

MODELACIÓN DE LA INTERACCIÓN PEATÓN – VEHÍCULO EN UN ARCO DURANTE SITUACIONES DE EMERGENCIA

Filipa Muñoz Petersen, Pontificia Universidad Católica de Chile famunoz3@uc.cl

Ricardo Giesen Encina, Pontificia Universidad Católica de Chile giesen@ing.puc.cl

Juan Carlos Herrera Maldonado, Pontificia Universidad Católica de Chile jch@ing.puc.cl

RESUMEN

La evacuación de gran parte de una población es necesaria cuando esta se encuentra en riesgo debido al impacto de desastres naturales, y tiende a ser un proceso muy complejo. Herramientas computacionales pueden apoyar la toma de decisiones al momento de construir un plan de evacuación que minimice el tiempo de evacuación. En este documento se expone la investigación en curso para el desarrollo de un modelo macroscópico basado en el *Cell Transmission Model* de Daganzo (Daganzo, 1994) que considera la interacción entre peatones y vehículos cuando estos comparten una misma vía de evacuación, inicialmente enfocado en la ciudad de Iquique.

Palabras claves: gestión de desastres, macroscópico, Cell Transmission Model

ABSTRACT

Evacuating a large part of a region is necessary when people are affected by natural disasters and it can become a complex process. Softwares have already been used to support the decision making when building an evacuation plan in order to minimize population's evacuation time. In this document an ongoing research to develop a new model to simulate evacuations is exposed, based on Daganzo's Cell Transmission Model (Daganzo, 1994). It incorporates pedestrian – vehicle interaction on the same evacuation route when evacuating and initially its focus will be on the city Iquique, in the north of Chile.

Keywords: disaster management, macroscopic, Cell Transmission Model

1. INTRODUCCIÓN

Debido a su ubicación geográfica, Chile se ve constantemente afectado por desastres naturales como terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierra. Solo en los últimos 15 años, 64 eventos de este tipo han ocurrido en nuestro país, dejando a más de cuatro millones de personas afectadas. Sin embargo, no ha sido sino después del terremoto del año 2010 en la Región del Bío-Bío que el estudio de este tipo de eventos ha tomado mayor relevancia tanto en el mundo académico como privado y gubernamental. El Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN) es una de las iniciativas que se creó luego de que el país se diera cuenta que aún falta mucho por desarrollar en torno a los desastres naturales. Esta investigación está enmarcada en el área de la gestión de desastres del CIGIDEN, y se está llevando a cabo en la ciudad de Iquique, con apoyo de la ONEMI y la Ilustre Municipalidad de Iquique.

El foco de la gestión de desastres está puesto en la preparación, respuesta y recuperación o mitigación de los efectos del desastre, y una de las formas más comúnmente utilizada para alcanzar su objetivo es la evacuación de gran parte de la población desde zonas en riesgo hasta zonas de seguridad. El proceso de evacuación toma especial relevancia cuando una región se ve afectada por un desastre natural que entrega un corto tiempo de respuesta, como es el caso de terremotos y tsunamis. La población cuenta a veces solo con minutos para dirigirse a un lugar seguro, por lo que la organización del movimiento de grandes masas debe estar planificado con anterioridad, objetivo que cumplen los planes de evacuación que se han desarrollado en Chile, por ejemplo. Si bien estos planes son implementados a todo lo largo del país, estos no cuentan con el respaldo de herramientas especializadas, sino que han sido creados a partir de la experiencia y los escasos registros que se conservan, por lo que es necesaria la utilización de una herramienta de apoyo más compleja que permita predecir posibles puntos de congestión y rutas aptas para la evacuación.

Actualmente existe una serie de programas computacionales que simulan el proceso de evacuación tanto en espacios reducidos, por ejemplo al interior de edificios, como en lugares abiertos tal como una ciudad completa. Pero debido a que ninguno de estos modelos ha sido desarrollado para el caso específico de Chile, no son capaces de captar un comportamiento particular que en Chile es muy común: la evacuación en múltiples modos de transporte. Aunque las autoridades aconsejan la evacuación a pie, estas no realizan ningún tipo de fiscalización durante el proceso que se lleva a cabo, y evidencia empírica muestra que gran parte de la población utiliza su vehículo particular para evacuar, compartiendo la misma vía de evacuación con los peatones. Por lo tanto, si se desea utilizar una herramienta de apoyo a las instituciones competentes, se necesita un modelo que replique el comportamiento que se observa en Chile.

Esta investigación está aún en curso y se centra en el desarrollo del modelo básico para simular la interacción entre peatones y vehículos en un mismo arco bajo condiciones de emergencia. Así se podrían evaluar distintos escenarios dependiendo de la proporción de individuos que escoge evacuar a pie o en vehículos. En las siguientes secciones se presenta una revisión bibliográfica para dar a conocer los avances que se han realizado hasta ahora (Sección 2), luego se expone el modelo teórico en el que se basará la propuesta (Sección 3) y los principales supuestos de modelación y los alcances que se esperan obtener (Secciones 4 y 5). Aún no se tienen resultados finales para presentar, pero en la Sección 6 se presentan los resultados esperados.

2. CONTEXTO

Iquique es la capital regional de la I Región de Tarapacá. Con una población de 168.397 habitantes (INE, 2012), gran parte de ella estaría en riesgo en caso de haber un tsunami en la zona, incluyendo a cerca de la mitad de colegios y jardines infantiles de la ciudad. Iquique ha registrado al menos cuatro grandes movimientos telúricos en los últimos nueve años, los cuales se muestran en la Tabla X a continuación, y en todos ellos ha sido necesario evacuar a la población preventivamente, aunque los daños han sido menores solo en algunos casos.

Tabla 1 Movimientos telúricos en la I Región de Tarapacá (Fuente: Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile)

Ciudad	Fecha	Grados (Escala Richter)
Iquique	13-06-2005	7,8
Arica	16-03-2014	6,7
Iquique	01-04-2014	8,2
Iquique	03-04-2014	7,7

El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA, 2012) elabora la Carta de Inundación por Tsunami para todas las regiones de Chile, la que entrega información sobre la profundidad de la inundación y la representación del terreno en relieve. Esta es la base para la posterior elaboración del Plan de Protección Civil ante Tsunami por la ONEMI el año 2013, el que se muestra en el Apéndice A. Este último documento está dirigido a la población y entrega información sobre:

- i. Línea de seguridad: nivel en que la población estaría fuera de riesgo de la inundación.
- ii. Puntos de encuentro (PE): zonas ubicadas sobre la línea de seguridad y que tienen la capacidad de albergar a grandes masas de personas
- iii. Vías de evacuación: calles por las cuales se recomienda evacuar
- iv. Zona de inundabilidad: zona que se encuentra potencialmente en riesgo

Si bien la determinación de la línea de seguridad y la zona de inundabilidad ha sido en base a la Carta de Inundación por Tsunami del SHOA, la elección de las vías de evacuación y los PE no ha tenido mayor respaldo tecnológico. El proceso fue la simple selección de rutas cuyo flujo vehicular fuese perpendicular a la línea costera y contrario a la dirección de la evacuación, para que la evacuación no fuese entorpecida por los vehículos. Solo en algunos casos se tuvo en cuenta la peligrosidad de las vías debido a posibles derrumbes, y en ningún caso se consideró la presencia de vehículos motorizados sobre las rutas.

Iquique es la segunda ciudad con la tasa de motorización más alta en el país, con un promedio de 257 vehículos particulares cada mil habitantes, y cuenta con un promedio de 23,7 vehículos por hectárea urbana, el más alto del país (FUENTE: PDF de la UDP). Si bien tanto la ONEMI como la Municipalidad recomiendan la evacuación a pie para evitar congestiones y accidentes, evidencia empírica recogida en evacuaciones preventivas muestra que gran parte de la población escoge su vehículo particular para evacuar hasta la zona segura. Este comportamiento, que difiere de lo que se ha observado en otros países más desarrollados, no es tan poco común en regiones con las mismas características socio – económicas de Iquique tanto dentro del país como internacionalmente. De esta manera, la necesidad por una herramienta que replique esta situación toma mayor relevancia.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los modelos de evacuación típicamente se clasifican en microscópicos, mesoscópicos y macroscópicos (Hardy y Wunderlich, 2007). Los primeros caracterizan separadamente a cada uno de los vehículos en una red, modelando sus trayectorias individuales en cada instante. Por esta razón es que, si bien resultan en simulaciones con un mayor nivel de detalle, al mismo tiempo requieren de mucha información para poder trabajar. Los modelos mesoscópicos muchas veces son clasificados dentro de las otras dos categorías, ya que entregan flujos relativos en una red, pero sin representar las trayectorias individuales de los vehículos. Por último, los modelos macroscópicos utilizan variables agregadas para describir el tráfico en una red en cada instante de tiempo, por lo que requieren de menos cantidad de información (Murray-Tuite y Wolshon, 2013). Este tipo de modelos toma especial relevancia al momento de analizar tiempos totales de evacuación y la capacidad en distintos puntos en una red. Debido a esta última característica mencionada y al hecho que no existe mucha información recolectada directamente en evacuaciones, es que en esta investigación se utilizará el enfoque macroscópico.

Los modelos macroscópicos pueden clasificarse, a su vez, en dos grandes categorías: continuos y discretos. Los primeros se basan en ecuaciones físicas implementadas a flujos de vehículos, como la de ondas cinemáticas que dio paso a la creación del modelo LWR (Lighthill and Whitham, 1955, Richards, 1956), la de la ley de los gases, o en optimizaciones. Esta última técnica ha sido ampliamente utilizada en modelación de evacuaciones, pero su gran limitación es el supuesto de que los evacuados se comportarán según un algoritmo de rutas mínimas u óptimas, lo cual puede estar muy alejado de la realidad. Los modelos discretos son generalmente discretizaciones de los modelos continuos mencionados, y son de gran utilidad cuando deben ser implementados en programas computacionales de simulación de tráfico. Debido a su simplicidad al momento de representar una red, lo que hace que ya hayan sido ampliamente utilizados en redes reales, y gracias a su aplicabilidad a herramientas computacionales, es que esta investigación se enfocará en la elaboración de un modelo discreto.

Los primeros modelos creados específicamente para redes bajo condiciones de emergencia comenzaron a desarrollarse en la década de 1970. En muchos de estos estudios las evacuaciones se consideraron eventos donde la demanda, el comportamiento de los evacuados y las condiciones de tráfico, entre otras características, eran excepcionales, por lo que los modelos se desarrollaron específicamente para situaciones de emergencia (Pel, 2012). El objetivo principal de la mayoría de estos modelos fue dar apoyo a las autoridades al momento de organizar la evacuación de regiones previo a huracanes o desastres nucleares, por lo que el elemento principal de modelación es el vehículo motorizado.

Uno de los primeros modelos de este tipo fue NETVAC, desarrollado por Sheffi et al. en 1981 para la simulación de evacuaciones alrededor de plantas nucleares. Este modelo de simulación usa relaciones entre el flujo, la densidad y la velocidad para reproducir el proceso de evacuación en una red representada como un grafo dirigido. Tiene la ventaja de representar la formación de colas y de su simple aplicabilidad, pero solo considera un elemento de modelación, el vehículo, sin dar espacio a otros modos de transporte (Sheffi et al., 1981). Precursor de NETVAC es TEVACS, modelo desarrollado por Han en 1990. Este modelo se basa en el mismo procedimiento del simulador de Sheffi, pero integra distintos tiempos de vehículos interactuando en la misma red. Esto lo hace transformando el número total de vehículos en una unidad equivalente en pasajeros,

llamada *passenger car unit*, o PCU (Han, 1990). Si bien el tráfico mixto es considerado, uno esperaría observar una relación entre los flujos de cada clase de vehículo en función de la densidad de estos, y la homogeneización de los vehículos en un arco no permite analizar estos cambios de capacidad. Ninguno de estos modelos es utilizado actualmente, ya que han sido reemplazados por simuladores de mayor complejidad (Hardy, 2007).

En 1984 KLD Associates Inc. desarrollaron el modelo DYNEV, que años más tarde quedó obsoleto al ser reemplazado por PCDYNEV, elaborado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) (Hardy, 2007). Ambos modelos representaron una mejora sustancial respecto a los modelos anteriormente mencionados: la integración de evacuación multimodal, representando en la modelación a vehículos y buses en la misma red. Sin embargo, esta particularidad es limitada, ya que los buses se representan en base a rutas, horarios y paradas fijas (Pel, 2012), lo que no permite analizar cambios de capacidad inesperados durante la evacuación. Cabe destacar que PCDYNEV ha sido recientemente utilizado en redes reales y de mayor tamaño en los Estados Unidos (Hardy y Wunderlich, 2007).

En la misma década se publicó MASSVAC (Hobeika et al., 1985), sucesor de NETVAC (Pel, 2012). MASSVAC, a diferencia de NETVAC fue desarrollado para la evacuación de áreas rurales frente al peligro de huracanes. Años más tarde, en 1994, se publicó la extensión de MASSVAC, TEDSS (Hobeika et al., 1994). Este último ofrece la posibilidad de evaluar distintos escenarios bajo condiciones de desastres humanos y naturales. De esta forma, se incorpora implementación de desastres que dejan un corto tiempo de respuesta a los evacuados, que difiere de otros eventos donde la organización de la evacuación se puede realizar con anterioridad. Sin embargo, ninguno de ellos considera la interacción entre distintos modos de transporte en una misma ruta ni la reducción de capacidad debido al mismo desastre o al proceso de evacuación.

Ninguno de los modelos mencionados simula la interacción entre peatones y vehículos sobre un mismo arco, debido a que el tipo de desastres considerados, generalmente permiten una evacuación organizada previamente en la que la población se dirige a una zona segura en sus vehículos particulares. Por otro lado, muy pocos de los modelos anteriores incorpora la reducción de capacidad de las vías ya sea por el mismo desastre o por la demanda de elementos de distinto tamaño.

Durante los últimos años se ha observado que muchos de los parámetros del tráfico durante una evacuación no difieren mucho respecto a situaciones bajo condiciones normales, por lo que estudios ya han utilizado modelos tradicionales de tráfico para la modelación de evacuaciones (Pel, 2012). Ejemplos de este tipo de modelos son DYNASMART (Murray-Tuite 2007), DynaMIT (Balakrishna et al. 2008), DynusT (Noh et al. 2009), TransCAD (Wang et al. 2010) e INDY (Klunder et al. 2009). Asimismo, existe una serie de simuladores que, si bien no han sido utilizados para modelar evacuaciones, podrían cumplir dicho objetivo. Ejemplos de esto son FREFLO (Payne, 1979), METANET (Messmer y Papageorgiou, 1990), K-Waves (Newell, 1993) y NETCELL (Daganzo et al., 1997). Todas estas herramientas, a excepción de K-Waves, se basan en la discretización de un tramo de ruta en celdas, logrando analizar el estado del tráfico en cada una de ellas en cada instante de tiempo. K-Waves reemplaza el análisis de las condiciones de tráfico a través de flujos y densidad por el flujo acumulado que pasa por un punto x en un instante de tiempo t . Nuevamente, ninguna de las herramientas anteriores incorpora a la modelación el tráfico mixto de manera heterogénea.

Actualmente, y debido al aumento de la población en las grandes urbes, ha crecido el interés por la modelación de la interacción entre peatones y vehículos utilizando modelos de tráfico ya conocidos. Sin embargo, muchos de estos estudios han usado la técnica de la optimización que, por las razones descritas anteriormente, no cumplen con las características buscadas. De todos modos cabe mencionarlos debido a que han sido precursores en el estudio de este tipo de comportamiento. Zong et al. (2008) utilizan objetivos simultáneos para optimizar la evacuación de una zona compartida por peatones y vehículos, pero restringen a peatones a lugares abiertos y a los vehículos a la red de la ciudad. Zong et al. (2010) utilizan el conocido algoritmo de múltiples colonias de hormigas para representar tráfico mixto en una ruta. Cada clase de hormiga representa una clase de vehículo, y así se integra el tráfico mixto en la red.

El enfoque que han tenido dos estudios muy recientes es la modelación basada en celdas, como el conocido *Cell Transmission Model* o CTM de Daganzo (1994). En dos trabajos de Zhang y Chang (2010, 2014) se consideran dos redes separadas de peatones y vehículos, es decir, los peatones circulan por una red de veredas y cruces peatonales y, por su lado, los vehículos se mueven por una red de calles, que se intersectan con los cruces peatonales mencionados. Así, la única interacción entre ambas clases se da en las intersecciones (Zhang y Chang, 2010, 2014). Sin incluir a peatones en su modelo, Fan y Work (2015) utilizan el enfoque del *Cell Transmission Model* para replicar el comportamiento de *creeping*, el que ocurre cuando vehículos de menor tamaño pueden seguir avanzando por entremedio de un flujo de vehículos de mayor tamaño en condiciones de congestión. Para lograr esto, separan el flujo mixto en dos fases: la primera, en condiciones de flujo libre, donde ambos flujos se mueven de acuerdo el modelo de Daganzo, y una segunda, en condiciones de congestión, donde se integra el *creeping*.

4. CELL TRANSMISSION MODEL

El modelo original fue publicado en 1994 para la modelación de un arco único, y ha sido muy utilizado hasta el día de hoy. Su naturaleza discreta basada en celdas permite una fácil comprensión y resolución del modelo, y cumple con las características buscadas para esta investigación. En esta sección primero se presenta el *Cell Transmission Model* (CTM) y luego se destacan sus ventajas y limitaciones respecto al objetivo de esta investigación.

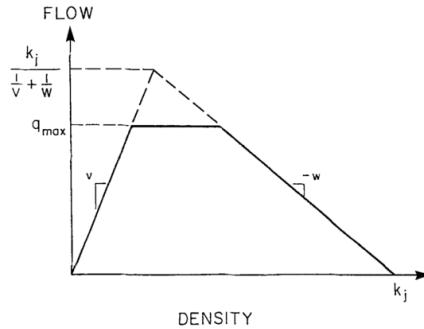
4.1. El modelo

El CTM (Daganzo, 1994) es un modelo discreto cuya resolución es coherente con la teoría del modelo LWR, y asume que el flujo (q), la densidad (k) y la velocidad (v) de los vehículos se relacionan según una relación triangular tal que:

$$q = \min\{v \cdot k, q_{max}, w(k_j - k)\}, \text{ cuando } 0 \leq k \leq k_j \quad (1)$$

Gráficamente, esta relación es como se muestra a continuación:

Figure 1 Relación triangular entre densidad y flujo



El objetivo del modelo es analizar la evolución del tráfico en un arco, donde las condiciones se actualizan a cada instante de un reloj virtual, que avanza cada cierta cantidad de segundos determinada por el modelador. El arco se divide en secciones homogéneas, llamadas celdas, que se numeran consecutivamente desde aguas arriba, donde $i=1$, hasta aguas abajo, donde $i=I$. En cada una de las celdas i , el número de vehículos se representa por $n_i(t)$, y en el caso en que no haya congestión en el arco, se debería cumplir que:

$$n_{i+1}(t+1) = n_i(t) \quad (2)$$

Para incorporar la modelación de colas en condiciones de congestión, se introducen dos constantes:

- 1) El número máximo de vehículos que puede estar presente en la celda i en el intervalo de tiempo t , representado por:

$$N_i(t) = (\text{largo celda}) \cdot k_j \quad (3)$$

- 2) La capacidad de descarga de la celda i hacia la celda $i+1$ en el intervalo de tiempo t , representada por:

$$Q_i(t) = (\text{intervalo tiempo}) \cdot (q_{max}) \quad (4)$$

Bajo congestión, la ecuación (2) ya no se cumple, y el número de vehículos que hay en la celda $i+1$ en el intervalo de tiempo $t+1$ ($n_{i+1}(t+1)$) pasa a depender de la cantidad de vehículos que son capaces de abandonar la celda i y aquellos que ingresan a la misma celda, además de depender de $n_i(t)$, según la siguiente ecuación:

$$n_i(t+1) = n_i(t) + y_i(t) - y_{i+1}(t) \quad (5)$$

Donde $y_i(t)$ es el flujo de vehículos desde la celda $i-1$ hacia la celda i en el intervalo de tiempo t , y está dada por:

$$y_i(t) = \min\{n_{i-1}(t), Q_i(t), \delta(N_i(t) - n_i(t))\} \quad (6)$$

Donde $\delta = w/v$.

4.2. Ventajas

La principal ventaja del CTM salta a simple vista: su simplicidad. Esta característica le permite al modelo ser de rápida resolución y, por lo tanto, ser de gran utilidad si se busca una herramienta de apoyo a tomadores de decisión. El modelo puede ser aplicado a cualquier tipo de arco y red, mientras se tenga información de sus parámetros de flujo, densidad y velocidad.

La representación del tráfico a través del diagrama vehicular representa otra gran ventaja, ya que tanto vehículos como peatones pueden modelarse bajo esta perspectiva. Por ejemplo, Bauer et al. (2007) y Asano et al. (2007) desarrollan modelos discretos del flujo de peatones, y ambos utilizan el diagrama triangular para representar el flujo peatonal. Bauer analiza masas de individuos en lugares públicos abiertos, y divide la zona en regiones para analizar el traspaso del flujo de un punto de una región a un punto de la siguiente (Bauer et al., 2007). Asano et al. aplican el CTM de Daganzo para el flujo peatonal multidireccional, pero con algunas extensiones. La zona de modelación también es un área, la que es dividida en forma de grilla, permitiendo el movimiento multidireccional de los individuos.

Por último, la variable $Q(t)$ es dependiente del tiempo, lo que toma especial relevancia cuando interactúan elementos de distinto tipo y tamaño sobre un mismo arco. La capacidad de un mismo arco es diferente para peatones y para vehículos, debido al tamaño de cada uno de ellos y a sus parámetros de flujo, densidad y velocidad. Según la proporción de cada una de las clases sobre el arco va a variar la capacidad de este, por lo que $Q(t)$ va a variar tanto con el tiempo como para cada clase.

4.3. Limitaciones

La gran limitación del CTM es que considera una sola clase, lo que se traduce en que la función de transferencia, $y_i(t)$, solo depende de una serie de parámetros. Por un lado, en el caso en que el arco es compartido por dos clases distintas, la capacidad de descarga de la celda i depende no solo del flujo y del tiempo como determina el modelo originalmente, sino que también del número de elementos de cada clase. Por otro lado, el espacio disponible en la celda $i+1$ será diferente para cada clase, ya que, por ejemplo, en el espacio libre en el que cabe una cierta cantidad de peatones, puede no caber un vehículo.

Entonces, las extensiones que deben hacerse deben ir dirigidas a modificar la función de transferencia para que ésta considere a ambas clases presente en el arco.

5. METODOLOGÍA

La modelación de esta investigación está basada en la evidencia empírica. A través del CIGIDEN, se obtuvo una serie de grabaciones de los principales canales de televisión (TVN, C13, CHV y MEGA), en los que se registra el proceso de evacuación en Iquique desde distintas perspectivas y variados puntos a lo largo de la ciudad. Las observaciones obtenidas de este material serán la base para la determinación de los parámetros de modelación y la función de transferencia.

Una vez que se cuente con la información mencionada, se procederá a programar el modelo correspondiente para un arco sin entradas ni salidas físicas. Sí se considerará la entrada y salida de peatones a lo largo del arco, ya que estos comienzan su evacuación generalmente desde sus hogares. Los vehículos solo serán capaces de ingresar en el origen del arco y salir al final de este.

La validación de este tipo de modelos es muy difícil, ya que generalmente se carece de datos reales medidos en terreno durante una evacuación. Por esta razón, la validación de este modelo va a depender de la información disponible. Actualmente los autores están trabajando en la búsqueda de información empírica de cámaras de seguridad de la Ilustre Municipalidad de Iquique para la validación.

6. MODELACIÓN

6.1. Características del modelo

El nivel de detalle del modelo será macroscópico, por lo que las variables agregadas de flujo, densidad y velocidad tomarán especial relevancia. Además, el enfoque será discreto en tiempo y espacio, dividiendo la simulación en instantes de tiempo homogéneos y el arco en celdas de igual longitud. El área de modelación será un único arco, sin bandeja central, cuyo flujo vehicular puede ser en una o dos direcciones. Solo se considerarán dos modos de evacuación, el vehículo, particular o taxi colectivo, y la caminata.

6.2. Supuestos de modelación

Tal como se observa actualmente en Iquique, se asumirá que no hay regulación por parte de las autoridades durante la evacuación. De esta manera, la porción de la población que desee evacuar en vehículo no será penalizada. El flujo, tanto de peatones como de vehículos, será siempre unidireccional, dirigiéndose desde una zona vulnerable a la zona de seguridad. Estas zonas, llamadas PE en Iquique, tienen capacidad suficiente para albergar a todos los evacuados. El contraflujo, es decir, individuos que se dirigen hacia la zona de peligro, se considera despreciable. La evacuación se asume luego de desastres naturales donde se cuenta con un tiempo de respuesta corto, por lo que no hay mayor planificación previa al evento. Por último, se asume que tanto el movimiento de peatones como de vehículos puede ser representado por el modelo triangular.

Por último, literatura especializada en la psicología de la emergencia sostiene que comportamientos como el pánico masivo y los grandes desórdenes son mitos, y no entorpecen el proceso de evacuación (Dury et al. 2013). De la evidencia empírica proveniente de la ciudad de Iquique con la que se cuenta se extrae la misma conclusión.

6.3. Hipótesis de comportamiento

El comportamiento de peatones y vehículos mientras interactúan unos con otros se observó directamente de la evidencia empírica. A continuación se describen los comportamientos detectados y las hipótesis que se consideran a partir de ellos.

- i. Se observó que cuando los vehículos se encontraban bajo condiciones de taco (a k_j y $v=0$), los peatones no ingresaban a la calle, y en casos en que los vehículos se movían a velocidad de flujo libre y a bajas densidades, los peatones sí utilizaban la calle.

Hipótesis de comportamiento: La proporción en la que se distribuyen peatones y vehículos en el arco depende solo de la densidad, no de la velocidad.

- ii. Cuando peatones y vehículos comparten la calle, sin estar una clase generando congestión sobre la otra, los peatones se mueven por los extremos de la calle, mientras que los vehículos se mueven por el centro, aunque esto signifique ir en fila reduciendo su velocidad.

Hipótesis de comportamiento: Bajo densidades críticas, las clases no interactúan entre sí, y se mueven como dos flujos separados.

- iii. Si bien los peatones pueden alcanzar una alta densidad, debido a su capacidad de agruparse con poco espacio entre cada individuo, se observa que estos no superan una densidad que les permite el libre movimiento. Al momento en que el espacio disponible les obliga a superar esta densidad, los peatones se retiran de la calle.

Se observa además que los peatones no aumentan su tiempo de evacuación debido a los demás peatones. Como estos tienen la posibilidad de evacuar tanto por la acera como por la calle, el momento en que alguno de estos arcos supere la densidad crítica y se comience a generar una cola, los peatones se cambiaran de arco.

Hipótesis de comportamiento: Peatones no superan una densidad que es menor a la máxima alcanzable.

- iv. Los vehículos no realizan movimientos que pongan en riesgo la vida de los peatones. Mantienen la máxima velocidad alcanzable en el arco y no utilizan la acera para evacuar.

Hipótesis de comportamiento: Vehículos pueden ser modelados por una relación triangular tradicional.

7. RESULTADOS ESPERADOS Y CONSTRIBUCIONES

El principal resultado de esta investigación es un modelo de simulación, de simple comprensión e implementación, que requiera poca información para su funcionamiento y que replique el comportamiento de peatones y vehículos cuando estos comparten una misma vía de evacuación luego de un desastre. Se espera que este modelo sea el punto de partida para el desarrollo de una herramienta más completa en un futuro, que permita modelar redes más complejas, similares a las que se encuentran actualmente en ciudades con riesgo de desastres naturales en Chile.

Durante una evacuación, el principal objetivo es reducir lo más posible el tiempo de evacuación de la población, para que ésta logre llegar a una zona de seguridad y así evitar perder vidas. Con este tipo de herramientas será posible simular la evacuación de una región dada, encontrando los

posibles puntos de congestión causados por reducciones de capacidad en las rutas. De esta manera, se podrán evaluar distintos escenarios de evacuación, dependiendo de la proporción de la población que evacúa a pie y la que lo hace en vehículo.

Este modelo representará un avance respecto a la tecnología usada en Chile para la elaboración de planes de evacuaciones. Regiones con las mismas características analizadas en esta investigación, que se encuentran en muchos países de distintos niveles de desarrollo económico, podrán utilizar este modelo también.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Asano, M., Agachi, S., Kuwahara, M. y Tanaka, S. (2007) Dynamic Cell Transmission-Based Pedestrian Flows and Strategic Route Choices. **Transportation Research Record Board**, 2039, 42-49
2. Bauer, D., Seer, S. y Brändle, N. (2007) Macroscopic Pedestrian Flow Simulation for Designing Crowd Control Measures in Public Transport after Special Events. **SCSC Proceedings of the 2007 summer computer simulation conference**, 1035-1042
3. Daganzo, C. (1994). The cell transmission model part I: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. **Transportation Research Part B: Methodological**, Vol. 28B, pp.269-287
4. Daganzo, C. (1995) The cell transmission model part II: Network modelling. **Transportation Research Part B: Methodological**, 29B(2), 79-93
5. Daganzo, C., Cayford, R. y Lin, W. (1997) **The NETCELL simulation package: Technical description**. Research Reports, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH), Institute of Transportation Studies (UCB), UC Berkeley
6. Dury, J., Novelli, D., Stott, C. (2013) Psychological disaster myths in the perception and management of mass emergencies. **Journal of Applied Social Psychology**, 43, 11, 2259-2270.
7. Fan, S. (2015) A Cell Transmission Model for Heterogeneous Multiclass Traffic Flow With Creeping. **Transportation Research Board**, 94th Annual Meeting.
8. Han, A. (1990) TEVACS: Decision Support System for Evacuation Planning in Taiwan. **Journal of Transportation Engineering**, 116, 6, 821-830
9. Hardy, M. y Wunderlich, K. (2007) Evacuation Management Operations (EMO) Modeling Assessment: Transportation Modeling Inventory. FHWA, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
10. Hobeika, A., Kim, S. y Beckwith, R. (1994) A decision system for developing evacuation plans around nuclear power stations. **Institute for Operations Research and the Management Sciences, INFORMS**, 24, 5, 22-35.
11. Hoogendoorn, S. (2001) State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, pp. 283-303
12. INE (2012) **Censo 2012, Resultados preliminares Región de Tarapacá**.
13. Murray-Tuite, P. y Wolshon, B. (2013) Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 27, 25-45

14. Newell, G. (1993) A simplified theory of kinematic waves in highway traffic part I: General theory. **Transportation Research Part B: Methodological**, 27, 4, 305-313
15. Lighthill, M. y Whitham, G. (1955) On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long crowded roads. **Proceedings of the Royal Society A** (Londres), A229, 281-345.
16. Pel, A., Bliemer, M. y Hoogendoorn, S. (2012) A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations. **Transportation**, 39, 97-123
17. Pel, A., Bliemer, M. y Hoogendoorn, S. (2008) EVAQ: A new analytical model for voluntary and mandatory evacuation strategies on time-varying networks. **IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems**, Proceedings, ITSC, 528-533
18. Richards, P. (1956) Shock waves on the highway. **Operations Research**, 4, 42-51
19. Sheffi, Y. (1981) A Transportation Network Evacuation Model. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 16(A), 3, 209-218
20. Universidad Diego Portales (2012) **Diagnóstico del Transporte Urbano en Chile**, Análisis e indicadores para 28 ciudades chilenas. Realizado por la Facultad de Ingeniería, Santiago, Chile.
21. Zhang, X. (2010) Optimal Control Strategies for Massive Vehicular-Pedestrian Mixed Flows in the Evacuation Zone. **Transportation Research Board**, 23, 1-24
22. Zhang, X. y Chang, G. (2014) A dynamic evacuation model for pedestrian-vehicle mixed-flow networks. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 40, 75-92
23. Zong, X. et al. (2008) A conflict-congestion model for pedestrian-vehicle mixed evacuation based on discrete particle swarm optimization algorithm. **Computers and Operations Research**, 44, 1-12

9. APÉNDICE

Apéndice A: Plan de Protección Civil ante Tsunami

