

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**MODELAMIENTO DE LA DEMANDA DE UNA RED DE
TRANSPORTE DE LIMA DESPUÉS DE LA OCURRENCIA DE
UN EVENTO SÍSMICO**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

DARYL MITCHEL CANDIA NINA

ASESOR

MSc. LEONARDO FLORES GONZÁLEZ

LIMA - PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir de la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Candia Nina, Daryl Mitchel

dcandian@uni.pe

976638749

Dedicatoria:

*A mi padre por su apoyo incondicional,
a mi hermano por su apoyo intelectual,
a mis tías Margarita y Julia por su ayuda
en los momentos más difíciles.*

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación ha sido uno de los proyectos más largos y retadores que he tenido que afrontar a lo largo de mi vida. Completarlo y presentarlo es una alegría que he ansiado por años, sin embargo, debo reconocer y agradecer el apoyo de diferentes personas e instituciones que, sin ellos, esta tesis difícilmente se hubiera logrado completar. Las próximas líneas las dedico a todas las personas que de alguna u otra manera han permitido que esta investigación se haya culminado con éxito.

- A la Universidad Nacional de Ingeniería por brindarme los conocimientos esenciales para desarrollarme en el mundo del transporte.
- A mi asesor MsC. Ing. Leonardo Flores por darme la oportunidad de adentrarme a este mundo. Toda esta investigación tuvo su génesis en sus clases de Modelamiento Numérico y desde ese momento se ha sido desarrollando hasta llegar a este punto.
- A mi padre y a mis tías por haberme apoyado con mucho amor y de manera incondicional en gran parte de la tesis.
- A mi hermano por su apoyo desinteresado en gran parte de la codificación y por compartir sus conocimientos en Python conmigo.
- Al CISMID y a todos sus colaboradores por realizar un arduo trabajo en la elaboración del Mapa de Riesgo Sísmico de Lima al 2020, el cual fue una información extremadamente importante y vital para la tesis.
- Al Ing. Walter Montenegro y al Bach. Pablo Cárdenas por el desarrollo de los modelos iniciales que sentaron las bases para los modelos creados en esta investigación.

ÍNDICE

Resumen	5
Abstract	6
Prólogo	7
Lista de tablas	8
Lista de figuras	9
Capítulo I: Introducción	12
1.1 Generalidades.....	12
1.1.1 Antecedentes de la investigación.....	12
1.2 Realidad problemática.....	16
1.2.1 Problema principal.....	17
1.2.2 Problemas secundarios	17
1.3 Justificación	18
1.4 Objetivos de estudio.....	18
1.4.1 Objetivo general.....	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.5 Formulación de hipótesis de investigación	18
1.5.1 Hipótesis principal	18
1.5.2 Hipótesis secundarias	18
1.6 Metodología	19
Capítulo II: Marco teórico y conceptual	20
2.1 Primeras 3 etapas del modelo de 4 etapas	20
2.1.1 Generación de viajes	20
2.1.2 Distribución de viajes	20
2.1.3 Distribución de modal.....	23
2.2 Etapa de asignación del modelo de 4 etapas	24
2.2.1 Modelos de elección de ruta y equilibrio.....	25
2.2.2 Asignación estática y dinámica	25

2.3	Asignación dinámica	26
2.3.1	Modelo de red	26
2.3.2	Condiciones de Equilibrio de Usuario Dinámico.....	29
2.4	Modelos de simulación de tráfico	30
2.4.1	Modelos Macroscópicos	30
2.4.2	Modelos Microscópicos	31
2.5	Modelado postsismo	32
2.5.1	Situación postsismo.....	32
2.5.2	Mapa de riesgo sísmico.....	32
2.5.3	Producción y atracción de viajes postsismo	34
2.5.4	Modelo de cierre de vías debido al colapso de edificios.....	36
2.6	Polígonos de Thiessen (diagramas de Voronoi).....	38
2.7	Algoritmos de agrupamiento.....	39
2.7.1	Algoritmo K-Means	40
2.8	Medida de eficiencia de la red.....	43
2.8.1	Importancia de un componente de la red	43
2.9	Capacidad de reserva	44
2.10	Programas de simulación.....	44
2.10.1	Simulation Urban Mobility (SUMO).....	44
Capítulo III: Diseño y estrategia de la investigación		46
3.1	Generalidades.....	46
3.2	Alcance y nivel de investigación.....	47
3.2.1	Alcance de investigación.....	47
3.2.2	Nivel de investigación	48
3.3	Enfoque y diseño de la investigación	48
3.3.1	Enfoque de la investigación	48
3.3.2	Diseño de la investigación.....	48
3.4	Población y muestra de la investigación.....	49

3.4.1	Población	49
3.4.2	Muestra.....	49
3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	49
3.5.1	Técnica de investigación	50
3.5.2	Instrumentos de recolección de datos.....	50
Capítulo IV: Construcción del modelo.....		51
4.1	Área de estudio	51
4.2	Representación del mapa de riesgo en un entorno sig.....	52
4.3	Datos del mapa de estudio.....	54
4.4	Centros de refugio y parques	55
4.5	Desarrollo del área de influencia de centros de refugio con voronoi.....	62
4.6	Distribución de damnificados.....	65
4.7	Modelo de bloqueo de calles por derrumbe de edificios	67
4.8	Agrupamiento de vías bloqueadas	70
4.9	Etapas de generación de viajes	73
4.10	Etapas de distribución y elección del modo.....	75
4.11	Etapas de asignación de viajes.....	76
4.11.1	Asignación iterativa	76
Capítulo V: Medida de desempeño de la red		79
5.1	Resultados de simulaciones.....	79
5.1.1	Información basada en vehículos	79
5.1.2	Información basada en la simulación de la red	81
5.2	Gráficos de resultados	83
5.2.1	Número de vehículos simulados versus el tiempo	83
5.2.2	Tiempos de viaje promedio.....	85
5.2.3	Número de vehículos que han terminado su viaje	86
5.3	Índices de desempeño de la red	87
5.3.1	Índice de Nagurney	88

5.4	Capacidad de reserva	89
	Conclusiones.....	91
	Recomendaciones.....	93
	Referencias bibliográficas	94
	Anexos	101

Resumen

El objetivo de esta investigación es realizar un modelo de simulación posterior a un sismo de gran magnitud de una red vial de Lima. La primera parte de la investigación consiste en la construcción del modelo postsísmico, para ello se define el área de estudio y se utiliza un mapa de riesgo sísmico, el cual se representa en un entorno Sistema de Información Geográfica (SIG).

Posteriormente se establece un modelo de bloque de calles según la literatura encontrada, para poder así conseguir la extensión de los escombros de los edificios destruidos debido al sismo.

A partir de la información anterior se realizan los modelos en un software de simulación, sin embargo, para evitar un requerimiento computacional excesivo, se divide el escenario desfavorable en clústeres utilizando diagramas de Voronoi y Machine Learning y se disminuyen el número de iteraciones de simulación requeridas para llegar al estado de equilibrio dinámico estocástico a través de un método visual y numérico.

Cada escenario desarrollado es simulado considerando un cambio en sus orígenes a nuevos centros de refugio que fueron seleccionados con criterios de diferentes autores. En los capítulos finales de la tesis se obtienen los resultados de las simulaciones y se calcula la eficiencia de la red en cada escenario a través del índice de Nagurney y la capacidad de reserva. Además, se obtienen datos relevantes a las simulaciones como números de vehículos simulados, tiempos de viaje promedio y número de vehículos que terminan su viaje.

Finalmente se llega a la conclusión que, ante un evento sísmico en la red vial de Lima analizada, la red padece un mayor impacto en su eficiencia si las vías de la Costa Verde se mantienen dañadas, mientras que, los efectos de otras vías afectadas dentro del área de estudio no son tan relevantes debido a su bajo impacto a la eficiencia de la red.

Abstract

The objective of this research is to create a post-earthquake simulation model of a road network in Lima following a major seismic event. The first part of the research involves constructing the post-seismic model. To achieve this, the study area is defined, and a seismic risk map is used, which is represented within a Geographic Information System (GIS) environment.

Subsequently, a block model of streets is established based on the literature found, in order to determine the extent of debris from buildings destroyed due to the earthquake.

Using the aforementioned information, simulation models are created in a simulation software. However, to avoid excessive computational requirements, the unfavorable scenario is divided into clusters using Voronoi diagrams and Machine Learning. Additionally, the number of simulation iterations required to reach a state of stochastic dynamic equilibrium is reduced using both visual and numerical methods.

Each developed scenario is simulated considering a change in their origins to new refuge centers that were selected based on criteria from different authors. In the final chapters of the thesis, simulation results are obtained, and the network's efficiency is calculated for each scenario using the Nagurney index and reserve capacity of the network. Moreover, relevant simulation data such as numbers of simulated vehicles, average travel times, and the number of arrived vehicles are obtained.

In conclusion, it is found that in the event of a seismic event in the analyzed road network of Lima, the network's efficiency is most impacted if the roads of the Costa Verde remain damaged. On the other hand, the effects of other affected roads within the study area are not as relevant due to their lower impact on the network's efficiency.

Prólogo

La presente investigación presenta la replicabilidad del protocolo doctoral que realizo en el tema de eventos disruptivos ordinarios y extraordinarios, emplea además resultados de la investigación “Estudio de la influencia de la conectividad en los principales atributos de resiliencia física de un sistema vial durante eventos disruptivos ordinarios” realizado en IIFIC por mi persona con estudiantes de la FIC, donde se mide el desempeño de una red vial urbana para mejora de sus atributos de desempeño. El autor estudia la demanda de una red de transporte de Lima en un estado postsismo con la finalidad de conocer los efectos del sismo en la movilidad sobre la red. La misma que es medida con el índice de Nagurney, el que es aceptado en diversas investigaciones para los fines mencionados.

En el trabajo se ha realizado la revisión de la literatura para conocer los efectos generados por sismos en las redes de transportes de otros países, a partir de tales estudios se plantea las bases del comportamiento de la demanda postsismo y sus efectos producidos por las estructuras civiles que interrumpen el tráfico de una red vial.

En los primeros capítulos se construye la red en un entorno de Sistema de Información Geográfica con ayuda de un mapa de riesgo sísmico realizado por CISMID, al modelo que se propone se le adicionan los efectos del sismo relativos a la movilidad de la población. Para optimizar el tiempo de la simulación que requiere el modelo, se ha utilizado diagramas de Voronoi y algoritmos de Machine Learning para agrupar sectores con similar nivel de daño, luego se realizan numerosas simulaciones con escenarios que llegan al Equilibrio Dinámico Estocástico para conocer el estado de la red a través del número de vehículos que aun no completan su viaje en la red en estudio.

La investigación realizada por Daryl Candia iniciada con otros temas con jóvenes de la FIC a partir de 2018, ofrece la metodología que se ha desarrollado en forma aplicada la misma que es replicable a nuevos sistemas y a nuevas investigaciones para futuros tesis. En la presente tesis se ofrece información útil de los efectos de un sismo de gran magnitud a una red de transporte de Lima, información útil en el caso de ser utilizada por alguna entidad pública afín.

Lista de tablas

Tabla N° 1 Representación de una matriz Origen-Destino.....	21
Tabla N° 2 Tipos de zonas según la presencia de edificios dañados, hospitales o centros de refugio.....	36
Tabla N° 3 Métodos de agrupamiento de scikit-learn.....	39
Tabla N° 4 Tipos de investigación científica y sus intereses.	47
Tabla N° 5 Proyección de la población del área de estudio al 2020.....	55
Tabla N° 6 Categorías y criterios para la selección de Centros de Refugios.....	56
Tabla N° 7 Capacidad de los centros de refugios de alta capacidad presentes en el área de estudio	59
Tabla N° 8 Cantidad de damnificados recibidos y la capacidad ocupada de cada centro de refugio de alta capacidad	66
Tabla N° 9 Determinación de carriles bloqueados por colapso de una edificación..	69
Tabla N° 10 Representación parcial de los viajes generados y atraídos	73
Tabla N° 11 Esquema de una matriz con generación y atracción de viajes	74
Tabla N° 12 Esquema de una matriz de generación y atracción de viajes afectada por un sismo	75
Tabla N° 13 Valor de UCP por topología vehicular.	75
Tabla N° 14 Parámetros de salida de vehroute-output del SUMO.	79
Tabla N° 15 Ejemplo de datos de salida de vehroute-output.....	80
Tabla N° 16 Cálculo de los parámetros del índice de Nagurney	81
Tabla N° 17 Parámetros de salida del summary-output del SUMO.....	81
Tabla N° 18 Ejemplo de datos de salida de summary-output de SUMO.	82
Tabla N° 19 Resultados del índice de Nagurney de los escenarios patrones.....	88
Tabla N° 20 Resultados del índice de Nagurney por clúster	88

Lista de figuras

Figura N° 1: Mapa de riesgo sísmica de Lima.....	34
Figura N° 2: Clasificación de TAZ según sus características de atracción o repelencia.	35
Figura N° 3: Ejemplo de clasificación de TAZ según la presencia de hospitales y centros de refugio.....	35
Figura N° 4: Esquema de colapso.	37
Figura N° 5: Esquema del modelo de Argyroudis (2010) del colapso de una edificación según su geometría.....	38
Figura N° 6: Representación esquemática de la producción de polígonos de Thiessen	39
Figura N° 7: Representación de agrupamiento de datos con K-Means y gráfico de áreas con Voronoi (centroides marcados con un aspa blanco)	41
Figura N° 8: Gráfica de inercia vs número de agrupamientos	42
Figura N° 9: Resultado del agrupamiento de K-Means de la Figura N° 8.....	42
Figura N° 10: Extracto de simulación en SUMO	45
Figura N° 11: Área de estudio.....	51
Figura N° 12: Niveles de daños causados por manzana debido a un sismo de gran magnitud	52
Figura N° 13: Representación de las vías utilizadas en el estudio	53
Figura N° 14: Mapa de Zonas de Análisis de Tráfico (TAZ)	54
Figura N° 15: Delimitación de parques en el área de estudio (verde) dentro de los TAZ (rojo).	60
Figura N° 16: Distribución geográfica de los centros de refugios de alta capacidad en el área de estudio	61
Figura N° 17: Clasificación de TAZ por presencia de atractores y repelentes de viajes.	62
Figura N° 18: Esquema de atracción de los centros de refugios	63

Figura N° 19: Áreas de influencia de cada centro de refugio de alta capacidad en el área de estudio	64
Figura N° 20: Esquema de distribución de damnificados por medio de los polígonos de Thiessen	65
Figura N° 21: Ejemplo del área de influencia del centro de refugio de alta capacidad llamado 'Municipalidad de la Victoria'	67
Figura N° 22: Edificación analizada de La Victoria.....	68
Figura N° 23: Vías bloqueadas debido al colapso de edificios	70
Figura N° 24: Gráfica de valores de inercia vs valores de número de agrupamientos (k)	71
Figura N° 25: Gráfica de agrupamiento de vías bloqueadas para un k=8	72
Figura N° 26: Agrupamiento de vías por cluster utilizando el algoritmo K-Means.	73
Figura N° 27: Velocidad promedio del escenario base por iteración.	77
Figura N° 28: Tiempo de viaje promedio del escenario base por iteración.....	77
Figura N° 29: Tiempo de viaje perdido promedio del escenario base por iteración	78
Figura N° 30: Gráfica de número de vehículos vs tiempo para todos los clústeres, el escenario original y el escenario más desfavorable	83
Figura N° 31: Gráfica de casos más relevantes en el estudio: caso de la Costa Verde (clúster 8), escenario original y el escenario más desfavorable.....	84
Figura N° 32: Tiempos de viaje promedio vs tiempo de todos los escenarios	85
Figura N° 33: Tiempos de viajes promedio vs tiempo de los escenarios más desfavorables.....	85
Figura N° 34: Número de vehículos que culminan sus viajes vs tiempo de todos los escenarios..	86

Figura N° 35: Número de vehículos que culminan sus viajes vs tiempo de los escenarios más relevantes.	87
Figura N° 36: Comparación de los vehículos en simulación del escenario de la Costa Verde y el escenario normal en un periodo de tiempo estable.....	89

Capítulo I: Introducción

1.1 Generalidades

1.1.1 Antecedentes de la investigación

Los primeros modelos para evaluar el desempeño de un sistema de red de transporte después de un evento sísmico llevan años desarrollándose, uno de los más relevantes en el ámbito fue el propuesto por Nojima y Sugito (1927), quienes propusieron un modelo para simular y evaluar el desempeño funcional de un sistema de red de transporte de carreteras en Hanshin-Awaji, Japón. El modelo utiliza una combinación entre el método de simulación Monte Carlo y el método de asignación incremental modificada; el primero generado los estados de la red que se encuentran dañados de manera aleatoria, y el segundo simula el comportamiento del tráfico en cada estado de daño según el primero. Evaluaron diferentes medidas de rendimiento, entre los que más destacan son las medidas de rendimiento de los enlaces y la red total, con el fin de evaluar el funcionamiento de la red. Los resultados muestran que los flujos en los enlaces disminuyen cuando la tasa de daños es alta, de la misma manera, el rendimiento total de la red se deteriora a la vez que la conexión de la red disminuye cuando esta sufre daños graves.

Con el pasar de los años, las investigaciones ampliaron su alcance hasta periodos más allá del instante del posterior al sismo, tal como lo hicieron Goretti y Sarli (2006), quienes propusieron un modelo para analizar el comportamiento sísmico de una red de carreteras en áreas urbanas, considerando la interacción entre construcciones y carreteras. Consideraron dos fases: la primera, a corto plazo inmediatamente después del evento sísmico; el segundo, a largo plazo, cuando la capacidad de la red todavía no esta completamente restaurada y la demanda de la red debe tener en cuenta a las personas desplazadas debido a los edificios inhabitables, en este caso el nivel de servicio de la vía fue tomado de interés. Utilizaron la misma metodología de Nojima y Sugito (1927) para considerar la incertidumbre del comportamiento de las edificaciones. La metodología fue aplicada a la ciudad de Potenza, Italia, donde consideraron un modelo para evaluar la matriz origen-destino en escenarios postsísmicos a través de planes de emergencias urbanos. Sus resultados indicaron que la interacción entre la red de carretera, edificaciones y servicios de emergencia es significativa solo para intensidades de sismo más altos; también indicaron que hay una necesidad, con

motivo de reducir la probabilidad de bloqueo de calles, permitir los flujos de vehículos de emergencia en ambas direcciones, incluso en vías de un solo sentido, requiriendo señales de tránsito postsismo especiales; finalmente mostraron que la redundancia de la red y el funcionamiento continuo de las carreteras conducen a una pequeña variación del nivel de servicio promedio en toda la red de carreteras. Por otro lado, la metodología que propusieron permite reconocer los enlaces más vulnerables o saturados de la red, proporcionando información útil en una planificación óptima de la zona urbana después de un evento sísmico.

Posteriormente a estas investigaciones Chang et al. (2012) estudiaron y propusieron un marco para evaluar la demanda de la red de Sioux Falls, Estados Unidos, posterior a un sismo a través de un modelo que consideró ciertos pares de escenarios: día y noche, antes y después del sismo, y considerando modelos convencionales de 4 etapas basado en el modelo Equilibrio de Usuario Determinístico (DUE) y Asignación de Tráfico Dinámica (DTA). La metodología de los investigadores consistió en considerar ciertas suposiciones para simplificar el comportamiento de los viajes postsismo y medidas de gestión del tráfico de emergencia, siendo las suposiciones más relevantes:

- Las personas evacúan inmediatamente después de un terremoto, sin considerar factores sociales de vulnerabilidad como raza, género y desigualdad social, debido a que no se consideran dentro del alcance de la investigación.
- La generación de viajes es considerada directamente proporcional al tamaño de la Zona de Análisis de Tráfico (TAZ) afectada, habiendo clasificado los TAZ en grupos homogéneos basados en su localización geográfica y características socioeconómicas.
- Dependiendo de la presencia de atractores (p.e., hospitales, centros de refugios) y repelentes (p.e., liberación de materiales peligrosos [HAZMAT], incendios seguidos después del sismo o daños en instalaciones) clasificaron los TAZ en cuatro diferentes grupos:
 1. Zonas sin instalaciones dañadas, sin presencia de centros de refugio ni hospitales: no generan variación en su producción de viajes.

2. Zonas sin instalaciones dañadas, con presencia de centros de refugio u hospitales: generan una atracción de viajes.
 3. Zonas con instalaciones dañadas sin presencia de centros de refugio ni hospitales: generan una producción de viajes.
 4. Zonas con instalaciones dañadas con presencia de centros de refugio y hospitales: generan tanto producción como atracción de viajes.
- Los puentes son considerados como componentes vulnerables de la red a peligros sísmicos. En este estudio sólo se consideraron la vulnerabilidad de los puentes y no de otros componentes como las calzadas.

También consideraron utilizar el modelo clásico de 4 etapas modificando las etapas de distribución y asignación en una sola etapa integral. Sus resultados numéricos sugieren que (i) un sismo que se produzca durante las horas punta afectaría gravemente a los sistemas de transporte y provocaría grandes congestiones y atascos; y (ii) al tener en cuenta los efectos de las instalaciones de emergencia y los cambios del comportamiento de los viajeros en sus desplazamientos y la elección de sus rutas después de un sismo, la metodología que propusieron puede captar los patrones de viajes anormales y proporcionar resultados más razonables tras el terremoto a comparación de los modelos convencionales de simulación de tráfico. Por lo tanto, sus resultados permiten ayudar a los planificadores de tráfico a evaluar sus planes de contingencia y tomar mejores decisiones en el ámbito de formación, preparación y planificación de respuesta ante un sismo.

En paralelo, las investigaciones de la interacción de redes de transporte y entornos de edificaciones se fueron profundizando, así lo demuestran Argyroudis et al. (2015), donde presentan un enfoque integrado para el análisis probabilístico del riesgo sistémico de una red de carreteras en Tesalónica, Grecia, considerando la peligrosidad sísmica espacial con la correlación de la intensidad del sismo, la vulnerabilidad de los componentes de la red y el efecto de las interacciones entre los diferentes elementos de la red. Su estudio se enfocó en evaluar el rendimiento del sistema a través de un indicador global de rendimiento de la conectividad, que depende tanto de los daños físicos de sus componentes como de las pérdidas de funcionalidad generadas debido a las interacciones con otros sistemas. Ellos utilizan un paradigma de modelado orientado a objetos, con el objetivo de reducir

el problema de varios sistemas que interactúan a una descomposición de objetos que interactúan, para así considerar la intra e interdependencias entre y dentro los sistemas. La característica más novedosa de esta investigación es que utilizan la estimación de la extensión de los escombros de una edificación, afectada severamente por un sismo, propuesta por Argyroudis (2010) quien propone una correlación de la extensión con la geometría de la edificación. Sus resultados muestran que su enfoque indica una relación del desempeño de la red, a nivel urbano, es altamente controlado por las interdependencias entre sistemas. También encontraron que, en un contexto urbano, el colapso de edificaciones parece ser el mecanismo más importante de pérdida de desempeño para la red de transporte. El marco que presentaron les permitió identificar los componentes más críticos para el desempeño de la red y cuantificar su desempeño bajo condiciones de un sismo.

En el ámbito nacional se han realizado estudios por instituciones importantes para conocer las consecuencias de un sismo de gran magnitud (8.8 magnitud momento), debido a que Perú se encuentra ubicada en la zona que concentra la mayor actividad sísmica en el mundo llamada el cinturón de Fuego del Pacífico. El Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI] (2017) desarrolló, en su informe llamado “Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8Mw”, el estudio de los impactos de un escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao ante un sismo de 8.8Mw (magnitud momento) con una intensidad máxima de VIII en la escala de Mercalli, indicando una posible destrucción de viviendas vulnerables al sismo de 353,496 desarrollado en gran parte de la zona costera de Lima y Callao debido a una representación de peligro Muy Alto y Alto, así como las zonas periféricas de los distritos de Carabaylo, Comas, Puente Piedra, Independencia, San Juan de Lurigancho, Ate Vitarte y La Molina; mientras que los distritos que se ubican en la zona centro de la provincia de Lima presentan un nivel de Peligro Medio y por último las zonas de Lurigancho y Chaclacayo presentan un Peligro Bajo. El informe de INDECI demuestra la importancia de conocer la vulnerabilidad sísmica en las viviendas y edificaciones ante un sismo. Esta información permite conocer la vulnerabilidad en los sistemas de transporte de Lima y muestra la preocupación por los efectos de un sismo de gran magnitud. Los estudios más recientes sobre modelamiento de la demanda ante un evento sísmico se han profundizado y han optado por usar índices de desempeño más completos tal como lo hicieron Singh et al. (2020) quienes midieron la accesibilidad

de redes vecinales considerando el colapso de edificios debido a un sismo en distritos del Municipio de Siliguri. Estudiaron la accesibilidad basada en determinantes intrínsecos y extrínsecos de vulnerabilidad. La metodología dividió la red de carreteras en dos componentes: (i) el primero es la inaccesibilidad de la red debido a la anchura de sus vías (vulnerabilidad intrínseca) y (ii) el segundo es la accesibilidad de la red propense a cierres de carreteras debido al colapso de edificaciones (vulnerabilidad extrínseca). Posteriormente en la metodología, desarrollaron un marco de tres pasos para evaluar la vulnerabilidad, estos pasos son el desarrollo del inventario de la red de carreteras, la evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones, y el análisis de cierre de carreteras. Los resultados mostraron que los índices de redundancia y conectividad que usaron se redujeron comparado a la base del escenario presísmico, a pesar de esto, los cambios aparentaron ser pequeños. Sin embargo, cuando los resultados se interpretaron en niveles absolutos de inaccesibilidad, encontraron que estos son significativamente grandes.

1.2 Realidad problemática

El presente estudio se enfoca en eventos disruptivos generados por movimientos sísmicos en una red vial para ello se considera como fuente de información secundaria el Mapa de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Lima al Año 2020 elaborado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres [CISMID] (2020), y su principal problema es el modelado de la demanda de la red vial posterior al sismo. En condiciones de un sismo de magnitud igual o mayor a 7.0Mw se generan flujos de tráfico significativamente diferentes a lo largo de toda la red, debido al rápido aumento de la demanda y al deterioro de las capacidades de la red (Shen et al., 2008). Por lo tanto, es fundamental evitar colas, retrasos excesivos y asegurar la entrada y salida de vehículos de emergencia. Las medidas de mitigación se han desarrollado más en el ámbito de diseños sismorresistentes en la infraestructura de transporte (p.e., los puentes). Sin embargo, en situaciones de emergencia, el funcionamiento de las redes de transporte es importante. El flujo de tráfico en condiciones de emergencia es significativamente distinto al tráfico en condiciones normales debido a los cambios drásticos en la demanda posterior al evento y también a las capacidades deterioradas de la red. Los modelos convencionales de demanda de viajes, como los modelos de demanda fija, son inadecuados y limitados en

situaciones como estas debido a supuestos poco realistas (Kiremidjian et al., 2007).

El primer problema en la modelización del transporte en escenarios posteriores a un sismo es la estimación de la demanda; lo que constituye uno de los obstáculos más difíciles de superar, antes de realizar el modelamiento del tráfico para las aplicaciones de planificación, en general el problema consiste en estimar y predecir con precisión la demanda origen-destino (OD) (Chang et al., 2012). El tráfico en escenarios de emergencia depende de la capacidad operativa de las infraestructuras de transporte y del comportamiento del público que evacua (Moriarty et al., 2007). Existen varios factores que influyen en la respuesta de la población, como la hora del día, la ubicación y las características estructurales de los hogares, el sexo, la edad, el factor de amenaza específico del evento extraordinario, la percepción del riesgo, el tipo de información y su fuente, el soporte de ayuda para el transporte de evacuación, los actos de las autoridades locales, la presencia de infantes o discapacitados en el hogar, etc. (Lindell et al., 2012). La manera en que se consideran y abordan los factores tiene un efecto directo en el patrón de demanda de viajes (Chang et al., 2012).

En la presente investigación se plantea el siguiente problema: ¿cómo definir un escenario probable de una red vial y cómo optimizar su eficiencia después de un evento sísmico?

1.2.1 Problema principal

¿Cómo definir un escenario postsismo probable de una red vial y cómo optimizar su eficiencia después de un evento sísmico?

1.2.2 Problemas secundarios

- ¿Bajo qué criterios se establecen zonas atractores y repelentes en un subsistema en estudio de Lima?
- ¿Cómo determinar la demanda de los viajes de transporte de las TAZ en la red en estudio?
- ¿Cómo proponer un escenario probable basado en el Mapa de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Lima al 2020?
- ¿Cómo calcular el costo del escenario probable de la red?
- ¿Cómo calcular la capacidad de reserva la red?

1.3 Justificación

La presente investigación beneficia a la sociedad en su conjunto, ya que la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud en Lima es probable, y la sociedad en conjunto debe estar preparada para tales momentos, por lo que una investigación como la presente aporta futuras medidas de planificación para situaciones como las descritas anteriormente.

1.4 Objetivos de estudio

1.4.1 Objetivo general

El objetivo de este estudio es realizar un modelo de simulación de una red vial de Lima, considerando un escenario desfavorable producido por un evento sísmico de gran magnitud, para determinar la demanda de viajes.

1.4.2 Objetivos específicos

- Proponer zonas atractores y repelentes de un subsistema en estudio de Lima.
- Determinar la demanda de las TAZ de la red en estudio
- Proponer un escenario probable basado en el Mapa de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Lima al 2020.
- Calcular el costo del escenario probable (demora total de los tiempos de viaje en toda la red).
- Calcular la capacidad de reserva de la red.

1.5 Formulación de hipótesis de investigación

1.5.1 Hipótesis principal

La disminución de la capacidad de los arcos empleados por caminos importantes que atraviesan una zona de alto riesgo en el mapa de riesgo sísmico es inversamente proporcional al tiempo de viaje en la red vial.

1.5.2 Hipótesis secundarias

- Las zonas de atracción y repelencia influyen en el comportamiento de los viajeros después de un evento sísmico.
- El Mapa de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Lima al 2020 proporciona un escenario probable postsismo.

1.6 Metodología

La metodología aplicada para el desarrollo de la presente investigación es la siguiente:

- Recopilación de información afín al tema de modelamiento de la demanda en redes de transporte urbano después de la ocurrencia de un sismo, modelos de extensión de escombros, mapas de riesgo sísmico, resiliencia en redes de transporte. Con el fin de obtener la información se ha realizado una revisión de artículos científicos, reportes de investigación, libros y tesis.
- Recopilación y procesamiento de datos de información geográfica para el desarrollo de un mapa postsismo. Por este motivo se hizo una búsqueda de datos poblacionales, socioeconómicos, parques, refugios potenciales, dimensiones geométricas de la infraestructura vial y edificaciones, y encuestas.
- Desarrollo del modelo de 4 etapas adaptado a un entorno postsismo. Se realizaron distintas suposiciones para simplificar la complejidad del comportamiento de los viajeros basado en la revisión de literatura y propuestas propias.
- Obtención y análisis de los datos del modelo de asignación postsismo. Para lograr este objetivo se procesa los datos a través del lenguaje de programación Python. Este modelo utiliza un enfoque determinístico/estocástico.
- Propuesta de mejoramiento de desempeño de la red considerando los resultados de los datos de simulación a nivel de enlaces y la red en general.

Capítulo II: Marco teórico y conceptual

2.1 Primeras 3 etapas del modelo de 4 etapas

2.1.1 Generación de viajes

El propósito principal de los modelos de generación de viajes es estimar el número de viajes generados y atraídos por cada zona del área de estudio anteriormente definida. Estas predicciones, mayormente, se basan en datos sobre las características socioeconómicas de los hogares, por ejemplo: propósitos de viaje, ingresos familiares, propiedad de vehículo, actividad del uso del suelo en las zonas de origen y destino, distancias y modos de viaje, y tiempo del día (Ortúzar & Willumsen, 2011; Patrikkson, 2015).

A partir de las características de los hogares y usuarios, los viajes se pueden clasificar en (Ortúzar & Willumsen, 2011):

- Por propósito de viaje: los propósitos pueden clasificarse en viajes obligados y opcionales, en donde en el primero se encuentran los viajes al trabajo y estudio; mientras que, en el segundo, viajes de compras, sociales, recreacionales y por otros motivos.
- Según la hora del día: el periodo de tiempo en cual un usuario viaja puede clasificarse en dos grupos muy bien marcados en las redes de transporte, los periodos de hora punta y los de fuera de hora punta, ya que la cantidad de viajes entre dichos periodos varían significativamente.
- Por tipo de persona: cuando se ve las características socioeconómicas más influyentes en los usuarios, se encuentran distintas categorías como: nivel de renta, posesión de coche, tamaño y estructura de hogar.

2.1.2 Distribución de viajes

El propósito del modelo de distribución de viajes es estimar el número de viajes realizados entre los distintos orígenes y destinos de una red dada, basados en los números de viajes obtenidos en el modelo de generación de viajes. Esto quiere decir que en una matriz de Origen-Destino, el modelo nos permitirá obtener el número de viajes en cada celda, llamado " T_{ij} " que representa un viaje desde un origen " i ", O_i , a un destino " j ", D_j , tal como se muestra en la

Tabla N° 1.

Tabla N° 1
Representación de una matriz Origen-Destino. Elaboración propia.

Orígenes	Destinos				$\sum_j T_{ij}$
	1	2	3	... j	
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{1j}	O_1
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{2j}	O_2
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}	T_{3j}	O_3
... i	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	T_{ij}	O_i
$\sum_i T_{ij}$	D_1	D_2	D_3	D_j	Total

Donde:

- Las celdas de cada una de las filas “i” contienen los viajes con origen en “i” y destino en las zonas de la columna correspondiente.
- La diagonal principal corresponde a los viajes intrazonales.
- T_{ij} el número total de viajes entre una zona i a una j.
- O_i representa el total de viajes con origen en la zona i.
- D_j representa el total de viajes con destino en la zona j.

Por otro lado, los costos de los viajes entre cada ruta origen-destino debe ser calculada, esta puede expresarse en unidades de distancia, tiempo o monetaria. Para evitar un conflicto con las unidades, es común plantear un coste generalizado de viaje que se representa como una medida combinatoria de todos los factores asociados a la desutilidad del viaje. Generalmente el costo de viaje se representa como una función lineal dependiente de múltiples variables que son ponderados por coeficientes que representan la importancia relativa de cada variable. Una representación del coste generalizado se muestra en la Ecuación N° (1).

$$C_{ij} = a_1 t_{ij}^v + a_2 t_{ij}^w + a_3 t_{ij}^t + a_4 t_{nij} + a_5 F_{ij} + a_6 \phi_j + \delta \quad (1)$$

donde:

- t_{ij}^v es el tiempo de viaje a bordo del vehículo para ir de i a j;
- t_{ij}^w es el tiempo andando hacia y desde la parada;
- t_{ij}^t es el tiempo de espera en la parada;

- t_{nij} es el tiempo de transbordo, si existe;
- F_{ij} es la tarifa para ir de i a j;
- ϕ_j es un coste “terminal”, asociado al viaje de i a j;
- δ es una penalidad modal, es decir un parámetro que representa los restantes atributos no incluidos en el coste generalizado de viaje;
- $a_1 \dots a_6$ son las ponderaciones asociadas a cada elemento del coste.

Considerando los costes de cada ruta, los modelos de distribución de viajes se han propuesto para distintos tipos de problemas y circunstancias, tales como los modelos basados en el factor de crecimiento, los sintéticos o gravitacionales, y aquellos que buscan la maximización de la entropía (Ortúzar & Willumsen, 2011; Patriksson, 2015).

En el presente estudio se emplea el modelo de gravedad, el cual plantea que el número de viajes realizados entre un par origen-destino es directamente proporcional a la atracción relativa de cada zona e inversamente proporcional a una función de separación espacial entre dos zonas. Existen diferentes propuestas de este modelo, en el presente estudio se utiliza el modelo usado por Chang et al. (2012) tal como se muestra en la Ecuación N°(2).

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j F(t_{ij}) \quad (2)$$

donde:

- T_{ij} es el número de viajes desde una zona i a una zona j.
- A_i es la constante para balancear los viajes originados de una zona i.
- B_j es la constante para balancear los viajes destinados a una zona j.
- O_i es el número de viajes producidos en la zona i.
- D_j es el número de viajes atraídos en la zona j.
- t_{ij} es la impedancia o resistencia desde una zona i a una zona j.
- $F(t_{ij})$ es la función de desutilidad, que suele estar inversamente relacionada con la separación de zonas en forma de funciones gamma, de potencia o exponenciales.

2.1.3 Distribución de modal

La distribución modal divide el número total de viajes en diferentes modos de viaje, a partir de medidas relativas de competitividad. Las medidas de competitividad son derivadas de un análisis de tres conjuntos básicos de factores (Patrikkson, 2015):

- Características del viaje. En este factor esta incluido la longitud del viaje y el costo, propósito del viaje, y tiempo del día del viaje. Los factores más importantes en esta categoría son la longitud y el propósito del viaje.
- Características del viajero. Los factores más relevantes en esta categoría se basan en las características socioeconómicas de los hogares que hacen los viajes, e incluye variables como ingresos, propiedad de un vehículo, tamaño de familia y estructura, densidad de desarrollo residencial, tipo de trabajo, y la localización del lugar de trabajo. Estos factores están altamente relacionados, por ejemplo, la propiedad de un vehículo depende de los ingresos; por lo tanto, no pueden ser analizados aisladamente.
- Características del sistema de transporte. Los factores más importantes en esta categoría son el tiempo de viaje y el gasto del viajero en los viajes, y las medidas de calidad del nivel de servicio de los modos que compiten. Estas medidas de competitividad son usualmente dados en tasas de medidas de competitividad de modos alternativos.

Los modelos de distribución modal se caracterizan por ser una selección aleatoria de variables independientes. En la práctica, la teoría de aleatoriedad es ampliamente usada en varias industrias, incluyendo la industria del transporte. Los usos de los modelos son diferentes en el uso y tipo de función de distribución. Dependiendo del número de variables independientes, se utiliza la función:

- Modelo Probit.
- Modelo Logit.
- Modelo Nested.

El modelo Logit es el más ampliamente usado y sencillo en el ámbito de transporte, este presenta una variación en el caso de más de dos variables dependientes, es decir, se convierte en un Modelo Logit Multinomial.

El modelo Logit Multinomial consiste en definir un conjunto C en donde se incluye todas las opciones potenciales para alguna población. Llamando a C el conjunto

de elección universal y definimos J como el número de elementos que lo componen. Cada miembro de la población tiene un subconjunto C como conjunto de elección. Por ejemplo, en un modelo de elección de modo, C puede estar constituido de tres elementos:

- Taxi
- Transporte público
- Auto privado

La expresión general para la probabilidad de escoger una alternativa o elemento i ($i = 1, 2, \dots, J$) de un conjunto de J alternativas es representado en la Ecuación N° (3):

$$P_{r(i)} = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^J e^{V_j}} \quad (3)$$

Donde:

- $P_{r(i)}$ es la probabilidad de que el viajero escoja la alternativa i .
- V_j es la componente sistemática de la utilidad de la alternativa j .

En esta etapa del modelo de 4 etapas, es común que el conjunto de elecciones de cada individuo pueda ser especificado por el analista utilizando algunas reglas deterministas.

2.2 Etapa de asignación del modelo de 4 etapas

La etapa de asignación de viajes consiste en seleccionar las rutas usadas por los viajeros para posteriormente introducir los flujos origen-destino sobre los enlaces de la red. Bajo este enfoque, un recorrido es la secuencia de enlaces que los usuarios emplean para llegar del origen a su destino (Ortúzar & Willumsen, 2007). Para realizar este cálculo, las opciones de ruta en un modelo de simulación, no solo es necesario la matriz origen-destino, sino también información sobre los costos de viaje (tiempo generalmente). Sin embargo, estos costos de viaje dependerán también de las opciones de ruta. Por lo tanto, es primordial determinar un conjunto de elecciones de rutas que sea consistente con los tiempos de viaje resultantes c

2.2.1 Modelos de elección de ruta y equilibrio

Existen dos clases diferentes fundamentalmente de los modelos de elección de ruta: la asignación de tráfico óptima del sistema y de equilibrio de usuario. La primera se basa en el Segundo Principio de Wardrop:

“Bajo condiciones de equilibrio social en redes congestionadas, el tráfico debería distribuirse de tal modo que los costes medios (o totales) de viaje son mínimos (Wardrop, 1952, p. 345)”

Mientras que la asignación de equilibrio de usuario se basa en el Primer Principio de Wardrop:

“Los tiempos de viaje en todas las rutas realmente utilizadas son iguales, menores que los que experimentaría un solo vehículo en cualquier ruta no utilizada (Wardrop, 1952, p. 345)”

Este último caso asume implícitamente que cada individuo tiene un conocimiento detallado del estado de la red. En el caso de tráfico de cercanías, en el que la demanda de tráfico es aproximadamente el mismo todos los días, esta suposición se cumple parcialmente. Además, se supone que los viajeros tienen un comportamiento perfectamente racional y uniforme. Estos últimos supuestos pueden tomarse en cuenta si se considera una distinción entre el tiempo de viaje real y el tiempo de viaje percibido por el individuo. Los tiempos de viaje percibidos por los viajeros se describen como variables aleatorias distribuidas. El equilibrio en el que ningún viajero percibe que puede mejorar su tiempo de viaje escogiendo unilateralmente otra ruta se denomina Equilibrio Estocástico del Usuario (o SUE de sus siglas en inglés) (Ortúzar y Willumsen, 2007).

2.2.2 Asignación estática y dinámica

La diferencia entre ambas asignaciones se basa en el cómo se percibe el tiempo, si la matriz origen-destino y los flujos de los enlaces son asumidos independientes del tiempo, entonces se refiere a una asignación estática. Por otra parte, si se toma en cuenta una dependencia del tiempo, se refiere a una asignación dinámica.

En la vida real, los flujos nunca son independientes del tiempo, pero para casos de, por ejemplo, un periodo pico de tráfico, la asignación dinámica ofrece una buena aproximación describiendo un “límite estacionario” de patrones de flujo de tráfico.

Sin embargo, no es realista considerar un “límite estacionario” para redes congestionadas. Si consideramos que el flujo es estacionario, una cola, formada debido a que un flujo de salida de un enlace no puede superar su capacidad, crecerá infinitamente; lo que no solo no es realista, sino que además da un tiempo de viaje infinito. Por lo tanto, en el límite estacionario el modelo de elección de ruta no superaría la capacidad de un enlace.

En la realidad, la afluencia en un enlace podría superar la capacidad de este durante la hora pico, porque el tiempo de viaje en la ruta más corta podría ser aún menor que el tiempo de viaje de la segunda ruta más corta considerando incluso solo la primera congestionada. Por ello, la situación en una red congestionada no puede describirse de forma satisfactoria mediante un enfoque estático (Gawron, 1999).

2.3 Asignación dinámica

Una de las desventajas principales de la asignación de tráfico estática es la falta de consideración correcta de la congestión y, en el caso de redes extensas, los flujos de los enlaces se sobrestiman, solo pueden solucionarse a través de modelos dinámicos, es decir, dependientes del tiempo (Gawron, 1999)

2.3.1 Modelo de red

En su tesis doctoral (Gawron, 1999) plantea la asignación dinámica considerando un periodo de tiempo fijo $[0, T]$ que debe ser lo suficientemente extenso para permitir a los viajeros alcanzar sus destinos. También reemplaza las variables de flujo x_a por las funciones $x_a(t)$, que ya no se considera solo el flujo en el enlace a , sino representa el número de vehículos que viajan por el enlace a en el instante t .

Para la descripción correcta de la propagación de vehículos, distingue a los vehículos por sus destinos y rutas. Por lo tanto, introduce la variable $x_{ap}^{rs}(t)$, que viene a ser el número de vehículos viajando por el enlace a sobre la ruta p desde r a s en el tiempo t . La función $x_a(t)$ esta relacionado con $x_{ap}^{rs}(t)$ por la Ecuación N° (4):

$$\sum_{(r,s) \in OD} \sum_{p \in P} x_{ap}^{rs}(t) = x_a(t) \quad (4)$$

Para la descripción dinámica de $x_a(t)$, introduce las tasas de entrada y salida $u_a(t)$ y $v_a(t)$ y sus correspondientes variables $u_{ap}^{rs}(t)$ y $v_{ap}^{rs}(t)$, respectivamente. Este último par de variables son llamadas “variables de control” debido a que controlan la dinámica de las variables de estado $x_a(t)$. Las variables de control están relacionadas con $x_{ap}^{rs}(t)$ por la Ecuación N° (5):

$$\frac{dx_{ap}^{rs}(t)}{dt} = u_{ap}^{rs}(t) - v_{ap}^{rs}(t) \quad (5)$$

Donde usualmente se asume la condición inicial y no-negatividad de las variables tal como se muestra en la Ecuación N° (6) y Ecuación N° (7):

$$x_{ap}^{rs}(0) = 0 \quad (6)$$

$$x_{ap}^{rs}(0) \geq 0, u_{ap}^{rs}(t) \geq 0, v_{ap}^{rs}(t) \geq 0 \quad (7)$$

2.3.1.1 Restricciones de conservación de flujo

Considerando que cada nodo $v \in \mathcal{N}(\mathcal{O} \cup \mathcal{D})$, implican conservaciones de flujo tal como se muestra en la Ecuación N° (8):

$$\sum_{a \in A(v)} v_{ap}^{rs}(t) = \sum_{a \in B(v)} u_{ap}^{rs}(t), \forall v \notin \{r, s\} \quad (8)$$

Donde $A(v) = \{(v, w) \in \mathcal{A}\}$ denota el conjunto de todos los enlaces que salen del nodo v y $B(v) = \{(w, v) \in \mathcal{A}\}$, por el contrario, el conjunto de todos los enlaces que ingresan en v .

Considerando $f^{rs}(t)$ como el flujo que parte de un nodo de origen r al nodo destino s en el tiempo t , y también $e^{rs}(t)$ como el flujo de llegada al destino s desde el origen r en el tiempo t . Entonces las restricciones de conservación de flujo en los nodos de origen y destino pueden ser descritos según la Ecuación N° (9) y Ecuación N° (10):

$$\sum_{a \in A(r)} \sum_{p \in \mathcal{P}_{rs}} u_{ap}^{rs}(t) = f^{rs}(t) \quad (9)$$

$$\sum_{a \in B(s)} \sum_{p \in \mathcal{P}_{rs}} u_{ap}^{rs}(t) = e^{rs}(t) \quad (10)$$

También surgen las restricciones de no-negatividad según la Ecuación N° (11) y Ecuación N° (12):

$$f^{rs}(t) \geq 0 \quad (11)$$

$$e^{rs}(t) \geq 0 \quad (12)$$

2.3.1.2 Restricciones de propagación de flujo

Los modelos de asignación dinámica describen la propagación del flujo a través de la red por medio de variables de flujo de entrada y salida que son dependientes del tiempo. Una manera de formular estas restricciones es por observación del hecho que los vehículos que usan la ruta p que están en el enlace a en el tiempo t están en el tiempo $t + \tau_a(t)$, es decir, estos se encuentran en algún enlace aguas abajo que es parte de la subruta $\bar{p}$ de p que comienza en a , o que ha llegado a su destino. Usando la Ecuación N° (13):

$$E_p^{rs}(t) = \int_0^t e_p^{rs}(\tau) d\tau \quad (13)$$

Esta observación puede ser escrita como la Ecuación N° (14):

$$x_{ap}^{rs}(t) = E_p^{rs}(t + \tau_a(t)) - E_p^{rs}(t) + \sum_{b \in \bar{p}} x_{bp}^{rs}(t + \tau_a(t)) - x_{bp}^{rs}(t) \quad (14)$$

El mayor problema con las restricciones de propagación es que contienen el tiempo de viaje $\tau_a(t)$, que es desconocido hasta que el problema es resuelto. Para resolver este problema se utiliza un proceso de iteración que incremente la complejidad del problema de asignación dinámica drásticamente comparado a su homólogo estático.

2.3.1.3 Tiempos de viaje

En los modelos estáticos, el tiempo de viaje en un enlace “a” depende solo del estado del enlace, sin embargo, para la decisión de los viajeros en la asignación dinámica, se introducen dos conceptos de tiempos de viaje de ruta: tiempo de viaje instantáneo y el tiempo de viaje actual.

El tiempo de viaje instantáneo es el tiempo necesitado para viajar a lo largo de la ruta p es las condiciones de tráfico en el tiempo t prevalecieron durante todo el viaje, es decir la Ecuación N° (15):

$$\psi_p^{rs}(t) = \sum_{a \in p} \tau_a(t) \quad (15)$$

El tiempo de viaje actual $\eta_p^{rs}(t)$, es el tiempo que un viajero necesita para viajar a lo largo de la ruta p si él comienza en el tiempo t . Para expresar $\eta_p^{rs}(t)$ en términos de los tiempos de viaje del enlace, se asume que $p = (r, v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, s)$ y se define recursivamente según la Ecuación N° (16) y Ecuación N° (17):

$$\eta_p^{rr}(t) = 0, \quad (16)$$

$$\eta_p^{rv_i}(t) = \eta_p^{rv_{i-1}}(t) + \tau_{(v_{i-1}, v_i)}(t + \eta_p^{rv_{i-1}}(t)) \quad (17)$$

El tiempo de viaje actual sería un criterio de decisión razonable para los viajeros en una configuración diaria porque al intentar diferentes rutas distintas, el viajero, puede aprender el tiempo de viaje real de las distintas rutas. Por lo tanto, se define la Ecuación N° (18) y Ecuación N° (19):

$$\sigma^{rs}(t) = \min_{p \in \mathcal{P}_{rs}} \psi_p^{rs}(t) \quad (18)$$

$$\pi^{rs}(t) = \min_{p \in \mathcal{P}_{rs}} \eta_p^{rs}(t) \quad (19)$$

2.3.2 Condiciones de Equilibrio de Usuario Dinámico

La condición de equilibrio dinámica nace de la extensión del primer principio de Wardrop usando o el tiempo de viaje actual o el tiempo de viaje instantáneo. Gawron (1999), define el equilibrio de usuario dinámico a partir de los viajes de tiempo actual ya que busca representar una configuración diaria asumiendo que los viajeros han “aprendido” sobre el estado dinámica de la red. Expresa, por lo tanto, las condiciones de equilibrio de usuario dinámicas como un problema de complementariedad no lineal según la Ecuación N° (20), (21) y (22):

$$\eta_p^{rs}(t) - \pi^{rs}(t) \geq 0 \quad (20)$$

$$f_p^{rs}(t) \cdot (\eta_p^{rs}(t) - \pi^{rs}(t)) = 0 \quad (21)$$

$$f_p^{rs}(t) \geq 0 \quad (22)$$

El problema de expresar las condiciones en las ecuaciones anteriores en términos de flujos de ruta $f_p^{rs}(t)$ es que un algoritmo de solución eficiente no debe enumerar todas las rutas. Por lo tanto, una formulación basada en el enlace es preferible. Gawron (1999) define para cada enlace $a = (v, w)$ los costos reducidos según la Ecuación N° (23):

$$\Omega_a^{rv}(t) = \pi^{rv}(t) + \tau_{(v,w)}(t + \pi^{rv}(t)) - \pi^{rw}(t) \quad (23)$$

Y también propone el siguiente lema:

“Las condiciones de Equilibrio de Usuario Dinámicas sobre los flujos de la ruta son equivalentes al siguiente problema de complementariedad no lineal sobre las tasas de entrada del enlace $\mu_a^{rs}(t)$ para cada enlace $a = (v, w)$ ” (Gawron, 1999, p. 26):

$$\Omega_a^{rv}(t) \geq 0 \quad (24)$$

$$u_a^{rs}(t + \pi^{rv}) \cdot \Omega_a^{rv}(t) = 0 \quad (25)$$

$$u_a^{rs}(t + \pi^{rv}) \geq 0 \quad (26)$$

2.4 Modelos de simulación de tráfico

Bajo la perspectiva de la asignación de tráfico, los modelos de simulación de tráfico pueden clasificarse en dos grupos: los modelos orientados al vehículo (microscópicos) describiendo el movimiento individual de cada vehículo en toda la red, y los modelos basados en flujos (macroscópicos) que no describen a detalle los vehículos individualmente, sin embargo, describen el tráfico como un ‘fluido’ (Gawron, 1999).

2.4.1 Modelos Macroscópicos

Estos modelos representan las dinámicas del vehículo considerando la densidad vehicular espacial $\rho(x, t)$ y la velocidad promedio como una función de la ubicación (x) y el tiempo (t). Considerando que hay una conservación del número de vehículos, cada modelo macroscópico esta basado en la ecuación de continuidad (ver Ecuación N° (27)) para la densidad de vehículos. La tasa de vehículos que entran o salen de la red esta dado por $v(x, t)$, considerando una sección de longitud ∂x .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial x} = v(x, t) \quad (27)$$

El origen de los enfoques macroscópicos parte de la idea que los flujos de tráfico son similares a flujos de fluidos (Adebisi, 2017). Lighthill y Whitham (1955) presentaron su investigación principal siguiendo este enfoque. Su modelo comparó los ‘flujos de tráfico en carreteras extensas y congestionadas’ con ‘movimientos de inundación en ríos extensos’. Richards (1956) presentó la idea de “ondas de choque en carreteras” completando el modelo LWR (Lighthill-Whitham-Richards). Posteriormente numerosos modelos han aparecido con diferentes enfoques en cómo calcular la ecuación de velocidad $V(x, t)$. Una formulación genérica se representa en la Ecuación N° (28):

$$\frac{dV}{dt} + V \frac{dV}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = \frac{1}{\tau} (V_e - V) \quad (28)$$

Donde:

- $V \frac{\partial V}{\partial x}$ = Término de transporte.
- $\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx}$ = Término de presión.
- $\frac{1}{\tau} (V_e - V)$ = Término de relajación.

2.4.2 Modelos Microscópicos

Los modelos de flujo de tráfico microscópicos están enfocados en los vehículos individuales, prediciendo ubicación y velocidad de unidades de vehículos individuales. Estas medidas son matemáticamente expresadas como posiciones, $x_\alpha(t)$ y velocidades, $v_\alpha(t)$ de vehículos que interactúan (α). Este tipo de simulaciones tiene dos diferentes enfoques: modelos de seguimiento vehicular o de autómatas celulares (Pereira, 2020).

2.4.2.1 Modelos de seguimiento vehicular

Los modelos de seguimiento vehicular están basados en ecuaciones diferenciales ordinarias, describiendo posición y velocidad. Además de la velocidad, la distancia entre parachoques también se representa y es expresado como en la Ecuación N° (29), donde $l_{\alpha-1}$ define la distancia del vehículo que va al frente, $\alpha - 1$.

$$s_\alpha = x_{\alpha-1} - x_\alpha - l_{\alpha-1} \quad (29)$$

El movimiento de cada vehículo se puede representar en función de la aceleración (ver Ecuación N° (30) dependiendo de las entradas explicadas en el párrafo anterior.

$$\ddot{x}_\alpha(t) = \dot{v}_\alpha(t) = F(v_\alpha(t), s_\alpha(t), v_{\alpha-1}(t)) \quad (30)$$

Una ecuación más generalizada se encuentra en la Ecuación N° (31), considerando tanto al líder, $\alpha - 1$, y a los n_α vehículos del frente.

$$\dot{v}_\alpha(t) = f(x_\alpha(t), v_\alpha(t), x_{\alpha-1}(t), v_{\alpha-1}(t), \dots, x_{\alpha-n_\alpha}(t), v_{\alpha-n_\alpha}(t)) \quad (31)$$

Se han presentado numerosos modelos como los de Newell, Bando, Gips, Helbing, y Krauss que consideran más variables extras. La tesis de Krauß, Wagner & Gawron (1997) fue sobre la dinámica de vehículos sin colisiones que se convirtió en la base de SUMO, un popular simulador de tráfico. Existen modelos más complejos, llamados “modelos de alta fidelidad”, como los modelos de Wiedemann

y MITSIM, los cuales realizan simulaciones los más realistas posibles, pero requieren la calibración de numerosos parámetros altamente complejos y, por lo tanto, difíciles de calibrar.

2.5 Modelado postsismo

2.5.1 Situación postsismo

En el presente estudio se ha considerado una situación postsísmica con un espaciamiento temporal de más de una semana desde el evento disruptivo, de tal manera que se permitan las siguientes suposiciones:

1. Los heridos causados por el sismo ya han sido trasladados a hospitales o centros de salud más cercanos, por lo tanto, no se generan viajes de vehículos de emergencia provenientes de centros de salud.
2. Las vías bloqueadas por el sismo se encuentran sin trabajos de desbloqueo en dicho instante por parte de alguna entidad pública o de la población misma.
3. El gobierno nacional y local ha dado en disposición como centros de refugios numerosas áreas del estado como parques, edificios gubernamentales, estadios, etc.
4. Los damnificados del sismo ya han sido trasladados a los centros de refugio más cercanos y ya han retomado sus actividades iniciales (trabajo), considerando que su nuevo origen de sus viajes es un centro de refugio.
5. Existe un equilibrio de tráfico debido a que los conductores ya conocen qué vías se han bloqueado total o parcialmente causados por el colapso de edificaciones.

2.5.2 Mapa de riesgo sísmico

Los mapas de riesgo permiten visualizar la distribución de riesgos de desastre en un área espacial en específico a través de una representación cartográfica; además, estos mapas se crean a través de la combinación de mapas de peligro y mapas de vulnerabilidad, cada uno de los cuales ya son el resultado de índices e indicadores puntuales (Renda, Rozas, Moscardini y Torchia, 2017). Existen diferentes tipos de mapas de riesgo, entre ellos están los mapas de riesgo sísmico, el cual muestra la distribución de riesgos ante un evento sísmico de gran magnitud.

2.5.2.1 Mapa de peligro

En el presente estudio se evalúa un escenario sísmico, es decir, es necesario conocer el peligro sísmico. Este peligro es obtenido a través de las aceleraciones máximas por el tipo de suelo que se realiza a través de una microzonificación geotécnica sísmica de la zona, luego de haber caracterizado el comportamiento dinámico de los suelos en base de su sismicidad (CISMID, 2018)

2.5.2.2 Mapa de vulnerabilidad

La obtención de la vulnerabilidad sísmica de una edificación es el grado de susceptibilidad de daño ante la ocurrencia de un sismo. A través de este grado, que en el caso del presente estudio se muestra como nivel de daño (en una escala del I al V donde I es sin daños y V es colapso), se cuantifica el daño (CISMID, 2018).

En la presente investigación se ha utilizado información directamente del mapa creado por el CISMID (2020) llamado “Mapa de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Lima al Año 2020”, el cual elabora su mapa de vulnerabilidad a través de la herramienta propuesta por Zavala (2004) llamado Simulador Respuesta Sísmica y Nivel de Daño [SRSND] considerando un sismo severo de periodo de retorno de 475 años y probabilidad de excedencia del 10%.

2.5.2.3 Mapa de riesgo sísmico de Lima

En el caso de Lima, Perú, a solicitud de sus ministerios y municipalidades, se elabora un mapa de riesgo sísmico de manera progresiva, siendo el último mapa elaborado de manera oficial el Mapa de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Lima al Año 2020 creado principalmente por el CISMID (2020). El mapa se observa en la Figura N° 1.

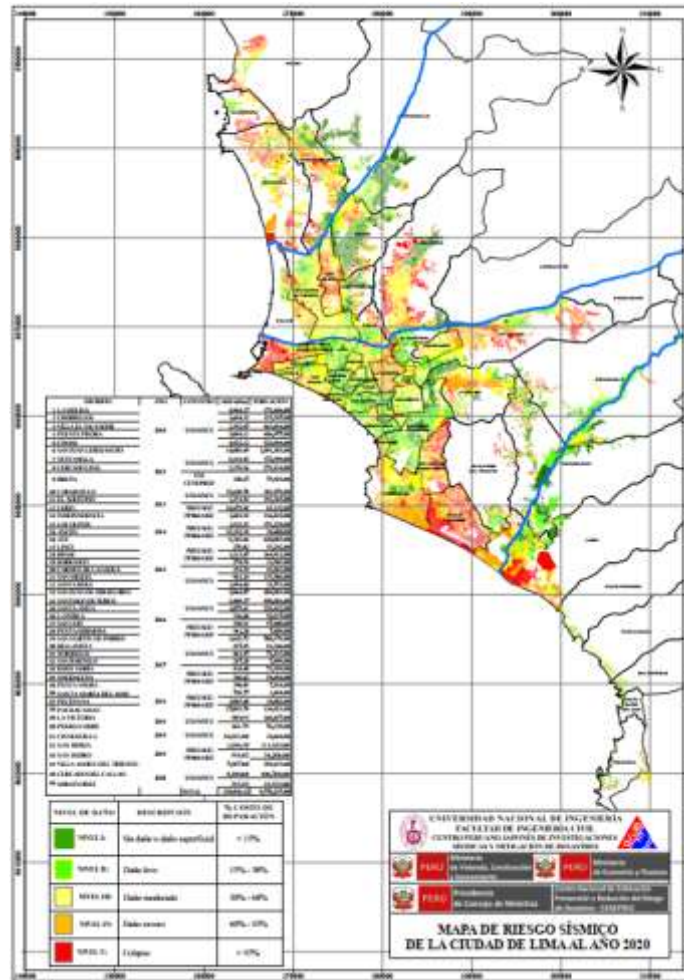


Figura N° 1: Mapa de riesgo sísmica de Lima. Adaptado de CISMID, 2020.

2.5.3 Producción y atracción de viajes postsismo

Representar la producción y atracción de viajes postsismo es un problema complejo del modelamiento de la demanda, tal como lo mencionan Chang et al. (2012), que utilizan las siguientes suposiciones para simplificar el problema:

- La producción de viajes residenciales esta relacionada por la cantidad de población afectada en las zonas residenciales.
- La producción de viajes industriales y comerciales esta relacionada con la superficie afectada de las zonas industriales y comerciales.
- La atracción de viajes a un hospital o centro de refugio será proporcional a la capacidad de estos.

Además, establecen una clasificación de los TAZ dependiendo de las características postsismo que posean, los cuales son:

- A1 (Atractora): con presencia de hospitales y centros de refugio.
- A2 (No atractora): sin presencia de hospitales ni centros de refugio.

- R1 (Repelente): con presencia de estructuras dañadas o con presencia de materiales peligrosos (como petróleo, fugas de gas natural, etc.).
- R2 (No repelente): sin presencia de estructuras dañadas ni con presencia de materiales peligrosos.

A través de estas características se establece la clasificación como se observa en la Figura N° 2.

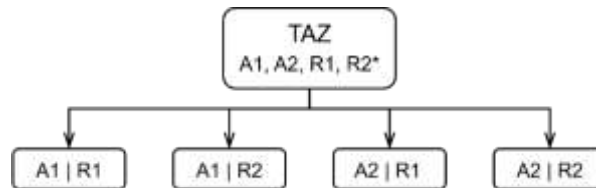


Figura N° 2: Clasificación de TAZ según sus características de atracción o repelencia. Elaboración propia.

Un ejemplo de esta aplicación de clasificación se encuentra en la Figura N° 3 y en la Tabla N° 2.

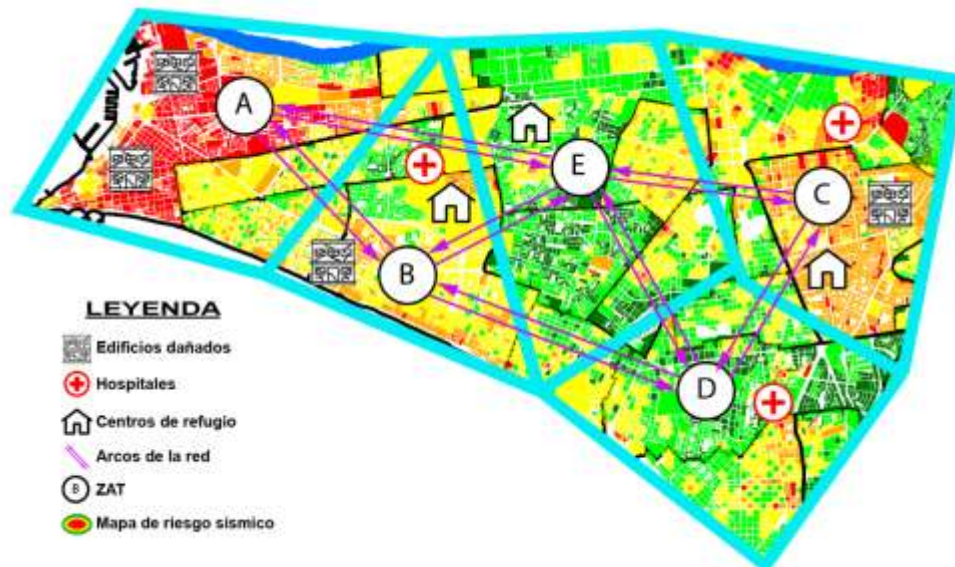


Figura N° 3: Ejemplo de clasificación de TAZ según la presencia de hospitales y centros de refugio. Elaboración propia.

Tabla N° 2

Tipos de zonas según la presencia de edificios dañados, hospitales o centros de refugio.
Elaboración propia.

ID de zona	Tipo de zona	Producción de viajes	Atracción de viajes	Nota
A	A2 R1	Base + evacuados	Sin cambios	Presencia de edificios dañados
B	A1 R1	Base + evacuados	Base + atraídos	Presencia de hospital/centro de refugio, y edificios dañados
C	A1 R1	Base + evacuados	Base + atraídos	Presencia de hospital/centro de refugio, y edificios dañados
D	A1 R2	Sin cambios	Base + atraídos	Presencia de hospital
E	A1 R2	Sin cambios	Base + atraídos	Presencia centro de refugio

2.5.4 Modelo de cierre de vías debido al colapso de edificios

Una vez se ha determinado la probabilidad de colapso, es vital que se estime el estado de la vía postsismo ante colapsos de edificios adyacentes a la vía. La estimación de la extensión de los escombros en la vía es un problema complejo y depende de muchos factores que requieren ciertas suposiciones. En la literatura existen distintos métodos para modelar los escombros de los edificios, en los que destacan el enfoque de Mansouri et al. (2008) que considera un ancho de restos fijo para diferentes alturas de edificios; Argyroudis et al. (2015) que considera las relaciones geométricas entre los edificios y las calles; y Santarelli et al. (2018) que considera un conjunto de datos de terremotos anteriores.

En el presente estudio se aplica el modelo de Argyroudis et al. (2015), quienes proponen un modelo basado en la geometría propia de la edificación con ciertas suposiciones. Se propusieron diferentes modelos de colapso y calcularon aproximadamente la extensión de los escombros (W_d) como una función de la profundidad del edificio (W), la inclinación del colapso (ϕ), la fracción del volumen de escombros (k_v) y la altura del edificio (Y). Se adopta solo un modelo de colapso que se muestra en la Figura N° 4, luego el cálculo de la extensión de los escombros se basa en la Ecuación N° (32). Debido a la alta complejidad para predecir el ángulo y naturaleza del colapso, ciertas suposiciones son realizadas en estudios relevantes (Santarelli et al., 2018). El volumen de reducción (k_v) es

considerado el 20% y el ángulo de colapso de la edificación (ϕ) considerado es 45° .

$$W_d = \sqrt{W^2 + \frac{2K_v \cdot W \cdot H}{\tan \phi}} - W \quad (32)$$

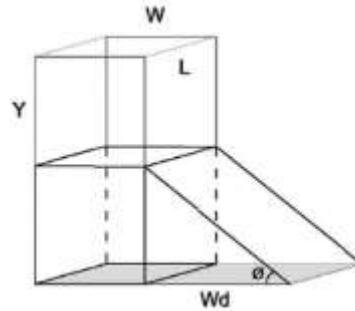


Figura N° 4: Esquema de colapso. Adaptado de Argyroudis, 2010.

Considerando la extensión de los escombros, se definen tres distintas situaciones posibles en las vías, basado en el ancho efectivo de la vía (W_{eff}), el cual es definido en la Ecuación N° (33).

$$W_{eff} = W_s + W_r - W_d \quad (33)$$

Donde:

- W_r : ancho de la vía.
- W_s : distancia de retroceso del edificio (veredas)
- W_d : ancho de los escombros.

El ancho efectivo (W_{eff}) de la vía que permite el movimiento de vehículos es calculado tal como muestra la Figura N° 5. Basado en la Ecuación N° (33), se definen tres tipos de cierre:

1. Cierre completo: si el ancho efectivo de la vía es menor que 2.80m.
2. Cierre parcial: si el ancho efectivo de la vía es 2.80m – 5.60m, en caso de vías de dos carriles.
3. Cierre menor: si el ancho efectivo de la vía es ≥ 5.60 m.

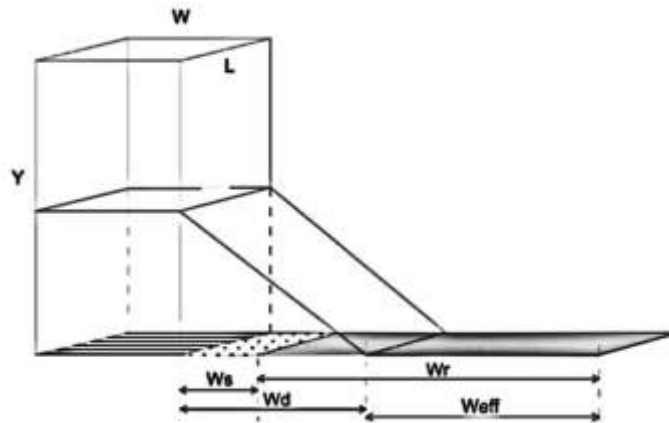


Figura N° 5: Esquema del modelo de Argyroudis (2010) del colapso de una edificación según su geometría. Adaptado de Argyroudis, 2010

Es importante considerar que el ancho designado de las carreteras de un solo carril es de 2.80m, y que cualquier pequeña extensión de escombros en la carretera provocaría un cierre completo. Por lo tanto, las carreteras de un solo carril no son propensas a cierres parciales. Sin embargo, las carreteras de doble carril o más pueden conservar cierres parciales debido a la reducción de W_{eff} , lo que obliga a una parte a funcionar como una carretera de un solo carril.

2.6 Polígonos de Thiessen (diagramas de Voronoi)

Los polígonos de Thiessen son una división geométrica de un área bidimensional. Es un método de interpolación basado en la distancia euclidiana. Se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan un conjunto de polígonos en un espacio euclidiano alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designan su área de influencia.

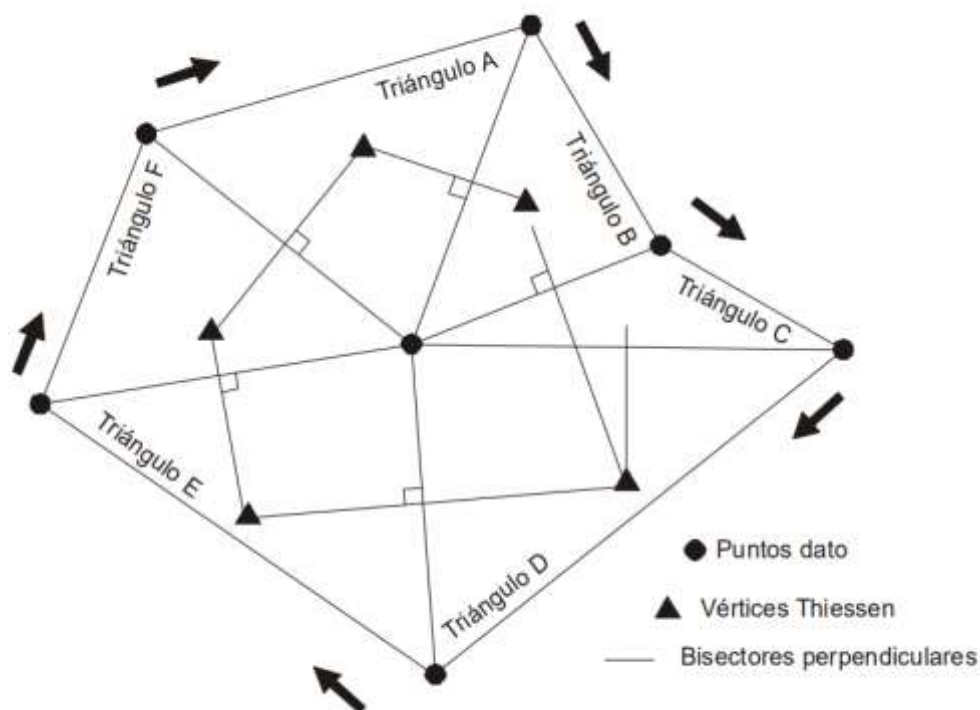


Figura N° 6: Representación esquemática de la producción de polígonos de Thiessen. Adaptado de Memoria Atlas de Historia, 2017.

2.7 Algoritmos de agrupamiento

La agrupación de datos se puede realizar de muchas maneras, sin embargo, actualmente existen numerosas librerías de programación en Python que permiten realizar estos agrupamientos de una manera eficiente y rápida a pesar del número de datos. La librería más conocida en Python es Scikit-learn el cual posee un gran número de métodos de agrupamiento en su módulo `sklearn.cluster`. Cada método posee casos de usos relevantes con respecto a otros, diferentes métricas, escalabilidad y parámetros.

Tabla N° 3

Métodos de agrupamiento de scikit-learn. Adaptado de scikit-learn.org, 2023.

Nombre del método	Parámetros	Caso de uso	Geometría (métrica utilizada)
K-Means	número de grupos	uso general, tamaño de grupo parejo, geometría plana, no demasiados grupos, inductivo	distancias entre puntos
Affinity propagation	amortiguamiento, preferencia de muestra	muchos grupos, tamaño de grupo desigual, geometría no plana, inductivo	distancia del gráfico

Nombre del método	Parámetros	Caso de uso	Geometría (métrica utilizada)
Mean-shift	banda ancha	muchos grupos, tamaño de grupo desigual, geometría no plana, inductivo	distancias entre puntos
Spectral clustering	número de grupos	pocos grupos, incluso tamaño de grupo, geometría no plana, transductivo	distancia del gráfico
Ward hierarchical clustering	número de grupos o umbral de distancia	muchos grupos, posiblemente restricciones de conectividad, transductivo	distancias entre puntos
Agglomerative clustering	número de conglomerados o umbral de distancia, tipo de enlace, distancia	muchos grupos, posiblemente restricciones de conectividad, distancias no euclidianas, transductivo	cualquier distancia por pares
DBSCAN	tamaño del vecindario	geometría no plana, tamaños de grupos irregulares, eliminación de valores atípicos, transductivos	distancias entre puntos más cercanos
OPTICS	membresía mínima del cluster	geometría no plana, tamaños de conglomerados desiguales, densidad de conglomerados variable, eliminación de valores atípicos, transductivo	distancias entre puntos
Gaussian mixtures	muchos	geometría plana, buena para la estimación de densidad, inductiva	mahalanobis distancias a los centros
BIRCH	factor de ramificación, umbral, agrupador global opcional	gran conjunto de datos, eliminación de valores atípicos, reducción de datos, inductivo	distancia euclidiana entre puntos
Bisecting K-Means	número de grupos	uso general, tamaño de clúster parejo, geometría plana, sin clústeres vacíos, inductivo, jerárquico	distancias entre puntos

Uno de los métodos más utilizados para realizar agrupamientos por distancias entre puntos es el método K-Means (ver Tabla N° 3) debido a la posibilidad de manejar una enorme cantidad de grupos, tamaños de grupos desiguales e incluso geometrías no planas, es decir, tres dimensiones.

2.7.1 Algoritmo K-Means

El algoritmo de K-Means es un algoritmo sencillo con la capacidad de agrupar conjuntos de datos con rapidez y eficacia, usualmente con un número reducido de

iteraciones (Géron, 2020). La finalidad del algoritmo es agrupar en n grupos de igual varianza, minimizando la inercia o la suma de cuadrados dentro del grupo (ver Ecuación N° (34)). Este algoritmo requiere que se indique el número de grupos o clústeres.

$$\sum_{i=0}^n \min_{u_j \in C} (\|x_i - \mu_j\|^2) \quad (34)$$

La inercia se reconoce usualmente como una medida de la coherencia interna de los clústeres. Sin embargo, padece de algunos inconvenientes (Pedregosa et al., 2011):

- La inercia supone que los grupos son convexos e isotrópicos, condición no constante en todos los casos. Responde sesgadamente a conjuntos de datos alargados o variedades con formados irregulares.
- La inercia no es una métrica normalizada, es decir, se considera que los valores menores son mejores y el cero es el valor óptimo. Sin embargo, en espacios de dimensiones muy altas, las distancias euclidianas tiendan a aumentar (conocido como la “maldición de la dimensionalidad”).

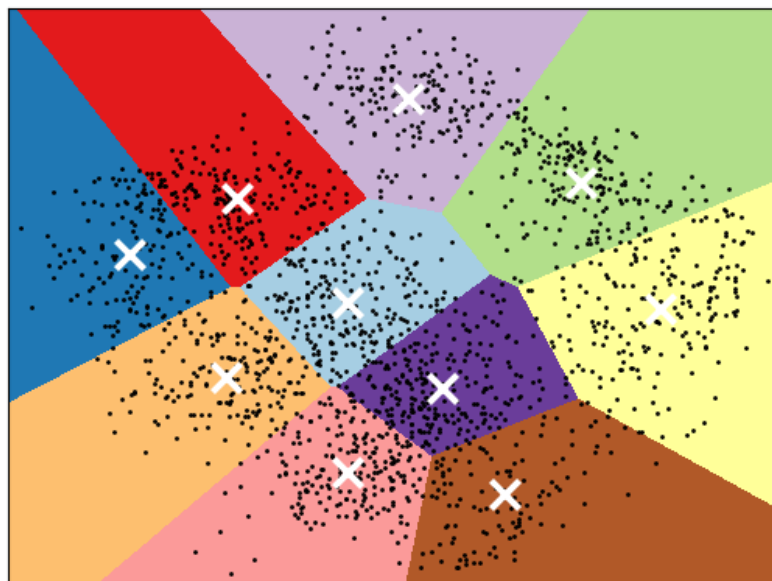


Figura N° 7: Representación de agrupamiento de datos con K-Means y gráfico de áreas con Voronoi (centroides marcados con un aspa blanco). Adaptado de scikit-learn.org, 2023.

2.7.1.1 Encontrar el número de grupos óptimo

Una de las entradas requeridas en el algoritmo de K-Means (ver Tabla N° 3) es el número de grupos. Existen métodos costosos a nivel computacional (por ejemplo,

utilizar puntuación de la silueta), sin embargo, existe un método más simple en el cual se utiliza el valor de la inercia como un indicador de métrica de rendimiento, sin embargo, la inercia más baja no asegura ser una métrica totalmente confiable en la elección del número de agrupamientos ya que existe la posibilidad de dividir grupos sólidos en más grupos.

El planteamiento de este problema se puede solucionar de manera simple a través de la aplicación del método del codo (en inglés “elbow”), el cual consiste en evidenciar gráficamente el cambio de la inercia en gráficos por diferentes números de agrupamientos definidos. A partir de la gráfica es factible, hasta cierto punto dependiendo de los datos, escoger el número de agrupamientos.

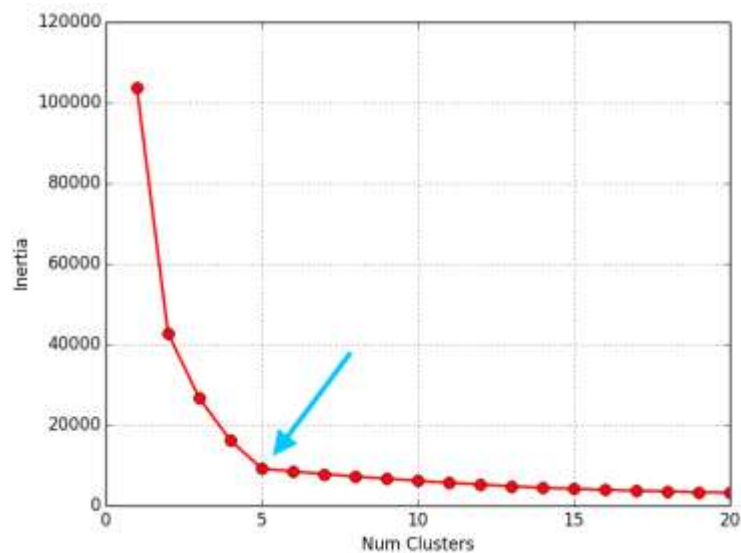


Figura N° 8: Gráfica de inercia vs número de agrupamientos. Adaptado de jarroba.com, 2023.

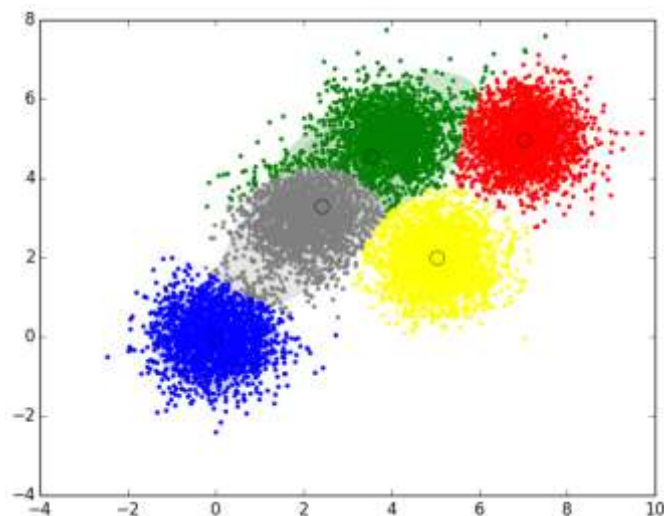


Figura N° 9: Resultado del agrupamiento de K-Means de la Figura N° 8. Adaptado de jarroba.com, 2023.

Como se puede apreciar en la Figura N° 8, existe un quiebre evidente en el número de agrupamientos de cinco, por lo tanto, se considera que el número de agrupamientos óptimo es cinco. Esta elección se visualiza en la Figura N° 9 mostrando un óptimo agrupamiento para los datos en dicho ejemplo.

2.8 Medida de eficiencia de la red

En la literatura de medidas de eficiencia de la red existen numerosos modelos y medidas que pretenden medir la eficiencia de la red según las necesidades que se presentan. En la presente investigación se ha utilizado la propuesta de medida de eficiencia de una red congestionada presentada por Nagurney & Qiang (2007), quienes propusieron que para una topología de red G y un vector de demanda d , la medida de eficiencia esta definida según la Ecuación N° (35).

$$\varepsilon = \varepsilon(G, d) = \frac{\sum_{w \in W} \frac{d_w}{\lambda_w}}{n_W} \quad (35)$$

Donde:

- W : Conjunto de pares OD en la red.
- w : Par OD.
- d_w : La demanda de un par OD.
- λ_w : Desutilidad del equilibrio para el par w .
- n_W : Número de elementos de W .

Esta medida mide el rendimiento medio (basado en el par OD) frente al costo o al precio, siendo el rendimiento medido por las demandas y el coste por la desutilidad del viaje.

2.8.1 Importancia de un componente de la red

La propuesta de Nagurney & Qiang (2007) indujo también a desarrollar un índice de importancia de un componente de la red. La importancia de un componente de la red $g \in G$, $I_{(g)}$, es medida por la eficiencia relativa de la red luego g que es removida de la red tal como se muestra en la Ecuación N° (36):

$$I_{(g)} = \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(G, d) - \varepsilon(G - g, d)}{\varepsilon(G, d)} \quad (36)$$

Donde:

- $G - g$: Es la red resultante después que la componente g es removida de la red G .

- $I_{(g)}$: Índice de importancia de componente de la red. Sin unidades y limitado por 1.

2.9 Capacidad de reserva

La definición de capacidad de reserva implica primero definir la capacidad de una red. Según el Highway Capacity Manual [HCM] (2010) define la capacidad de reserva de una red vial como la cantidad máxima de tráfico que puede soportar una red en condiciones óptimas, es decir, sin que se produzcan congestiones significativas.

La capacidad de reserva, por lo tanto, es la cantidad adicional de tráfico que una red vial puede soportar superando su capacidad de diseño en condiciones normales. En otras palabras, es la capacidad disponible para absorber aumentos de flujos extraordinarios en la demanda de tráfico para compensar disminuciones temporales en la capacidad debido a condiciones inusuales. La capacidad de reserva permite mantener un nivel aceptable de servicio incluso en situaciones imprevistas, evitando o reduciendo la congestión y los retrasos en la red vial.

En la presente investigación, el cálculo de la capacidad parte de las ideas de Flores (2018), del cual se puede definir la capacidad de reserva como el promedio de las diferencias de un caso ordinario con uno extraordinario, es decir, en el caso de la presente investigación, la diferencia entre el caso más desfavorable con el caso ordinario.

2.10 Programas de simulación

Para la simulación de tráfico existen múltiples programas, dependiendo de su objetivo cada uno tiene funcionalidades distintas, por ejemplo, TransCAD es utilizado ampliamente para simulaciones macroscópicas, sin embargo, requiere licencia. En el presente estudio se utilizó un software gratuito y de código abierto, siendo el más conocido en el mercado, el software Simulation Urban Mobility (desde ahora SUMO).

2.10.1 Simulation Urban Mobility (SUMO)

SUMO es un software de simulación de tráfico de código abierto y gratuito que permite modelar y analizar el tráfico urbano en entornos complejos. Además, es posible crear redes de transporte, programar flujos de tráfico y simular comportamientos de vehículos individuales, peatones y ciclistas (Alvarez et al., 2018).

Dentro de las funcionalidades de SUMO, se destacan las siguientes:

- netconvert: es una herramienta que permite importar redes de transporte digitales al SUMO.
- netedit: es un editor de redes gráfico que incluye SUMO, el cual te permite crear o modificar redes de transporte.
- od2trips: es una herramienta que permite importar matrices origen-destino provenientes de otros programas como VISSIM.
- duarouter: es una herramienta que te permite calcular las rutas de vehículos e incluso posee la capacidad de ser llamado iterativamente para llegar al equilibrio de usuario dinámico a través de un script de Python llamado duaiterate.py.

En la Figura N° 10 se aprecia un extracto de simulación de la red de una de las simulaciones realizadas en el presente estudio.



Figura N° 10: Extracto de simulación en SUMO. Elaboración propia.

Capítulo III: Diseño y estrategia de la investigación

3.1 Generalidades

En toda investigación científica es necesario que los hechos estudiados, sus relaciones entre estos, los resultados obtenidos y las evidencias relevantes encontradas en relación con el problema abordado, además de los conocimientos nuevos que ha de ser posible situar; reúnan las condiciones de fiabilidad, objetividad y validez interna; para lo cual, se necesita delimitar los procedimientos de orden metodológico, a través de los cuales se intenta dar respuestas o soluciones a las interrogantes planteadas en la investigación.

En consecuencia, el Capítulo 3 de la presente investigación propone un marco metodológico para estudiar el Modelamiento de la demanda de una red de transporte de Lima después de la ocurrencia de un evento sísmico. El marco metodológico es la estancia que alude al momento tecno-operacional presente en todo proceso de investigación; donde es vital situar al detalle el conjunto de métodos, técnicas y protocolos instrumentales que se aplicarán en el proceso de recolección de los datos requeridos en la investigación (Balestrini, 2006).

Destaca en esta dirección, que en relación de las características derivadas del problema investigado y de los objetivos propuestos al inicio de esta, en el Capítulo 3 del presente estudio, se introducirán, previamente, los diversos procedimientos tecno-operacionales más adecuados para recopilar, presentar y analizar los datos, con el objetivo de cumplir con el propósito general de la investigación planteada. En tal propósito, como lo menciona Balestrini (2006), se desarrollarán importantes aspectos relativos al tipo de estudio y a su diseño de investigación, incorporados en función a los objetivos establecidos que, en este caso, se trata de una investigación explicativa; la población estudiada, así como, el número total de sujetos que la integran; la muestra que se utilizará y cómo fue seleccionada; las técnicas e instrumentos que se emplearán en la recolección de los datos y las características esenciales de los mismos; las formas de codificación, presentación de los datos; y el análisis e interpretación de los resultados que permitirá destacar las evidencias más relevantes encontradas en relación al Modelamiento de la demanda de una red de transporte de Lima después de la ocurrencia de un evento sísmico.

3.2 Alcance y nivel de investigación

3.2.1 Alcance de investigación

Según Arias (2012), “La investigación científica es un proceso metódico y sistemático dirigido a la solución de problemas o preguntas científicas, mediante la producción de nuevos conocimientos, los cuales constituyen la solución o respuesta a tales interrogantes” (p. 22).

Según Vara (2015), la investigación científica se clasifica en:

- a) Investigación básica.
- b) Investigación aplicada.

Diferenciándose ambos tal como se muestra en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4

Tipos de investigación científica y sus intereses. Adaptado de Vara (2015).

Tipo tradicional de investigación	Algunos intereses
Investigación básica (Generar conocimiento)	• Investiga la relación entre variables o constructos. • Diagnostica alguna realidad empresarial. • Prueba y adapta teorías. • Genera nuevas formas de entender los fenómenos empresariales. • Construye o adapta instrumentos de medición.
Investigación aplicada (Resolver problemas)	• Propone programas de gestión, innovación, nuevos modelos. • Investiga sobre la gestión administrativa para mejorarla. • Propone innovaciones tecnológicas o de gestión. • Propone nuevas herramientas de análisis empresarial. • Propone planes de negocio o propuestas empresariales.

La investigación presente, de acuerdo con el problema planteado, no integra intereses en investigar exclusivamente relaciones entre variables, probar teorías ni generar nuevas formas de entender fenómenos; en cambio, busca proponer nuevas herramientas de análisis y proponer innovaciones de gestión a través de la resolución de un problema. De lo anteriormente expuesto, se desarrollará una

investigación del tipo aplicada, debido a que busca resolver un problema a través de teorías existentes.

3.2.2 Nivel de investigación

“El nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un fenómeno u objeto de estudio.” (Arias, 2012, p. 23).

Según el nivel de la investigación, esta se puede clasificar en:

- Investigación exploratoria.
- Investigación descriptiva.
- Investigación explicativa.

En el presente estudio, se buscará conocer los efectos de un evento disruptivo, un sismo, en el modelamiento de una red de transporte de Lima, por lo tanto, el nivel de la investigación presente será de tipo explicativa ya que se ocupará de conocer los efectos de un sismo en una red de transporte de Lima.

3.3 Enfoque y diseño de la investigación

3.3.1 Enfoque de la investigación

En el enfoque cuantitativo, tal como indican Hernández et al. (2010), “Usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías” (p. 4).

El enfoque de la investigación será cuantitativo.

3.3.2 Diseño de la investigación

“El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental” (Arias, 2012, p. 27).

“La investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)” (Arias, 2012, p. 34).

El diseño de la investigación es experimental, pues, los objetos de estudio serán sometidos a manipulación y control de las condiciones que ejercerá el investigador durante el experimento.

3.4 Población y muestra de la investigación

3.4.1 Población

“Aquí el interés se centra en “qué o quiénes”, es decir, en los participantes, objetos, sucesos o comunidades de estudio (las unidades de análisis), lo cual depende del planteamiento de la investigación y de los alcances del estudio” (Hernández et al., 2010, p.172).

La población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones (Cook, Sellitz & Wrightsman, 1980).

La población motivo de investigación esta conformada por todos los viajes realizados en Lima Metropolitana, con un origen y destino dentro de la misma.

3.4.2 Muestra

“La muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” (Arias, 2012, p. 83).

En la investigación se usarán los datos de todos los viajes realizados dentro del área de influencia del área de estudio, es decir, que se encuentren dentro de los siguientes distritos de manera parcial o total. Según los límites geográficos escogidos por el autor de la presente investigación, el área de influencia abarca los distritos: Cercado de Lima, Ate Vitarte, Barranco, Breña, Chorrillos, Jesús María, La Victoria, Lince, Magdalena del Mar, Pueblo Libre, Miraflores, San Borja, San Isidro, San Luis, San Miguel, Santiago de Surco y Surquillo.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica de investigación es el procedimiento de obtener información; mientras que el instrumento es cualquier recurso que se utiliza para la obtención, registro o almacenamiento de información (Arias, 2012).

En la presente investigación se ha utilizado la información proveniente del Plan Maestro de Transporte Urbano para el Área Metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú (Agencia de Cooperación Internacional de Japón [JICA], 2005), sin embargo, las técnicas e instrumentos de recolección de datos para la presente investigación son distintas. Estas se explican a continuación.

3.5.1 Técnica de investigación

Debido a la envergadura y la necesidad de distintos datos provenientes de la unidad de estudio (viajes), se utilizaron dos técnicas de investigación:

- Observación: para el caso de los conteos de tráfico vehiculares
- Encuestas: para el caso de las encuestas origen-destino.

3.5.2 Instrumentos de recolección de datos

Para la técnica de observación se ha utilizado un instrumento estructurado (formatos de conteos vehiculares). Mientras que para la técnica de encuesta se ha utilizado un instrumento escrito (encuesta de origen-destino).

Capítulo IV: Construcción del modelo

4.1 Área de estudio

El área de estudio del presente estudio comprende distritos ubicados en Lima centro, esta área ha sido definida en la investigación de Flores (2018) y Flores et al. (2021) a través del análisis de la influencia de la Vía Expresa de la Av. Paseo de la República.

Los distritos dentro del área de estudio son (ver Figura N° 11): Cercado de Lima, Barranco, Jesús María, La Victoria, Lince, Magdalena del Mar, Miraflores, San Borja, San Isidro, San Luis, Santiago de Surco y Surquillo.

Por otro lado, el área de influencia abarca los siguientes distritos de Lima Metropolitana: Lince, Magdalena del Mar, Barranco, Jesús María, La Victoria, Cercado de Lima, Miraflores, San Borja, San Isidro, San Luis, Santiago de Surco, Surquillo, Breña, Pueblo Libre, Ate Vitarte, Chorrillos, San Miguel. Esta área de influencia es explicada en el Capítulo 4.2.



Figura N° 11: Área de estudio. Elaboración propia.

4.2 Representación del mapa de riesgo en un entorno sig

En el presente estudio se utilizó el mapa de riesgo sísmico de Lima del año 2020 en un entorno SIG por medio del software libre y de código abierto QGIS. Se representó parcialmente el mapa de riesgo según el alcance de la investigación. El mapa utilizado consiste en la representación de las manzanas ubicadas dentro del área de influencia del presente estudio, las vías y los límites geográficos de cada TAZ.

Los distritos del área de influencia cuentan con al menos una manzana con un riesgo de nivel IV o V según la clasificación del Mapa de Riesgo Sísmico de Lima 2020, es decir, manzanas de color naranja y rojo, respectivamente.

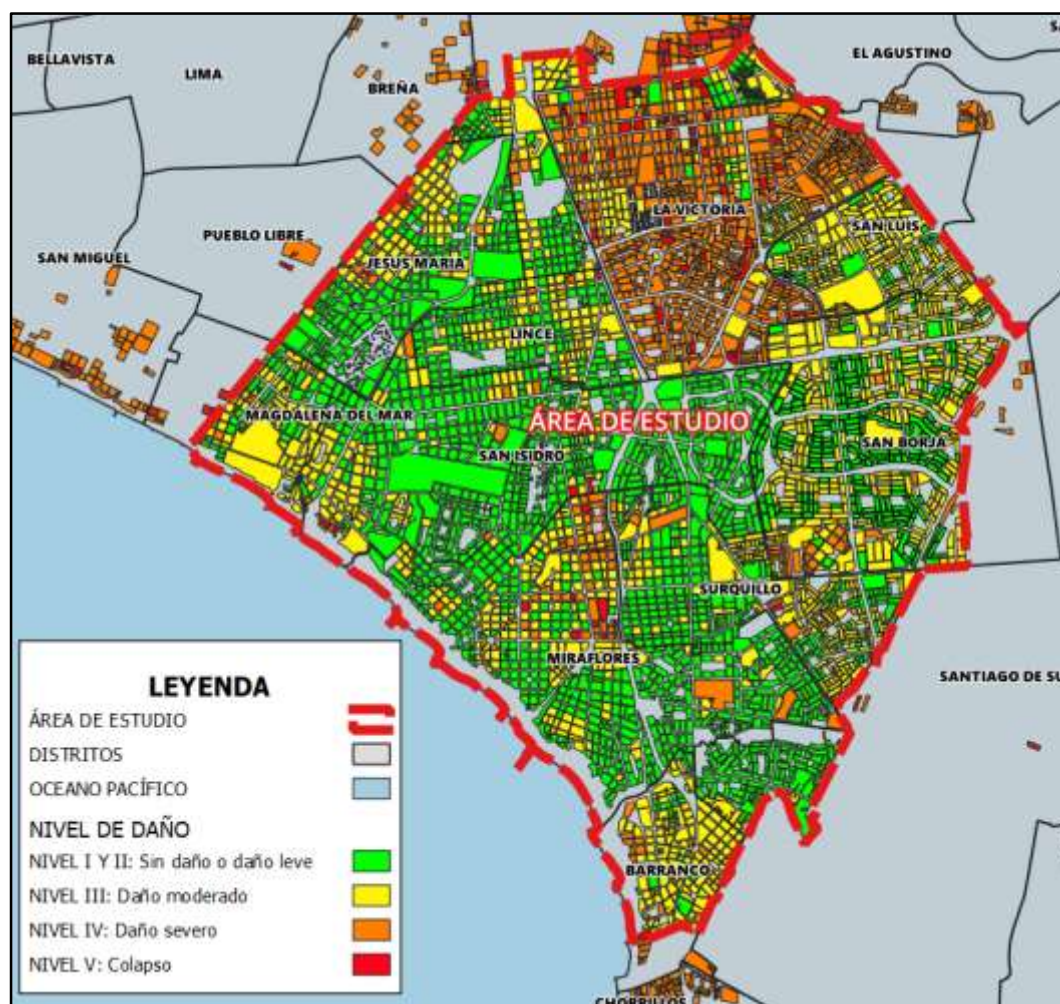


Figura N° 12: Niveles de daños causados por manzana debido a un sismo de gran magnitud.
Adaptado del Mapa de Riesgo Sísmico de Lima, 2020.

Las vías utilizadas en el estudio fueron extraídas de los mapas del proyecto colaborativo OpenStreetMap. Se realizaron correcciones necesarias a vías

defectuosas a través del software SUMO. Cada segmento de vía, desde ahora llamado link, posee los datos necesarios para su aplicación en el estudio, estos datos son: ID, longitud, nombre, jerarquía y número de carriles.

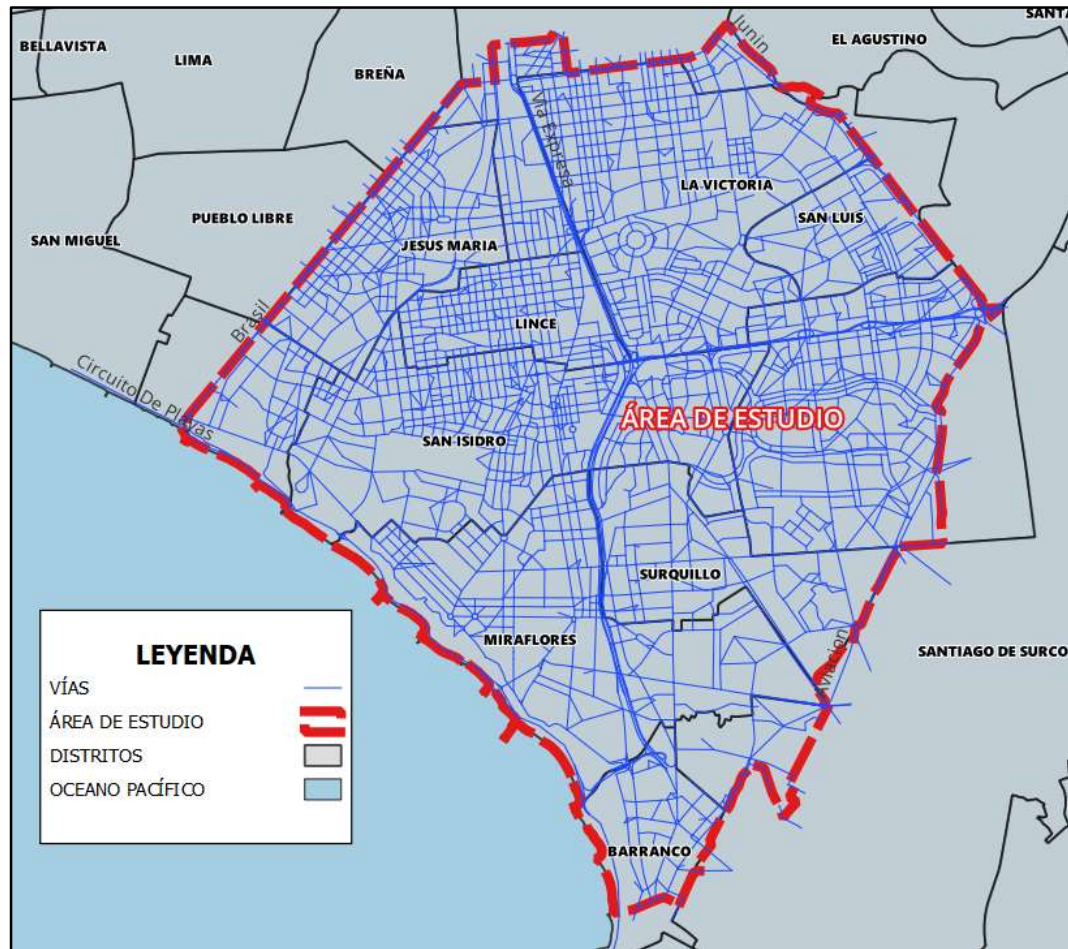


Figura N° 13: Representación de las vías utilizadas en el estudio. Elaboración propia.

Los límites geográficos que se aplicaron son los mismos utilizados por Plan Maestro con la excepción de la creación de pequeños TAZ en los límites del área de estudio. Estos TAZ se encuentran en el tramo final de un link. Cada TAZ contiene la siguiente información básica: ID, riesgo (del nivel I al V) y distrito al que pertenece.



Figura N° 14: Mapa de Zonas de Análisis de Tráfico (TAZ). Elaboración propia.

4.3 Datos del mapa de estudio

En adición a los datos básicos indicados en el Capítulo 4.1, se requirieron más datos para el desarrollo óptimo de la investigación, en específico, en las manzanas representadas. Los nuevos datos obtenidos son: área por manzana y población por manzana.

Los datos de área por manzana fueron obtenidos en el software QGIS a través de su herramienta de Calculadora de Campos aplicado a geometrías euclidianas (polígonos que representan los TAZ).

La población por manzana fue obtenida por medio de una proyección poblacional al 2020 a partir del censo del 2017 del Instituto Nacional de Estadística e Informática (2017). Se utilizó una proyección por interés compuesto, considerando un crecimiento de la población anual del 1%. Se obtuvieron los resultados de la Tabla N° 5.

Tabla N° 5
Proyección de la población del área de estudio al 2020. Elaboración propia

Distrito	Población 2017	Población 2020
Lima	268,352	279,248
Ate Vitarte	599,196	623,526
Barranco	34,378	35,774
Breña	85,309	88,773
Chorrillos	314,241	327,000
Jesús María	75,359	78,419
La Victoria	173,630	180,680
Lince	54,711	56,932
Magdalena del Mar	60,290	62,738
Pueblo Libre	83,323	86,706
Miraflores	99,337	103,370
San Borja	113,247	117,845
San Isidro	60,735	63,201
San Luis	52,082	54,197
San Miguel	155,384	161,693
Santiago de Surco	329,152	342,517
Surquillo	91,023	94,719

La distribución de la población por manzana se realizó considerando que la distribución es uniforme en el área de cada manzana, es decir, no se consideraron los pisos de las edificaciones debido a la falta de información brindada por las municipalidades.

4.4 Centros de refugio y parques

El modelamiento postsismo del estudio requiere conocer ubicación y capacidad de centros de refugio y parques; para ello se utilizaron los mapas digitales de Google Earth y Google Maps, con el fin de obtener los datos necesarios.

El escenario postsismo del presente estudio considera la siguiente situación: El área de estudio considera que los damnificados han cambiado sus hogares a centros de refugio de alta capacidad o parques y, por lo tanto, sus orígenes han cambiado.

En el equilibrio del tráfico postsismo es necesario conocer la capacidad de los centros de refugio de alta capacidad, en tal sentido, se debe conocer qué centros de refugio se pueden considerar como centros de refugio y también de alta capacidad.

La definición de centro de refugio esta basada en los estudios de Soltani, Ardalan, Boloorani, Haghdooost y Hosseinzadeh-Attar (2014); Soltani, Ardalan, Boloorani, Haghdooost, Hosseinzadeh-Attar (2015); y United Nations High Commissioner for Refugees (2007). Estos estudios y publicaciones muestran las consideraciones para seleccionar un centro de refugio basado en criterios clasificadas en categorías. Algunos de las categorías principales no concuerdan con la realidad del área de estudio de la presente investigación, a partir de esta afirmación se consideraron solo aquellas categorías aplicables, las cuales se muestran en la Tabla N° 6.

Tabla N° 6
Categorías y criterios para la selección de Centros de Refugios. Adaptado de Soltani et. al. (2014).

Categoría principal	Criterio	Definición
Consideraciones socioculturales	Proximidad a hogares de personas afectadas	Los refugios deben distribuirse de manera uniforme para que las víctimas del terremoto puedan llegar rápidamente.
	Uso de suelo anterior	Algunos tipos de uso de la tierra antes del terremoto podrían afectar la salud de las personas o su disposición a vivir allí.
	Uso compatible del suelo vecino	Los refugios deben estar lejos de áreas desagradables o insalubres como cárceles, depósitos de cadáveres, cementerios, mataderos y fábricas de productos químicos.
Disponibilidad de servicios	Accesibilidad	Los refugios deben distribuirse de manera uniforme para que las víctimas del terremoto puedan entrar, salir y recibir servicios de socorro rápidamente. La proximidad a las redes de carreteras es importante.

Categoría principal	Criterio	Definición
	Suministro de agua	Los refugios deben tener instalaciones de agua que puedan proporcionar agua potable, agua doméstica y agua contra incendios.
	Servicios médicos	Los refugios deben poder proporcionar servicios médicos. Por lo tanto, dicho sitio debe ubicarse lo más cerca posible de los centros médicos.
	Servicios de emergencias	Los refugios deben distribuirse de manera uniforme para que las víctimas del terremoto puedan recibir artículos y servicios de socorro como alimentos, tiendas de campaña, mantas, agua y tener acceso para los bomberos.
	Seguridad y protección	Se recomienda que las víctimas del terremoto se establezcan a una distancia conveniente de las estaciones de policía y las instalaciones militares para garantizar su protección y seguridad.
	Redes eléctricas	Se recomienda que los sitios estén a una distancia razonable de las redes eléctricas para garantizar el suministro de iluminación y las necesidades de energía.
	Servicios de comunicación	Despliegue de instalaciones de comunicación como teléfonos y radios, etc.
Reducción del riesgo de desastres	Peligros geológicos	Los refugios deben ubicarse lejos de fallas sísmicas activas, deslizamientos de tierra, colapso, flujo de escombros, licuefacción del suelo y depresión del suelo.

Categoría principal	Criterio	Definición
	Peligros hidrometeorológicos	Los refugios deben ubicarse lejos de fallas sísmicas activas, deslizamientos de tierra, colapso, flujo de escombros, licuefacción del suelo y depresión del suelo.
	Enfermedades ambientales	Los refugios no deben estar situados cerca de desagües, pantanos, vertederos, avicultura, lecherías, establos, instalaciones de tratamiento de aguas residuales, etc.
	Peligros secundarios	Los refugios deben estar ubicados lejos de cualquier peligro potencial, como edificios altos, sustancias inflamables y explosivas, productos químicos peligrosos, sustancias radioactivas, líneas de transmisión de alto voltaje, aeropuertos, ferrocarriles, carreteras y todos los posibles peligros secundarios.
	Industrias contaminantes	Los refugios deben ubicarse lejos de cualquier industria contaminante como refinerías, fábricas, etc.

Los centros de refugios fueron hallados por medio de una inspección visual del área de estudio y documentos oficiales de distintas municipalidades las cuales son Municipalidad Distrital de Breña (2015), Municipalidad Distrital de Chorrillos (s.f.), Municipalidad Distrital de Jesús María (2017), Municipalidad Distrital de La Victoria (2015), Municipalidad Distrital de Miraflores (s.f.), Municipalidad Distrital de San Miguel (2015), Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres [CISMID] (2016), CISMID (2018), CISMID (2017), CISMID (2019). Posteriormente se aplicaron las consideraciones anteriormente expuestas para filtrar los centros de refugios que cumplen con los criterios en la Tabla N° 6.

Para la obtención de las capacidades de los centros de refugio se utilizó una relación de capacidad de damnificados por área; para esto se utilizó el catálogo

de bienes de ayuda humanitaria del Instituto Nacional de Defensa Civil (2011) en donde se indica las características técnicas de la Carpa Familiar para 6 Personas (ver las especificaciones técnicas en el Anexo 3).

Los datos técnicos indican un ancho y un largo requerido de 3m x 3m, con un total de área de 9m². Se consideró un espacio entre carpas de 1m para la circulación de personas, sumando en total un área de 12m² para una capacidad de 6 personas, es decir, una relación de damnificados por unidad de área de 0.50.

Considerando la relación anterior, se obtuvieron las capacidades de cada centro de refugio considerando que un refugio de alta capacidad posee una capacidad mínima de albergar 6500 refugiados. No se consideran parques vecinales como centros de refugios de alta capacidad. Se obtuvo los centros de refugios de alta capacidad y sus capacidades, estos datos se muestran en la Tabla N° 7.

Tabla N° 7

Capacidad de los centros de refugios de alta capacidad presentes en el área de estudio.
Elaboración propia

Centro de Refugio de Alta Capacidad	Capacidad Máx. 0.5 pers/m²
Club de Golf de Lima	249,855
Estadio Luis Gálvez Chipoco	27,447
Estadio Municipal Carlos A. Moscoso	13,789
Cuartel General del Ejército del Perú	384,630
Federación Deportiva Peruana de Atletismo	109,739
Parque del Migrante José María Arguedas	16,799
Municipalidad de la Victoria	16,055
Estadio Alianza Lima	31,969
Complejo Deportivo IPD Oscar R. Benavides	6,892
Parque Juana Larco de Dammert	12,687
Parque de la Exposición	59,232
Estadio Nacional	32,298
Circuito Mágico del Agua	55,450
Campo Marte	101,512
Parque Próceres de la Independencia	29,015
Circuito Militar Salaverry	32,681
Complejo deportivo San Isidro	16,599

Centro de Refugio de Alta Capacidad	Capacidad Máx. 0.5 pers/m ²
Cuartel Militar Barbones	100,626
TOTAL	1,250,100

Los parques que se consideraron en el estudio fueron parques vecinales y su objetivo principal es albergar a los damnificados más cercanos. Se consideró que cada parque vecinal alberga solo damnificados dentro de cada TAZ, es decir, no se aplicaron modelos de gravedad para la distribución de los damnificados, debido a que el número de parques es altísimo y sus capacidades son muy bajas comparado a centros de refugios de alta capacidad. La capacidad de los parques vecinales se consideró de la misma manera que los centros de refugios de alta capacidad. En total se encontraron 235 parques vecinales. El efecto de los parques vecinales en el modelo de la demanda se explicará en el Capítulo 4.9.



Figura N° 15: Delimitación de parques en el área de estudio (verde) dentro de los TAZ (rojo).
Elaboración propia.

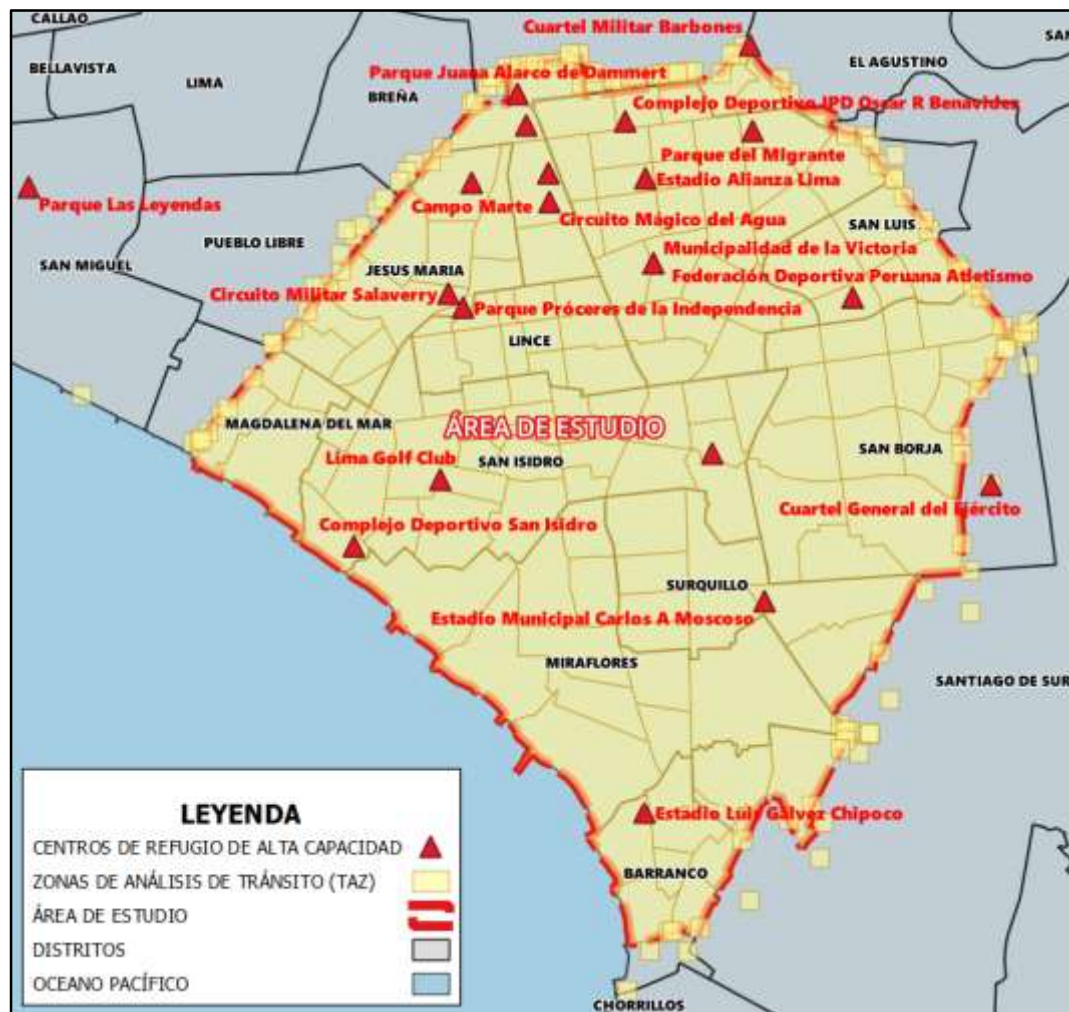


Figura N° 16: Distribución geográfica de los centros de refugios de alta capacidad en el área de estudio. Elaboración propia

A partir de la Figura N° 12, Figura N° 14 y Figura N° 16 se establece la clasificación de cada TAZ según el criterio del Capítulo 2.5.3, el cual establece los criterios en la Tabla N° 2. El resultado de la clasificación de cada TAZ se muestra en la

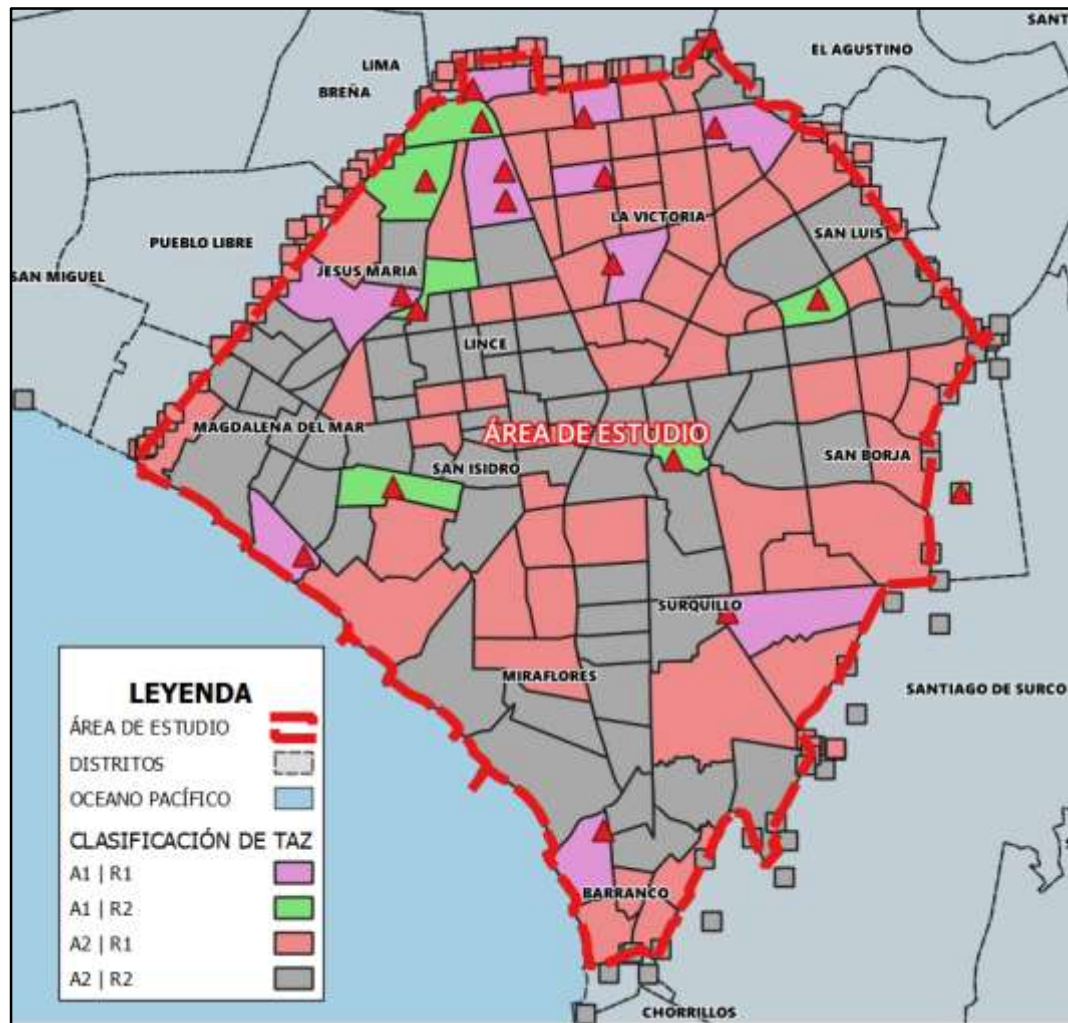


Figura N° 17: Clasificación de TAZ por presencia de atractores y repelentes de viajes. Elaboración propia.

4.5 Desarrollo del área de influencia de centros de refugio con voronoi

En el estado de equilibrio del sistema de tráfico del área de estudio, se considera que los centros de refugios son nuevos puntos de origen para todos aquellos viajes de damnificados que se encuentren cerca, es decir, si un centro de refugio de alta capacidad se encuentra dentro del área geométrica de un TAZ, este TAZ será considerado un nuevo origen para todos aquellos viajes de damnificados que se encuentren más cerca y no posean un centro de refugio de alta capacidad. Vinculado al concepto de la Tabla N° 2, estos TAZ son considerados A1R1 o A1R2, es decir, un TAZ atractor con repelencia y un atractor sin repelencia, respectivamente.

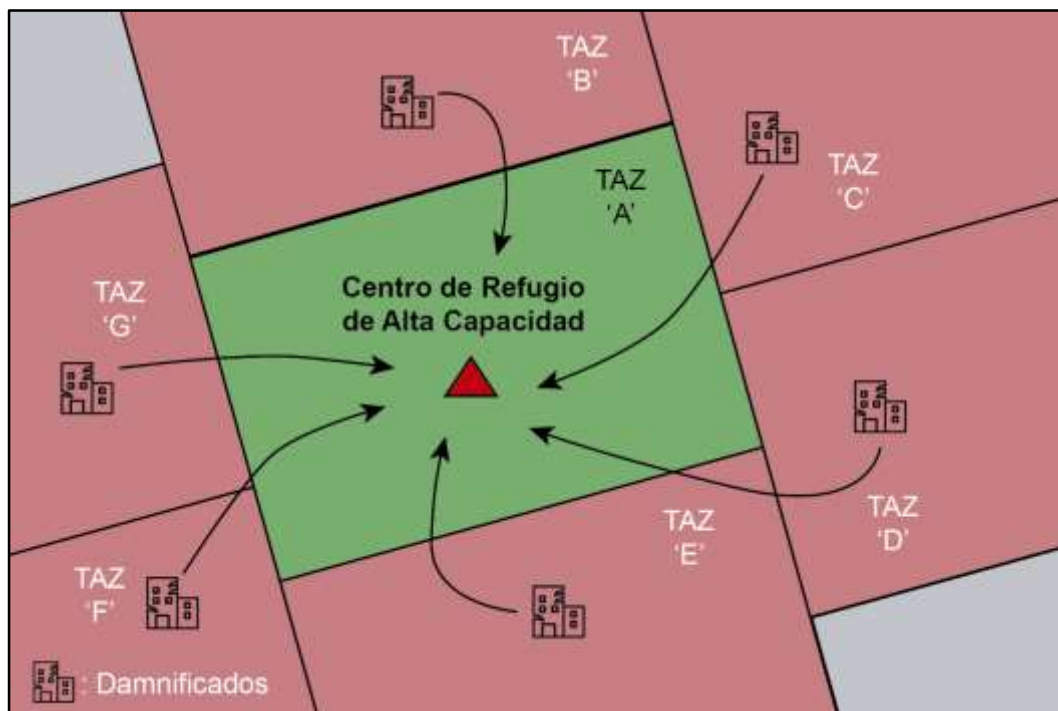


Figura N° 18: Esquema de atracción de los centros de refugios. Elaboración propia

En la Figura N° 18 se observa cómo es el comportamiento de los damnificados alrededor de un centro de refugio de alta capacidad, como se puede observar en la figura, todos los TAZ (B, C, D, E, F y G) clasificados como A2 | R1 (rojo), es decir, no tiene ninguna atracción de viajes pero sí repelencia, por lo tanto, múltiples viajes necesitarán cambiar su origen de su TAZ actual a otro debido a que sus hogares presentan niveles de daño IV o V y serían reemplazados por un Centro de Refugio de Alta Capacidad.

Las posibilidades para escoger un nuevo TAZ de origen son:

- A1 | R1: con presencia de centro de refugio y edificios dañados.
- A2 | R2: con presencia de centro de refugio y sin edificios dañados, en la Figura N° 18 se observa de color verde

Al respecto de los nuevos orígenes, existe un conflicto en el instante de escoger a qué Centro de Refugio de Alta Capacidad asistir, como damnificado, si se encuentran dos refugios muy cercanos, por lo tanto, se utilizaron los polígonos de Thiessen, o también llamado polígonos de Voronoi, con el objetivo de limitar el área de influencia de cada uno de los centros de refugio de alta capacidad según la cercanía entre estos. El área de influencia de cada centro de refugio de alta capacidad se observa en la Figura N° 19.

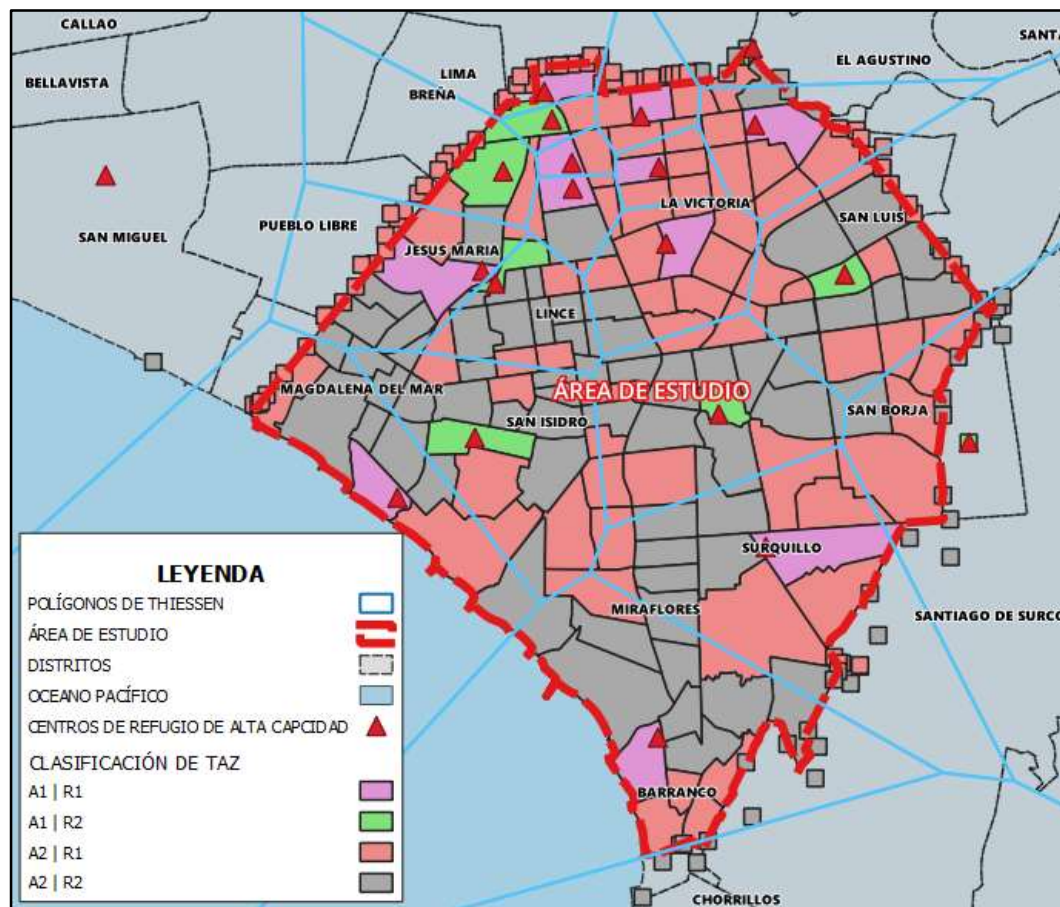


Figura N° 19: Áreas de influencia de cada centro de refugio de alta capacidad en el área de estudio. Elaboración propia

La forma en que se utilizaron los polígonos de Thiessen se visualiza en la Figura N° 20. En la figura se observa que todos los TAZ clasificados como A2 | R1 (rojo) cambian su origen a aquellos TAZ del tipo A1 | R2 (verde) o A1 | R1 (morado) siempre y cuando el centroide de su TAZ original se encuentre dentro del área de influencia de un centro de refugio de alta capacidad. Es decir, en el caso de la figura los TAZ “B” y “H” poseen sus centroides dentro del área de influencia del centro de refugio del TAZ “I”, por lo tanto, los viajes de los damnificados serán originados en el centro de refugio, es decir, se originarán a partir del TAZ “I”. De la misma manera los TAZ “C”, “D” y “A” cambian sus orígenes al TAZ “E”. Finalmente, el TAZ “G” recepciona los viajes del TAZ “F”. En el caso que un TAZ tenga damnificados y a la vez posea un centro de refugio de alta capacidad, los orígenes no cambian ya que los damnificados simplemente utilizarán los centros de refugio y ocuparán cierta capacidad dependiendo del número de estos.

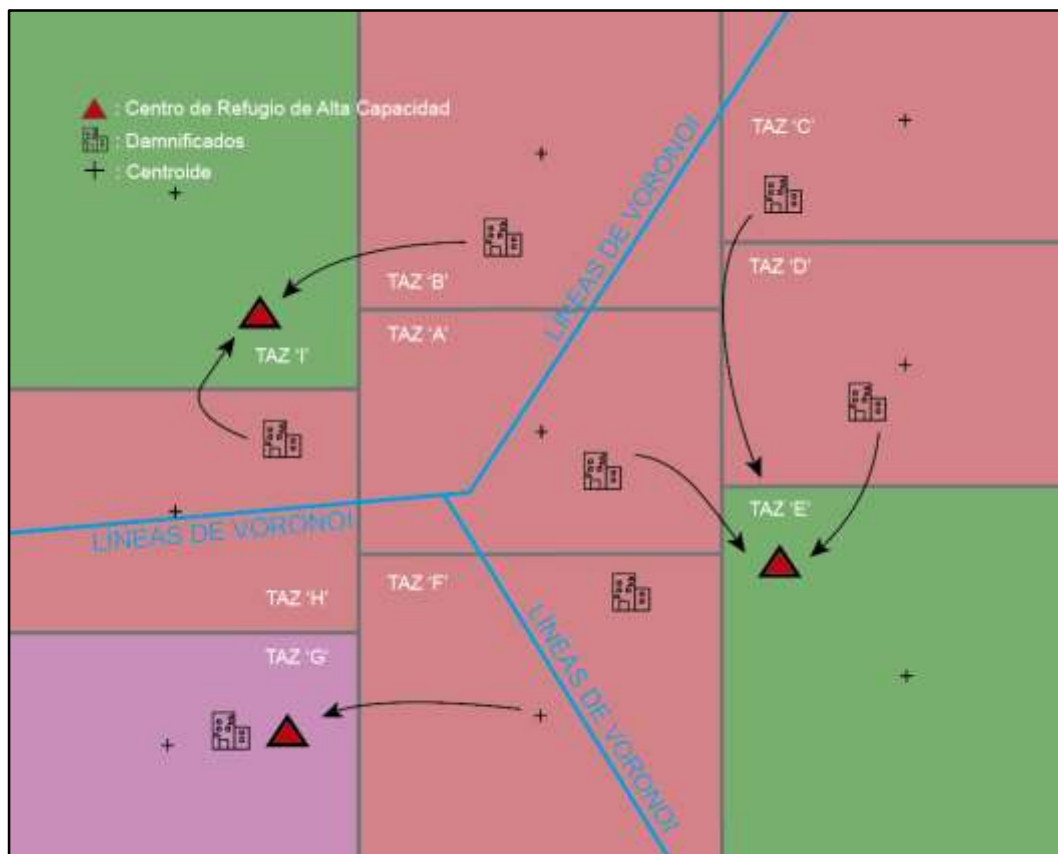


Figura N° 20: Esquema de distribución de damnificados por medio de los polígonos de Thiessen.
Elaboración propia

La razón principal por la cual se utiliza el criterio de los centroides para indicar que un TAZ se encuentra dentro del área de influencia de un centro de refugio, es porque los centroides de cada TAZ representan el punto con mayor actividad y, por lo tanto, con mayor generación de viajes. Estos centroides están conectados a la red a través de “conectores”, links en donde se originan y finalizan todos los viajes simulados.

4.6 Distribución de damnificados

A partir de la construcción de los polígonos de Voronoi, se procedió a contabilizar la cantidad de damnificados presentes en cada TAZ y distribuirlos en cada Centro de Refugio de Alta Capacidad tal como se explicó en el capítulo anterior. Por ejemplo, en la Figura N° 21 se puede observar que La Municipalidad de La Victoria posee diez TAZ dentro de su área de influencia.

Realizando el conteo de damnificados y considerando la Tabla N° 7, se planteó la Tabla N° 8 en donde se muestra la cantidad de damnificados en cada Centro de Refugio de Alta Capacidad.

Tabla N° 8

Cantidad de damnificados recibidos y la capacidad ocupada de cada centro de refugio de alta capacidad. Elaboración propia

Centro de Refugio de Alta Capacidad	Capacidad Máx.	Damnificados	Capacidad en uso
Club de Golf de Lima	249,855	590	0.24%
Estadio Luis Gálvez Chipoco	27,447	3,627	13.21%
Estadio Municipal Carlos A. Moscoso	13,789	11,959	86.73%
Cuartel General del Ejército del Perú	384,630	1,327	0.35%
Federación Deportiva Peruana de Atletismo	109,739	11,029	10.05%
Parque del Migrante José María Arguedas	16,799	24,778	100.00%
Municipalidad de la Victoria	16,055	13,195	82.19%
Estadio Alianza Lima	31,969	27,454	85.88%
Complejo Deportivo IPD Oscar R. Benavides	6,892	22,639	100.00%
Parque Juana Larco de Dammert	12,687	6,914	54.50%
Parque de la Exposición	59,232	15,747	26.59%
Estadio Nacional	32,298	7,857	8.95%
Circuito Mágico del Agua	55,450		
Campo Marte	101,512	5,175	5.10%
Parque Próceres de la Independencia	29,015	442	1.52%
Circuito Militar Salaverry	32,681	4,707	14.40%
Complejo deportivo San Isidro	16,599	1,761	10.61%
Cuartel Militar Barbones	100,626	334	0.33%
TOTAL	1,250,100	182,928	

La tabla anterior indica que dos Centros de Refugios de Alta Capacidad estarán al límite de su capacidad, por lo tanto, el exceso se distribuyó al Centro de Refugio de Alta Capacidad más cercano.

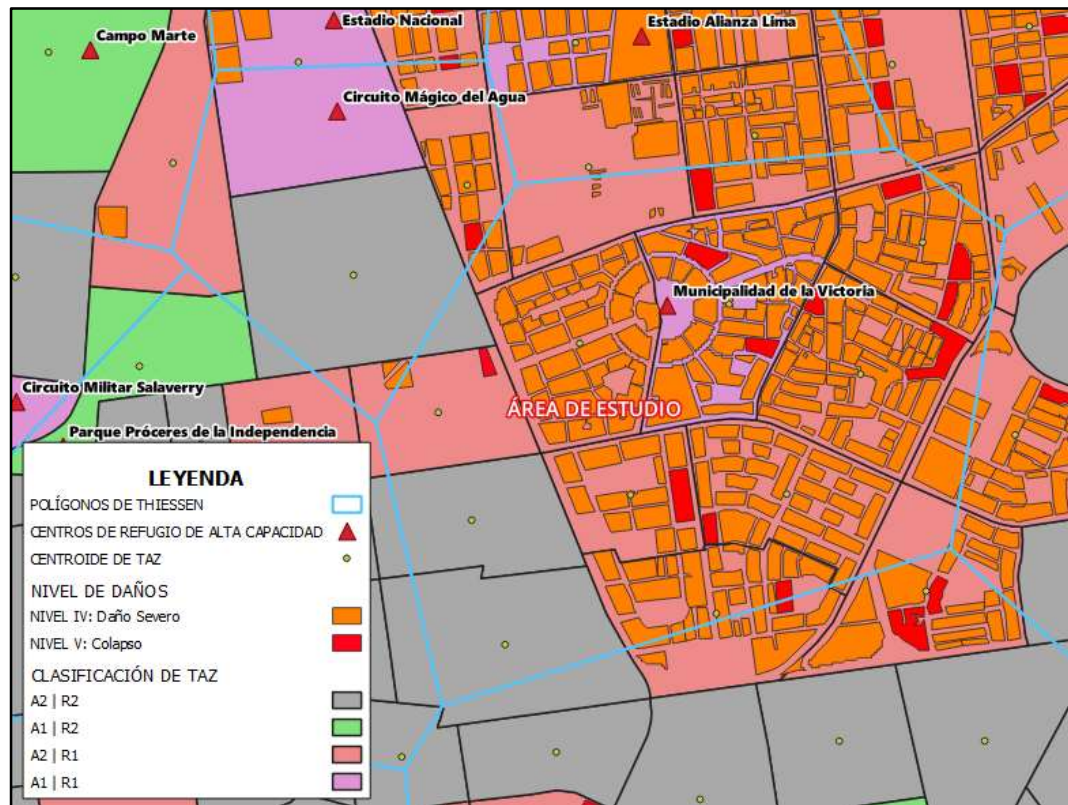


Figura N° 21: Ejemplo del área de influencia del centro de refugio de alta capacidad llamado 'Municipalidad de la Victoria'. Elaboración propia

4.7 Modelo de bloqueo de calles por derrumbe de edificios

A partir del modelo de bloqueo de calles debido al colapso de edificios de Argyroudis et al. (2015) se utiliza la Ecuación N° (37).

$$W_d = \sqrt{W^2 + \frac{2K_v \cdot W \cdot H}{\tan \phi}} - W \quad (37)$$

De la presente ecuación, se evaluaron todas las edificaciones pertenecientes a una manzana con riesgo sísmico de nivel V, es decir, una manzana de color rojo en el mapa de riesgo sísmico. Se obtuvieron los siguientes datos a partir de Google Maps:

- W Profundidad de la edificación
- H Altura de la edificación
- W_s Ancho de retiro (veredas o estacionamientos)

Se utilizaron los siguientes valores para edificaciones en contacto recomendados por Argyroudis et. al (2015) debido a que no es posible predecir de manera precisa el ángulo y la naturaleza del colapso:

- $K_v = 20\%$ Fracción del volumen total que se considera escombros.
- $\phi = 45^\circ$ El ángulo de colapso de la edificación

Se consideraron valores promedios geométricos de las edificaciones y vías del área del estudio, las cuales son:

- Ancho de vía = 2.8m
- Altura de piso = 2.8m

Posteriormente se realizó el cálculo de la distancia de los escombros en las vías para conocer cuántos carriles se bloquearon. Se siguió los siguientes criterios para el bloqueo de calles:

- Si $W_d > W_s$, existirá un bloqueo parcial o total, como mínimo un carril quedará bloqueado.
- El número total de carriles bloqueados se basó en la Ecuación N° (38), considerando que se agrega un carril más bloqueado debido a trabajos de desbloques por parte del estado o de los ciudadanos.

$$Nro. carriles bloq. = Redondeo\ al\ mínimo \left[\frac{W_s + W_r - W_d}{2.8} \right] + 1 \quad (38)$$

- En caso $W_s + W_r < W_d$, se presentará un bloqueo total de la vía.

Se aplica el procedimiento tal como en el siguiente caso:



Figura N° 22: Edificación analizada de La Victoria. Adaptado de Google Maps (2020).

Tabla N° 9
Determinación de carriles bloqueados por colapso de una edificación. Elaboración propia.

Datos	Valores
ID	107
Distrito	La Victoria
W	27.5m
W_s	2.5m
H	19.6m
K_v	20%
ϕ	45°
W_r	11.2m
W_d	3.7m
#Carriles bloqueados	2 carril bloqueado

A partir de la Figura N° 22 se han calculado datos geométricos los cuales son expuestos en la Tabla N° 9, en donde se determina que el número de carriles bloqueados es de dos.

El resultado final después de analizar cada manzana con un nivel de daño de nivel V, se obtiene la Figura N° 23, en donde se aprecian las vías que no han sido bloqueadas (azul) y aquellas que sí (rojo). Este mapa muestra que una numerosa cantidad de vías bloqueadas se encuentran en la Costa Verde, esto debido al efecto del tsunami posterior al sismo de gran magnitud considerado en el presente estudio.

Además, se observa una cantidad muy baja de vías bloqueadas en zonas no costeras, es decir, zonas céntricas. Esto es debido a que los distritos pertenecientes al área de estudio pertenecen a un nivel socioeconómico medio o alto, con excepción del distrito de La Victoria. Por lo tanto, se espera que un gran número de edificaciones de grandes alturas hayan sido construidas considerando diseños sismorresistentes.

Los resultados completos de edificios analizados se encuentran en el Anexo 1 junto con su panel fotográfico en el Anexo 2.

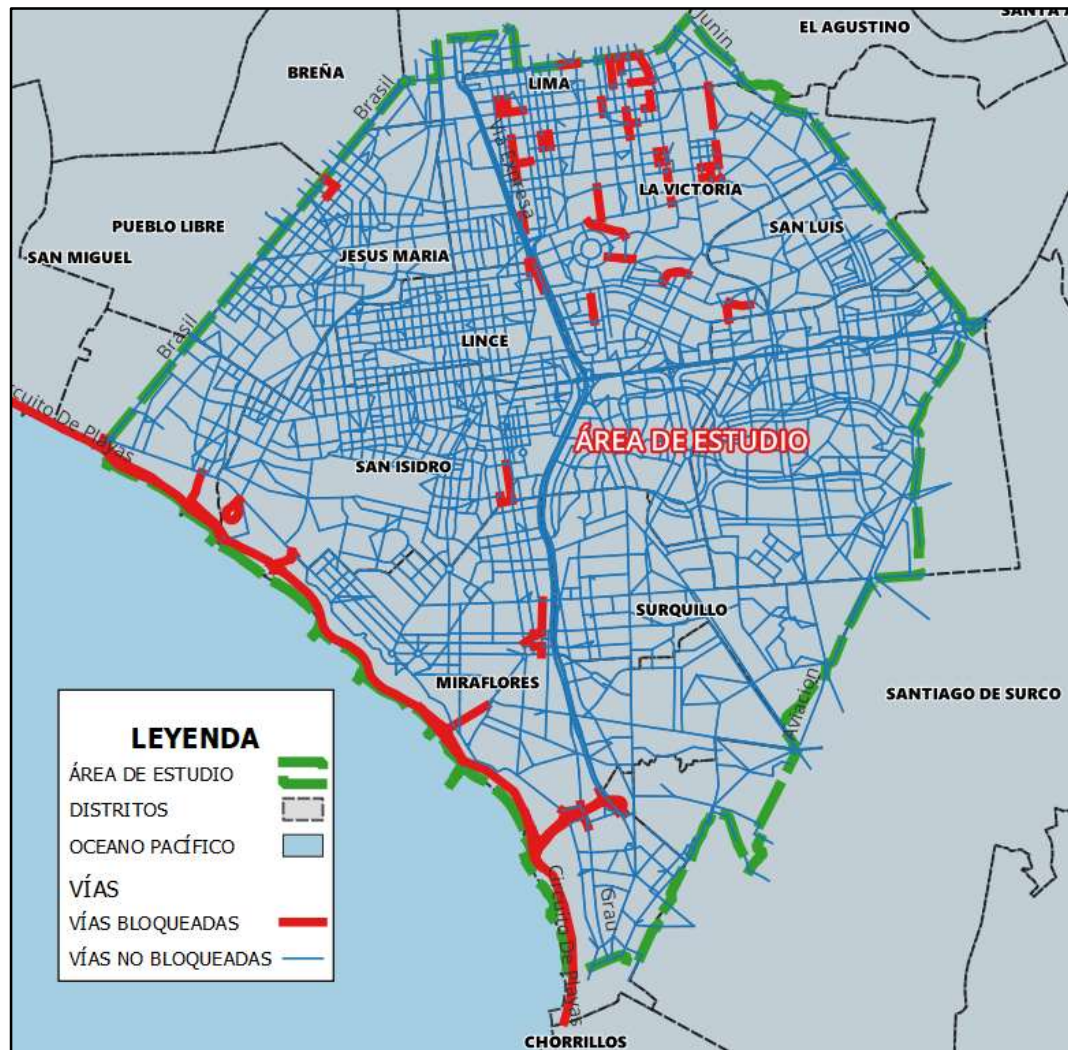


Figura N° 23: Vías bloqueadas debido al colapso de edificios. Elaboración propia.

4.8 Agrupamiento de vías bloqueadas

Debido a la alta demanda computacional requerida para que el modelo en SUMO llegué al equilibrio dinámico de usuario, se planteó la utilización de algoritmos de agrupamiento. El algoritmo que se ha utilizado debido a su simplicidad y la disponibilidad de datos es el algoritmo K-Means. Este algoritmo ha sido aplicado con Python, por lo tanto, se ha utilizado la librería de scikit-learn.

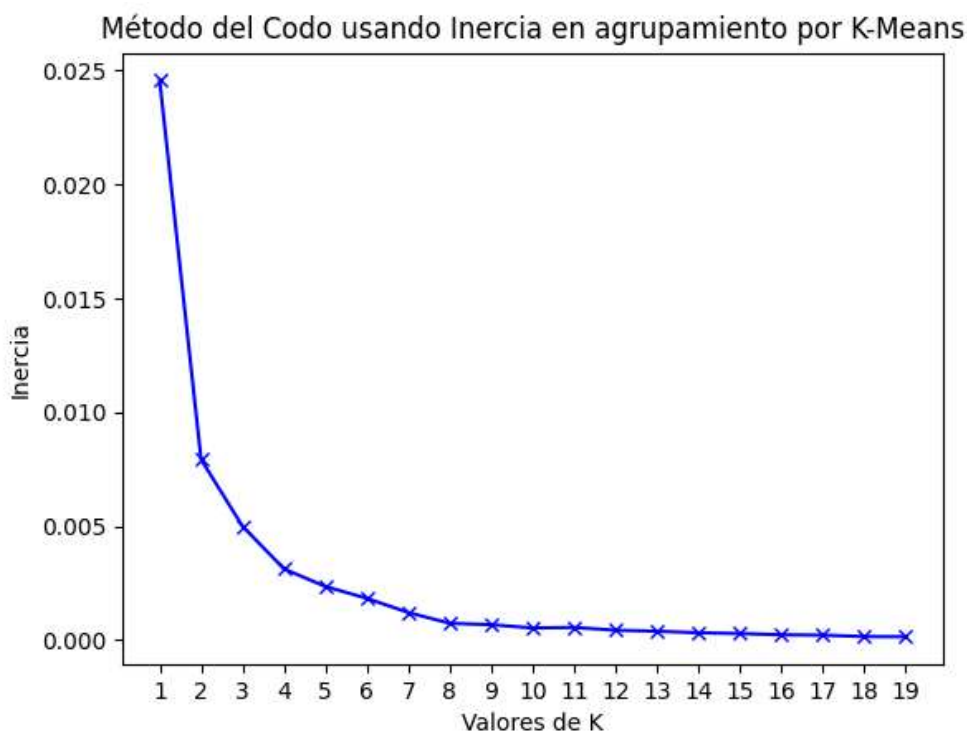
Uno de los datos de entrada del algoritmo es el número de agrupamientos (Clústers en inglés). Existen muchos métodos para definir el número de agrupamientos, en el presente estudio se utilizó un método visual que utiliza los valores de inercia versus el número de agrupamientos.

Tal como se muestra en la Figura N° 24, se ha utilizado el algoritmo de K-Means hasta considerar 19 números de grupos. En esta gráfica se puede visualizar

fácilmente que el valor de inercia se estabiliza o su gráfica realiza un quiebre (forma de un codo) en un número de grupos igual a ocho, por lo tanto, el número de agrupamientos en la red es de ocho (ver codificación del kmeans en el Anexo 4D).

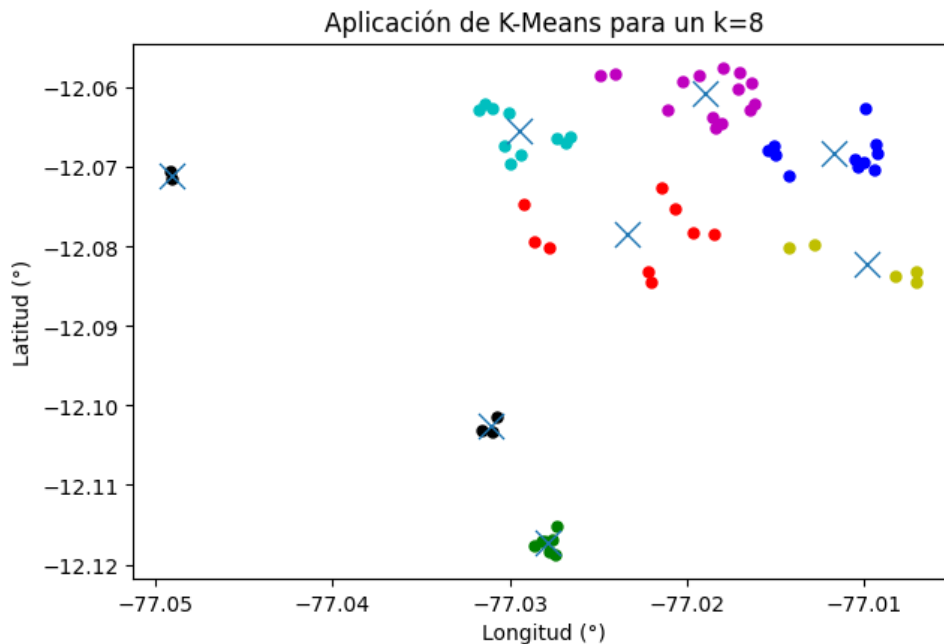
Por otro lado, teniendo en consideración que las vías que se encuentran debajo del acantilado de la Costa Verde quedarán totalmente bloqueadas debido a un tsunami originado por los efectos de un sismo de gran magnitud, se han agrupado todas las vías que serán afectadas por el tsunami en un solo agrupamiento y no se han considerado en la aplicación del algoritmo K-Means.

Figura N° 24: Gráfica de valores de inercia vs valores de número de agrupamientos (k).
Elaboración propia.



Una vez definido el número de agrupamientos, se procede a identificar los agrupamientos en el área de estudio, este proceso se muestra en la Figura N° 25, en el cual se muestran los centroides de las vías bloqueadas en sus respectivas ubicaciones en latitud y longitud.

Figura N° 25: Gráfica de agrupamiento de vías bloqueadas para un $k=8$. Elaboración propia.



Las vías bloqueadas por agrupamiento son las siguientes:

1. Cluster 0: Av. Isabel la Católica, Jr. América, Calle San Cristóbal, Jr. Huánuco, Av. San Pablo, Jr. Italia, Jr. Pisagüa, Jr. Francia y Av. México.
2. Cluster 1: Calle Gral. Suárez, calle Gonzáles Prada, calle Gral. Pershing, Av. Petit Thouars y Calle Narciso de la Colina.
3. Cluster 2: Av. Miguel Grau, prolongación La Mar, Jr. Lucanas, Jr. Huánuco, Jr. García Naranjo, Av. Bauzate y Meza, Jr. América y Jr. Cangallo.
4. Cluster 3: Jr. Canta, Jr. García Naranjo, Av. Iquitos, Av. 28 de Julio, calle Sebastián Barranca, Jr. Hipólito Unanue, Jr. Luna Pizarro y Jr. Renovación.
5. Cluster 4: Jr. Abtao, calle Juan Castro, Jr. Vizcardo y Guzmán, Av. Iquitos, Av. Paseo de la República, Av. Prol. Iquitos y calle Enrique León García.
6. Cluster 5: Av. Andrés Aramburú, Av. Arequipa y Av. Petit Thouars.
7. Cluster 6: Calle Batería Independencia, Av. Del Aire y Jr. Francisco Graña.
8. Cluster 7: Av. Gral. Sta. Cruz y Av. Gral. Eugenio Garzón.
9. Cluster 8: Todas las vías afectadas por un posible tsunami (Costa Verde).

El resultado final se observa en la Figura N° 26.

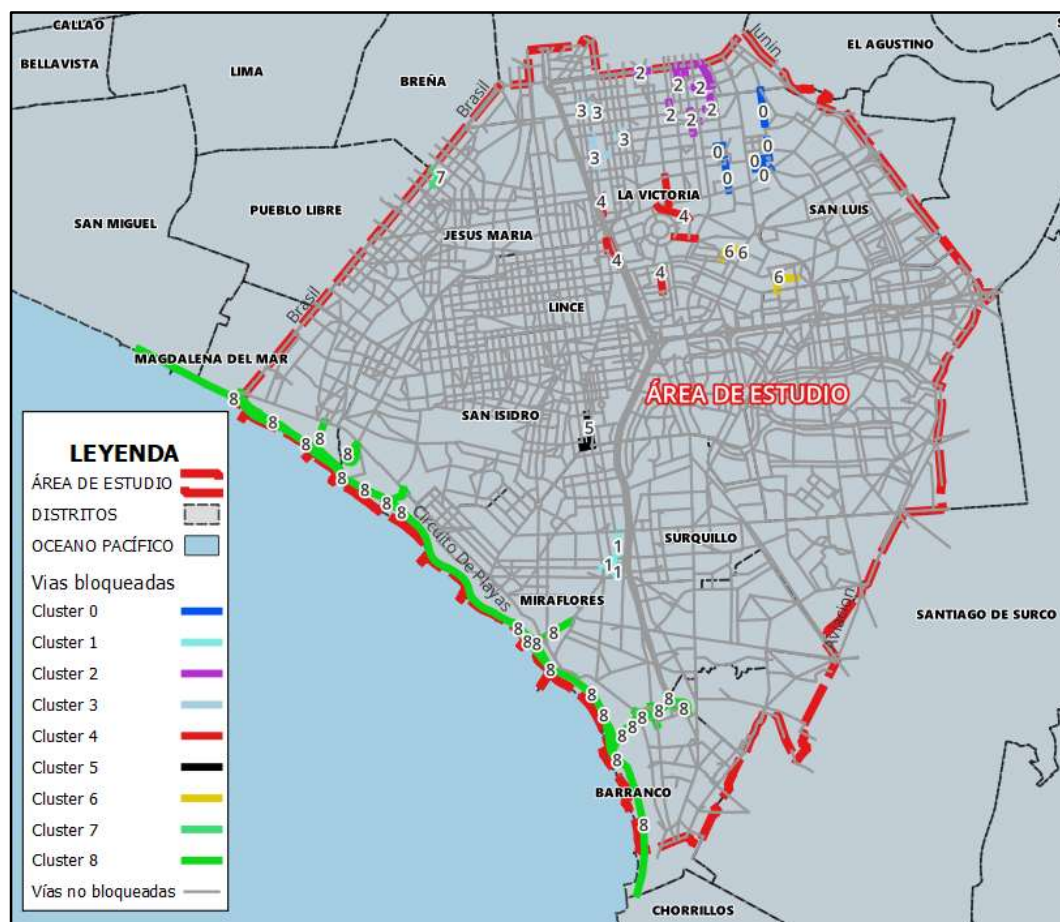


Figura N° 26: Agrupamiento de vías por cluster utilizando el algoritmo K-Means. Elaboración propia.

4.9 Etapa de generación de viajes

La primera etapa del modelo de 4 etapas consiste en la generación de viajes, para esta etapa se han utilizado los datos del Plan Maestro, en donde se especifica los viajes generados y atraídos para cada uno de los 248 TAZ presentes en esta investigación. La siguiente tabla muestra una representación parcial de los viajes generados y atraídos originales del Plan Maestro anteriormente mencionado.

Tabla N° 10
Representación parcial de los viajes generados y atraídos. Adaptado de JICA, 2005

Origen	Destino	V(G)	V(A)
6853	6853	2894	2542
6893	9266	156	383
...	...	...	...
16551	16551	4076	4284

A partir de los datos anteriores, se ha realizado modificaciones a los viajes generados y atraídos del Plan Maestro. Los orígenes fueron distribuidos a los Centros de Refugio de alta capacidad para todos los damnificados, por lo tanto, los viajes generados han cambiado (ver Capítulo 4.4). Se han utilizado las siguientes suposiciones:

- El número de viajes generados es proporcional a la población.
- Los viajes generados en un TAZ A2R1 son enviados a un TAZ A1R1 o A1R2 más cercano, es decir, un TAZ que contenga damnificados y no posea un Centro de Refugio de Alta Capacidad enviará todos los afectados a un TAZ que posea un Centro de Refugio de Alta Capacidad.
- El número total de viajes generados se mantiene, con excepción de la disminución de los viajes de la población herida o muerta debido al sismo.
- Si un TAZ R1 posee parques vecinales con la capacidad suficiente de atender a todos los damnificados, este no generará viajes nuevos a otro TAZ con un Centro de Refugio de Alta Capacidad. En caso contrario, disminuirá el número de viajes generados a otro Centro de Refugio de Alta Capacidad.
- Si un Centro de Refugio de Alta Capacidad llega su límite, los viajes en exceso serán enviados a otro Centro de Refugio de Alta Capacidad más cercano.

A continuación, se muestra un ejemplo de cómo afecta el evento disruptivo sísmico al modelo de generación de viajes:

- Inicialmente, en la etapa de generación de viajes, aún no se posee la información de viajes entre orígenes y destinos, solo la cantidad total de viajes a un origen y también a un destino.

Tabla N° 11
Esquema de una matriz con generación y atracción de viajes. Elaboración propia

TAZ	1	2	3	Total
1	-	-	-	30
2	-	-	-	30
3	-	-	-	35
Total	25	35	35	95

- Posteriormente, si consideramos que 10 viajes generados en el TAZ '1' son enviados al TAZ '2' debido a que este posee un Centro de Refugio de Alta Capacidad, entonces el TAZ '1' disminuye sus viajes generados a 20 y el TAZ '2' aumenta sus viajes generados a 40, de tal forma que la suma total de viajes originados se mantiene constante.

Tabla N° 12

Esquema de una matriz de generación y atracción de viajes afectada por un sismo. Elaboración propia

TAZ	1	2	3	Total
1	-	-	-	20
2	-	-	-	40
3	-	-	-	35
Total	25	35	35	95

- En el caso de los heridos o muertos por el sismo, se han descontado los viajes proporcionalmente al número de la población herida o muerta del total de la población, es decir, el número total de viajes generados disminuye, por lo tanto, para mantener el equilibrio de viajes generados y atraídos de la matriz origen-destino postsismo, se balancearon los viajes atraídos en función del total de los viajes generados.

4.10 Etapa de distribución y elección del modo

En la etapa de distribución, se han balanceado los viajes entre TAZ de manera proporcional a los viajes generados con la finalidad de conservar el balance entre los viajes.

En lo que respecta a la elección modal, se ha conservado la matriz original y se ha utilizado la Unidad Coche Patrón (UCP) en la simulación, tal como se muestra en la Tabla N° 13.

Tabla N° 13

Valor de UCP por topología vehicular. Adaptado del Highway Capacity Manual (2000).

Topología	UCP
Auto	1.00
Bus	3.00
Micro	2.00
Cam. Rural	1.25

Topología	UCP
Camión	2.50
Mototaxis	0.33

4.11 Etapa de asignación de viajes

Se utilizó una asignación dinámica de usuarios, siendo los métodos más simples la utilización de algoritmos de enrutamiento como Dijkstra o A*, sin embargo, estos algoritmos utilizan suposiciones con respecto al tiempo de viaje para cada link de la red, lo que usualmente no se conoce previo a la ejecución de la simulación teniendo en consideración que los tiempos de viaje dependen de la cantidad de vehículos en la red.

Debido a estos problemas, se ha utilizado un software de simulación llamado Simulation Urban Mobility (SUMO) que ofrece distintas herramientas para resolver este problema, siendo una de estas la “Asignación Iterativa”.

4.11.1 Asignación iterativa

SUMO ofrece esta herramienta a través del código en Python `duaiterate.py`, que se utiliza para calcular el equilibrio dinámica del usuario (aproximado).

Este script busca una ruta para cada vehículo de tal forma que cada vehículo no pueda reducir su costo de viaje (en este caso el tiempo de viaje) usando una ruta diferente. Esto se ha realizado iterativamente de la siguiente manera:

1. Llamando a `duarouter` (ver código en el Anexo 4B) para enrutar los vehículos en una red con los últimos costos de links conocidos (comenzando con tiempos de viaje de red vacía a través de OD2Trips, ver codificación en el Anexo 4A).
2. Llamar a SUMO para simular tiempos de viajes “reales” resultado de las rutas calculadas.

El número de iteraciones se ha establecido a través de la metodología usada por Lobo et. al (2020) quienes utilizan las variables: velocidad promedio, tiempo perdido y tiempo de viaje promedio. Según los resultados del escenario base (50 iteraciones), se utilizaron las variables de velocidad promedio, tiempo perdido promedio y tiempo de viaje promedio para la elección visual del número de iteraciones necesarias.

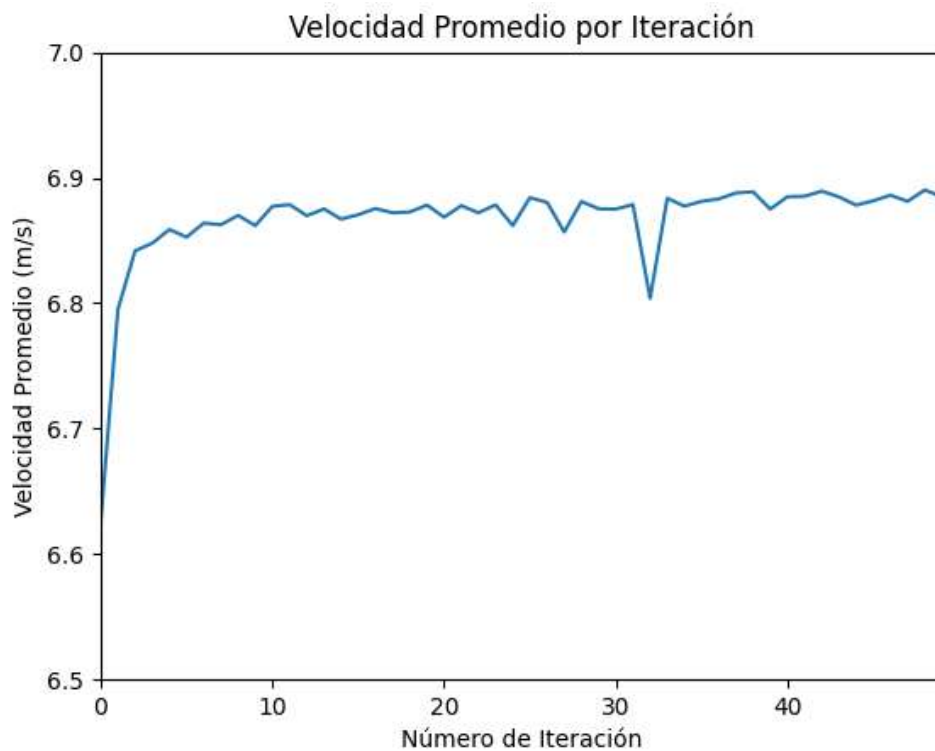


Figura N° 27: Velocidad promedio del escenario base por iteración. Elaboración propia.

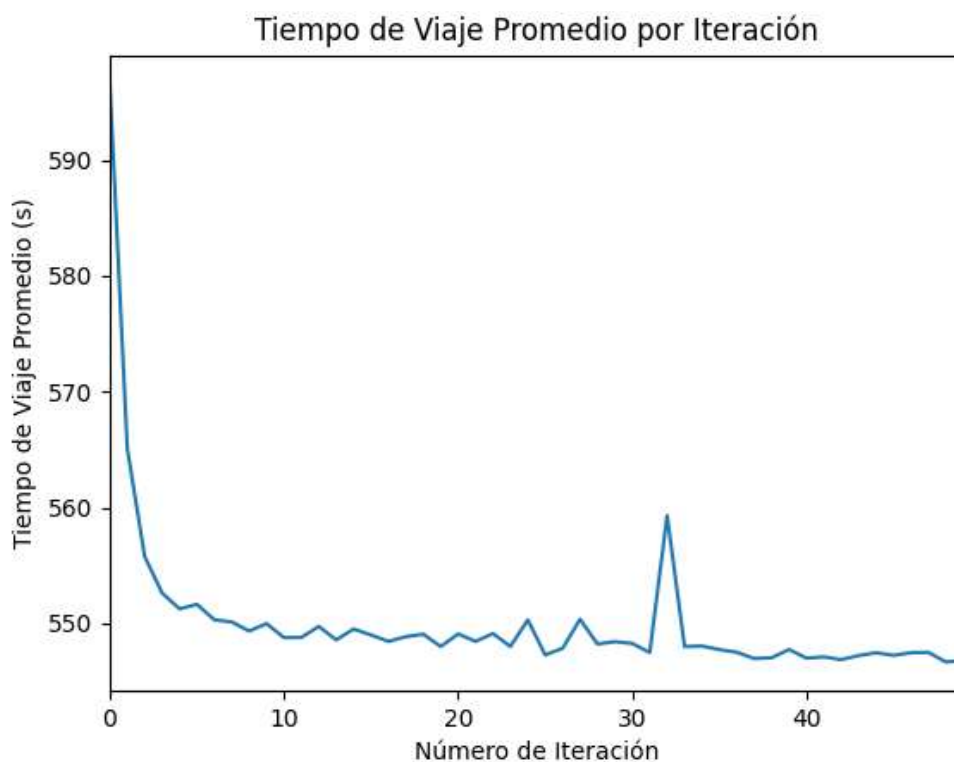


Figura N° 28: Tiempo de viaje promedio del escenario base por iteración. Elaboración propia.

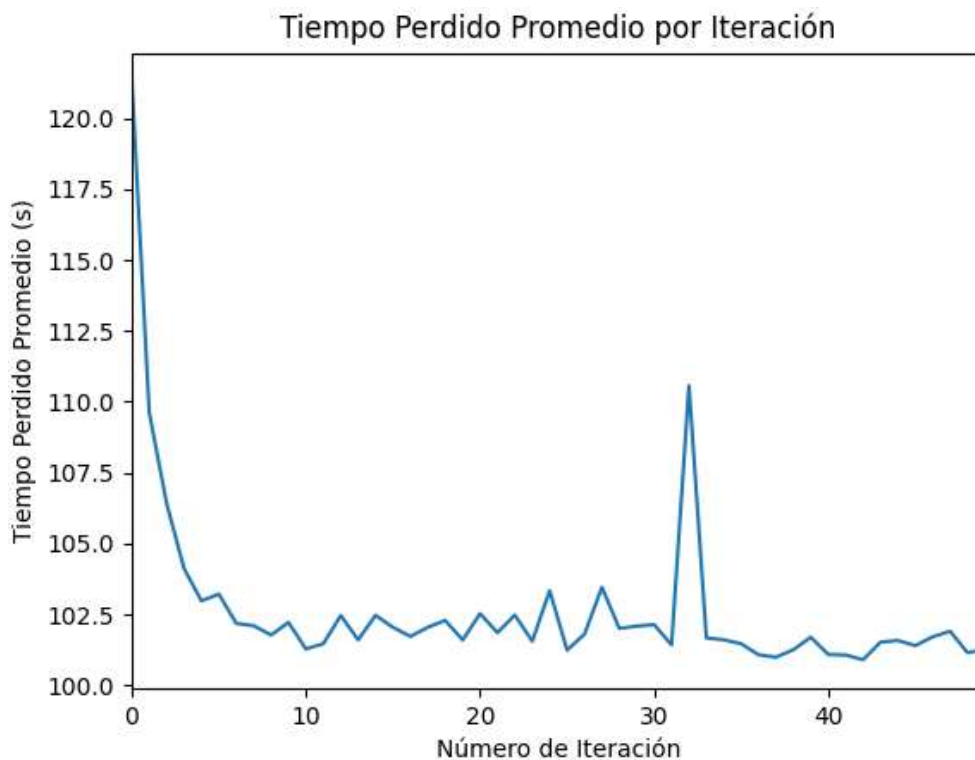


Figura N° 29: Tiempo de viaje perdido promedio del escenario base por iteración. Elaboración propia.

En la Figura N° 27, Figura N° 28 y Figura N° 29 se visualiza rápidamente que existe una estabilización de los promedios alrededor de la iteración número 11, por lo tanto, se seleccionó un número de iteraciones suficientes de 11 para todos los agrupamientos del presente estudio.

A partir de los resultados de la asignación dinámica para todos los agrupamientos, se procedió a evaluar los datos obtenidos por las simulaciones en el equilibrio dinámico. Esta evaluación se muestra en el Capítulo 5.

Capítulo V: Medida de desempeño de la red

5.1 Resultados de simulaciones

Las salidas (output en inglés) disponibles en SUMO están expuestas en la página web de documentación de SUMO. Las salidas más relevantes para el presente estudio se encuentran en dos archivos de salidas disponibles: información basada en vehículos, e información basada en la simulación de la red.

5.1.1 Información basada en vehículos

SUMO ofrece cinco tipos de salidas de información basados en vehículos:

- Información sobre el viaje (trip information): información agregada sobre el trayecto de cada vehículo.
- Información sobre rutas: información sobre los recorridos de cada vehículo durante la simulación
- Resultado de las paradas: información sobre las paradas de los vehículos y la carga y descarga de personas y contenedores.
- Uso de la batería: información sobre el estado de la batería de los vehículos eléctricos
- Información sobre colisiones: información sobre colisiones entre vehículos, y entre vehículos y peatones.

De los cinco tipos de salidas, se ha utilizado la información de rutas. La presentación de estos resultados contiene los parámetros contenidos en la Tabla N° 14.

Tabla N° 14
Parámetros de salida de vehroute-output del SUMO. Adaptado de sumo.dlr.de, 2022.

Nombre	Tipo/Unidad	Descripción
id	(vehículo) id	La identificación del vehículo que describe esta entrada
type	id de tipo de vehículo	La identificación del tipo de vehículo si es diferente de la predeterminada
depart	s	El tiempo que el vehículo fue emitido a la red.
arrival	s	La hora en que el vehículo fue retirado de la simulación (por llegar al final de la ruta)
routeLength	m	La longitud total de la ruta del vehículo
replacedOnEdge	(link) id	El borde en el que estaba el vehículo cuando se reemplazó la ruta descrita

Nombre	Tipo/Unidad	Descripción
replacedAtTime	s	El paso de tiempo de este reemplazo.
edges	[(link) id]	La ruta reemplazada
route edges	[(link) id]	La ruta final del vehículo
exitTimes	[tiempo en s]	El tiempo de salida para cada borde de la ruta o caminata
ended	s	La hora de llegada para la caminata o el paseo (o transbordo/transporte para contenedores)
started	s	La hora de salida de la caminata o la hora en que el vehículo de paseo ha sido ingresado y comienza a conducir nuevamente (también para transbordo/transporte con contenedores)

Además de la información presente en la Tabla N° 14, SUMO también muestra atributos adicionales de cada vehículo como los TAZ de origen y destino.

En adición a estos parámetros, se ha configurado al SUMO para que considere los tiempos de espera de vehículos que esperan en entrar a la red. Estos vehículos no pueden entrar debido a la congestión de los conectores (vías en donde se inician y acaban los viajes). La opción es "vehroute-output.intended-depart" el cual usa la hora de salida prevista en lugar de la hora de salida real (en caso de retrasos en la salida). Los resultados luego de realizar la modificación anterior se muestran en un extracto en la Tabla N° 15 y su codificación en el Anexo 4C.

Tabla N° 15

Ejemplo de datos de salida de vehroute-output. Elaboración propia.

1	<vehicle id="318506" depart="1312.00" departLane="0" departSpeed="9.42" fromTaz="9901" toTaz="16290" speedFactor="0.85" arrival="2131.00">
2	<route edges="7370 7313 7951 7774 [...] -17943"/>
3	</vehicle>

A partir de la información anterior, es posible realizar los cálculos para uno de los índices de desempeños estudiados en el presente estudio: el índice de Nagurney. Este ofrece una forma de conocer el desempeño de una red de manera global a través de la Ecuación N° (35) expuesto en el Capítulo 2.8. Los parámetros

utilizados para este índice son la demanda y desutilidad en el equilibrio para cada origen y destino, además del número de orígenes y destinos. Para la obtención de estos parámetros se utiliza la información de los datos de salida del tipo vehroute-output (ver Tabla N° 15), para su cálculo se realizaron las operaciones mostradas en la Tabla N° 16.

Tabla N° 16
Cálculo de los parámetros del índice de Nagurney. Elaboración propia.

Parámetro	Descripción	Cálculo
w	Par origen-destino	fromTaz - toTaz
d_w	Demanda del par w	Matriz origen-destino
λ_w	Desutilidad del par w	arrival - depart
n_w	Número de pares w en la red.	Matriz origen-destino

5.1.2 Información basada en la simulación de la red

SUMO ofrece tres tipos de salidas de información basados la simulación de la red:

1. Estadísticas de resumen del estado de la simulación: información sobre el estado actual de la simulación (conteo de vehículos, etc.).
2. Estadísticas de resumen de personas del estado de la simulación: información sobre el estado actual de las personas de la simulación (conteo de personas, etc.).
3. Información estadística: estadísticas generales de la simulación (vehículos, teletransportaciones, seguridad, personas, etc.).

De los tres tipos de salidas, se ha utilizado las estadísticas de resumen del estado de la simulación. La presentación de estos resultados contiene los parámetros contenidos en la Tabla N° 17.

Tabla N° 17
Parámetros de salida del summary-output del SUMO. Adaptado de SUMO, 2022.

Nombre	Tipo	Descripción
time	(simulación) s	El paso de tiempo descrito por la entrada.
loaded	#	Número de vehículos que se cargaron desde archivos de entrada hasta este paso de tiempo. Esto puede incluir vehículos con horarios de salida en el futuro.

Nombre	Tipo	Descripción
inserted	#	Número de vehículos insertados hasta el momento (incluido el paso de tiempo informado)
running	#	Número de vehículos que estaban funcionando dentro del paso de tiempo informado
waiting	#	Número de vehículos que esperaban la inserción (no se pudo insertar) dentro del paso de tiempo informado
ended	#	Número de vehículos que han llegado a su destino hasta el momento o que se eliminaron de la simulación (incluido el paso de tiempo informado)
arrived	#	Número de vehículos que han llegado a su destino hasta el momento
halting	#	El número de vehículos en la red con velocidad inferior a 0,1 m/s (que no están esperando en un <stop>).
collisions	#	El número de vehículos que estuvieron involucrados en una colisión.
teleports	#	La cantidad de vehículos en la red que fueron teletransportados (debido a atascos o colisiones)
meanWaitingTime	s	El tiempo medio que todos los vehículos hasta ahora y dentro del paso de tiempo informado tuvieron que esperar para ser insertados; -1 si aún no se ha insertado ningún vehículo
meanTravelTime	s	El tiempo medio de viaje de todos los vehículos que han salido de la simulación dentro del tiempo anterior y el informado; -1 si no se ha eliminado ningún vehículo de la simulación, todavía
meanSpeed	m/s	La velocidad media de todos los vehículos de la red (que no están esperando en un <stop>).
meanSpeedRelative		La velocidad media de todos los vehículos de la red en relación con el límite de velocidad (que no están esperando en un <stop>).
duration	ms	El tiempo de cálculo para ese paso de simulación en milisegundos).

Se muestra un extracto de la información obtenida en la Tabla N° 18.

Tabla N° 18

Ejemplo de datos de salida de summary-output de SUMO. Elaboración propia.

1	<step time="0.00" loaded="3" inserted="2" running="2" waiting="0" ended="0" arrived="0" collisions="0" teleports="0" halting="0" stopped="0" meanWaitingTime="0.00"
---	---

```
meanTravelTime="-1.00" meanSpeed="5.56"
meanSpeedRelative="1.00" duration="31004279"/>
```

Esta información es utilizada para realizar gráficos relevantes de la simulación de cada clúster y, por lo tanto, es información vital para realizar comparaciones entre ellos. El análisis gráfico se mostrará en el siguiente capítulo.

5.2 Gráficos de resultados

5.2.1 Número de vehículos simulados versus el tiempo

SUMO ofrece una amplia gama de datos provenientes de los resultados de las simulaciones, sin embargo, su visualización de manera gráfica requiere de conocimientos de programación debido a la magnitud de datos microscópicos.

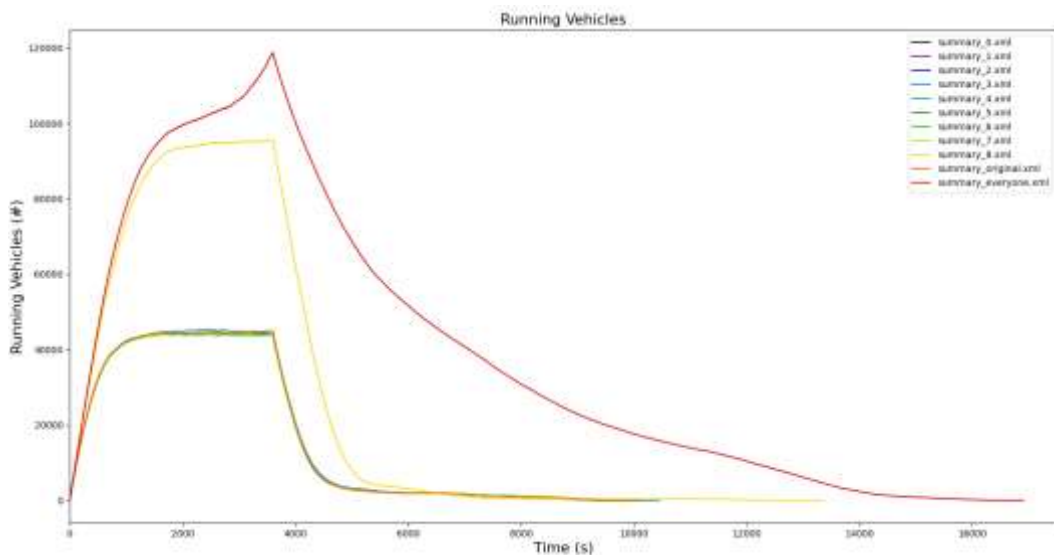


Figura N° 30: Gráfica de número de vehículos vs tiempo para todos los clústeres, el escenario original y el escenario más desfavorable. Elaboración propia.

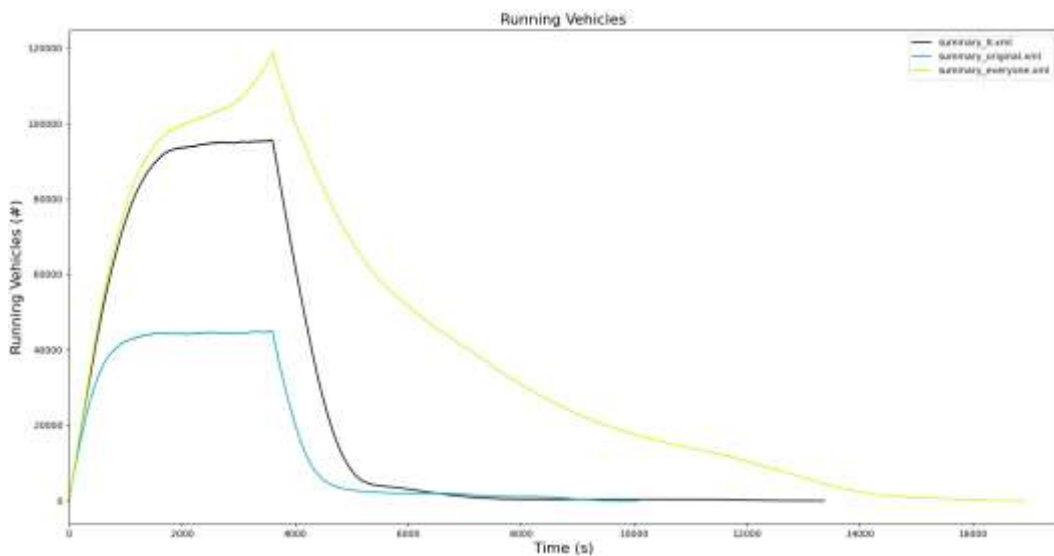


Figura N° 31: Gráfica de casos más relevantes en el estudio: caso de la Costa Verde (clúster 8), escenario original y el escenario más desfavorable. Elaboración propia.

Los desarrolladores del software microscópico han realizado códigos en Python que permiten visualizar de manera sencilla los resultados obtenidos. Entre los resultados más relevantes, se encuentra el número de vehículos simulados por segundo.

En la Figura N° 30 se observa tres curvas diferenciadas, en el cual el rojo (escenario más desfavorable) muestra un número más elevado de vehículos en la simulación, seguido por el amarillo (clúster 8) y finalmente los demás colores (todos los demás clústeres y el escenario original). La interpretación de estas 3 curvas diferenciadas se entiende de la siguiente manera: la curva roja y amarilla muestran que numerosos vehículos se mantienen en la red en una magnitud mayor a las demás curvas, esto quiere decir que los viajes en ambos casos (rojo y amarillo) no pueden completarse tan rápidamente como en los otros casos.

En la Figura N° 31, el cual suprime los clústeres menos relevantes (es decir, solo se muestra el clúster 8) muestra que la extensión de cada curva varía según la intensidad del desastre, siendo: el color verde es el escenario más desfavorable (cierre de todas las vías de todos los clústeres), el negro es el escenario de la costa verde (clúster 8), y el cian es el escenario original (sin sismo). Se observa que el escenario más desfavorable tarda más en disipar los viajes en la red, seguido por el escenario de la Costa Verde y por último del escenario original.

5.2.2 Tiempos de viaje promedio

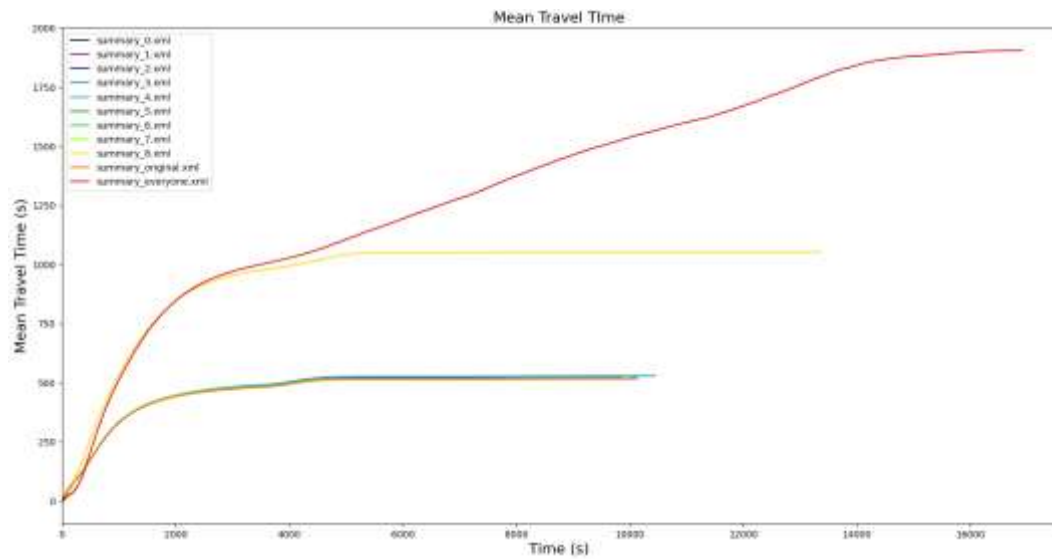


Figura N° 32: Tiempos de viaje promedio vs tiempo de todos los escenarios. Elaboración propia.

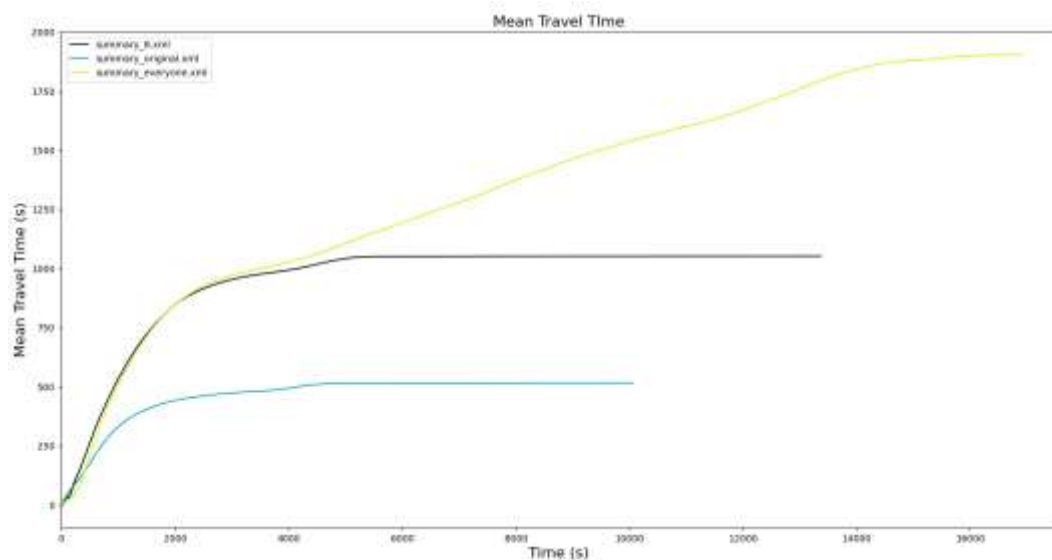


Figura N° 33: Tiempos de viajes promedio vs tiempo de los escenarios más desfavorables. Elaboración propia.

En la Figura N° 32 se observa tres curvas diferenciadas, en el cual: el rojo (escenario más desfavorable) muestra un tiempo promedio de viajes más elevado, seguido por el naranja (clúster 8) y finalmente los demás colores (todos los demás clústeres y el escenario original). La interpretación de estas 3 curvas diferenciadas se entiende de la siguiente manera: las curvas roja y naranja indican que, en estos escenarios, en promedio, los viajes son más extensos en tiempo que los demás escenarios (todos los demás clústeres y el escenario favorable).

En la Figura N° 33Figura N° 31, el cual suprime los clústeres menos relevantes (es decir, solo se muestra el clúster 8) muestra que la extensión de cada curva varía según la intensidad del desastre, siendo: el color verde es el escenario más desfavorable (cierre de todas las vías de todos los clústeres), el negro es el escenario de la costa verde (clúster 8), y el cian es el escenario original (sin sismo). Se observa que aproximadamente a la hora de la simulación (tiempo en el cual ya no se ingresan más vehículos en la red) las curvas negra y cian mantienen una pendiente constante en los tiempos de viaje. Es decir, la red mantiene un nivel de congestión estable. Sin embargo, en el caso del escenario más desfavorable representado por el color verde, se observa que los tiempos de viajes mantienen una pendiente positiva, es decir, el nivel de congestión aumenta con el pasar del tiempo. Esto último se genera debido a una funcionalidad de SUMO, el cual mantiene a los vehículos en espera mientras haya una cola en el link de origen. Esta característica explica el porqué de la pendiente positiva del caso más desfavorable: los vehículos comienzan a entrar más tarde en la red debido a un nivel más alto de congestión en comparación de las demás curvas.

5.2.3 Número de vehículos que han terminado su viaje

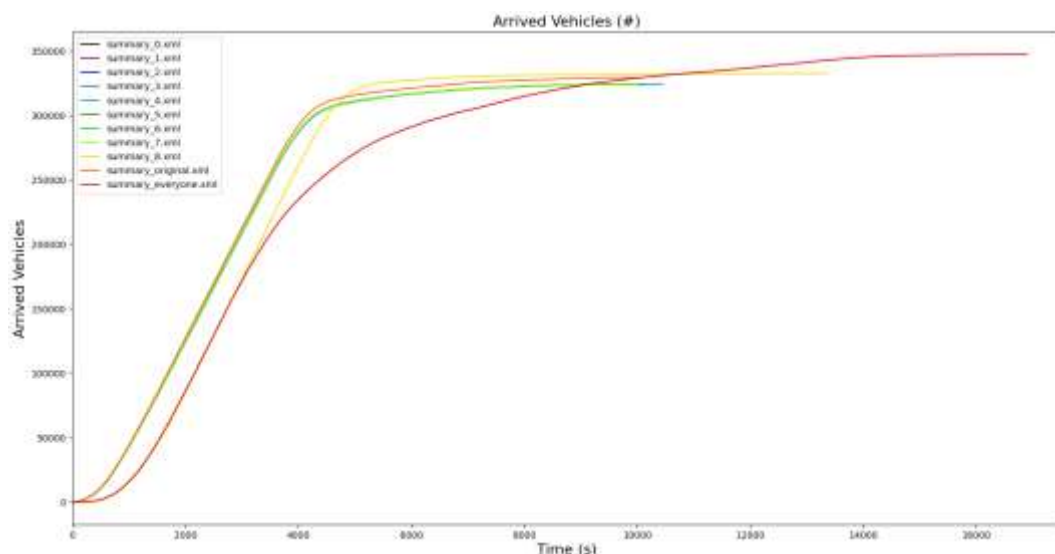


Figura N° 34: Número de vehículos que culminan sus viajes vs tiempo de todos los escenarios.
Elaboración propia.

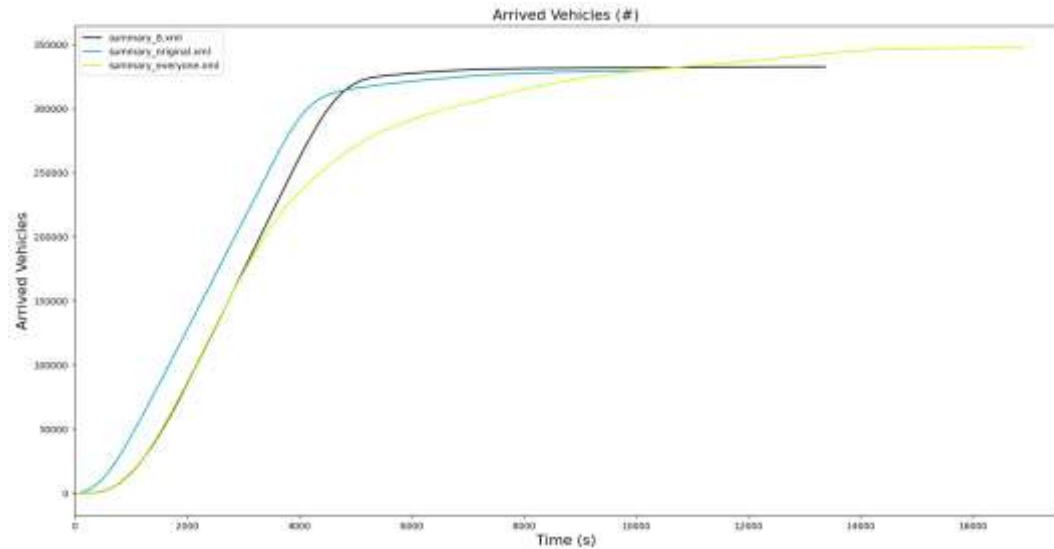


Figura N° 35: Número de vehículos que culminan sus viajes vs tiempo de los escenarios más relevantes. Elaboración propia.

En la Figura N° 34 se observa tres curvas ligeramente diferenciadas, en el cual el rojo (escenario más desfavorable) muestra un número de vehículos con viajes finalizados menor que cambia aproximadamente cuando todos los demás escenarios (todos los clúster menos el 8 y el escenario original) han concluido con todos los viajes de cada vehículo; seguido por el naranja (clúster 8), el cual mantiene una tasa de viajes concluidos similar al escenario más desfavorable; finalmente, todos los demás casos, los cuales mantienen un comportamiento similar al escenario original.

En la Figura N° 35, Figura N° 33, Figura N° 31, el cual suprime los clústeres menos relevantes (es decir, solo se muestra el clúster 8) muestra que la extensión de cada curva varía según la intensidad del desastre. Este comportamiento es similar a los otros dos pares de gráficas anteriores. Lo más destacado de esta gráfica es el comportamiento del caso más desfavorable en comparación de las otras dos curvas, debido a que posee un comportamiento diferente. Este comportamiento indica que, en la simulación, existe un nivel tan alto de congestión que la tasa de viajes finaliza es más baja y, por lo tanto, más lenta en comparación a los otros escenarios.

5.3 Índices de desempeño de la red

Una vez obtenido los datos de las simulaciones de cada agrupamiento en el equilibrio de usuario dinámico, se utilizan los siguientes índices de desempeño de la red:

5.3.1 Índice de Nagurney

Se utilizó un código en Python (ver ANEXO 4E) para realizar el cálculo del índice de Nagurney, obteniendo los resultados para los escenarios patrones y los escenarios por clústeres.

En la Tabla N° 19 se muestran los resultados de los escenarios patrones, los cuales son: red en estado normal y red postsismo con todos los clústeres bloqueados.

Tabla N° 19
Resultados del índice de Nagurney de los escenarios patrones. Elaboración propia.

Escenario	Nagurney (veh/h)	Variación N-Q (%)
Red con bloqueo total	103	-86.86%
Red en estado normal	784	-

En la Tabla N° 20 se muestran los resultados del índice de Nagurney para cada caso de clúster, en donde se puede apreciar índices similares para casi todos los clústeres con excepción del clúster 8, el cual es un escenario en donde las vías de la Costa Verde no se encuentran disponibles debido a efectos del sismo (tsunami).

Tabla N° 20
Resultados del índice de Nagurney por clúster. Elaboración propia.

Escenario	Nagurney (veh/h)	Variación N-Q (%)
Clúster 0	792	1.02%
Clúster 1	814	3.83%
Clúster 2	807	2.93%
Clúster 3	807	2.93%
Clúster 4	810	3.32%
Clúster 5	773	-1.40%
Clúster 6	791	0.89%
Clúster 7	807	2.93%
Clúster 8	80	-89.80%

En la Tabla N° 19 se evidencia significativamente los efectos del sismo en el rendimiento de la red, ya que existe una reducción de la eficiente del 87%. En la Tabla N° 20 se muestra una variación baja con un promedio del 2.41%, sin embargo, el caso del Clúster 8 posee una variación severa con respecto al

escenario original (ver Tabla N° 19), demostrando que la Costa Verde representa un clúster más importante y, por lo tanto, el más importante en la red.

5.4 Capacidad de reserva

La capacidad de reserva es una medida de seguridad que permite garantizar la continuidad del servicio en situaciones extraordinarias al mantener una capacidad adicional.

En el caso de la presente investigación se compararán las capacidades de dos escenarios: ordinario y extraordinario. El primero consiste en el escenario sin presencia de un evento disruptivo extraordinario y en el segundo existe un evento extraordinario disruptivo (sismo de gran magnitud).

Para la obtención de la capacidad de reserva planteada anteriormente, se utiliza los datos de los archivos de tipo “summary” de las simulaciones en SUMO, obteniéndose la Figura N° 36 que compara los vehículos simulados en la red (Running) por segundo (Time) para dos escenarios distintos.

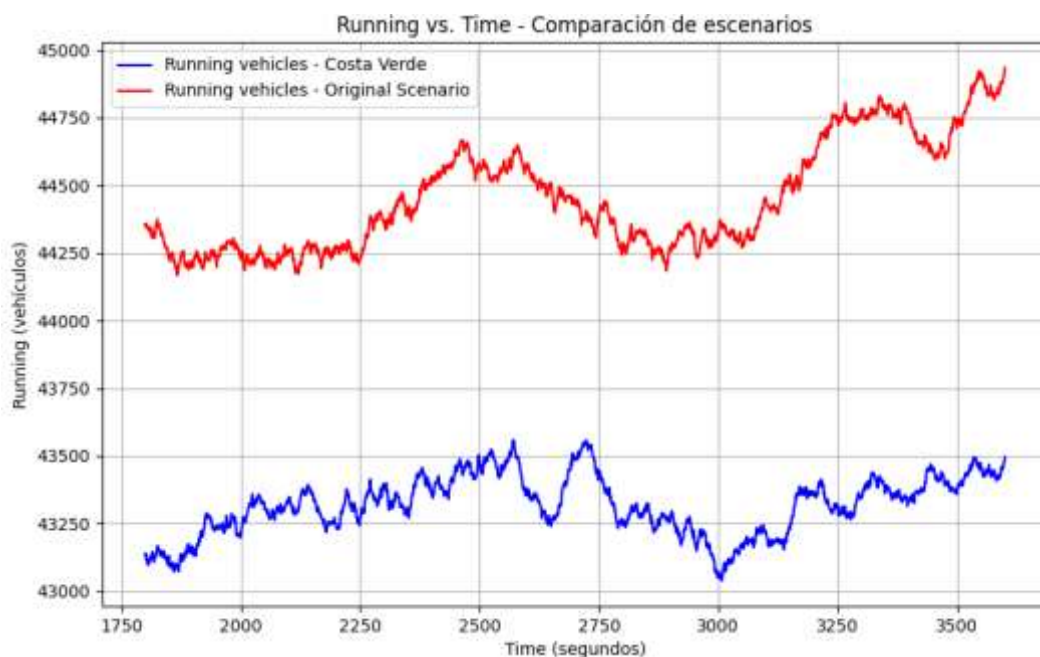


Figura N° 36: Comparación de los vehículos en simulación del escenario de la Costa Verde y el escenario normal en un periodo de tiempo estable. Elaboración propia.

A partir de los datos obtenidos, se realiza el cálculo de la capacidad de reserva como el promedio de las diferencias de las capacidades de los dos escenarios. El resultado obtenido es de 2269.60 vehículos/hora. Debe considerarse que los promedios de vehículos que soporta la red en la hora punta son de 44453 vehículos para el escenario normal y 43318 vehículos para el escenario de la

Costa Verde. Por lo tanto, la capacidad de reserva de la red comparando un escenario normal con un escenario postsismo sería de 2269.60 vehículos/hora.

Conclusiones

La modelación de una red vial de Lima considerando un escenario desfavorable producido por un evento sísmico ha sido posible de realizar a través de un modelo dinámico estocástico de simulación microscópica bajo ciertas consideraciones iniciales según la literatura: nuevas características de los TAZ, agrupamientos en clúster de sectores de la red para simular los efectos del cierre de vías en la red, entre otros. Se puede concluir que los efectos del sismo influyen en las características de los TAZ, convirtiendo algunas de ellas en zonas atractores y otras, en repelentes. Lo cual modifica parcialmente los orígenes de los viajes, sin embargo, no influye en los destinos.

La demanda de cada TAZ posterior a un efecto sísmico esta influenciada por los niveles de daño de cada manzana según el mapa de riesgo sísmico de Lima, es decir, el número de viajes varía en sus orígenes debido a la presencia de damnificados (viviendas que se encuentran en manzanas con niveles de daño de nivel IV) y muertos (viviendas que se encuentran en manzanas con niveles de daño de nivel V); por lo que es necesario crear un escenario probable basado en el Mapa de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Lima al 2020 el que requiere la adaptación de la teoría de extensión de escombros de Argyroudís (2010), el cual proporciona relaciones entre la geometría de la edificación y la extensión de sus escombros ante el eventual colapso por el sismo.

El cálculo de los costos del escenario probable se subdivide en diferentes escenarios para una mejor evaluación. Los escenarios probables se han formado a través de agrupamientos en clústeres de grupos de vías bloqueadas que se encuentran geográficamente más cerca. Esto se realizó a través del algoritmo K-Means utilizado en Machine Learning, los cuales son útiles para la jerarquización de los sectores de acuerdo al daño.

Los escenarios probables generados son nueve en su totalidad para el área de análisis, sin embargo, se ha simulado también el escenario original y el escenario más desfavorable (todos los clústeres bloqueados a la vez). Los resultados muestran un comportamiento similar al escenario base entre los clústeres con excepción del octavo clúster.

Los escenarios de los clústeres del 0 al 7 (todos los clústeres que se encuentran en el interior del área de estudio) muestran un comportamiento similar al escenario original. Igualmente, el índice de Nagurney, que indica el número de vehículos por

hora que la red puede procesar, manifiesta valores similares para los escenarios anteriormente mencionados.

El escenario del clúster 8 (Costa Verde) se muestra como el escenario más desfavorable con un valor de índice de Nagurney de 80 veh/h, en comparación del escenario original que es de 784 veh/h. Esto demuestra que el efecto de la pérdida de la Costa Verde sobre el tráfico en el área de estudio es devastador, debido a que disminuye la eficiencia de la red a su décima parte aproximadamente. Además, se evidencia que el índice de Nagurney es un buen índice para conocer una idea cualitativa del estado de la red.

La capacidad de reserva muestra una capacidad necesaria de 2269.60 vehículos/hora en la red para poder soportar un evento disruptivo extraordinario del tipo sísmico de gran magnitud. También indica que la capacidad de la red recuperará su estado anterior al sismo aproximadamente si se recuperan las vías de la Costa Verde o si se realiza una intervención para los flujos que circulaban por sus vías.

A partir del escenario sin circuito de playas Costa Verde se concluye que la disminución total o parcial del número de los arcos de red empleados en caminos importantes de la zona en estudio es inversamente proporcional al tiempo de viaje en la zona, lo cual se pone de manifiesto a través del índice de Nagurney.

Recomendaciones

La presente investigación proporciona una metodología para mostrar los efectos de un sismo a una red de transporte, está basada en teoría de riesgo y metodología propuesta en Flores (2018), con la que se puede calibrar de manera correcta redes de transporte, por lo que se recomienda su empleo para casos sísmicos.

Para obtener resultados globales para todo Lima se recomienda el empleo de muestreos aleatorios estratificados e incluir nuevas encuestas origen-destino para la replicabilidad del modelo.

Se recomienda el empleo de otros métodos de Machine Learning como Spectral Clustering para reagrupar los sectores de daños por sismo en modelos de redes de transporte.

Referencias bibliográficas

Adebisi, A. (2017). A review of the difference among macroscopic, microscopic and mesoscopic traffic models. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11508.65929>

Agencia de Cooperación Internacional de Japón [JICA]. (2005). Plan Maestro de Transporte Urbano para el Área Metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú.

Alvarez, P., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., Wießner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*. Recuperado de: <https://elib.dlr.de/124092/>

Arias, F. (2012). El Proyecto de Investigación. (6ª ed.). Venezuela: Editorial Episteme.

Argyroudis, S. (2010). Contribution to seismic vulnerability and risk of transportation networks in urban environment (Tesis de doctorado). Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

Argyroudis, S., Selva, J., Gehl, P., & Pitilakis, K. (2015). Systemic seismic risk assessment of road networks considering interactions with the built environment. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30(7), 524–540. <https://doi.org/10.1111/mice.12136>

Balestrini, M. (2006). Como se Elabora el Proyecto de Investigación. (7ª ed.). Venezuela: BL Consultores Asociados.

Berdica, K. (2002). An introduction to road vulnerability: What has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9(2), 117–127. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00011-2)

Cal y Mayor, R., & Cárdenas, J. (2019). Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y Aplicaciones. 9a ed. México: Alfaomega Grupo Editor.

- Chang, L., Elnashai, A. & Spencer, B. (2012). Post-earthquake modelling of transportation networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(10), 893–911. <https://doi.org/10.1080/15732479.2011.574810>
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres [CISMID]. (2016). Estudio de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio, ubicada en la municipalidad distrital de Santiago de Surco.
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres [CISMID]. (2018). Estudio de microzonificación sísmica y análisis de riesgo en la zona de estudio ubicada en el distrito de Pueblo Libre.
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres [CISMID]. (2019). Análisis de Riesgo en Zonas Urbanas del Distrito de San Borja.
- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Ertugay, K., Argyroudis, S., & Düzgün, H. (2016). Accessibility modeling in earthquake case considering road closure probabilities: A case study of health and shelter service accessibility in Thessaloniki, Greece. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 17, 49–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.03.005>
- Flores, G. (2018). *Hacia una gestión del tráfico como medio para incrementar la resiliencia de la logística urbana. Caso: Vía Expresa de Av. Paseo de la República, Lima*. (Protocolo doctoral). Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Flores, G., Montenegro, W., Cárdenas, P., Escriba, D., Lengua, L. & Neira, N. (2021). *Estudio de la influencia de la conectividad en los principales atributos de resiliencia física de un sistema vial durante eventos disruptivos ordinarios*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Gawron, C. (1999). Simulation-based traffic assignment: computing user equilibria

- in large street networks [Doctoral dissertation]. University of Cologne.
Recuperado de: <https://sumo.dlr.de/pdf/GawronDiss.pdf>
- Gerón, A. (2020). Aprende Machine Learning con Scikit-Learn, Keras y TensorFlow. (2ª ed.). España: Anaya Multimedia.
- Golla, A. P. S., Bhattacharya, S. P., & Gupta, S. (2020). The accessibility of urban neighborhoods when buildings collapse due to an earthquake. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102439. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102439>
- Goretti, A., & Sarli, V. (2006). Road network and damaged buildings in urban areas: Short and long-term interaction. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(2), 159–175. <https://doi.org/10.1007/s10518-006-9004-3>
- González, C., & Sarmiento, I. (2009). Modelación de la distribución de viajes en el Valle de Aburrá utilizando el modelo gravitatorio. *DYNA*, 76(158), 199–207.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2010). Metodología de la Investigación. (5ª ed.). México: The McGraw-Hill.
- Instituto Nacional de Defensa Civil [INDECI]. (2017). *Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8Mw*. Recuperado de <https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201711231521471-1.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2017). *Resultados Definitivos de los Censos Nacionales 2017*. Recuperado de: <https://censo2017.inei.gob.pe/publicaciones/>
- Jones, S. (1981). Accessibility Measures: A Literature Review. TRRL Report 967, *Transport and Road Research Laboratory*.
- Kiremidjian, A., Moore, J., Fan, Y. Y., Yazlali, O., Basoz, N., & Williams, M. (2007). Seismic risk assessment of transportation network systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 11(3), 371–382. <https://doi.org/10.1080/13632460701285277>.

- Krauß, S., Wagner, P. & Gawron, C. (1997). Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow. *Physical Review E*. 55. 5597-5602. Recuperado de: <https://SUMO.dlr.de/pdf/sk.pdf>
- Lighthill, M & Whitham, G. (1955). A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proceedings of the Royal Society of London*, 229, 317-345. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1955.0089>.
- Lindell, M., Lu, J., & Prater, C. (2012). Household Evacuation Decision Making in Response to Hurricane Lili. *Natural Hazards Review*, 13(4), 283–296. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)nh.1527-6996.0000074](https://doi.org/10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000074)
- Lobo, S., Neumeier, S., Fernandez, E. & Facchi, C. (2020). InTAS – The Ingolstadt Traffic Scenario for SUMO. *SUMO User Conference 2020*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.11995>
- Mansouri, B., Ghafory-Ashtiany, M., Amini-Hosseini, K., Nourjou, R. & Mousavi, M. (2008). Building Seismic Loss Model for Tehran. *Earthquake Spectra*, 26(1), 153-168. <https://doi.org/10.1193/1.3280377>
- Moriarty, K., Ni, D. & Collura, J. (2007). Modeling traffic flow under emergency evacuation situations: current practice and future directions. *The 86th Transportation Research Board Annual Meeting, May*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/228359452>
- Municipalidad Distrital de Breña. (2015). Mapa de ubicación de zonas seguras, refugio temporal, hospital de emergencia y rutas de evacuación en caso de sismo.
- Municipalidad Distrital de Chorrillos. (s.f.). Mapa de zona de refugio.
- Municipalidad Distrital de Jesús María. (2017). Plan de Contingencias Frente a Sismos de Jesús María.
- Municipalidad Distrital de La Victoria (2015). Plan de Contingencia Ante Sismos e Incendios.

Municipalidad Distrital de Miraflores (s.f.). Almacenes soterrados y puntos de reunión.

Municipalidad Distrital de San Miguel. (2015). Plan de rehabilitación ante riesgo de desastres.

Nagurney, A. & Qiang, Q. (2007). A network efficiency measure for congested networks. EPL, 79(3). <https://doi.org/10.1209/0295-5075/79/38005>

National Research Council. (2010). Highway Capacity Manual (HCM). *Transportation Research Board*.

Nojima, N., & Sugito, M. (1927). Simulation and Evaluation of Post-Earthquake Functional Performance of Transportation Network. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Recuperado de: https://www1.gifu-u.ac.jp/~nojima/pdf/2000_12wcee_nojima_paper.pdf

O'Flaherty, C. (1997). Transport Planning and Traffic Engineering.

Ortúzar, J. & Willumsen, L. (2011). Modelling Transport.

Ortúzar, J. & Willumsen, L. (2007). Modelado de transporte.

Patrikkson, M. (2015). The Traffic Assignment Problem: Models & Methods. Utrecht, Netherlands: Dover Publications.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 12(85). 2825-2830. Recuperado de: <https://jmlr.csail.mit.edu/papers/v12/pedregosa11a.html>

Pereira Machado, D. (2020). *Microscopic Traffic Assignment under Dynamic Demand*.

Renda, E., Rozas, M., Moscardini, O. & Patricia, N. (2017). Manual para la elaboración de mapas de riesgo. (1^a ed.). Argentina: Ministerio de Seguridad

de la Nación.

Richards, P. (1956). Shock Waves on the Highway. *Operations Research*. 4(1), 42-51. <https://doi.org/10.1287/opre.4.1.42>.

Santarelli, S., Bernandini, G. & Quagliarini, E. (2018). Earthquake building debris estimation in historic city centres: From real world data to experimental-based criteria. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.05.017>

Secretaría de Protección Civil y Abordaje Integral de Emergencias y Catástrofes (2017). Manual para la Elaboración de Mapas de Riesgo. (1ª ed.). Argentina: Ministerio de Seguridad de la Nación.

Selltiz, C., Wrightsman, L. & Cook, S. (1980). Research Methods in Social Relations. *Teaching Sociology*, 5(3), 315-317. <https://doi.org/10.2307/1317214>

Shen, Z., Pannala, J., Rai, R. & Tsoi, T. (2008). Modeling Transportation Networks During Disruptions and Emergency Evacuations. *UC Berkeley: University of California Transportation Center*, 15(4), 250–260. <https://doi.org/10.11436/mssj.15.250>

Singh, A., Bhattacharya, S., & Gupta, S. (2020). The accessibility of urban neighborhoods when buildings collapse due to an earthquake. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102439. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102439>

Soltani, A., Ardalan, A., Boloorani, A., Haghdoost, A. & Hosseinzadeh-Attar, M. (2014). Site selection criteria for sheltering after earthquakes: a systematic review. *PLOS CURR*. 10.1371/currents.dis.17ad1f98fb85be80785d0a81ced6a7a6

Soltani, A., Ardalan, A., Boloorani, A., Haghdoost, A. & Hosseinzadeh-Attar, M. (2015). Criteria for Site Selection of Temporary Shelter after Earthquakes: a Delphi Panel. *PLOS CURR*. 10.1371/currents.dis.07ae4415115b4b3d71f99ba8b304b807

Tang, Y., & Huang, S. (2019). Assessing seismic vulnerability of urban road networks by a Bayesian network approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 77, 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.003>

United Nations. (2007). *Report of the United Nations High Commissioner for Refugees*. Nueva York. Recuperado de:
<https://www.unhcr.org/media/report-united-nations-high-commissioner-refugees-2007-covering-period-1-january-2007-30-june>

Wardrop, J. G. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Road Engineering Division Meeting*, 1(3), 325–362.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1680/ipeds.1952.11260>.

Zavala, C. & Aguilar, A. (2004). “SRSND – Simulador Respuesta Sísmica y Nivel de Daño”. Perú: CISMID-FIC-UNI.

Anexos

Anexo 1: Lista de bloqueo de vías por edificio con un nivel de daño V.....	102
Anexo 2: Panel fotográfico de edificios que bloquean vías.....	102
Anexo 3: Especificaciones geométricas de carpas de defensa civil.....	102
Anexo 4: Códigos de programación.....	102

Anexo 1:

Lista de bloqueo de vías por edificio con un nivel de daño V

ID	Distritos	Pisos	W (m)	Ws (m)	Orient.	Wd (m)	#Carriles bloqueados
1	Jesús María	40	70	15	W	19.64	3
2	Jesús María	4	53	1.25	E	2.19	2
3	Jesús María	8	30	2.5	N	4.19	2
4	La Victoria	3	16	1.5	N	1.60	2
5	La Victoria	6	21	1.5	S	3.13	2
6	La Victoria	7	18	3	W	3.57	2
7	La Victoria	5	12.75	2.5	W	2.55	2
8	La Victoria	4	24	2	N	2.14	2
9	La Victoria	4.5	8.5	2	N	2.23	2
10	La Victoria	6	14	2.5	S	3.03	2
11	La Victoria	7	27.5	2.5	W	3.67	2
12	La Victoria	9	23	2.5	E	4.58	2
13	La Victoria	4	9	1	S	2.01	2
14	La Victoria	9	16	2.5	N	4.43	2
15	La Victoria	5	17	2.5	S	2.60	2
16	La Victoria	6	4	2	W	2.55	2
17	La Victoria	7	18	2.5	E	3.57	2
18	La Victoria	6	10	2	W	2.93	2
19	La Victoria	6	8.5	1.5	S	2.87	2
20	La Victoria	5	20	1	N	2.63	2
21	La Victoria	4	13	1	S	2.07	2
22	La Victoria	4	13	1	E	2.07	2
23	La Victoria	5	8	1	E	2.43	2
24	La Victoria	5	14	2	S	2.57	2
25	La Victoria	3	7.5	1	E	1.52	2
26	La Victoria	3	13	1	N	1.58	2
27	La Victoria	4	13	2	W	2.07	2
28	La Victoria	4	13	1	N	2.07	2
29	La Victoria	7	65	2	W	3.81	2
30	La Victoria	6	16	1	E	3.07	2
31	La Victoria	4	8.5	1	W	2.00	2
32	La Victoria	5	32	2.5	W	2.69	2

ID	Distritos	Pisos	W (m)	Ws (m)	Orient.	Wd (m)	#Carriles bloqueados
33	La Victoria	4	10	1	E	2.03	2
34	La Victoria	4	10	1.5	N	2.03	2
35	La Victoria	5	30	1.5	E	2.68	2
36	La Victoria	3.5	15	1.5	W	1.85	2
37	La Victoria	3	21	1.5	S	1.62	2
38	La Victoria	5	10	2	W	2.49	2
39	La Victoria	5	14	2	W	2.57	2
40	La Victoria	5	12	2.5	N	2.53	2
41	La Victoria	5	28	2	W	2.67	2
42	La Victoria	8	25	3	S	4.14	2
43	La Victoria	5	17	2	W	2.60	2
44	La Victoria	6	23	1	W	3.14	2
45	La Victoria	6	10	2	E	2.93	2
46	La Victoria	5	21	2.25	N	2.63	2
47	Lince	4	15	2	W	2.09	2
48	Lince	8	15	3	E	3.96	2
49	Miraflores	3	18	1	E	1.61	2
50	Miraflores	2	27	1	N	1.10	2
51	Miraflores	3	14	1	E	1.59	2
52	Miraflores	5	25	2	S	2.66	2
53	Miraflores	5	20	1.5	E	2.63	2
54	Miraflores	3	27	1.5	S	1.63	2
55	San Isidro	6	17	2.5	SE	3.08	2
56	San Isidro	9	40	2.5	W	4.76	2
57	San Isidro	3	10	1	E	1.56	2
58	San Isidro	4	25	2	S	2.15	2

Anexo 2:

Panel fotográfico de edificios que bloquean vías

ID	Districts	Orientation	Photograph
1	Jesús María	W	
2	Jesús María	E	
3	Jesús María	N	
4	La Victoria	N	
5	La Victoria	S	
6	La Victoria	W	
7	La Victoria	W	
8	La Victoria	N	

ID	Distritos	Orientación	Fotografía
9	La Victoria	N	
10	La Victoria	S	
11	La Victoria	W	
12	La Victoria	E	
13	La Victoria	S	
14	La Victoria	N	
15	La Victoria	S	
16	La Victoria	W	

ID	Distritos	Orientación	Fotografía
17	La Victoria	E	
18	La Victoria	W	
19	La Victoria	S	
20	La Victoria	N	
21	La Victoria	S	
22	La Victoria	E	
23	La Victoria	E	
24	La Victoria	S	

ID	Distritos	Orientación	Fotografía
25	La Victoria	E	
26	La Victoria	N	
27	La Victoria	W	
28	La Victoria	N	
29	La Victoria	W	
30	La Victoria	E	
31	La Victoria	W	
32	La Victoria	W	

ID	Districts	Orientation	Photograph
33	La Victoria	E	
34	La Victoria	N	
35	La Victoria	E	
36	La Victoria	W	
37	La Victoria	S	
38	La Victoria	W	
39	La Victoria	W	
40	La Victoria	N	

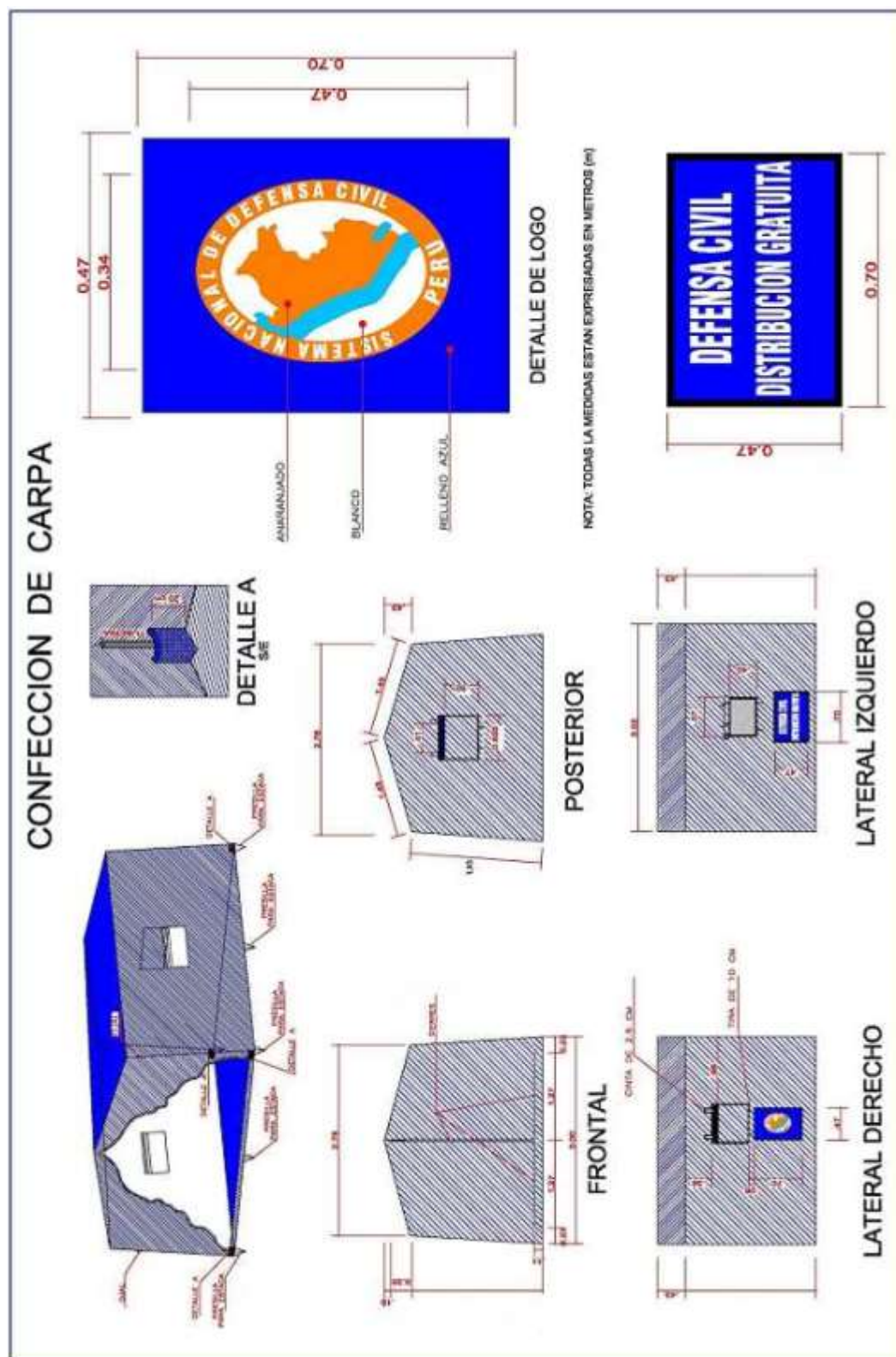
ID	Districts	Orientation	Photograph
41	La Victoria	W	
42	La Victoria	S	
43	La Victoria	W	
44	La Victoria	W	
45	La Victoria	E	
46	La Victoria	N	
47	Lince	W	
48	Lince	E	

ID	Distritos	Orientación	Fotografía
49	Miraflores	E	
50	Miraflores	N	
51	Miraflores	E	
52	Miraflores	S	
53	Miraflores	E	
54	Miraflores	S	
55	San Isidro	SE	
56	San Isidro	W	

ID	Distritos	Orientación	Fotografía
57	San Isidro	E	
58	San Isidro	S	

Anexo 3:

Especificaciones geométricas de carpas de defensa civil



Anexo 4:

Códigos de programación

ANEXO 4A: Configuración od2trips

```
1 <configuration>
2   <input>
3     <od-matrix-files value="nombre_matriz.txt"/>
4     <taz-files value="districts.taz.xml"/>
5   </input>
6
7   <output>
8     <output-file value="cluster_x.trips.rou.xml"/>
9   </output>
10
11 </configuration>
```

ANEXO 4B: Configuración duarouter

```
1 <configuration>
2
3   <input>
4     <net-file value="../.\cluster_x.net.xml"/>
5     <additional-files value="vtypes.rou.xml"/>
6     <route-files value="trips.rou.xml"/>
7     <junction-taz value="false"/>
8   </input>
9
10  <output>
11    <output-file value="cluster_x.rou.xml"/>
12  </output>
13
14  <processing>
15    <no-internal-links value="true"/>
16    <max-alternatives value="5"/>
17    <with-taz value="false"/>
18    <route-choice-method value="gawron"/>
19    <keep-all-routes value="false"/>
20    <gawron.beta value="0.9"/>
21    <gawron.a value="0.5"/>
22  </processing>
23
24  <time>
25    <begin value="0"/>
26  </time>
27
28  <report>
29    <ignore-errors value="true"/>
```

```
30     <no-warnings value="true"/>
31 </report>
32
33 </configuration>
```

ANEXO 4C: Configuración sumocfg

```
1 <configuration>
2
3   <input>
4     <net-file value="../../cluster_x.net.xml"/>
5     <route-files value="cluster_x_iteracion_#.rou.xml"/>
6     <additional-files value="dua_dump_###.add.xml"/>
7   </input>
8
9   <output>
10    <tripinfo-output value="cluster_x_tripinfo_#.xml"/>
11    <summary value="cluster_x_summary_#.xml"/>
12    <vehroute-output.intended-depart value="true"/>
13    <vehroute-output value="cluster_x_vehroute_#.xml"/>
14  </output>
15
16  <time>
17    <begin value="0"/>
18  </time>
19
20  <processing>
21    <route-steps value="200"/>
22    <no-internal-links value="false"/>
23    <time-to-teleport value="300"/>
24    <time-to-teleport.highways value="0"/>
25    <eager-insert value="false"/>
26  </processing>
27
28  <report>
29    <verbose value="false"/>
30    <no-warnings value="true"/>
31    <no-step-log value="true"/>
32  </report>
33
34  <random_number>
35    <random value="false"/>
36  </random_number>
37
38 </configuration>
```

ANEXO 4D: Código en Python del método del codo.

```
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from sklearn.cluster import KMeans
5 from sklearn import metrics
6 from scipy.spatial.distance import cdist
7
8 datos=pd.read_csv('coordenadas_vias_bloqueadas.csv')
9 df=pd.DataFrame(datos)
10 x=df['X'].values
11 y=df['Y'].values
12
13 X=np.array(list(zip(x,y)))
14
15 #Mostrar el KMeans
16 kmeans=KMeans(n_clusters=8,max_iter=100,init='k-means++')
17 kmeans=kmeans.fit(X)
18 labels=kmeans.predict(X)
19 centroids=kmeans.cluster_centers_
20
21 colors=["b.", "g.", "r.", "c.", "m.", "y.", "k.", "k."]
22
23 for i in range(len(X)):
24     #print("Coordenada: ",X[i]," Label: ",labels[i])
25     plt.plot(X[i][0],X[i][1],colors[labels[i]],markersize=10
26
27 print(centroids)
28
29 #Método del Codo
30 distortions = []
31 inertias = []
32 mapping1 = {}
33 mapping2 = {}
34 K = range(1,20)
35
36 for k in K:
37
```

```
38     kmeanModel =
KMeans(n_clusters=k,max_iter=500,init='random').fit(X)
39     kmeanModel.fit(X)
40
41     if k==8:
42         labels=kmeanModel.predict(X)
43         print(X)
44         centroids=kmeanModel.cluster_centers_
45         colors=["b.", "g.", "r.", "c.", "m.", "y.", "k.", "k."]
46         for i in range(len(X)):
47             plt.plot(X[i][0],X[i][1],colors[labels[i]],marke
rsize=10)
48
49             plt.scatter(centroids[:,0],centroids[:,1],marker='x'
,s=150,linewidths=1,zorder=10)
50
51         distortions.append(sum(np.min(cdist(X,
kmeanModel.cluster_centers_,
52             'euclidean'),axis=1)) / X.shape[0])
53
54         inertias.append(kmeanModel.inertia_)
55
56         mapping1[k] = sum(np.min(cdist(X,
kmeanModel.cluster_centers_,
57             'euclidean'),axis=1)) / X.shape[0]
58         mapping2[k] = kmeanModel.inertia_
59
60 #Distorsion
61 plt.xticks(range(0,20,1))
62 plt.plot(K, distortions, 'bx-')
63 plt.xlabel('Valores de K')
64 plt.ylabel('Distorsión')
65 plt.title('Método del Codo usando Distorsión')
66 plt.show()
67
68 #Inercia
69 plt.xticks(range(0,20,1))
70 plt.plot(K, inertias, 'bx-')
71 plt.xlabel('Valores de K')
72 plt.ylabel('Inercia')
```

```
71 plt.title('Método del Codo usando Inercia en agrupamiento  
    por K-Means')  
72 plt.show()
```

ANEXO 4E: Código en Python para calcular el índice de Nagurney.

```
1  from asyncore import read  
2  import xmltodict  
3  
4  '''  
5  SUMO redondea de manera especial los números de viajes de la  
6  matriz OD.  
7  Por ejemplo: 25.6 viajes <> 26 viajes o 25.3 viajes <> 25  
8  viajes.  
9  '''  
10 def redondeador(number):  
11     number_text=list(number)  
12     controler=False  
13     if len(number)!=1 and number_text[0]!=0:  
14         for i in range(len(number_text)):  
15             if number_text[i]==".":  
16                 punto_decimal=i  
17             if number_text[i]=="E" or number_text[i]=="-":  
18                 controler=True  
19                 return 0  
20  
21     if controler==False:  
22         aumentar=0  
23         for k in range(len(number_text)-1-  
24 (punto_decimal)):  
25             if aumentar==1 and  
26 int(number_text[len(number_text)-1-k])<9:  
27                 digito_a_cambiar=int(number_text[len(num  
28 ber_text)-1-k])+aumentar  
29                 number_text[len(number_text)-1-  
30 k]=str(digito_a_cambiar)  
31             else:  
32                 digito=int(number_text[len(number_text)-  
33 1-k])  
34                 if digito>=5:  
35                     aumentar=1  
36                 else:  
37                     aumentar=0  
38  
39     new_str=''.join(number_text)  
40  
41     if int(number_text[punto_decimal+1])>=5:
```

```
35         final_number=float(new_str)
36         final_number=int(final_number)+1
37     else:
38         final_number=float(new_str)
39         final_number=int(final_number)
40
41     return final_number
42
43     else:
44         return 0
45 else:
46     return 0
47
48 #Lectura de datos de simulación, el output leído son los
49 #archivos de tipo 'vehroute'
50 xml_content = open('Ruta del archivo vehroute.xml','r')
51 my_ordered_dict=xmltodict.parse(xml_content.read())
52
53 vehicle = [] #fromTaz-toTaz, tiempo = arrival - depart
54 for i in range(len(my_ordered_dict['routes']['vehicle'])):
55     vehicle.append([my_ordered_dict['routes']['vehicle'][i][
56 '@fromTaz']+'-
57 '+my_ordered_dict['routes']['vehicle'][i]['@toTaz'],float(my
58 _ordered_dict['routes']['vehicle'][i]['@arrival'])-
59 float(my_ordered_dict['routes']['vehicle'][i]['@depart'])])
60
61 def myFunc(e):
62     return e[0]
63
64 vehicle.sort(key=myFunc)
65
66 '''
67 El siguiente proceso permite conocer el tiempo mínimo de
68 viaje entre un par O-D
69 '''
70 aux=''
71 aux2=-1
72 minimos=[]
73 contador=0
74 for index, k in enumerate(vehicle):
75     if (aux==''):
76         aux=k[0] #1-2
77         aux2=k[1] #33.0
78     if (aux==k[0]): #1-2
79         if (k[1]<aux2): #35<33
```

```
75         aux2=k[1]
76         if (index==len(vehicle)-1):
77             minimos.append([aux,aux2])
78         else:
79             minimos.append([aux,aux2])
80             aux=k[0]
81             aux2=k[1]
82
83 #Lectura de la matriz OD
84 demand_file=open('Ruta del archivo matriz.txt',"r")
85
86 for j in range(8): #8 líneas innecesarias del formato de
87     demand_file.readline()
88     lectura de SUMO.
89
90 z=[]
91 number_vehicles=60516 #Número de vehículos simulados.
92 for l in range(number_vehicles):
93     a=demand_file.readline().rstrip()
94     a=a.split()
95     z.append([a[0]+'-'+a[1],redondeador(a[2])])
96
97 demand_file.close()
98
99 #Creación de lista con los tiempos de viaje mínimos, origen
100 y destino.
101 for k in range(len(minimos)):
102     print("Cargando:",round(k/len(minimos)*100,0),"%")
103     for p in range(len(z)):
104         if minimos[k][0]==z[p][0]:
105             minimos[k].append(z[p][1])
106             break
107
108 #Cálculo del Índice de Nagurney
109 numerator=0
110 contador_divisor_0=0
111 for i in range (len(minimos)):
112     numerator=minimos[i][2]/(minimos[i][1]/60/60)+numerator
113
114 Nagurney=numerator/len(minimos)
115
116 print("Nagurney Index = ", int(Nagurney))
```