, publicados para la Región de La Araucanía y Los Ríos, grafican las vías de evacuación, los puntos de encuentro transitorio y los perímetros de seguridad establecidos por las autoridades frente a distintos escenarios de actividad volcánica.

La respuesta ante una posible erupción incluye también la definición de perímetros de seguridad y exclusión, que se ajustan según la alerta volcánica. Por ejemplo, cuando se registra un aumento de actividad superficial sin peligro inminente, se pueden establecer perímetros preventivos de 500 metros o más alrededor del cráter para resguardar a la población y gestionar el tránsito de personas en los sectores más expuestos.

Además, se llevan a cabo simulacros de evacuación para evaluar la preparación comunitaria y la eficacia de los mecanismos de respuesta de emergencia. En la Región de La Araucanía y de Los Ríos se han realizado ejercicios de simulacro volcánico que involucran sistemas de alerta, autoridades educativas y la participación ciudadana, con el objetivo de reforzar los protocolos y difundir las acciones recomendadas ante una crisis eruptiva.

Generalmente, los simulacros se programan en períodos de menor afluencia turística, lo que permite una coordinación más controlada y facilita la participación de la población

residente permanente. Sin embargo, esta práctica introduce una limitación relevante, ya que no siempre refleja las condiciones reales de alta demanda poblacional que se presentan durante los períodos de mayor actividad turística, como la temporada estival.

La literatura también enfatiza la importancia de mapas de peligros volcánicos específicos que representan zonas de afectación por flujos piroclásticos, lahares o caídas de ceniza como insumos básicos para diseñar rutas de evacuación y puntos seguros, constituyendo un puente entre la cartografía de riesgo técnica y los planes de emergencia comunales.

## **2.2 Enfoques internacionales para la evacuación ante desastres**

### **2.2.1 Modelos dinámicos de evacuación**

A nivel internacional, diversos estudios han avanzado hacia la simulación dinámica de evacuaciones como herramienta para el análisis del riesgo volcánico. Estos enfoques se caracterizan por representar explícitamente la red vial, la localización de la población y la interacción entre demanda de evacuación y capacidad del sistema de transporte.

En el contexto italiano, particularmente en áreas cercanas al Monte Etna, se han desarrollado modelos que integran redes viales jerarquizadas, parámetros de velocidad, restricciones de capacidad y escenarios de activación progresiva de la evacuación. La metodología aplicada en estos estudios suele estructurarse en cuatro etapas principales:

(i) construcción de una base geoespacial detallada del territorio, (ii) asignación de la población a nodos u orígenes de evacuación, (iii) definición de destinos seguros y (iv) simulación de flujos bajo distintos supuestos operativos.

La simulación permite evaluar indicadores como tiempos de evacuación, niveles de congestión y cuellos de botella, proporcionando una base cuantitativa para comparar escenarios. En estos modelos, la población se representa generalmente de forma agregada o mediante agentes simplificados, priorizando la escalabilidad y la interpretabilidad de los resultados por sobre la reproducción detallada del comportamiento individual.

Este tipo de enfoque resulta especialmente relevante en contextos volcánicos, donde la evacuación puede requerir la movilización simultánea de grandes volúmenes de población en plazos acotados. La simulación dinámica permite, además, explorar escenarios hipotéticos que no pueden ser observados directamente, como cambios en la red vial o variaciones en la proporción de modos de transporte utilizados durante la evacuación.

### **2.2.2 Uso de datos de movilidad y telefonía móvil en situaciones de desastre**

Un desarrollo metodológico complementario a la simulación dinámica ha sido el uso de datos agregados de telefonía móvil, comúnmente conocidos como Call Detail Records (CDR), para el análisis de desplazamientos poblacionales en contextos de desastre. Estos datos registran eventos de conexión de dispositivos a antenas celulares, permitiendo inferir patrones espaciales y temporales de movilidad a gran escala.

La metodología aplicada en estudios basados en CDR suele seguir una lógica distinta a la de los modelos de simulación. En lugar de generar escenarios hipotéticos, los datos móviles se utilizan para observar desplazamientos reales, identificando concentraciones de población, rutas predominantes y cambios en la distribución espacial antes y después de un evento. Casos ampliamente documentados incluyen el análisis de desplazamientos posteriores al terremoto de Haití en 2010 y al terremoto de Christchurch en 2011.

Desde el punto de vista metodológico, estos estudios se apoyan en procesos de agregación espacial y temporal, donde los datos individuales son anonimizados y resumidos en unidades territoriales mayores. El resultado es una representación empírica de la movilidad, útil para caracterizar población flotante, detectar patrones recurrentes y evaluar el impacto de eventos extremos sobre el comportamiento colectivo.

### **2.2.3 Síntesis del estado del arte y posicionamiento del estudio**

La revisión amplia de enfoques nacionales e internacionales evidencia una convergencia hacia marcos que combinan representación territorial, modelos dinámicos y datos de movilidad, con distintos grados de integración. No obstante, el acceso y uso de datos de movilidad real sigue siendo limitado en muchos contextos locales, especialmente cuando la disponibilidad de tales datos depende de acuerdos privados o complejos procesos de anonimización y agregación.

En el marco del estudio presentado, se adopta un enfoque progresivo que integra la visualización geoespacial y la simulación de evacuaciones utilizando fuentes públicas y censales, al tiempo que se reconoce la relevancia metodológica de los datos de movilidad para etapas futuras de calibración y validación del modelo.

Este posicionamiento permite situar el trabajo entre los enfoques tradicionales basados en datos censales y las metodologías emergentes que incorporan movilidad real, aportando una base sólida y reproducible para explorar escenarios de evacuación volcánica sin depender de información directa de operadores, pero con una estructura que admite extensiones hacia datos reales cuando sea accesible.

## **Referencias**

- Información de alertas y perímetros de seguridad del volcán Villarrica según SENAPRED y SERNAGEOMIN.
- Planos oficiales de evacuación volcánica en la Región de La Araucanía y Los Ríos.
- Simulacros de evacuación volcánica y prácticas de preparación comunitaria.
- Literatura general sobre movilidad y uso de CDR en desastres.

### **3. Hipótesis y Objetivos**

El análisis de evacuaciones ante riesgo volcánico en territorios con alta complejidad espacial requiere herramientas que permitan representar de forma integrada la población, la infraestructura y los procesos de desplazamiento. En contextos como el área de influencia del volcán Villarrica, donde coexisten localidades con distintas configuraciones urbanas y una marcada estacionalidad poblacional, los enfoques tradicionales basados en representaciones estáticas resultan insuficientes para evaluar escenarios de evacuación de manera comparativa.

En este marco, el presente estudio se estructura a partir de una hipótesis central y un conjunto de objetivos orientados a evaluar el potencial analítico de la integración entre visualización geoespacial y simulación de evacuaciones. Esta aproximación se adopta reconociendo explícitamente las limitaciones asociadas al uso de datos censales y la ausencia de información de movilidad real, entendiendo el modelo como una herramienta exploratoria y comparativa más que como un sistema predictivo.

#### **3.1 Hipótesis**

Este trabajo plantea que es posible mejorar la planificación y evaluación de evacuaciones ante riesgo volcánico mediante un enfoque progresivo basado en datos, que integre de manera ordenada la visualización territorial, la simulación de escenarios y, en una etapa posterior, la incorporación de datos de movilidad real.

En particular, se sostiene que una representación geoespacial consistente del territorio y de la distribución poblacional constituye un requisito fundamental para la simulación de evacuaciones, ya que permite identificar de forma temprana zonas críticas, cuellos de botella potenciales y limitaciones estructurales de la red vial. Asimismo, se plantea que la simulación basada en esta base visual validada permite estimar tiempos de evacuación y evaluar escenarios de forma más robusta que los enfoques estáticos tradicionales.

Finalmente, se hipotetiza que la incorporación futura de datos de movilidad real, como datos agregados de telefonía móvil, permitiría calibrar y refinar los modelos desarrollados, acercando los resultados simulados a patrones observados de comportamiento poblacional y mejorando su utilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en contextos de emergencia.

### **3.2 Objetivo**

El objetivo general de este estudio es desarrollar un enfoque metodológico basado en visualización geoespacial y simulación de evacuaciones que permita analizar escenarios de evacuación ante riesgo volcánico en el área de influencia del volcán Villarrica. A través de este enfoque, se busca estimar tiempos de evacuación y comparar resultados entre distintas localidades, contribuyendo a una mejor comprensión de las dinámicas territoriales asociadas a procesos de evacuación.

Para dar cumplimiento al objetivo general, el estudio se orienta a caracterizar el territorio de análisis mediante la integración de información censal, vial y administrativa, asegurando una representación espacial coherente de la población expuesta. A partir de esta base, se construye una grilla poblacional que permite distribuir la población de forma homogénea a nivel espacial, sirviendo como insumo para la simulación.

Posteriormente, se implementa un modelo de simulación de evacuaciones basado en agentes, incorporando supuestos explícitos sobre modos de desplazamiento y comportamiento agregado de la población. Este modelo se utiliza para estimar tiempos de evacuación generales y por localidad, diferenciando entre evacuación peatonal y vehicular. Finalmente, se analizan y comparan los resultados obtenidos para las localidades de Pucón, Lican Ray y Coñaripe, evaluando las diferencias observadas y discutiendo las limitaciones del enfoque adoptado, así como las oportunidades de mejora asociadas a la incorporación futura de datos de movilidad real.

## **4. Datos y fuentes de información**

El desarrollo del presente estudio se basa en la integración de diversas fuentes de información espacial y demográfica, con el objetivo de construir una representación coherente del territorio, la población expuesta y la infraestructura relevante para los procesos de evacuación ante riesgo volcánico. Dado que el foco del trabajo es metodológico y exploratorio, se priorizó el uso de datos públicos, oficiales y reproducibles, permitiendo asegurar transparencia, trazabilidad y coherencia con los instrumentos de planificación vigentes.

La selección de los datos respondió a dos criterios principales. En primer lugar, se buscó que las fuentes fueran consistentes con la información utilizada por los organismos nacionales de gestión del riesgo y planificación territorial. En segundo lugar, se privilegió información que permitiera una adecuada desagregación espacial, condición necesaria para la construcción de la grilla poblacional y el posterior desarrollo de la simulación de evacuaciones.

## **4.1 Área de estudio**

El área de estudio corresponde a la zona de influencia del volcán Villarrica, incluyendo los principales centros urbanos y localidades potencialmente afectadas por una erupción volcánica, específicamente Pucón, Lican Ray y Coñaripe. Este territorio ha sido definido considerando la información oficial disponible sobre zonas de amenaza y planificación de evacuación vigente.

Durante los últimos años, el volcán Villarrica ha registrado episodios recurrentes de incremento de actividad que han derivado en la declaración de alertas técnicas por parte de los organismos competentes. En particular, se han reportado aumentos significativos de actividad volcánica que motivaron la declaración de Alerta Técnica Amarilla en septiembre de 2023, asociada a un incremento en la actividad superficial y cambios en parámetros de monitoreo. Posteriormente, en enero de 2024, se mantuvieron medidas preventivas y perímetros de seguridad ante la persistencia de actividad anómala, lo que implicó la actualización de información operativa y de las condiciones de acceso al entorno del volcán.

Estos episodios recientes evidencian la recurrencia de estados de alerta en el área de estudio y refuerzan la pertinencia de analizar escenarios de evacuación bajo supuestos controlados, utilizando información territorial y poblacional coherente con los instrumentos de planificación vigentes.

El área de estudio fue delimitada mediante un polígono de recorte que permite acotar espacialmente el análisis y asegurar que todas las capas geográficas utilizadas compartan una extensión común. Este polígono constituye el insumo base para el recorte, validación y análisis de todas las capas geográficas empleadas en el trabajo, garantizando consistencia espacial entre los distintos conjuntos de datos y facilitando la integración de información territorial, poblacional y de evacuación.

## **4.2 Datos territoriales y de infraestructura**

Para la representación del territorio y de la infraestructura relevante para los procesos de evacuación, se utilizaron capas geoespaciales vectoriales que describen la red vial, los centros poblados y los límites administrativos presentes en el área de estudio.

La información de la red vial fue obtenida desde OpenStreetMap (OSM), una base de datos geográfica colaborativa de acceso abierto ampliamente utilizada en estudios de transporte, evacuación y simulación. Esta fuente proporciona información detallada sobre vías primarias, secundarias y terciarias, así como atributos asociados a la conectividad vial, permitiendo una representación adecuada de los posibles desplazamientos durante la evacuación.

La localización de centros poblados y localidades también fue obtenida desde OpenStreetMap, lo que permitió identificar zonas urbanas y rurales habitadas dentro del

área de estudio. Esta información resulta clave para contextualizar la distribución espacial de la población expuesta y su relación con la red vial existente.

Por su parte, los límites administrativos fueron obtenidos a partir de información oficial asociada al Instituto Nacional de Estadísticas, utilizando datos del Censo de Población y Vivienda 2017, complementados con cartografía disponible a través de la plataforma geoespacial institucional del INE. Estas capas permiten asociar información poblacional agregada a unidades territoriales reconocidas oficialmente y facilitan el análisis a escala comunal y subcomunal.

### **4.3 Población considerada en el estudio**

El estudio considera como base una población residente estimada, derivada de los datos del Censo de Población y Vivienda 2017, para los principales centros poblados analizados: Pucón, Lican Ray y Coñaripe. Esta población corresponde a la población fija o habitual, es decir, aquella que reside permanentemente en el territorio y constituye la base mínima de población expuesta ante un evento eruptivo fuera de períodos turísticos.

Localidad	Población residente (Censo 2017)	Fuente
Pucón	≈ 24.000 habitantes	INE, Censo 2017
Lican Ray	≈ 3.300 habitantes	INE, Censo 2017
Coñaripe	≈ 1.600 habitantes	INE, Censo 2017

Es importante destacar que esta estimación no incorpora población flotante, asociada principalmente al turismo, segundas viviendas y actividades estacionales, cuya magnitud puede variar significativamente a lo largo del año. En localidades con alta vocación turística como Pucón, Lican Ray y Coñaripe, la población presente puede incrementarse de manera sustantiva durante temporadas peak, particularmente en los meses de verano (diciembre a febrero).

En este sentido, los tiempos de evacuación estimados en este estudio se basan en una población fija residente, lo que permite establecer un escenario base controlado y reproducible. No obstante, en períodos de alta afluencia turística, la magnitud y distribución espacial de la población expuesta podría generar aumentos relevantes en los tiempos de evacuación y en la carga sobre la red vial y los Puntos de Encuentro Transitorios.

Esta diferencia implica que los tiempos de evacuación simulados representan una estimación conservadora, válida principalmente para escenarios fuera de temporada alta. En períodos de alta afluencia turística, la magnitud y distribución espacial de la población expuesta puede ser significativamente mayor, lo que podría generar aumentos relevantes en los tiempos de evacuación y en la carga sobre la red vial y los Puntos de Encuentro Transitorios.

#### **4.4 Grilla poblacional**

La estimación de población utilizada para la construcción de la grilla poblacional se basó en datos censales agregados a nivel de distrito, provenientes del Censo de Población y Vivienda 2017, elaborado por el Instituto Nacional de Estadísticas. El distrito censal constituye la unidad territorial mínima de desagregación pública disponible para la información poblacional, lo que permite un equilibrio adecuado entre nivel de detalle y confiabilidad de los datos.

El procedimiento general consistió en asociar la población total de cada distrito censal a las celdas de la grilla que intersectan su geometría, permitiendo así una redistribución espacial de la población desde unidades administrativas irregulares hacia unidades regulares homogéneas. Este enfoque evita la asignación puntual de población y permite una representación más realista y continua de la distribución espacial.

En síntesis, la grilla poblacional construida a partir de datos censales a nivel de distrito permite representar de manera homogénea la distribución espacial de la población residente y constituye el insumo principal para la definición de orígenes de evacuación en las etapas posteriores de simulación.

Fuentes:

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2017). Censo de Población y Vivienda

## **4.5 Puntos de Encuentro Transitorios (PET) y vías de evacuación**

Para asegurar coherencia con la planificación oficial de gestión del riesgo, se incorporaron datos correspondientes a los Puntos de Encuentro Transitorios (PET) y a las vías de evacuación definidas por los organismos de protección civil para el área de estudio. Esta información fue obtenida desde el visor geoespacial oficial del organismo nacional de gestión del riesgo, disponible a través del Geoportal institucional de ONEMI, actualmente integrado en SENAPRED.

Los PET corresponden a ubicaciones geográficas definidas oficialmente como zonas seguras temporales destinadas a la concentración inicial de la población evacuada durante una emergencia, mientras que las vías de evacuación representan rutas establecidas para el desplazamiento desde zonas de riesgo hacia zonas seguras o puntos

de encuentro. Ambas capas se encuentran en formato vectorial y cuentan con atributos descriptivos que permiten su identificación y análisis espacial.

En el contexto del presente estudio, los PET y las vías de evacuación cumplen un rol central en la definición de los destinos y trayectorias de evacuación simuladas, permitiendo orientar el uso de la red vial hacia rutas oficialmente reconocidas y asegurando que los escenarios analizados reflejen decisiones de planificación institucional vigentes. No obstante, es importante señalar que estas definiciones corresponden a elementos de carácter estático, que no consideran dinámicas temporales como saturación, capacidad efectiva o cambios operativos durante una emergencia. A pesar de estas limitaciones, su incorporación resulta indispensable para construir escenarios de evacuación realistas y comparables con los planes existentes.

## **5. Metodología**

La metodología aplicada en este estudio se estructura en dos grandes etapas complementarias: una etapa de visualización geoespacial orientada a la construcción y validación de la base territorial, y una etapa de simulación dinámica destinada al análisis de escenarios de evacuación ante un evento eruptivo del volcán Villarrica. Ambas etapas se desarrollan de forma secuencial y reproducible, asegurando coherencia entre los datos utilizados, los supuestos adoptados y los resultados obtenidos.

La etapa de visualización tiene como objetivo construir una base geoespacial consistente que permita representar adecuadamente el territorio, la infraestructura vial y la distribución espacial de la población expuesta. Para ello, todas las capas geográficas utilizadas incluyendo red vial, centros poblados, límites administrativos y distritos censales fueron cargadas en un entorno de análisis común y estandarizadas a un mismo sistema de referencia espacial de tipo métrico, adecuado para análisis de distancia y superficie. Este proceso incluyó la revisión de la validez geométrica de las capas, la corrección de geometrías inválidas y la eliminación de inconsistencias que pudieran afectar los análisis posteriores.

Una vez estandarizados los datos, se definió explícitamente el área de estudio mediante un polígono de recorte correspondiente a la zona de influencia del volcán Villarrica. Este polígono fue utilizado como máscara espacial para recortar todas las capas geográficas,

asegurando que el análisis se concentrará exclusivamente en el territorio relevante y garantizando coherencia espacial entre los distintos conjuntos de datos. La utilización de un área de estudio común permitió además reducir el volumen de datos procesados y facilitar la interpretación de los resultados.

La red vial obtenida desde OpenStreetMap fue procesada para asegurar su conectividad y consistencia topológica dentro del área de estudio. Se verificó la continuidad de los tramos viales y su correcta intersección, con el objetivo de disponer de una representación adecuada de la infraestructura de transporte que sería utilizada posteriormente para la simulación de rutas de evacuación. En esta etapa, la red vial se empleó principalmente con fines de visualización y validación territorial, sin incorporar aún atributos dinámicos asociados a capacidad o congestión.

Paralelamente, a partir de los límites de distritos censales y los datos de población del Censo de Población y Vivienda 2017, se construyó una grilla espacial regular que cubre completamente el área de estudio. Esta grilla permitió transformar la información poblacional originalmente asociada a unidades administrativas irregulares en unidades homogéneas, más adecuadas para el análisis espacial y la simulación. La población total de cada distrito fue redistribuida entre las celdas de la grilla que intersectan su geometría, manteniendo la consistencia con los valores censales originales y evitando concentraciones puntuales de población.

La segunda etapa metodológica corresponde a la simulación de evacuaciones, cuyo objetivo es analizar escenarios dinámicos de desplazamiento ante un evento eruptivo, incorporando la información territorial, poblacional y de planificación oficial construida previamente. La simulación se concibe como una herramienta de análisis exploratorio y comparativo, orientada a estimar tiempos de evacuación, identificar patrones espaciales y evaluar la coherencia entre la planificación oficial y el comportamiento agregado de los flujos de evacuación.

Para el desarrollo de la simulación se establecieron supuestos explícitos que permiten mantener un equilibrio entre realismo operativo y simplicidad metodológica. La población a evacuar se distribuye espacialmente de acuerdo con la grilla poblacional construida a partir de datos censales, donde cada celda representa un origen potencial de evacuación con una demanda proporcional a la población estimada. La evacuación se realiza utilizando la red vial existente y las vías de evacuación oficiales, sin incorporar en esta etapa restricciones dinámicas de capacidad ni efectos de congestión.

Los destinos de evacuación fueron definidos a partir de los Puntos de Encuentro Transitorios (PET) oficiales, obtenidos desde el geoportal del organismo nacional de gestión del riesgo. Estos puntos se modelan como destinos potenciales sin restricciones explícitas de capacidad, permitiendo analizar el comportamiento agregado del sistema bajo supuestos controlados. La activación de la evacuación se modela de forma escalonada, de modo que los agentes no inician el desplazamiento de manera simultánea,

sino que su salida se distribuye temporalmente al inicio de la simulación, representando de forma simplificada tiempos de reacción heterogéneos.

Desde el punto de vista de la movilidad, se adoptó una composición modal simplificada, en la cual el 70% de la población evacúa de manera peatonal y el 30% utiliza vehículo particular. Esta distribución se mantiene constante en todos los escenarios simulados y responde a un supuesto controlado que permite comparar resultados entre localidades sin introducir variabilidad adicional asociada a diferencias modales.

La red vial se modela como un grafo compuesto por nodos que representan intersecciones y arcos que representan tramos viales. Sobre esta estructura se priorizan las vías de evacuación oficiales, asegurando que las rutas simuladas sean coherentes con la planificación institucional vigente. Para cada origen definido en la grilla poblacional se asignan rutas hacia uno o más PET, utilizando criterios de conectividad y distancia, lo que permite generar trayectorias plausibles de evacuación.

La simulación se estructura mediante la definición de escenarios, permitiendo analizar configuraciones tales como evacuación simultánea de la población o evacuación progresiva. Para cada escenario se calculan métricas orientadas a evaluar el desempeño del proceso de evacuación, principalmente el tiempo estimado necesario para que la población alcance un PET. Estas métricas constituyen la base para el análisis comparativo de resultados entre localidades y modos de evacuación.

Para la estimación de los tiempos de desplazamiento se definieron velocidades constantes diferenciadas por modo de evacuación. La evacuación peatonal se modeló utilizando una velocidad promedio de 4,0 km/h, valor conservador ampliamente utilizado en estudios de evacuación y representativo de desplazamientos en condiciones de alerta. La evacuación vehicular se modeló utilizando una velocidad promedio de 30 km/h, inferior a la velocidad máxima de diseño de las vías, con el objetivo de representar condiciones de conducción precautoria y congestión inicial sin introducir dinámicas complejas de tráfico.

Finalmente, con el objetivo de mantener la eficiencia computacional del modelo, la población no se representa de manera individual, sino mediante agentes agregados, donde cada agente representa a cinco personas. Esta estrategia permite reducir la complejidad computacional sin alterar la magnitud relativa de los flujos simulados. La asignación de agentes se realiza proporcionalmente a la población estimada en cada celda de la grilla y a la composición modal definida.

Es importante señalar que la simulación desarrollada se basa en una representación estática de la población y no incorpora datos de movilidad real ni comportamiento individual detallado. Asimismo, no se consideran restricciones dinámicas de capacidad de la red vial ni de los PET. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como estimaciones orientativas, útiles para identificar patrones generales, zonas críticas y coherencia territorial, más que como predicciones exactas del comportamiento real. No obstante, esta aproximación permite construir una base metodológica sólida y

reproducibile, sobre la cual es posible incorporar progresivamente información más compleja en etapas futuras.

## **6. Resultados**

### **6.1 Visualización territorial**

**Herramientas utilizadas**

Los resultados de la etapa de visualización territorial fueron generados utilizando herramientas de análisis geoespacial orientadas a la integración, validación y exploración de datos espaciales.

- QGIS Project (QGIS)

Utilizado para la carga, visualización y validación de las capas geoespaciales, incluyendo red vial, centros poblados, límites administrativos, distritos censales, grilla poblacional, Puntos de Encuentro Transitorios (PET) y vías de evacuación. Esta herramienta permitió verificar la coherencia espacial entre capas y generar mapas temáticos de apoyo al análisis

### **Resultados de la visualización**

La primera etapa de resultados corresponde a la visualización territorial integrada del área de estudio, cuyo objetivo fue validar la coherencia espacial de los datos y construir una base cartográfica sólida para la simulación de evacuaciones. Esta etapa se centró en el análisis estático del territorio y no considera aún dinámicas de desplazamiento ni tiempos de evacuación.

A partir de la integración de la red vial, los límites administrativos, los distritos censales, la grilla poblacional y los Puntos de Encuentro Transitorios (PET), se obtuvo una representación espacial continua del área de influencia del Volcán Villarrica.

Los principales resultados de esta etapa incluyen:

- Validación de la correcta superposición entre red vial, centros poblados, grilla poblacional y PET.
- Identificación de zonas con mayor concentración de población, especialmente en áreas urbanas y lacustres.
- Verificación de la cobertura espacial y conectividad de las vías de evacuación oficiales.

Generación de una base territorial homogénea y consistente, apta para la simulación de escenarios de evacuación.

Esta etapa permitió detectar inconsistencias espaciales de forma temprana y asegurar que la simulación posterior se base en una representación territorial confiable.

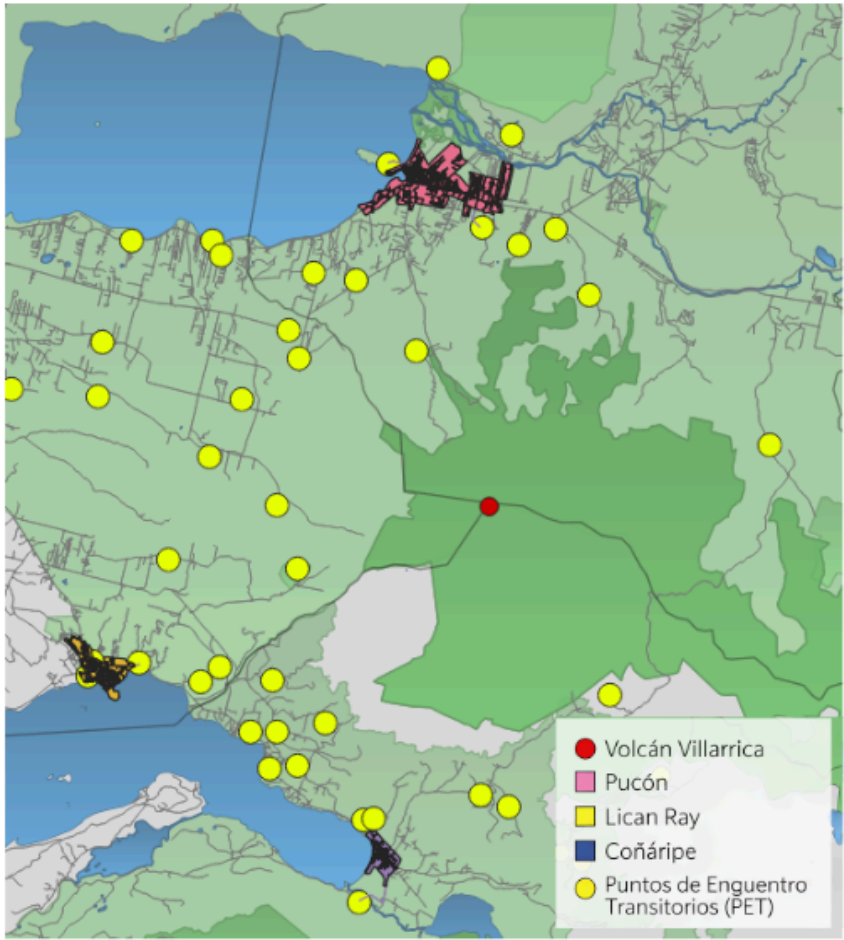
- Área de estudio



Zona: Pucon, Lican Ray, Coñaripe

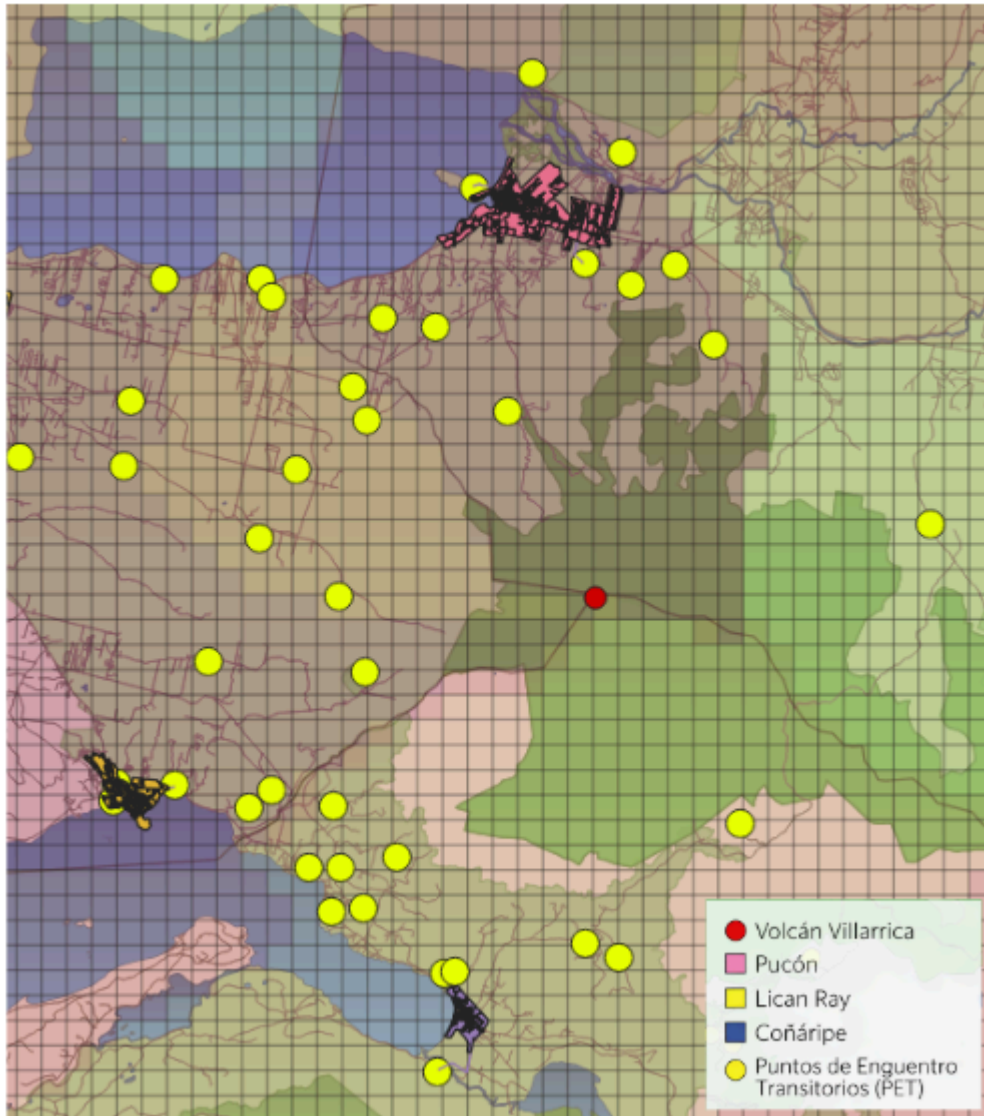
Fuente: Elaboración propia, a partir de datos geospaciales de OpenStreetMap y cartografía censal del Instituto Nacional de Estadísticas (Censo de Población y Vivienda 2017).

- Puntos de encuentros transitorios



Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de OpenStreetMap, Instituto Nacional de Estadísticas (Censo 2017) y ONEMI.

- Grilla poblacional



## 6.2 Simulación de evacuación

Herramientas utilizadas

Los resultados de la etapa de simulación fueron generados mediante una plataforma de modelación basada en agentes, seleccionada por su capacidad para integrar información geoespacial real y representar procesos dinámicos de evacuación sobre infraestructura existente. En particular, se utilizó la GAMA Modeling Platform como entorno principal de simulación.

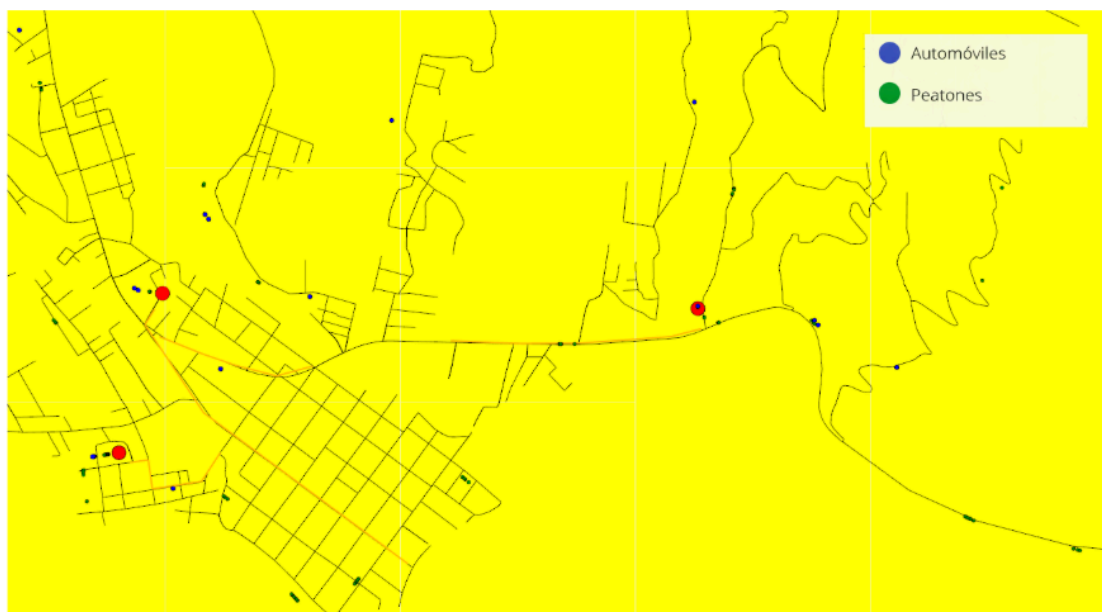
La modelación fue desarrollada utilizando su lenguaje propio, GAML (GAMA Modeling Language), lo que permitió representar explícitamente el territorio, la red vial, los orígenes de evacuación definidos a partir de la grilla poblacional y los destinos correspondientes a los Puntos de Encuentro Transitorios (PET). Esta plataforma permitió simular el desplazamiento agregado de la población sobre la red vial y estimar tiempos de evacuación bajo distintos supuestos operativos, manteniendo coherencia espacial con los datos de entrada utilizados en las etapas previas de visualización.

## **Resultados de la simulación**

La segunda etapa de resultados corresponde a la simulación de escenarios de evacuación ante un evento eruptivo del volcán Villarrica. La simulación se construyó utilizando como orígenes las celdas de la grilla poblacional ubicadas en zonas expuestas y como destinos los PET oficiales definidos por la autoridad, considerando la red vial y las vías de evacuación disponibles.

Los tiempos reportados en esta sección representan exclusivamente el intervalo transcurrido desde el inicio de la simulación, es decir, desde el momento en que se activa la evacuación, hasta que los agentes alcanzan un PET. No se incorporan tiempos previos asociados a detección del evento, emisión de alertas ni preparación inicial de la población.

Con el objetivo de analizar el comportamiento temporal del proceso de evacuación y capturar tanto diferencias territoriales como desigualdades internas dentro del sistema, los resultados se evaluaron combinando estimaciones por poblado y el análisis de la distribución completa de los tiempos de evacuación. Todos los tiempos reportados corresponden exclusivamente al intervalo transcurrido desde el inicio de la simulación, es decir, desde el momento en que se activa la evacuación, hasta que los agentes alcanzan un Punto de Encuentro Transitorio (PET).



Simulación de evacuación desarrollada para el poblado de Lican Ray.

Fuente: Elaboración propia.

A nivel agregado, la simulación permitió estimar los tiempos promedio de evacuación para el conjunto del área de estudio, considerando la totalidad de la población modelada y los supuestos definidos en la metodología. En este contexto, el tiempo promedio de **evacuación peatonal obtenido fue de 00:28:38**, mientras que el tiempo promedio de **evacuación para el modo vehicular alcanzó 00:20:17**.

A escala local, se estimaron tiempos de evacuación específicos para los principales poblados considerados en el estudio: Lican Ray, Coñaripe y Pucón. En **Lican Ray**, el tiempo estimado de evacuación **peatonal fue de 00:17:14**, mientras que el tiempo **vehicular alcanzó 00:08:30**. En **Coñaripe**, los tiempos estimados fueron de **00:18:35 para peatones y 00:10:03 para vehículos**. En el caso de **Pucón**, el tiempo de evacuación **peatonal** fue considerablemente mayor, alcanzando **00:27:45**, mientras que **el tiempo vehicular fue de 00:07:07**.



Simulación de evacuación desarrollada para el poblado de Coñaripe.

Fuente: Elaboración propia.

Estas diferencias reflejan contrastes asociados a la localización geográfica de cada poblado, su estructura urbana, la conectividad vial disponible y la proximidad relativa a los PET. En particular, Pucón presenta una mayor dispersión territorial y una trama urbana más extensa, lo que se traduce en mayores tiempos de evacuación peatonal, mientras que el uso de vehículo particular permite reducir de manera significativa los tiempos centrales de desplazamiento.

Más allá de estos promedios por localidad, el análisis de la distribución completa de los tiempos de evacuación permite caracterizar con mayor profundidad el desempeño del sistema. Los tiempos mínimos observados, tanto para peatones como para vehículos, fueron del orden de un segundo, correspondientes a agentes ubicados prácticamente sobre un PET al momento de iniciarse la simulación. En contraste, los tiempos máximos registrados desde el inicio de la evacuación alcanzaron valores elevados, con 01:42:17 para peatones y 01:42:10 para vehículos, representando las situaciones más desfavorables del sistema. Estos casos se asocian principalmente a trayectos de larga distancia y a sectores con menor conectividad vial o alta dependencia de corredores específicos de evacuación.



Simulación de evacuación desarrollada para el poblado de Pucón.

Fuente: Elaboración propia.

El uso de percentiles permite una interpretación más robusta del comportamiento general del proceso. En el caso de la evacuación peatonal, el percentil 50 indica que el 50% de los agentes alcanza un PET en aproximadamente 36 minutos, mientras que el 75% lo hace antes de 59 minutos y el 90% antes de 1 hora y 31 minutos desde el inicio de la evacuación. Para el modo vehicular, los tiempos centrales se reducen de forma significativa, con una mediana cercana a 16 minutos, un percentil 75 de 22 minutos y un percentil 90 de aproximadamente 58 minutos.

La comparación entre ambas modalidades evidencia que el uso de vehículo particular permite reducir de manera sustantiva los tiempos centrales de evacuación. No obstante, la presencia de colas prolongadas en ambos modos sugiere que existen sectores del territorio donde los tiempos de desplazamiento siguen siendo elevados, independientemente del modo utilizado, lo que refuerza la influencia de la configuración territorial, la distancia a los PET y la estructura de la red vial sobre el desempeño global del sistema de evacuación.



Simulación de evacuación desarrollada para el poblado de Pucón.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la distancia recorrida durante la evacuación se utilizó como una variable explicativa complementaria para relacionar los resultados temporales con la configuración territorial y la estructura de la red vial. La distancia media recorrida fue de

6,84 km para peatones y 12,61 km para vehículos, mientras que la distancia máxima observada alcanzó 45,48 km en peatones y 51,07 km en vehículos. La presencia de distancias máximas superiores a 45 km confirma la existencia de sectores donde el acceso a un PET implica recorridos extensos, dependientes de corredores viales específicos o alejados del sistema de puntos de encuentro. En conjunto, estas métricas permiten identificar potenciales zonas críticas del sistema y refuerzan la utilidad de complementar el análisis de tiempos con indicadores espaciales, especialmente en un territorio donde la distribución de la infraestructura y la distancia a los puntos de evacuación influyen de manera determinante en el desempeño global del proceso.

## **7. Conclusiones**

El presente trabajo desarrolló un enfoque progresivo para el análisis de evacuaciones ante riesgo volcánico en el área de influencia del volcán Villarrica, integrando visualización geoespacial y simulación de escenarios como herramientas centrales para el análisis territorial y la planificación del riesgo. A partir de datos territoriales, poblacionales e institucionales de acceso público, se construyó una base geoespacial consistente que permitió representar de manera estructurada la distribución espacial de la población, la red vial existente y los Puntos de Encuentro Transitorios definidos oficialmente por la autoridad.

Los resultados de la etapa de visualización territorial evidencian la relevancia de contar con una representación espacial validada como requisito previo para cualquier proceso de simulación. Esta etapa permitió verificar la coherencia entre las distintas capas geográficas, identificar patrones de concentración poblacional y asegurar que los escenarios simulados se basaran en una configuración territorial realista y alineada con los instrumentos de planificación vigentes.

La simulación de evacuación permitió estimar tiempos y distancias de desplazamiento orientativos tanto a nivel agregado como por localidad, considerando supuestos operativos simplificados y una representación agregada de la población. Los resultados muestran diferencias relevantes entre los poblados analizados, asociadas principalmente a la localización geográfica, la estructura de la red vial y la proximidad a los Puntos de

Encuentro Transitorios. Estas diferencias refuerzan la necesidad de abordar la planificación de evacuaciones desde una perspectiva territorial diferenciada, particularmente en territorios con configuraciones espaciales heterogéneas.

En términos modales, los resultados indican que, bajo los supuestos del modelo, el modo vehicular presenta tiempos centrales de evacuación menores que el modo peatonal. Sin embargo, esta ventaja relativa debe interpretarse con cautela, ya que la simulación no incorpora restricciones dinámicas de capacidad ni efectos de congestión. En escenarios de alta demanda, como aquellos asociados a períodos de mayor afluencia turística, los tiempos vehiculares podrían verse significativamente incrementados, reduciendo o incluso anulando las ventajas observadas en escenarios de baja congestión y aumentando la variabilidad temporal del sistema.

Un aspecto particularmente relevante del análisis corresponde a la presencia de outliers en los tiempos y distancias de evacuación, tanto en el modo peatonal como vehicular. Estos casos extremos se asocian a sectores del territorio ubicados a grandes distancias de los PET o con accesos limitados a la red vial principal. En particular, se identifican trayectos extensos asociados a zonas al interior o en el entorno de áreas de reserva, donde los accesos se realizan a través de senderos o caminos secundarios de difícil transitabilidad, así como a sectores más alejados del sistema de puntos de encuentro, especialmente en áreas cercanas al sector de Caburgua, donde la cobertura de PET resulta comparativamente menor.

La existencia de estos outliers pone de manifiesto limitaciones estructurales del sistema de evacuación vigente, que no quedan plenamente reflejadas en los promedios agregados. En este sentido, los valores extremos observados no deben interpretarse como anomalías del modelo, sino como indicadores de zonas potencialmente críticas que podrían requerir medidas específicas, tales como la redefinición de rutas, la incorporación de nuevos puntos de encuentro o estrategias de evacuación diferenciadas.

En relación con la hipótesis planteada, los resultados permiten sostener que la integración progresiva de visualización territorial y simulación dinámica constituye una base metodológica sólida para el análisis de evacuaciones volcánicas, superando las limitaciones de enfoques puramente estáticos. No obstante, el estudio también evidencia que la ausencia de datos de movilidad real, de variaciones temporales de la población y de mecanismos explícitos de congestión limita la representatividad de los tiempos estimados, particularmente en territorios turísticos y dinámicos.

El principal aporte del trabajo radica, por tanto, en la construcción de una base metodológica reproducible y escalable, capaz de incorporar progresivamente mayores niveles de complejidad. Esta base permite proyectar futuras extensiones del modelo, tales como la integración de datos de telefonía móvil para caracterizar población flotante, la incorporación de variación estacional de la demanda y la modelación explícita de congestión vial. De este modo, el enfoque propuesto se posiciona como una herramienta flexible para apoyar la planificación y gestión del riesgo volcánico en el

entorno del volcán Villarrica, contribuyendo a la identificación temprana de zonas críticas y a la evaluación de estrategias de evacuación más robustas.

## **8. Próximos Pasos**

El trabajo desarrollado establece una base metodológica sólida para el análisis de evacuaciones ante riesgo volcánico, integrando visualización territorial y simulación de escenarios como herramientas complementarias. No obstante, el carácter exploratorio del modelo y los supuestos adoptados abren diversas líneas de extensión orientadas a incrementar el realismo, la precisión y la aplicabilidad de los resultados en contextos reales de gestión del riesgo.

Una primera línea de desarrollo prioritaria corresponde a la incorporación de datos de movilidad real, tales como información agregada proveniente de redes de telefonía móvil u otras fuentes de desplazamiento poblacional. Este tipo de datos permitiría superar la representación estática de la población utilizada en el presente estudio, incorporando variaciones temporales relevantes asociadas a población flotante, turismo y dinámicas estacionales, particularmente significativas en localidades como Pucón, Lican Ray y Coñaripe. Desde el punto de vista metodológico, la incorporación de datos de movilidad no se plantea como un reemplazo de la base censal, sino como un complemento orientado a estimar la población presente efectiva, capturar variaciones horarias, diarias y estacionales, y calibrar los tiempos de evacuación simulados frente a patrones observados de desplazamiento.

Un segundo eje de extensión relevante se relaciona con la incorporación de restricciones operativas dinámicas, actualmente no consideradas en el modelo. En su estado actual, la simulación no contempla limitaciones de capacidad de la red vial ni de los Puntos de Encuentro Transitorios, lo que implica que los flujos de evacuación no experimentan efectos de congestión ni saturación. La incorporación de estos elementos permitiría simular escenarios más exigentes, evaluar la suficiencia de la infraestructura existente, identificar cuellos de botella y analizar estrategias alternativas de redistribución de flujos y puntos de encuentro, aportando información de alto valor para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

De manera complementaria, una línea de desarrollo particularmente relevante para el área de estudio consiste en la simulación de escenarios estacionales, considerando la variación temporal de la población expuesta a lo largo del año. En territorios con una alta componente turística, la magnitud y distribución espacial de la población puede variar sustancialmente entre períodos, lo que impacta directamente en los tiempos y patrones de evacuación. En este contexto, resulta pertinente avanzar desde una simulación basada en población promedio hacia la evaluación diferenciada de escenarios asociados a períodos de alta concentración poblacional, como la temporada estival (diciembre a febrero), escenarios de demanda intermedia como las vacaciones de invierno (julio), y períodos de baja demanda representativos de condiciones cercanas a la población residente, como los meses de otoño.

La simulación de estos escenarios permitiría analizar la sensibilidad del sistema de evacuación frente a cambios en la magnitud y distribución de la población, identificar ventanas temporales de mayor vulnerabilidad y evaluar cómo se modifican los tiempos de evacuación y los patrones de uso de la red vial bajo distintas condiciones de demanda. Desde el punto de vista metodológico, esta extensión puede implementarse ajustando la grilla poblacional mediante factores estacionales derivados de datos de movilidad real, sin alterar la estructura general del modelo de simulación, lo que asegura la escalabilidad, reproducibilidad y transferibilidad del enfoque propuesto.

En conjunto, estos próximos pasos permiten proyectar el modelo desarrollado hacia una herramienta más robusta y flexible, capaz de apoyar de manera efectiva la planificación y gestión del riesgo volcánico en contextos territoriales dinámicos, manteniendo al mismo tiempo un control explícito sobre los supuestos y el nivel de complejidad incorporado en cada etapa.

## **Bibliografía**

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI). (s.f.). Geoportal de Puntos de Encuentro Transitorios (PET) y vías de evacuación.

<https://geoportalonemi.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=5062b40cc3e347c8b11fd8b20a639a88>

Instituto Nacional de Estadísticas (INE). (2017). Censo de Población y Vivienda 2017.

<https://www.ine.gob.cl/herramientas/portal-de-mapas/geodatos-abiertos>

Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED). (s.f.). Chile Preparado – Visor de amenazas y riesgos.

<https://www.visorchilepreparado.cl/>

OpenStreetMap Contributors. (2024). OpenStreetMap.

<https://www.openstreetmap.org>

QGIS Development Team. (2024). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation.

<https://qgis.org>

Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q. N., Marilleau, N., Caillou, P., Philippon, D., & Drogoul, A. (2019). Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica*, 23, 299–322.  
<https://doi.org/10.1007/s10707-018-00339-6>

GSDRC. (2011). *Call Detail Records: The use of mobile phone data to track and predict population displacement in disasters*. Governance and Social Development Resource Centre.

Di Gangi, M., Velonà, P., & Vitetta, A. (2011). *Dynamic evacuation planning for volcanic risk mitigation*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(8), 727–740.