

DISEÑO DE UN PLAN DE EVACUACIÓN PARA ALUVIONES EN LA CUENCA DEL RÍO SALADO (ATACAMA) USANDO MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

Javiera A. Ybar, Universidad de Chile, javiybar@gmail.com
Cristián E. Cortés, Universidad de Chile e ISCI, ccortes@ing.uchile.cl
Raúl Espinoza, ISCI, raul.espinoza.muirhead@gmail.com
Pablo A. Rey, Universidad Tecnológica Metropolitana, prey@utem.cl

Resumen

En este trabajo presentamos un enfoque de microsimulación de tráfico que permite modelar de forma adecuada el movimiento de vehículos y peatones siguiendo una estrategia de evacuación ante el evento de una emergencia, herramienta que en este caso de estudio se construye y sirve de apoyo al análisis de la efectividad de planes de evacuación en el caso de aluviones en la zona de la cuenca del río Salado, en particular en la ciudad e Chañaral. Para apoyar el análisis y la toma de decisiones en esta situación excepcional, los modelos usuales de equilibrio no entregan la información necesaria con el suficiente detalle. El modelo propuesto incorpora las características multimodales de los flujos y el comportamiento de los habitantes. En particular, se modelan flujos mixtos de vehículos y peatones compartiendo la calzada de algunas vías. Este modelo se implementó utilizando la API de la plataforma Quadstone Paramics. Se analizan distintas estrategias de evacuación y se compara su efectividad.

1. Introducción

En la operación normal de una ciudad, los subsistemas de transporte, producción y servicios interactúan de manera dinámica y la oferta se ajusta a la demanda tanto en dimensiones espaciales como temporales. Sin embargo, cuando ocurre un desastre, las condiciones de los subsistemas cambian, y el comportamiento de los usuarios también se modifica de acuerdo con la evolución y el impacto que produce el desastre en espacio y tiempo sobre el funcionamiento de la ciudad.

Para enfrentar estas situaciones fuera de lo común, se debe trabajar en planes de evacuación ante los eventos de emergencia, con sus características propias y parámetros intrínsecos tales como el tiempo límite para evacuar, así como las características del caso de estudio. Evidentemente un problema no directo de tratar en el modelamiento de emergencias, es la interacción que se produce entre vehículos y peatones en condiciones de caos producto de la emergencia misma.

Este trabajo se enfoca en la construcción de una herramienta de microsimulación de tráfico, que permite modelar con mucho detalle y realismo un proceso de evacuación de vehículos y peatones de una ciudad de tamaño moderado ante el evento de una emergencia; en este caso de estudio, se considera un evento de aluvión en la cuenca del Río Salado, ciudad de Chañaral, norte de Chile. Se utiliza el software PARAMICS y su funcionalidad de API para el desarrollo de esta herramienta en particular. Para lograr un modelo de comportamiento realista ante el proceso de evacuación, se tuvo que generar módulos especializados en el microsimulador vía API, diseñados para modelar en detalle la interacción entre vehículos y peatones en condiciones de congestión (con autos estancados), lo cual requirió cambios medulares al software utilizado, y que consideramos representa una contribución importante del presente trabajo.

Con este enfoque, que es dinámico por sus características de movimiento de entidades siguiendo la dinámica de la evacuación, además de estar inmerso en un entorno con mucha incertidumbre (estocástico), será posible simular de mejor manera el comportamiento de los individuos durante la emergencia y así poder considerar no solo los parámetros asociados a estándares o peculiaridades de los casos en estudio, sino también, estrategias para permitir una evacuación más eficiente.

Esta publicación se organiza de la siguiente forma: la siguiente sección revisa los estudios enfocados en planes de evacuación ante emergencias. La sección 3 define las características del caso de estudio. La sección 4 las consideraciones en la codificación de la red. La sección 5 explica los cambios efectuados en el comportamiento de la demanda. La sección 6 propone estrategias tentativas para el plan de evacuación. La sección 7 muestra los resultados y análisis para la implementación de una de las estrategias propuestas. Finalmente, la sección 8 corresponde a las conclusiones y futuras direcciones del estudio.

2. Literatura

La evacuación ante emergencia hace referencia al abandono o retiro de personas de un cierto lugar con el fin de asegurar y permitir salvaguardar su integridad física. Los problemas de evacuación suelen identificarse por las componentes planteadas por [Southworth \(1991\)](#) y [Tuydes \(2005\)](#). Para estos autores, el análisis de riesgos se centra de forma genérica en el tipo de desastre, dónde y cuándo se generará, considerando el alcance de los posibles daños en infraestructura y redes de transporte, la respuesta social a la emergencia, gestión del tráfico y localización de refugios.

2.1. Modalidades de evacuación ante emergencia

En torno a la generación de viajes y la evaluación de la tasa de carga de tráfico, es posible su representación a partir del enfoque de dos pasos, donde el primer paso consiste en estimar el número de hogares evacuados y el segundo paso determina el tiempo de partida de estos hogares ([Murray-Tuite y Wolshon, 2013](#)). Particularmente, en el segundo paso del último enfoque se trabaja a partir de los tiempos de partida. El tiempo dedicado a responder a una advertencia a menudo sigue una curva en S ([Sorensen, 2000](#)), la cual puede elegirse entre muchas distribuciones diferentes, entre ellas, salida instantánea, distribución uniforme, Poisson, Weibull, sigmoide, estas dos últimas se utilizan con mayor frecuencia y se dice que son las más realistas ([Pel et al., 2012](#)). La distribución Weibull está dada por $D(t) = 1 - \exp(-\beta t^\gamma)$ y la distribución sigmoide esta dada por $D(t) = (1 + \exp(-\alpha(t - h)))^{-1}$, donde $D(t)$ es el porcentaje acumulado de personas que han evacuado hasta el instante t y los parámetros β , γ , α y h definen la forma de la curva.

[Stepanov y Smith \(2009\)](#) y [So y Daganzo \(2010\)](#) emplean estrategias de control para la generación de viajes. [Yang et al. \(2018\)](#) considera colas de personas para el uso del transporte masivo/público, además trabaja con múltiples modos de transporte, donde los evacuados tienen la posibilidad de preferencia hacia ciertos modos. Con énfasis a los peatones, [Makinoshima et al. \(2018\)](#) modelan el funcionamiento en la simulación microscópica para la evacuación a gran escala ante tsunami. Otro caso para la inclusión de peatones es el modelo construido por [Zhang y Chang \(2014\)](#), que incluye optimización de los movimientos de flujo mixto y tiempos de fase en los semáforos.

2.2. Enfoques para modelos de evacuación

2.2.1. Modelos estáticos y dinámicos

Los enfoques de flujo estático y dinámico se relacionan con características temporales de los flujos de tráfico en modelos de evacuación. Para los modelos estáticos, los flujos de tráfico son fijos y se trabaja con parámetros predefinidos, permiten tener rutas planificadas que son beneficiosas cuando no hay posibilidad de comunicación entre los terminal durante el evento ([Hashimoto y Tamiya, 1997](#)), mientras que en el caso dinámico, permite cambiar las condiciones del tráfico para encontrar las mejores rutas de evacuación.

En el contexto de los modelos estáticos se destacan las investigaciones de [Campos et al. \(2012\)](#) con un algoritmo heurístico para definir dos rutas independientes desde el área del desastre hacia cada refugio y [Üster et al. \(2018\)](#) con un modelo de optimización para el diseño de red a través de programación entera mixta.

Entorno a los modelos dinámicos, se destaca [Liu et al. \(2008\)](#) con un modelo dinámico de decisión de ruta, [Zhang y Chang \(2014\)](#) con un modelo para integrar la optimización de los movimientos de flujo mixto y los tiempos de fases en los semáforos, [Stepanov y Smith \(2009\)](#) con una metodología que permite generar un plan de evacuación que minimiza simultáneamente la distancia recorrida total, el bloqueo y el tiempo total de despeje de las rutas de salida y [Yang et al. \(2018\)](#), el cual trabaja con múltiples modos de transporte y sus interacciones.

2.2.2. Enfoques deterministas y estocásticos

Los eventos producto de la naturaleza se identifican por ser esencialmente aleatorios, ya que se basan en un conjunto de factores impredecibles que hacen que los resultados varíen según el azar (Alvear et al., 2014). A pesar de ello, en algunos casos la influencia de la aleatoriedad puede generar un impacto leve que no necesariamente se requiere una consideración sustancial en el modelado. En consecuencia, la mayoría de la literatura que propone nuevas ideas o metodologías de solución tienen un enfoque determinista, donde adoptan un escenario de amenaza único, como el peor de los casos o el más probable (Bayram, 2016).

Representando al enfoque determinista se destaca Liu et al. (2008) y Zhang y Chang (2014) por trabajar con información previa del caso, también se distingue Campos et al. (2012), So y Daganzo (2010), Bretschneider y Kimms (2012), donde las metodologías de solución se identifican principalmente por estrategias de control y heurísticas, además, revisiones más actuales como Üster et al. (2018) con solución a través del enfoque descomposición de Benders, Farahani et al. (2018) con metodologías de relajación lagrangeana y heurísticas y Yang et al. (2018) a través de solución heurística.

Con respecto al enfoque estocástico, Ng y Lin (2015) utilizan técnicas para determinar las rutas de evacuación óptimas cuando se conoce información limitada sobre la demanda de evacuación y las capacidades en carretera. El estudio emplea el modelo determinista de transmisión basado en celdas (CTM) propuesto por Ziliaskopoulos (2000), por otro lado, Stepanov y Smith (2009) proponen un modelo dinámico, donde se incluye un parámetro incierto que representa el límite superior en las llegadas, al establecer un valor umbral en la probabilidad máxima de bloqueo en la red de evacuación el estudio asegura en su modelo que los flujos de evacuados en las rutas de salida no se interrumpan.

2.3. Objetivos de los modelos de evacuación

Dependiendo del tipo y particularidades del desastre, de acuerdo con el objetivo de la autoridad de planificación de la evacuación se pueden emplear diferentes objetivos para una evacuación (Bayram, 2016). Los objetivos más utilizados en la literatura son maximizar el número de evacuados durante una ventana de tiempo y minimizar el tiempo necesario para evacuar todos los vehículos. Según las características del modelo, también pueden considerar los costos asociados a las instalaciones para la emergencia, como lo son aspectos de los refugios, señalizaciones, transporte asignado para evacuar, entre otros.

2.3.1. Modelos orientados a maximizar el número de evacuados

Con el objetivo de maximizar el número de evacuados en una ventana de tiempo se destaca Bretschneider y Kimms (2012) con un enfoque heurístico, Zhang y Chang (2014) donde también considera reducción de costo total para todos los viajeros y prevención de bloqueos o derrame de carriles y Farahani et al. (2018) considerando además la localización de potenciales refugios.

2.3.2. Modelos orientados a minimizar el tiempo total de evacuación

Los estudios Liu et al. (2008), Campos et al. (2012) y Stepanov y Smith (2009) distinguen en la minimización del tiempo total de evacuación, también Ng y Lin (2015) a través del modelo de transmisión de celdas, Yang et al. (2018) que minimiza no solo el tiempo total de los viajes en autos, sino también de los viajes en transporte masivo y las esperas en las estaciones de estos y So y Daganzo (2010) que simultáneamente maximiza también el número de evacuados.

En particular Üster et al. (2018) tienen como objetivo minimizar el costo total del diseño de la red de evacuación y sus variables de decisión incorporan la localización de los refugios como la asignación de evacuados a cada uno, junto con la elección de rutas.

2.4. Simulación de tráfico para enfrentar problemas de evacuación

Los estudios e investigaciones enfocados en modelos de tráfico para la evacuación, junto con la planificación y diseño de red del sistema, utilizan comúnmente la simulación computacional para representar características específicas del contexto. En el extenso estudio de Barceló (2010), se afirma

que la simulación es una técnica que puede verse como un experimento de muestreo en un sistema real dinámico a través de un modelo de computadora que lo representa formalmente.

Dentro de la literatura es posible encontrar estudios destinados a la identificación, análisis y comparación de simuladores de flujo de tráfico. [Mubasher y ul Qounain \(2015\)](#) realizan una revisión sistemática de los simuladores de flujo de tráfico vehicular presentados y utilizados en la literatura de investigación. En la exploración se encuentran 54 simuladores, donde se identifican los cinco simuladores que aparecen con mayor frecuencia en la literatura: VISSIM ([PTV Group, 2020](#)); PARAMICS ([Quadstone Paramics, 2020](#)); CORSIM ([McTrans Center, 2020](#)); AIMSUN ([TSS-Transport Simulation Systems, 2020](#)) y SUMO ([DLR Institute of Transportation Systems, 2020](#)), siendo VISSIM el más popular. En particular, el paquete de microsimulación de tráfico PARAMICS será fundamental para el desarrollo de la presente estudio.

2.4.1. Microsimulador de tráfico PARAMICS

Para la construcción de la red donde se aplica el modelo correspondiente, [Sykes \(2010\)](#) afirma que PARAMICS permite crear redes de carreteras y cruces que representen el área establecida. También permite construir intersecciones con semáforos y definir su programación. Los orígenes y destinos de la demanda se incorporan definiendo *zonas*. Asimismo, la demanda puede incluir distintos vehículos según sus características, así poder representar sin problemas autos, camiones, buses, entre otros. A través de matrices de demanda de origen-destino (OD) admite el control de la carga de vehículos en la red.

Con respecto a la calibración y la validación, en el *software* deben estar disponibles dos conjuntos de datos observados durante el proceso de desarrollo del modelo. Uno se utiliza para calibrar el modelo, ajustando los parámetros de modo que la salida del modelo coincida adecuadamente con estos datos observados. El segundo conjunto se utiliza para verificar que otros aspectos del desempeño del modelo calibrado están de acuerdo con este conjunto de datos observados. En particular para la calibración, [Sykes \(2010\)](#) menciona que el modelo permite ajustar parámetros relacionados a la asignación para la matriz de demanda, jerarquía en las carreteras y características de las uniones y enlaces para obtener costos de congestión realistas.

Diversos estudios han utilizado PARAMICS para la simulación de tráfico, particularmente, dentro del enfoque de evacuación ante emergencia. [HOU et al. \(2009\)](#) por medio del *software* busca obtener el tiempo de evacuación ante emergencia para un estadio de gran magnitud, [Song et al. \(2010\)](#) presentan un sistema de simulación de transporte de emergencia urbano basado en PARAMICS y sus aplicaciones para el área metropolitana de Beijing, por último, [Tu et al. \(2010\)](#) establecen un marco de simulación microscópico a través de PARAMICS en condiciones de evacuación para evaluar el impacto de las variaciones del comportamiento de conducción en el tiempo necesario para la evacuación.

2.5. Síntesis y observaciones finales

Se establece claramente que es necesario definir el sistema y la estructura correspondiente según el tipo de problema que se quiera enfrentar, identificando las características de la demanda, tanto el tamaño de la población como su localización y las ubicaciones tentativas para los refugios. También es fundamental, la forma de asignar y distribuir a los evacuados para lograr realizar la operación dentro del tiempo límite. Se destaca el enfoque dinámico por sobre el estático, ya que permite la toma de decisiones de los vehículos y peatones durante la evacuación evitando rutas congestionadas. También se destaca el enfoque estocástico por sobre el determinista, específicamente en la demanda y la generación de viajes por períodos. Ambos enfoques destacados permiten una mejor representación de la realidad. Sin embargo, se debe tener en consideración las limitaciones computacionales y temporales. De forma recurrente se identifican dos objetivos en los modelos de los estudios analizados: maximizar el número de evacuados y minimizar el tiempo total de evacuación. Ambos objetivos logran solucionar la esencia del problema, pero la elección de cada uno dependerá netamente del tipo de emergencia al que se enfrentan. Para validar los resultados de los modelos propuestos, la mayoría de los estudios utilizan la simulación por medio de programas computacionales. Varios estudios han utilizado el *software* PARAMICS, el cual se caracterizado por ser un microsimulador de tráfico que cumple satisfactoriamente con los requerimientos usuales en los problemas de evacuación.

3. Caso de Estudio

En los últimos años se ha presenciado un aumento de precipitaciones en la zona norte de Chile, generando en los años 2015 y 2017 aluviones de gran impacto en la Cuenca del Río Salado. Chañaral (Fig. 2) se convirtió en la comuna ícono del desastre por estas inundaciones, donde no solo hubo un impacto material, sino que también aislamiento de la población e incluso pérdidas de vidas (Fig. 1). El problema real de la emergencia radica en la ubicación de la ciudad con respecto al Río Salado y la construcción recurrente de viviendas en la rivera. La población de Chañaral el año 2017 era de 12,219 habitantes según el Censo nacional¹, se localiza en la costa y es una zona típicamente árida con escasas lluvias durante al año. Adicionalmente, gracias a los datos recolectados a partir del Instituto Nacional de Estadística (INE), para el año 2017 el parque vehicular de Chañaral era de 3717 vehículos motorizados livianos y medianos². Si bien, se busca trabajar con las proyecciones de población y el parque vehicular a la actualidad, el país se ha visto afectado en gran medida por la Pandemia Mundial, por lo tanto, se decide trabajar en base al año 2019, el cual es un año con cifras representativas. Por lo tanto, la proyección de la población al año 2019 es de 13 123 habitantes y el parque vehicular es de 4935 vehículos para el mismo año, siendo posible calcular la tasa de motorización 2.67 (per/veh), la cual permite tener una referencia para las calibraciones que se harán respecto de la demanda de la red.

A modo de proyección de futuras catástrofes, se cuenta con un modelo detallado de la propagación de



Figura 1: Impacto Aluviones 2015 y 2017 en Chañaral.

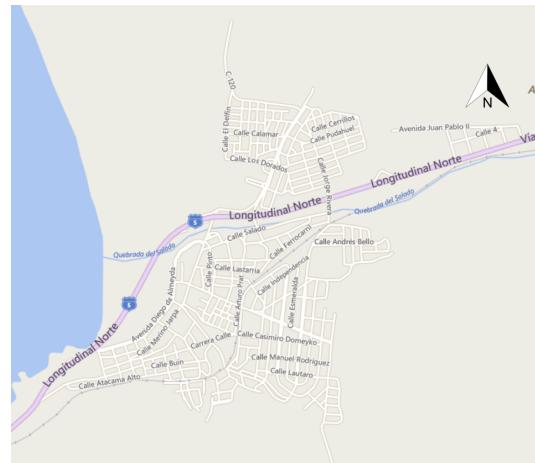


Figura 2: Mapa Chañaral. Fuente: Bing Maps.

aluviones en el sector de Chañaral (Fig. 3), con mapas precisos y modelos predictivos del impacto para diversos escenarios de ocurrencia de aluviones (Alves et al., 2019), esto permite identificar las zonas de mayor peligro y a su vez, aquellas que podrían ser destinos tentativos para los evacuados. De estos, para el proyecto se considera como destino la zona norte (el aeropuerto), el estadio, y una pequeña zona poblada al costado oriente de la ciudad (Fig. 4).

4. Codificación de la Red

Para simular la evacuación en la ciudad e implementar estrategias se utiliza el microsimulador de tráfico PARAMICS. En este *software* es posible definir en detalle las características del modelo, entre ellas, la demanda de viajes de evacuación y los atributos de los arcos de la red. Una característica de este simulador en particular, es que permite programar por medio de la interfaz de programación (API), una variedad amplia y flexible de modelos de comportamiento, con lo que será posible representar de forma

¹<https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/demografia-y-migracion>

²<https://www.ine.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>

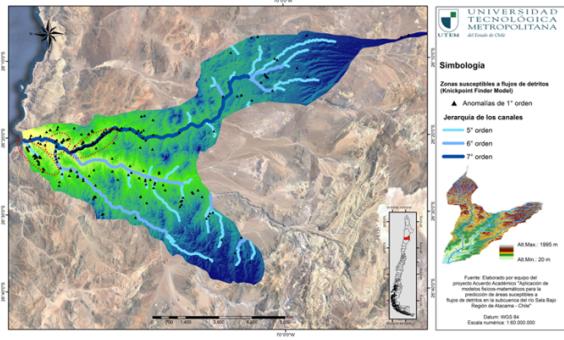


Figura 3: Modelo para deslizamiento de material
(Alves et al., 2019)

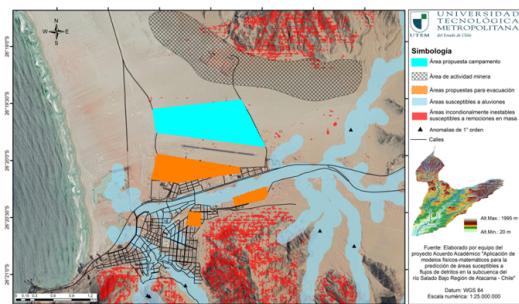


Figura 4: Zonas seguras para la evacuación
(Alves et al., 2019)

realista y ajustada ciertas peculiaridades que surgen al momento de una evacuación de emergencia, para así también proponer y cuantificar el rendimiento de varias estrategias tentativas.

Una de las herramientas que entrega PARAMICS es la visualización de la plataforma de asignación geoespacial Bing Maps, la cual funciona como capa y facilita la codificación de la red. Por lo tanto, con ayuda de esta herramienta, se crean arcos y nodos siguiendo la estructura exacta de la ciudad. Además, se tomó como referencia la zonas censadas el año 2017 para codificar zonas que permitan definir una matriz de origen y destino para poder dirigir a los evacuados a los respectivos refugios (Fig. 5).



Figura 5: Red Chañaral codificada en PARAMICS.

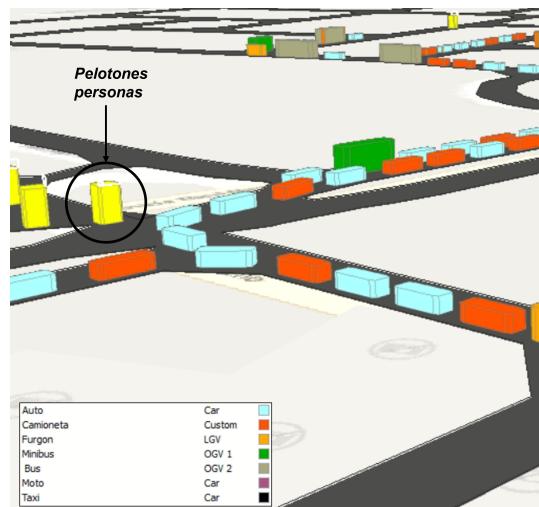


Figura 6: Representación vehículos en PARA-MICS.

5. Representación del comportamiento de la demanda

Si bien, una de las etapas más importantes es la implementación de estrategias para lograr una evacuación más eficiente, también es relevante lograr representar de la mejor forma las características y el comportamiento de los evacuados, ya sea en el inicio, como durante la evacuación.

5.1. Definición de la población

La distribución de los modos de transporte se realiza a partir de los datos recolectados previamente, en base a la población y el parque vehicular. Se destina el 25 % de la población para evacuar a pie y el 75 % para evacuar en vehículos motorizados livianos y medianos; estos últimos se discretizan en siete tipos, siendo posible extraer los porcentajes de vehículos desde los permisos de circulación provenientes del INE y representarlos en PARAMICS con tamaños y velocidades aproximadas. Además, a partir de la tasa de motorización, se destina un promedio de tres personas por vehículo, esto se traduce en un total de 3,281 vehículos. Si bien, es posible simular peatones en el *software*, estos no tendrían interacción con los vehículos más allá de intersecciones de la red, ya que las personas en PARAMICS solo se mueven por la acera de las calles. Esto simularía una situación poco realista, ya que lo que se busca representar en el problema es una evacuación mixta de individuos y vehículos usando el mismo espacio vial. No obstante, se decide representar a los peatones como pelotones de 10 personas a través de pequeños vehículos, con velocidad máxima de 5 [km/hr], por lo tanto, el número total de vehículos tipo “Grupo de personas” (GP) es de 329. A modo de ejemplo, en la Figura 6 se visualiza los tipos de vehículos y en la Tabla 1 se muestra un resumen de la información descrita anteriormente.

Tabla 1: Distribución de modos de transporte según parque vehicular Chañaral.

Tipo Vehículo	Porcentaje población	Num. de vehículos
Auto	33.54	1468
Furgón	2.20	97
Minibús	2.40	105
Camioneta	23.34	1021
Moto	0.90	40
Taxi	1.55	68
Bus	11.01	482
GP	25.00	329

5.2. Generación de viajes

Dentro de la codificación de la ciudad se construyeron subdivisiones de la red llamadas *zonas*, las cuales permiten asignar demanda de viajes desde varios orígenes hacia varios destinos, esto facilita la generación de viajes, ya que basta con definir el o los destinos y entregar los valores de la matriz. El desafío radica en lograr simular en qué instante los evacuados deben ingresar o aparecer en la red. Por defecto, PARAMICS genera viajes con una distribución uniforme, lo cual puede diferir en gran medida de una evacuación donde los usuarios deciden su inicio de evacuación de forma independiente. Estudios mencionados en la revisión de literatura indican que el tiempo dedicado a responder a una advertencia a menudo sigue una curva en S [Sorensen \(2000\)](#) (aumento de número de viajes en periodo intermedio), donde una de las distribuciones empleadas con mayor frecuencia en los estudios es la distribución Weibull [Pel et al. \(2012\)](#). Debido a que no es posible cambiar de distribución, se procede a trabajar en el API de PARAMICS el cual utiliza el lenguaje computacional *C++*. El procedimiento es el siguiente: en primer lugar se construye un histograma por medio de generación de viajes con distribución Weibull. El segundo paso es discretizar el horizonte de evacuación con los valores de tiempos del histograma. Y en tercer lugar, se asignan ponderaciones del número total de evacuados por intervalo, replanteando así, la pendiente de la distribución uniforme que tiene el *software* por defecto. Por lo tanto, se modela la distribución Weibull a partir de distribuciones uniformes con distintas pendientes.

La función de distribución acumulada de una variable aleatoria $X \sim Weibull(\alpha, \beta)$ es $F(x) = 1 - e^{-(\alpha x)^\beta}$ para $x > 0$. Los parámetros α y β permiten concentrar la generación de viajes y extender el tiempo de simulación total del problema, a modo de ejemplo, se realizan simulaciones en PARAMICS para distintos parámetros (Figuras 7 y 8), mostrando la posibilidad de manipular el comportamiento de viajes con el fin de representar distintos escenarios.

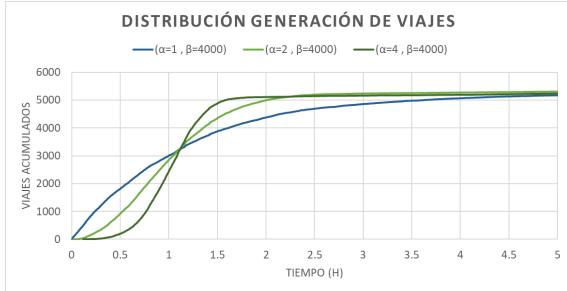


Figura 7: Generación de viajes variando parámetro α .

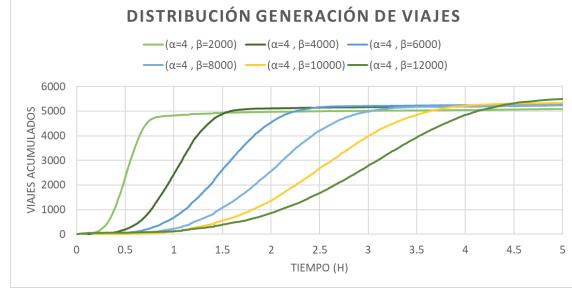


Figura 8: Generación de viajes variando parámetro β .

5.3. Comportamiento de las entidades que son evacuados durante su viaje

Para poder representar de mejor forma una situación de evacuación, de manera bastante gruesa, podemos decir que en el simulador se han modificado tres tipos de comportamientos:

- Uno de ellos es el parámetro *Feedback Period*, el cual cada cierto tiempo permite a los usuarios modificar su elección de ruta dinámicamente de acuerdo con los tiempos de viaje que se vayan observando. Para efectos de modelamiento, se fija el *Feedback Period* en 15 minutos, con el fin de evitar grandes aglomeraciones que interfieran con el flujo hacia los destinos.
- El segundo corresponde a rutas establecidas para aquellos que evacuen a pie (Fig. 9). Con este cambio se espera reproducir el comportamiento de la evacuación a pie, el cual debe seguir ciertas reglas según señalizaciones de evacuación de la ciudad. Además, con esta implementación se percibe mayor equilibrio y armonía en la evacuación, incentivando a los vehículos a tomar distintas rutas y a los peatones a seguir las rutas dispuestas sin ser afectadas por el *Feedback Period*. Para poder llevar a cabo este comportamiento se modelan los peatones como transporte público, esto permite adquirir las características de velocidad mencionadas en la *Definición de la población*, junto con la construcción de rutas previamente a la simulación. Se establecen 49 rutas para peatones dentro de toda la red con destino a la área segura “Aeropuerto” ubicada en la zona norte de Chañaral. Además, se distribuye el total de GP en todas las rutas tal de cumplir con la población destinada a evacuar a pie y las proporciones de población en cada zona censada el año 2017.
- En tercer lugar, si bien, la posibilidad de representar a los peatones como vehículos resuelve una de las restricciones del simulador, a través de análisis exhaustivos se determina que la existencia de colas vehiculares en las zonas de atojoamiento permite representar la realidad con respecto a los vehículos, pero no así para los peatones, los cuales se espera que continúen avanzando a través de las filas de vehículos influyendo en las velocidades de todos los usuarios. La naturaleza del simulador no permite recrear situaciones de adelantamiento en una misma pista, por lo tanto, se realizan los siguientes pasos para proponer una solución:
 1. Se evalúa e identifica el área y las calles de mayor aglomeración, donde suelen manifestarse colas de “Grupo de personas”. La idea principal es definir calles tentativas que requieran flujo mixto, para posteriormente encontrar una posible solución a partir del API de PARAMICS.
 2. Se plantea la posibilidad de generar costos de tiempo en los arcos de flujo mixto según la cantidad de GP y número de vehículos que estén en trayecto.
 3. Se definen conjuntos de arcos llamados “Vectores mixtos”, los cuales cumplen el rol de recibir estos grupos de personas y cambiar las velocidades de los usuarios en el viaje por estas calles.
 4. Se cambian las rutas fijas de los GP tal de que finalicen en los vectores mixtos. La interfaz del simulador mostrará que los pelotones de personas llegan a cierta zona y desaparecen, no obstante, en el API se entregaran órdenes de reajuste según estas llegadas y calculará tiempos y posición de los GP durante estos vectores mixtos, nuevamente, buscando representar

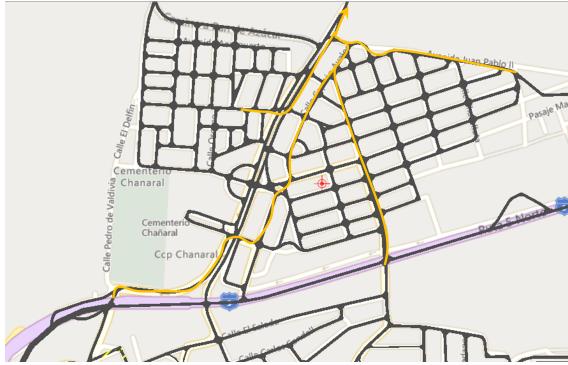


Figura 9: Rutas establecidas para peatones.



Figura 10: Ejemplo modificación de ruta fija en comportamiento de flujo mixto.

una evacuación mixta en la misma pista. El comportamiento de esta nueva estrategia se ejemplifica en la Fig. 10, donde se muestra hasta donde llegaría una de las rutas fijas para luego continuar en la zona de aglomeración a través del Vector Mixto.

- Para analizar como se verá afectada la velocidad de peatones y vehículos en los vectores mixtos, se decide trabajar bajo el enfoque de la Ecuación Fundamental del Tráfico $q = k \times u$, donde q corresponde al flujo vehicular, k la densidad y u la velocidad en un tramo dado. Con respecto a los grupos de personas, se seguirá el modelo Underwood $U = u_f e^{-(k/k_0)}$ sobre la base del estudio de [Rastogi et al. \(2013\)](#), donde u_f corresponde a la velocidad a flujo libre y k_0 es la densidad óptima; además, la densidad k dependerá de factores tales como largo L y ancho A de pista, número de vehículos NV y peatones NP y sus respectivas áreas de ocupación. Similar se trabajará con la velocidad de los vehículos, donde se seguirá el modelo de Greenshield $U = u_f (1 - k/k_j)$ sobre la base del estudio de [Gaddam y Rao \(2019\)](#), donde u_f corresponde a la velocidad a flujo libre, el cual para este caso será la velocidad de los peatones obtenida por Underwood y k_j es la densidad de embotellamiento. Los parámetros empleados para ambos modelos se muestran en la Tabla 2 y en las Figuras 11 y 12 se aprecia el comportamiento de la velocidad y el flujo con respecto a la densidad de los peatones (variando número de vehículos) para una calle determinada. Cabe recalcar que dado que los vehículos dependen de la velocidad a flujo libre de los peatones, sus variaciones de velocidad durante el trayecto en los vectores mixtos varían de forma limitada.

Tabla 2: Parámetros para velocidades en vectores mixtos.

Parámetro	Valor
$u_{f_{PEATON}}$	1.5 [m/s]
$k_{0_{PEATON}}$	3 [peat/m ²]
v_{PEATON} , para $NP > 0$	
$u_{f_{VEHICULO}}$	48 [km/h], para $NP = 0$
$k_{j_{VEHICULO}}$	0.7 [veh/m]

6. Escenarios y Estrategias

El trabajo busca que la modelación y codificación efectuada para representar los comportamientos de la red sea capaz de soportar cambios en los parámetros y estructura del caso de estudio. Por ello, es fundamental el análisis del impacto en la evacuación ante eventuales cambios de demanda, en especial

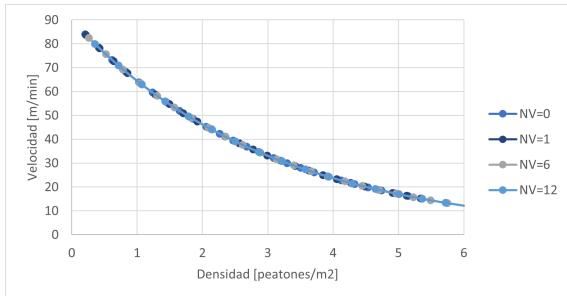


Figura 11: Velocidad con respecto a la densidad de los peatones según número de vehículos.

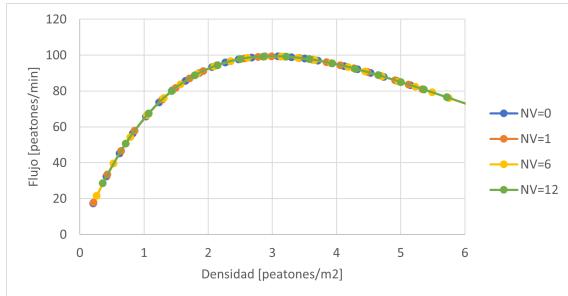


Figura 12: Flujo con respecto a la densidad de los peatones según número de vehículos.

para casos extremos, dónde la población aumente, el modo de evacuación es único (sólo vehículos) o incluso las ventanas de tiempo en la que se generan los viajes se acote.

Para efectos de análisis posteriores se proponen los siguientes escenarios resumidos en la Tabla 3: Aumento de la población en un 25 %, 50 % y 75 %. Cambios en la proporción de modos de transporte, dónde el uso de vehículo pasará de un 75 % de la población, a un 40 %, 60 %, 85 % y 95 %, y finalmente, para cada caso anterior, se evalúa la generación de viaje para distintos intervalos de tiempos (3 horas, 4 horas, 5 horas y 6 horas), completando un total de 32 escenarios.

Tabla 3: Escenarios considerados en los experimentos computacionales.

Escenario	Descripción
CB	Caso Base (75 % vehículos, población: 13.300 aprox.)
X1.25	Población x 1.25
X1.50	Población x 1.50
X1.75	Población x 1.75
40 %V	40 % vehículos
60 %V	60 % vehículos
85 %V	85 % vehículos
95 %V	95 % vehículos

Si bien, el foco del estudio se centra en la codificación y representación del comportamiento de los vehículos y peatones a través de PARAMICS, este trabajo también pretende entregar lineamientos para la investigación en curso, con el foco en mejorar los tiempos de evacuación y mejorar los protocolos de evacuación en general. Por esta razón se proponen la siguientes estrategias, de las cuales, la primera de ellas es implementada en este artículo, mientras que las otras dos quedan para publicaciones futuras.

1. Como se observa en la Fig. 4, Alves et al. (2019) no sólo propone como zona segura la considerada en el caso base, sino también el Estadio de la ciudad y una área poblada al costado oriente de la ciudad. A pesar de que estas zonas podrían no ser suficientes en capacidad, si pueden funcionar como destinos temporales. Por lo tanto, la primera estrategia consiste en aumentar de uno a tres refugios. Para llevar a cabo este procedimiento, se reconstruye la matriz de origen y destino de vehículos, destinando el 50 % hacia el refugio 1 (aeropuerto), 25 % hacia el refugio 2 (estadio) y 25 % hacia el refugio 3 (zona poblada), además, se codifican 29 rutas fijas adicionales hacia los nuevos destinos y la partición de evacuados es la misma que para los vehículos. Por último, es necesario definir nuevas zonas de aglomeración entorno a los refugios 2 y 3, con el fin de definir adicionales vectores mixtos al sistema.
2. De extremo a extremo, Chañaral puede presentar recorridos directos de hasta 3.5 kilómetros, se espera que tanto vehículos como peatones sean capaces de recorrer esta distancia, no obstante, la existencia de individuos con movilidad reducida, condiciones climáticas y desorden en

la generación de viajes pueden requerir tácticas para facilitar la evacuación, es por esto que la segunda estrategia propone disponer de Vehículos Exclusivos para la evacuación. Para ello, se busca estratégicamente estacionamientos para los vehículos y zonas de estaciones para recoger personas, según la gente que utilice esta estrategia se debe reajustar el número de viajeros que que no la utilicen.

3. La generación de viajes se construye a partir de la distribución Weibull, en la cual se observa un aumento de viajes en el periodo intermedio de la evacuación, esto puede ocasionar aglomeraciones y colapsos en la red. Con el fin de obtener una evacuación equilibrada y armónica, se propone una coordinación de horas de salidas para evacuar, tal de controlar el ingreso de flujo a la red. Esta estrategia requiere replantear la codificación empleada para generación de viajes, donde la idea principal es cada ciertos intervalos de tiempo es liberar vehículos ya sea con la distribución predefinida por PARAMICS o con la distribución Weibull.

7. Resultados y Análisis

Se analiza el comportamiento de la evacuación para cada escenario descrito en la sección previa. El análisis consiste en obtener para cada circunstancia los tiempos de viajes promedio y el número de evacuados con respecto a la población total, este último, observado entre las 3 y 7 horas de simulación. La simulación para cada escenario se realiza 30 veces con distintas semillas, lo que permite realizar análisis de intervalos de confianza para el tiempo promedio esperado del escenario y el número de evacuados esperado para cada intervalo de tiempo.

Para asistir los análisis descritos a continuación, se presenta los resultados de la microsimulación de la ventana de tiempo de 5 horas a través de perfiles de generación y llegadas de viajes, mapas de calor que muestran los intervalos de confianza y tablas con los tiempos de viajes promedio esperado para cada escenario.

Los escenarios relacionados al mismo número de evacuados pero con distinta distribución de modos de transporte no presentan un gran impacto en los tiempos necesarios para evacuar a toda la población (Figuras 13 y 15), sin embargo, los intervalos de confianza del número de evacuados esperado con respecto a la población total, para el caso de los grupos de personas se muestra un aumento del intervalo cuando el porcentaje de vehículos aumenta, en cambio, para el caso de los vehículos, el intervalo de confianza disminuye a medida que aumenta su porcentaje de uso, es claro ver estos valores en las Figuras 17 y 18 para el tramo de las 3 y 4 horas. En general, para la mayoría de los escenarios, la población evaca en su totalidad previo a las 7 horas.

Los escenarios relacionados al aumento de población (manteniendo la distribución de modos de transporte) muestra un aumento del tiempo total para evacuar la población (Figuras 14 y 16), este comportamiento reafirma la construcción del modelo del presente trabajo, ya que muestra un resultado esperado dado el aumento de la población y posibles aglomeraciones. A pesar de que existen aumentos de tiempos totales, los intervalos de confianza con respecto a los tiempos de viajes promedio y el número de evacuados no presentan una tendencia clara en su variación.

Los intervalos de confianza para todos los casos no superan el 1% de los promedios de las variables, lo cual refleja un alto nivel de confiabilidad de los resultados para diversas semillas sobre un mismo escenario.

El promedio de los tiempos de viaje aumenta cuando la generación de viajes se lleva a cabo en intervalos menores alcanzando casi una hora para los escenarios más críticos. Para el caso de los grupos de personas, la variabilidad de los tiempos de viajes es levemente menor.

Con respecto a la implementación de la estrategia de aumento de refugios, las Figuras 19 y 20 muestran un ejemplo de como la evacuación total se realiza antes para el caso de los 3 refugios, disminuyendo los tiempos de viajes y las aglomeraciones del sistema. Cabe destacar que en la codificación se implementa la eliminación de vehículos cuando las aglomeraciones son complejas de liberar, por ello, algunos perfiles de llegadas para el caso de 1 refugio completan la totalidad de evacuados.

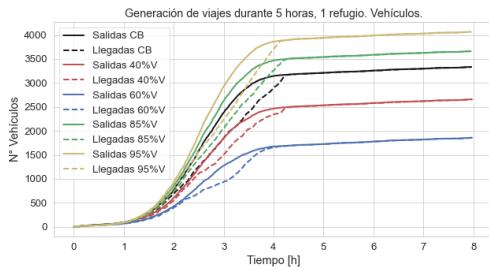


Figura 13: Perfiles de generación de viaje y llegadas a destinos para vehículos para un horizonte de 5 horas de evacuación (1 Refugio).

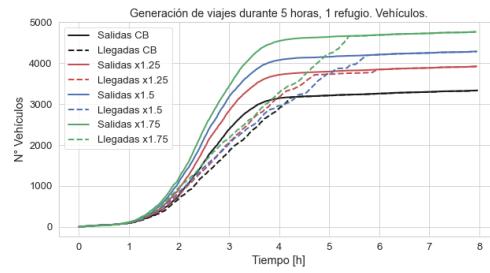


Figura 14: Perfiles de generación de viaje y llegadas a destinos para vehículos para un horizonte de 5 horas de evacuación (1 Refugio).

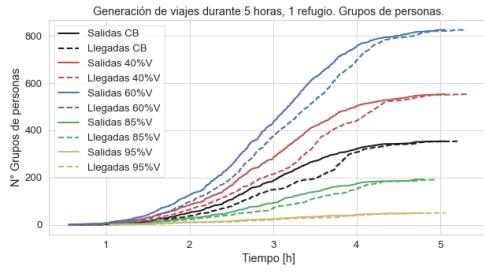


Figura 15: Perfiles de generación de viaje y llegadas a destinos para G. de personas para un horizonte de 5 horas de evacuación (1 Refugio).

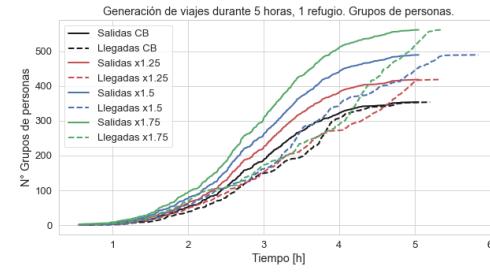


Figura 16: Perfiles de generación de viaje y llegadas a destinos para G. de personas para un horizonte de 5 horas de evacuación (1 Refugio).

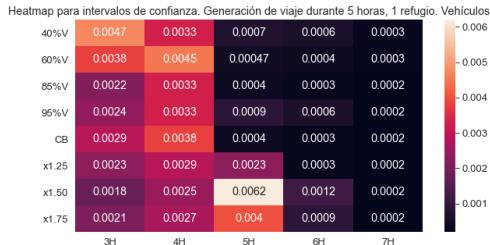


Figura 17: Intervalos de confianza del número de evacuados esperados c/r al total. Generación de viajes durante 5 horas, 1 refugio. Vehículos.

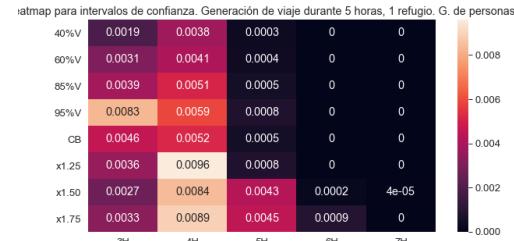


Figura 18: Intervalos de confianza del número de evacuados esperados c/r al total. Generación de viajes durante 5 horas, 1 refugio. G. de personas.

8. Conclusiones y futuras direcciones

Una de las dificultades más grandes del presente estudio es la escasa información que se posee con respecto a las emergencias ocurridas en Chañaral, complicando la calibración del caso de estudio. Sin embargo, la posibilidad de readjustar parámetros para representar distintos escenarios, permite adecuarse a las situaciones más críticas de la evacuación. Sin duda, la comunicación con el simulador y la implementación de comportamientos a través del API de PARAMICS ha sido el proceso más desafiantre de este estudio. Plantear soluciones, lograr implementar conductas y calibrarlas ha requerido de tiempo y trabajo constante.

Los escenarios implementados muestran un funcionamiento positivo de la herramienta diseñada, los escenarios críticos mostraron resultados esperados y lo estrecho de los intervalos de confianza de dan más confiabilidad a los resultados considerando distintas realizaciones del mismo escenario.

Tabla 4: Tiempos de viaje promedio (horas) esperados para vehículos

Escenarios	1 Refugio				3 Refugios			
	3 horas	4 horas	5 horas	6 horas	3 horas	4 horas	5 horas	6 horas
40 %V	0.39	0.25	0.15	0.08	0.24	0.14	0.09	0.06
60 %V	0.51	0.36	0.22	0.12	0.30	0.19	0.10	0.06
85 %V	0.53	0.39	0.25	0.16	0.32	0.18	0.10	0.06
95 %V	0.50	0.37	0.24	0.14	0.28	0.17	0.08	0.04
CB	0.57	0.40	0.25	0.14	0.33	0.21	0.12	0.06
X1.25	0.74	0.60	0.45	0.32	0.49	0.35	0.23	0.14
X1.5	0.93	0.80	0.65	0.52	0.64	0.52	0.37	0.26
X1.75	1.06	0.92	0.80	0.67	0.81	0.66	0.52	0.42

Tabla 5: Tiempos de viaje promedio (horas) esperados para grupos de personas

Escenarios	1 Refugio				3 Refugios			
	3 horas	4 horas	5 horas	6 horas	3 horas	4 horas	5 horas	6 horas
40 %V	0.40	0.28	0.20	0.17	0.26	0.17	0.16	0.15
60 %V	0.44	0.34	0.24	0.18	0.29	0.21	0.16	0.15
85 %V	0.41	0.29	0.25	0.20	0.29	0.21	0.16	0.15
95 %V	0.39	0.29	0.23	0.19	0.26	0.19	0.14	0.13
CB	0.45	0.34	0.25	0.20	0.31	0.22	0.17	0.15
X1.25	0.62	0.46	0.37	0.32	0.43	0.33	0.24	0.18
X1.5	0.78	0.66	0.50	0.40	0.55	0.44	0.31	0.26
X1.75	0.98	0.76	0.67	0.55	0.74	0.57	0.42	0.35

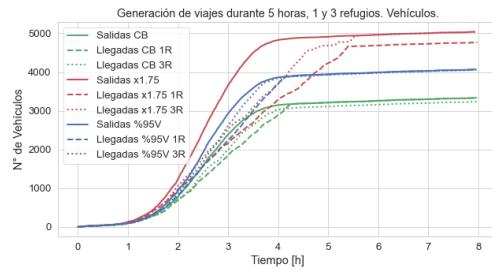


Figura 19: Perfiles de generación de viaje y llegadas a destinos para vehículos para un horizonte de 5 horas de evacuación. 1 y 3 refugios.

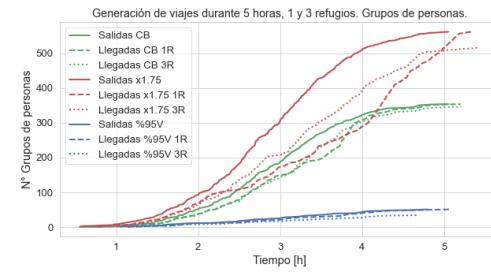


Figura 20: Perfiles de generación de viaje y llegadas a destinos para g. de personas para un horizonte de 5 horas de evacuación. 1 y 3 refugios.

Con respecto a los resultados obtenidos, si bien la implementación de la estrategia de aumento de refugios muestra positivos resultados, puede no ser suficiente para una evacuación expedita y sin mayores complicaciones en ventanas de tiempo acotadas. Además, dado que las condiciones climáticas podrían no ser las óptimas, la posibilidad para evacuar a cualquier individuo desde cualquier punto de la ciudad podría ser imposible, lo cual requiere agregar otras estrategias.

El modelamiento del caso de estudio contempla propiedades importantes tales como la generación de viajes, la consideración de refugios, distintos modos de transporte, entre otras. No obstante, este estudio aún puede incorporar variables de decisión asociadas a elección de modos de transporte y destinos, parámetros inciertos y otros aspectos abordados en la Revisión de Literatura. Debido a las limitaciones computacionales y temporales, la consideración de estas características del modelo queda para publicaciones en el futuro.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte de los proyectos ANID/FONDECYT/REGULAR 1191200 y del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería ANID PIA/APOYO AFB180003.

Referencias

- D. Alvear, O. Abreu, A. Cuesta, y V. Alonso. A new method for assessing the application of deterministic or stochastic modelling approach in evacuation scenarios. **Fire Safety Journal**, 65:11–18, 2014.
- K. M. Alves, M. C. Parodi, y P. A. Rey. Identificación de zonas seguras y diseño de un plan de evacuación en caso de aluviones en la cuenca del río salado. In **I Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIIO 2019)-JAIIO 48** (Salta), 2019.
- J. Barceló. Models, traffic models, simulation, and traffic simulation. In **Fundamentals of traffic simulation**, pages 1–62. Springer, 2010.
- V. Bayram. Optimization models for large scale network evacuation planning and management: A literature review. **Surveys in Operations Research and Management Science**, 21(2):63–84, 2016.
- S. Bretschneider y A. Kimms. Pattern-based evacuation planning for urban areas. **European Journal of Operational Research**, 216(1):57–69, 2012.
- V. Campos, R. Bandeira, y A. Bandeira. A method for evacuation route planning in disaster situations. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, 54:503–512, 2012.
- DLR Institute of Transportation Systems. Sumo webpage, 2020. URL http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabcid-9883/16931_read-41000/. [En línea; recuperado el 10 de abril de 2020].
- M. M. Farahani, S. K. Chaharsooghi, T. Van Woensel, y L. P. Veelenturf. Capacitated network-flow approach to the evacuation-location problem. **Computers & Industrial Engineering**, 115: 407–426, 2018.
- H. K. Gaddam y K. R. Rao. Speed–density functional relationship for heterogeneous traffic data: a statistical and theoretical investigation. **Journal of modern transportation**, 27(1):61–74, 2019.
- A. Hashimoto y H. Tamiya. Static routing system, Oct. 21 1997. US Patent 5,680,116.
- X. HOU, J. XIONG, G. JIANG, S. CHEN, X. YANG, y X. ZHAO. Calculation method of emergency evacuation time based on paramics. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, page S1, 2009.
- Y. Liu, N. Okada, y Y. Takeuchi. Dynamic route decision model-based multi-agent evacuation simulation-case study of nagata ward, kobe. **Journal of Natural Disaster Science**, 28(2):91–98, 2008.
- F. Makinoshima, F. Imamura, y Y. Abe. Enhancing a tsunami evacuation simulation for a multi-scenario analysis using parallel computing. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 83: 36–50, 2018.
- McTrans Center. Corsim webpage, 2020. URL <http://mctrans.ce.ufl.edu/mct/index.php/tsis-corsim/>. [En línea; recuperado el 10 de abril de 2020].
- M. M. Mubasher y J. S. W. ul Qounain. Systematic literature review of vehicular traffic flow simulators. In **2015 International Conference on Open Source Software Computing (OSSCOM)**, pages 1–6. IEEE, 2015.

- P. Murray-Tuite y B. Wolshon. Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 27:25–45, 2013.
- M. Ng y D.-Y. Lin. Sharp probability inequalities for reliable evacuation planning. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 60:161–168, 2015.
- A. J. Pel, M. C. Bliemer, y S. P. Hoogendoorn. A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations. **Transportation**, 39(1):97–123, 2012.
- PTV Group. Vissim webpage, 2020. URL <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/>. [En línea; recuperado el 10 de abril de 2020].
- Quadstone Paramics. Paramics version history, 2020. URL <http://www.paramics-online.com/>. [En línea; recuperado el 10 de abril de 2020].
- R. Rastogi, S. Chandra, et al. Pedestrian flow characteristics for different pedestrian facilities and situations. 2013.
- S. K. So y C. F. Daganzo. Managing evacuation routes. **Transportation Research Part B: Methodological**, 44(4):514–520, 2010.
- F. Song, X.-k. Yang, y L. Du. The development of paramics based metropolitan emergency evacuation transportation simulation system—meetsim. In **ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable**, pages 388–400. 2010.
- J. H. Sorensen. Hazard warning systems: Review of 20 years of progress. **Natural Hazards Review**, 1(2):119–125, 2000.
- F. Southworth. Regional evacuation modeling: A state of the art reviewing. Technical report, ORNL Oak Ridge National Laboratory (US), 1991.
- A. Stepanov y J. M. Smith. Multi-objective evacuation routing in transportation networks. **European Journal of Operational Research**, 198(2):435–446, 2009.
- P. Sykes. Traffic simulation with paramics. In **Fundamentals of traffic simulation**, pages 131–171. Springer, 2010.
- TSS-Transport Simulation Systems. Aimsun webpage, 2020. URL <https://www.aimsun.com/>. [En línea; recuperado el 10 de abril de 2020].
- H. Tu, G. Tamminga, H. Drolenga, J. de Wit, y W. van der Berg. Evacuation plan of the city of almere: simulating the impact of driving behavior on evacuation clearance time. **Procedia Engineering**, 3:67–75, 2010.
- H. Tuydes. **Network traffic management under disaster conditions**. Northwestern University, 2005.
- H. Üster, X. Wang, y J. T. Yates. Strategic evacuation network design (send) under cost and time considerations. **Transportation Research Part B: Methodological**, 107:124–145, 2018.
- X. Yang, X. J. Ban, y J. Mitchell. Modeling multimodal transportation network emergency evacuation considering evacuees' cooperative behavior. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 114:380–397, 2018.
- X. Zhang y G.-l. Chang. A dynamic evacuation model for pedestrian–vehicle mixed-flow networks. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 40:75–92, 2014.
- A. K. Ziliaskopoulos. A linear programming model for the single destination system optimum dynamic traffic assignment problem. **Transportation Science**, 34(1):37–49, 2000.