



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría En Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

## CÁLCULO DE TIEMPOS DE DESALOJO PARA RECINTOS CERRADOS

CASO DE ESTUDIO: AUDITORIO JOSEFA ORTIZ DE DOMÍNGUEZ

### Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

#### Presenta:

Ing. Andrés Andrade Becerra

#### Dirigido por:

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca  
Presidente

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza  
Secretario

Dra. María de Luz Pérez Rea  
Vocal

M.I. Marco Luis Dorado Pineda  
Suplente

M.I. Emilio Abarca Pérez  
Suplente

Dr. Manuel Toledano Ayala  
Director de la Facultad

Firma  
Firma  
Firma  
Firma  
Firma

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Junio 2018

## RESUMEN

El presente estudio analiza las metodologías internacionales para estimar tiempos de evacuación en recintos cerrados, basándose en la aplicación de códigos internacionales como el chino, americano y japonés. Por otra parte, existen además investigaciones que se enfocan en lugares más específicos como hospitales, estaciones de transporte público como el metro o el ferrocarril hasta evacuación de edificios altos, lo que se puede asemejar más al objeto de interés que se tiene en la investigación.

El área de estudio se ubica en el Auditorio Josefa Ortiz de Domínguez, en la ciudad de Querétaro donde el estudio se enriquece al realizar reconocimiento de lugar y contemplar las características generales del recinto como las capacidades de múltiples eventos, salidas de emergencias existentes, hasta dimensiones de pasillos y longitudes de salida a los puntos de seguridad exteriores, y así, poder observar que tan estrecha es la relación entre parámetros de experimentos estudiados y el que se analiza en el trabajo siendo que la evacuación es causada por un incendio o un terremoto.

(PALABRAS CLAVE: recinto cerrado, tiempo de evacuación, estimación, desastre natural, características físicas).

## SUMMARY

The present study analyzes international methodologies to estimate evacuation times in enclosed spaces, based on the application of international codes such as Chinese, American and Japanese. On the other hand, there are other investigations that focus on more specific places such as hospitals, public transport stations such as the subway or the railroad until the evacuation of tall buildings, which can be more similar to the object of interest in this investigation.

The location study area is the Josefa Ortiz de Dominguez Auditorium, in the city of Queretaro where the study is enriched by recognizing places and contemplating the general characteristics of the site such as the capabilities of multiple events, exits of existing emergencies, up to the dimensions of corridors and lengths of exit to the external security points, and thus, be able to observe that so closely related to the relation between parameters of experiments and the one that is analyzed in the work that is the evacuation caused by a fire or an earthquake.

(KEYWORDS: closed area, evacuation time, estimation, natural disaster, physical characteristics).

## AGRADECIMIENTOS

La presente investigación representa el último paso para alcanzar una meta personal, concluir una etapa más como estudiante y obtener el grado de Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad, un proyecto que desde hace años tuve presente que era el estudiar un nivel posgrado, y que hoy en día me doy cuenta de que es el inicio de una nueva vocación por seguir aprendiendo, descubriendo e implementar nuevas ideas para mejorar siempre el entorno y contribuir con conocimiento.

Agradezco de corazón a mi madre, Griselda Becerra Castañeda, mi padre, Andrés Andrade Ramírez y a mi hermano Alejandro Andrade Becerra por todo su apoyo y amor incondicional, por compartir junto a mi los buenos y malos momentos, sus consejos y la disciplina, por ser el pilar en la educación y mi formación en el núcleo familiar y ahora por apoyarme y guiarme en esta etapa que a la par involucro el proceso de independencia, contando con su respaldo en todo momento. Los amo.

Agradezco especialmente al Dr. Saúl A. Obregón Biosca por ser mi asesor y guía en el desarrollo de la investigación, su paciencia y motivación para desarrollar en mi la autosuficiencia de hacer las cosas, resolver problemas e ir avanzando siempre contando con su apoyo con alto profesionalismo y moral que tiene.

Agradezco también de manera muy especial al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, a la Dra. María de la Luz Pérez Rea, al M.I. Marco Luis Dorado Pineda y al M.I. Emilio Abarca Pérez por otorgarme la oportunidad de ser mis sinodales, agradezco y reconozco su valioso tiempo dedicado a la revisión, apoyo, observaciones y consejos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado durante el periodo de estudio, con el cual se cubrieron de gran manera los gastos necesarios para el desarrollo de la investigación y estancia en esta ciudad, muchas gracias por confiar en mi y en todos los investigadores mexicanos.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, a la Facultad de Ingeniería y a la División de Investigación y Posgrado de dicha facultad por brindar el espacio y medios necesarios, por formarme en un posgrado de calidad con un cuerpo académico que con todo profesionalismo comparten conocimientos y experiencias, que al final del camino son excelente base para la formación de criterio. Al personal administrativo por su amabilidad y servicio otorgado.

Agradezco a cada uno de mis amigos, compañeros y personas que desde antes y durante han sido parte de esta etapa, muchos de ellos de manera directa, otra indirecta, con los cuales viví experiencias, buenos y malos ratos, que siempre contribuyen a mantener un estado de animo ideal para seguir adelante.

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1 Antecedentes .....	10
1.2 Aplicaciones Reportadas .....	16
1.3 Descripción del problema.....	16
1.4 Justificación.....	17
1.5 Hipótesis y Objetivos .....	20
Hipótesis .....	20
Objetivos.....	20
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	21
2.1 Clasificación de recintos .....	21
2.2 Tipos de desalojos o evacuaciones .....	21
2.3 Psicología ante un desalojo .....	22
2.4 Calculo de Tiempo de evacuación.....	24
2.5 Códigos internacionales para estimación de tiempos de evacuación .....	25
2.6.- Modelos para la elección de la hora de salida.....	27
2.7.- Evacuación para vehículos.....	27
2.8.- Situación para desastres naturales .....	28
2.9.-LEGION para AIMSUN.....	29
2.10.-Normativas Internacionales para construcción de recintos.....	33
3. METODOLOGÍA .....	36
3.1.-Selección de recinto, características y descripción.....	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	44
5. CONCLUSIONES.....	51
5.1 Líneas de investigación futuras.....	54
6. BIBLIOGRAFIA .....	55

## Índice de cuadros

Cuadro 4.1 Tiempos de evacuación medidos de los videos, por bloque y nivel del evento 2 .....	44
Cuadro 4.2 Tiempos de evacuación medidos de los videos, por bloque y nivel del evento 1. ....	45
Cuadro 4.3 Resultados replicación evacuación con LEGION .....	46
Cuadro 4.4 Estimación de tiempos de evacuación empleando el código americano.....	48
Cuadro 4.5 Estimación de tiempos de evacuación empleando el código chino.....	49
Cuadro 4.6. Estimación de tiempos de evacuación empleando el código japonés. ....	50

## Índice de figuras

Figura 1.1 Fases de Evacuación: nº de personas desalojadas vs Tiempo.....	12
Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de investigación .....	37
Figura: 3.2 Puntos de seguridad exterior auditorio.....	38
Figura: 3.3 Señalización de rutas de evacuación .....	39
Figura: 3.4 Entradas y salidas principales del auditorio.....	39
Figura 3.5 Bloque de numeración Auditorio Josefa Ortiz de Domínguez .....	40
Figura 3.6. Parte superior: inicio de la evacuación de los locales, medio: proceso de evacuación, inferior: complejo evacuados. ....	41
Figura 3.7 Ejemplo Matriz O/D en simulación con LEGION.....	42
Figura 3.8 Grafo general para las replicaciones utilizando LEGION para Aimsun .....	43
Figura 3.9 Grafo de Auditorio Josefa Ortiz de Domínguez .....	43
Figura 5.1 Tiempo de recorrido peatonal (segundos) LEGIÓN en AIMSUN .....	52

## 1.INTRODUCCIÓN

La evacuación es una respuesta de emergencia para proteger masas, las características del flujo de vehículos y personas en una evacuación apropiada es el problema de la estimación de los tiempos de evacuación como lo menciona Zhao *et al.* (2012). En el caso de edificaciones que presentan eventos masivos, el estudio es casi nulo, lo importante es contar con parámetros definidos para eventos a escala urbana y otros para puntos de concentración de personas, es recalable que esta última requiere ser evacuada responsablemente ante una emergencia, considerando los diferentes tipos de asistentes.

Las metodologías para estimar tiempos de evacuación se han centrado en ser aplicadas solamente en lugares públicos y de grandes masas de personas en movimiento como las estaciones de trenes. Los códigos internacionales como el chino, americano y el japonés se basan bajo el mismo principio: la capacidad de desahogo tanto de escaleras, pasillos y puertas de emergencia, estos códigos ayudan a hacer más seguras las instalaciones urbanas nuevas en crecimiento en los sistemas de transporte público de casi cualquier ciudad de estos países y es replicada en países económicamente y socialmente semejantes.

En la actualidad existen softwares que ayudan a la simulación de evacuaciones en prácticamente cualquier clase de edificación, pero los estudios y aplicaciones se centran en edificios de orden público y en la infraestructura tanto interior y exterior de un sistema de transporte público, evacuaciones de estadios, auditorios, y edificaciones altas, así como la interacción de estos volúmenes de personas con la interacción que tienen con la red vial de una ciudad. AIMSUN es una herramienta muy conocida para la simulación de tránsito vehicular y LEGION como una herramienta complementaria ayuda a realizar estas simulaciones simultaneas de escenarios complejos que involucran las variables de un escenario real, esto gracias a que los programas de simulación permiten cambiar perfiles tanto de los vehículos como de los peatones, esto por velocidades tanto de marcha y caminata, si llevan equipaje o no, tipo de peatón ya sea masculino, femenino o un

niño, y por ultimo da la posibilidad de agregar un tipo de comportamiento a estos entes, incluyendo si se encuentra en un evento deportivo, una caminata común etc.

## 1.1 Antecedentes

El estudio y análisis de los tiempos de evacuación en el campo de la movilidad se han centrado en desastres naturales, considerando esencialmente las bajas de personas que se tienen ante eventos como huracanes y terremotos.

En una evacuación a nivel ciudad, bajo la llegada de un huracán por ejemplo existirán factores que afecten al tiempo de evacuación y serán de mayor magnitud, lo que involucra un tiempo mayor del que si se evacua un lugar de menores dimensiones como un estadio o auditorio donde la densidad de personas es considerablemente alta, Mohaimin *et al.* (2013) hace mención que dichas variables son: el cómo se informa del riesgo la persona, su historial de estar en eventos similares con anterioridad, su origen y nivel socioeconómico como variables normalmente distribuidas.

En una evacuación se tienen tres etapas o procesos, Chow (2016) los determina a partir de la literatura como el tiempo de derecho de respuesta, el tiempo de viaje y el tiempo de espera. Se puede entender el primero como el tiempo en que el espectador evacuada percibe la situación de peligro y el último como uno de los más críticos ya que es el que puede entorpecer el proceso eficiente de evacuar cualquier lugar. Las tres etapas de la evacuación en conjunto darán una estimación del tiempo total de evacuación y como se ha comentado anteriormente, existen variables tanto físicas como de conducta, Wang *et al.* (2015) encuentra particularmente complicado estimar los tiempos en las dos primeras etapas ya que es aquí donde más influyen las conductas individuales.

Miller (2009) menciona las fases comprendidas en un tiempo de desalojo o evacuación en edificaciones, mencionándolo como un complejo proceso que en caso de evacuación comienza por la aparición de la misma emergencia hasta estar en un punto a salvo fuera del inmueble, en un tiempo de desalojo las fases no son

las seis etapas completas que menciona a la autora, siendo cada una de ellas tan variable por los requerimientos de mayor o menor tiempo para su ejecución

En su trabajo de investigación Miller (2009) define las fases como:

- Primera fase: detección (T1). Corresponde al tiempo desde que comienza la emergencia hasta que algún espectador se percate de la situación que está ocurriendo y este puede ser tan variado por diversas variables como: clase de peligro, medios de detección disponible y día y hora del evento
- Segunda fase: alarma (T2). Es el tiempo transcurrido desde que un espectador o trabajador del inmueble reconoce el peligro y se informa que el edificio tiene que ser desalojado, este variará según los sistemas de alarma del inmueble y los tiempos de entrenamiento de los ocupantes.
- Tercera fase: decisión (T3). Tiempo transcurrido por una persona que está alertada del riesgo o de la necesidad de desalojar el inmueble, hasta que el individuo decide desalojar y básicamente depende de la capacidad de evaluar un peligro, de la información que tiene sobre ese peligro y la capacitación previa que tenga el asistente.
- Cuarta fase: información (T4). Tiempo transcurrido cuando la persona que decide que se tiene que evacuar el inmueble toma la decisión hasta que la comunica a los demás ocupantes y dependerá del sistema de comunicación, si es que el inmueble lo tiene o del modo que se emplea para informar a todos los asistentes.
- Quinta fase: preparación (T5). Tiempo transcurrido desde que se hace el comunicado de evacuar o desalojar el inmueble hasta que comienza a salir la primera persona del edificio y antes de considerar esta fase se tiene que verificar quienes y cuantas personas hay para evacuar para disminuir nuevos riesgos que puedan surgir y tener un punto de reunión acordado.
- Sexta fase: salida (T6). Tiempo transcurrido desde que empieza a salir la primera persona hasta que se retira la última en los puntos de

seguridad al exterior del inmueble y dependerá de valores como la distancia que deben recorrer los ocupantes para salir, número de personas que deben ser evacuadas, capacidad de las vías de salida y algunas limitantes de riesgo que se puedan presentar.



Figura 1.1 Fases de Evacuación: nº de personas desalojadas vs Tiempo  
Fuente: Miller, 2009.

En la actualidad las nuevas edificaciones necesitan cumplir con métodos constructivos y uso de materiales más amigables con el medio ambiente, que por lo general pueden ser más combustibles, Guancuan *et al.* (2012) Menciona en su trabajo que la seguridad contra incendios se ha vuelto en una medida muy importante en cuanto a protección civil y que cada evento de este tipo forma parte de un árbol de probabilidades, por lo que se tiene que considerar la afectación más desfavorable para la evacuación y a su vez la estimación de los tiempos del proceso como los que se han mencionado anteriormente.

Como mencionan Siikonen y Hakonen (2002) la velocidad en que un edificio puede ser desalojado puede ser crucial en muchas situaciones de emergencia, es igual de importante desarrollar modelos de estimación para lugares focalizados en una ciudad donde existan grandes concentraciones y flujos de vehículos, transporte público y asistentes a cualquier evento. Ronchi *et al.* (2015) en su estudio tiene como objeto de estudio un festival de música teniendo tres eventos modelados de posibles contingencias con capacidad para 65,000 personas, un recinto masivo, teniendo enfoque en la evacuación peatonal, identifica los principales factores que afectan el proceso observando las curvas de tiempo-personas donde hace énfasis en el estudio de aquellos que pueden alterar el comportamiento de los asistentes como la ingesta de alcohol y proponiendo como estudio a futuro implementar un modelo de una nube toxica como factor en el comportamiento de las personas ante una bomba.

En un plan integral, el tránsito generado en los alrededores durante el desalojo, los vehículos de emergencia son importantes a considerar como lo mencionan Chen *et al.* (2014) donde en el caso de evacuar, llegar al punto de seguridad más cercano involucra que la selección de la ruta de evacuación será la más corta o la más óptima donde los algoritmos más usados para la selección de esta son el Dijkstra (1959) y el Floyd Hua *et al.* (2014). Más estudios realizados demuestran modelos principalmente en eventos como huracanes y terremotos, los primeros para prevenir y los segundos después de que la red pudo haber sido dañada y lo que afecta esto en los tiempos de viaje cuando los ciudadanos se tienen que transportar de un lugar a otro.

La academia de ciencias de Estados Unidos a través del Transportation Research Board (TRB) ha publicado documentos que integran el plan de evacuación, los factores humanos y la ingeniería en tráfico donde Goldblatt y Weinisch (2005) hacen mención de que originalmente los planes integrados eran empleados a lugares como plantas químicas, instalaciones militares con armamento químico y biológico.

Bin Ran *et al.* (2014) proponen que para que una evacuación sea efectiva, en trabajos futuros, se tendrán que ver las necesidades tanto de los asistentes discapacitados como la gente que se encuentra no propiamente como espectador, sino como colaborador del evento, integrando todas las posibilidades. Ante la poca disponibilidad de estudios de medición de tiempos de evacuación para la estimación en eventos masivos, todo lleva una idea general que menciona Pourrahmani *et al.* (2015) donde involucra los cambios imprevistos en los patrones de demanda de viajes y como los peatones tienen acceso a la red de transporte, afecta el tiempo de viajes de todos, y con el enrutamiento dinámico de evacuación se pueden lograr mejores resultados en el proceso. Zhxiang *et al.* (2013) en un estudio de optimización de espacio-tiempo presenta un algoritmo involucrando a personas y vehículos en una evacuación asumiendo que esta cumpla con tres objetivos: minimizar el tiempo promedio de evacuación, reducir al mínimo la longitud recorrida y maximizar el uso de tiempo-espacio en la red de evacuación. En su estudio introducen la eficiencia de la variable tiempo-espacio como criterio para evaluar los movimientos de giro de los vehículos y peatones integrados en la red de evacuación.

Ulrich *et al.* (2013) se refiere a la necesidad de un proyecto Hermes que contempla la estimación de tiempos de evacuación estudiando todo un recinto desde colocar contadores en las puertas así como sensores para un constante monitoreo en tiempo real donde en un recinto con aforo de 55,000 a 65,000 personas predice una evacuación total de 2 minutos involucrando la arquitectura y la movilidad peatonal de la arena, aunque ante multitudes tan grandes, las consecuencias lamentables pueden ser mayores en caso de que no se evacue a tiempo, tiene que ser bien contemplado en nuevas construcciones que el tiempo de espera de los asistentes sea el menor, cosa que como lo cita Chow (2008) en edificaciones antiguas como lo son estaciones de transporte público en sistemas de transporte muy viejos y con alta densidad de usuarios como lo son en general en el medio oriente, el problema hoy en día es la evacuación de lugares abarrotados y que hacen que el tiempo de espera de las personas sea considerablemente alto, entorpeciendo así todo el proceso seguro de evacuación y aumentando la

posibilidad de que ante una situación muy desfavorable aumente el número de víctimas mortales.

En recientes investigaciones Lindell (2007) ha investigado el comportamiento de los evacuados en un huracán, lo que le permitió mediante encuestas, determinar su modelo Eblema2 que relaciona desde la selección de la ruta con cuatro parámetros físicos y 16 parámetros de conducta de los encuestados para determinar una evacuación controlada por un sistema de soporte de toma de decisiones.

Trabajos recientes acerca del tema tienen como objetivo diseñar además, modelos donde en una evacuación por muy difícil que parezca que se logre, se aumente la eficiencia del proceso, Fang *et al.* (2010) Se refiere a la eficiencia como un requisito fundamental en la planificación y operación de evacuación y para ello se tiene como antecedente su trabajo realizado en un estadio, proponiendo que en la salida algunos de los espectadores esperen un turno de evacuación para así evitar cuellos de botella mediante tiempos de espera que mejoran el sistema.

Como puede ocurrir por cuestiones físicas del inmueble a evacuar, muchas veces o en la mayoría de ellas, la evacuación de los automóviles también es muy importante, Xing *et al.* (2016) propone que para hacer la evacuación efectiva de los automóviles evacuados de una forma más rápida y más en las intersecciones viales, se preste atención en los puntos terminales de la evacuación siendo puntos críticos entre las zonas de peligro y las seguras. Otro caso que se ha causado interés entre varios investigadores, es la simulación mediante softwares de evacuación como el Pathfinder o el FDS+EVAC donde la estimación de tiempos de evacuación no sea ideal, contemplando el miedo, pánico, la pérdida de tiempo en el procesamiento de la información, la renuencia de abandonar las propiedades y la influencia social en elegir la salida de evacuación las que pueden perturbar, donde todos los aspectos anteriores pueden arrojar resultados similares a lo medido en campo o no, menciona Guo *et al.* (2014).

## 1.2 Aplicaciones Reportadas

Aplicaciones similares aplicadas a edificios o con condiciones similares como las multitudes de gente en espacios pequeños se han centrado como (12) para evaluar y aplicar los algoritmos de control de flujo rápido, como se hizo en un estudio realizado en tiempo real en espacios de tiendas en Shanghai, desplazando a 300 personas por bloque y porque de esta investigación para los bloques de entre 200 a 300 personas de una evacuación tiempo estimado en 43 segundos. Otro enfoque es la reportada por (13) encontró que los polinomios de orden variable para optimizar las distancias entre las salidas para una evacuación, y llegó a la conclusión de que, con una anchura de 2,5 m, la evacuación considerando aspectos del código de china, para un edificio de aproximadamente entre 863 y 910 segundos. El primer estudio es más similar a la infraestructura de un auditorio por la superficie y por el número de niveles en la estructura, la tienda de departamentos de un piso y la audiencia que sólo presenta diferentes niveles, además de los chinos aplicado a edificios altos con superficie máxima de 2500 metros cuadrados, la evacuación se vuelve muy larga hasta un poco más de 15 minutos. Esta diferencia significativa respecto de la idea de estimar con una cantidad de tiempo razonable en comparación con la evacuación de unos grandes almacenes.

## 1.3 Descripción del problema

Dado que la mayoría de los recintos de eventos masivos han quedado absorbidos por las manchas urbanas y quedan inmersos en la red vial de las ciudades, es importante identificar los factores que se pueden analizar para el estudio de los tiempos de evacuación para cada situación específica y no solamente que requiera ser ordenada en situaciones meramente de desastre.

El problema radica en el desconocimiento de los factores algorítmicos que se pueden emplear en un modelo de cálculo o estimación para el desalojo o

evacuación tanto de asistentes al evento y los vehículos al mismo tiempo según sea el caso, así como su interacción con el transitar cotidiano motorizado y no motorizado de la zona, para hacer un plan de desalojo adecuado a un recinto que contemple los tiempos de recorrido de los asistentes hasta un lugar seguro y que este tiempo pueda ser importante para la posible implementación de actividades después de la evacuación, en este caso el auditorio Josefa Ortiz de Domínguez, lo que implica conocer más a detalle los tiempos de evacuación que sean congruentes a la situación y conducta de los asistentes.

#### 1.4 Justificación

Dada la carencia de estudios de tiempos de evacuación en recintos de eventos masivos, es importante identificar qué factores se pueden analizar para el estudio de cada situación específica y diferenciarlo de un evento de desastre natural con evacuación a gran escala, Siikonen y Hakonen (2002) contribuyen en el análisis específico de edificios como lugares más concentrados a diferencia de una ciudad.

En Proulx (1995) se sostiene la necesidad de identificar las capacidades de cada ocupante de un lugar para ser evacuado que va desde ser un menor de edad a una persona mayor, y más aún una persona con discapacidad. Mientras en Bin Ran *et al.* (2014) se expone que los estudios óptimos serán aquellos que integren los factores como transporte público TP y peatón y así hacer la investigación para identificar factores en el algoritmo de estudio que pueden ser cambiados o estandarizados para situaciones de evacuación y tener una estimación cercana que involucre la mayor cantidad de variables que se pueden presentar, ya sean físicas, hablando estructuralmente, psicológicas, fisiológicas y patológicas, Jiang *et al.* (2014).

Por lo anterior, sobre la necesidad que sostienen Siikonen y Hakonen (2002) para la evacuación de recintos, la presente investigación considera los parámetros definidos en Proulx (1995) para calcular los tiempos de evacuación y cómo esta interactúa con el tránsito en algunos casos de lugares donde el proceso puede involucrar interacción con el flujo vehicular careciendo de espacios amplios donde se lleve a cabo, tal como propone Bin Ran *et al.* (2014).

Privyl *et al.* (2014) señalan que en caso de un incendio la identificación rápida del mismo en conjunto con la implementación óptima de la información pertinente a la gente en el recinto aumenta significativamente la conciencia y reduce el tiempo de respuesta, acelerando el proceso de evacuación total.

Otro punto para realizar la investigación radica en determinar factores genéricos ahora para los recintos cerrados como lo menciona Davood *et al.* (2011) en su trabajo donde realizó una estimación de tiempo de evacuación para cualquier hospital en situación de emergencia y encontrando así un panorama general para este tipo de edificaciones, lo que puede acercarnos a la posibilidad de estimaciones categorizadas para cada tipo o uso de un edificio en situación de emergencia específica. En cualquier espacio con aglomeraciones la necesidad de contar con los pasillos adecuados en dimensiones y la cantidad de puertas suficientes para el tránsito de las personas usando la ruta más corta y fácil para salir del recinto, Po-Han *et al.* (2009) identificó en un estudio de planta de algunos lugares como centros comerciales, un algoritmo de flujo rápido de salida donde el cálculo se basa en el tiempo de evacuación mínima con un número óptimo de evacuados para cada ruta evaluada ubicando a detalle los pasillos y salidas en planta.

Un aspecto importante a identificar es que la distancia entre las salidas es algo determinante al momento de evacuar, con múltiples salidas se reduce la distancia recorrida por el espectador hacia un punto seguro y por ende, la ruta será de cierta forma más directa, sin tantos quiebres entre su asiento y la zona segura, Qimiao *et al.* (2016) concluye en su trabajo acerca de la optimización de la distancia entre las salidas considerando una situación de incendio, usando un modelo de aproximación que construye basándose en un polinomio arbitrario usando el modelo Monte Carlo encontrando dicha distancia haciendo énfasis en la carga de ocupantes niños. La parte más sensible de evacuar son los niños, Abulassan *et al.* (2016) en su estudio en un autobús escolar en condiciones de incendio estima que una evacuación exitosa se realiza en 3 minutos o 5 minutos como máximo en puertas de autobuses donde usa caudales de 29,21 y 36 niños/minuto. En un auditorio al

igual que en el autobús ensayado los asistentes, inicialmente están sentados así que los resultados dan estimación del resultado esperado considerando que son los primeros en evacuar, e incluso que las puertas son más grandes que las de un autobús.

Otro punto que se tiene que tener en cuenta son los alcances de las estimaciones de los tiempos, Urbanik (2000) determina que son tres los objetivos de la determinación de los ETEs (Estimación de tiempos de evacuación), uno es reducir significativamente la exposición de los evacuados a la situación de emergencia, en segundo lugar saber si los ETEs son significativamente afectados por condiciones adversas como el clima y en tercero indicar si las acciones de gestión de tráfico reduciría significativamente los tiempos de evacuación. Además, para el método propuesto García *et al.* (2013) sugiere que tanto el método como el software implementado para el análisis tienen que partir de la construcción de las rutas de evacuación representadas donde cada ubicación y paso en el edificio estén dados por un conjunto de atributos que tienen que ser tomados en cuenta para la planificación de las rutas de evacuación.

Durante una emergencia dentro del recinto como puede ser un incendio, los factores que pueden afectar a los asistentes van desde el aumento de temperatura, la baja visibilidad causada por el humo hasta lo tóxico del mismo lo que hace necesario determinarlos cómo lo dice Zhang *et al.* (2016), además Cai *et al.* (2016) hace hincapié en las simulaciones de la propagación del humo generado en el edificio, influyen en todo momento en los tiempos de salida, ya que si bien en un incendio se puede tener la percepción de peligro antes de que si ocurriera un movimiento sísmico, se tiene más tiempo de holgura para evacuar si es que el incendio se presenta de forma aislada en el recinto, pero si se presenta de forma moderada, se tiene que contemplar el tiempo en el que posiblemente la estructura, si es de acero como suele ser en muchas de las nuevas construcciones como auditorios, puede colapsar la estructura por la inestabilidad que las altas temperaturas le pueden causar al acero.

En cuestiones físicas las estructuras pueden determinar el comportamiento del edificio ante una siniestralidad, pero también el caminar, la preferencia de paso. Velocidad y obstáculos serán factores que hagan incrementar u optimizar los tiempos de evacuación, Xiao-dong *et al.* (2014).

## 1.5 Hipótesis y Objetivos

### Hipótesis

El cálculo de los tiempos de evacuación o desalojo en un recinto cerrado tienen relación directa con la estimación de tiempos de evacuación en estaciones de tren para transporte público, implementando los mismos factores usados en códigos internacionales como el americano, chino y japonés.

### Objetivos

Estimar los tiempos de evacuación en recintos cerrados y decidir qué factores tanto físicos y mentales son considerables para un evento de carácter masivo en un recinto con accesos y salidas controladas, así como estudiar las similitudes y diferencias de metodologías computacionales.

Como caso de estudio el Auditorio Josefa Ortiz de Domínguez para la estimación de tiempos de evacuación de peatones y vehículos teniendo como escenario un evento en dicho auditorio y analizar cómo se comportan según la capacidad del evento, y las características de los asistentes en el proceso de evacuación.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1 Clasificación de recintos

La clasificación de recintos en los cuales se presentan eventos tiene dos componentes básicos, se denomina recinto abierto a aquel espacio, patio o explanada en el cual se presentan eventos ante un escenario, este tipo de lugares se caracterizan por ser planos o con un ligero lomerío para una mejor visión de los espectadores, al ser un espacio no delimitado por vallas o pasillos, la gente tiene libre acomodo, no existen rutas encausadas o confinadas por las cuales se lleva a cabo el acceso, acomodo de asistentes y salida de los mismos, la proporción de ocupantes no tiene un control preciso y por esto puede haber más espectadores en la sección central, izquierda o derecha y las densidades de ocupantes son variables.

Un recinto cerrado es aquel cuya infraestructura está mejor preparada para una variedad amplia de eventos, tiene secciones bien delimitadas para espacio de asistentes, su infraestructura es ordenada y cada sección tiene pasillos confinados y salidas específicas por las cuales circulan los asistentes sin interferir otras áreas del recinto. Al contar con áreas con butacas, los asistentes tienen espacios específicos a ocupar y las densidades del auditorio son más controlables. Un recinto cerrado no necesariamente es aquel que está totalmente cubierto por un techo, existen auditorios con techo y sin techo, caso similar pasa con los estadios, su clasificación se hace por si tipo de infraestructura antes mencionada.

### 2.2 Tipos de desalojos o evacuaciones

En su trabajo de investigación Miller (2009) identifica dos tipos de desalojo o evacuaciones de un inmueble, la parcial y la total, y el que pase una u otra radica en el impacto de emergencia o de situación por la cual se tiene que desalojar una parte o todo el inmueble afectando así a algunos o a todos los espectadores, y con ello varían los tiempos de desalojo por la variable de número de personas

desocupadas que al pasar por las mismas rutas de evacuación tanto parcial como de manera total, la probabilidad de que se supere la capacidad de desalojo que tienen los pasillos y las puertas será menor si el número de ocupantes desalojados es solo una fracción, la clasificación se hace de la siguiente manera:

- Evacuación parcial: Se desarrolla solo cuando la emergencia o situación es detectada de manera oportuna y solo requiere el desalojo del área afectada y además por seguridad y procedimiento hasta el punto de seguridad establecido, para que esta se lleve a cabo con éxito, el inmueble deberá contar con un sistema de comunicación clara hacia las personas del lugar preciso que se tiene que desalojar.
- Evacuación total: se realiza cuando la situación de emergencia o situación de riesgo sea verdaderamente fuerte como para que se considere que afectará a todos los asistentes, incluido el personal que labora en el recinto como un incendio de grandes proporciones o una fuga de gas.

### 2.3 Psicología ante un desalojo

Existen diversos factores que afectan el comportamiento de las personas al momento de desalojar un inmueble, los accidentes en el proceso y el descontrol de las personas son las que causan fatalidades en el peor de los casos, o interrupciones en el correcto proceso de desalojo de un inmueble. Diversos estudios actualmente buscan explicar la manera en que se comportan las personas en situaciones de riesgo o que ocurren de manera repentina y que tienen que saber actuar para salir salvos de la situación, Miller (2009) destaca dos principales factores que son el miedo activo y el miedo pasivo, el primero cuando la persona hace actividades a las que nunca se ha presentado pero le cuesta el doble de energía o pensarlo dos veces antes de hacerlo, el segundo es aquel que vive el sujeto cuando vive situaciones increíbles, queda perplejo, anonadado y no puede moverse para ejecutar los movimientos o las acciones necesarias para el desalojo. Otro factor muy

importante es el estrés al que se somete el individuo, y no es precisamente por el agotamiento que puede tener, va más allá e involucra factores físicos como la temperatura, químicos como el humo o smog, hasta estar bajo agentes bioquímicos como el alcohol.

La velocidad con que las personas pueden evacuar o ser rescatas de un inmueble es crucial para salvar vidas en muchas situaciones de emergencia, ya sea en un incendio, amenaza de bomba, armas biológicas, químicas o amenaza nuclear en los alrededores o en el mismo edificio analiza Marja (2002). Existen varios algoritmos como el desarrollado por Dijkstra (1959) que se enfoca en la optimización de ruta de evacuación para vehículos así como el Floyd, y para los tiempos de evacuación de las personas existen métodos tales como el Chino publicado por la China Planning Press (2013) y el de los Estados Unidos publicado por la National Fire Protection Assosiation (NFPA, 2014), como ejemplos de algoritmos para el caso de tiempos de evacuación para personas en los cuales se establecen parámetros definidos que indican el máximo de minutos que tomará el movimiento hacia el exterior del lugar en cuestión.

Gand *et al.* (2016) Hace una comparación entra la metodología americana, la china y la japonesa y sus resultados indican que la metodología china es fácil de ser comprendida, aunque ignora características importantes haciéndola un poco irracional, mientras que la americana y la japonesa si especifican códigos de ruta de evacuación a detalle lo cual al final concluye en tiempos de evacuación más razonable.

Para el caso de tiempos de evacuación para vehículos puede aplicar para definir la ruta de evacuación, se basa principalmente en la selección de la ruta óptima o la más corta que tendrá que recorrer como lo analizan los algoritmos de Floyd (1959) y el Dijkstra (1959), que se basan en teoría de grafos e iteraciones para que, en la combinación de la red carretera se identifique la ruta ideal.

Los dos tiempos, de peatones como de vehículos son importantes relacionarlos e integrarlos en un plan ya que son los que definirán en conjunto, el éxito o el fracaso de la evacuación oportuna de un recinto y con esto, hacer una estimación más cercana a la realidad como menciona Lindell (2006), se tendrá el tiempo necesario para borrar un área de riesgo determinada por la capacidad de las rutas de evacuación y atender la demanda que se le coloca sobre ella.

## 2.4 Calculo de Tiempo de evacuación

Miller (2009) destaca dos métodos que se pueden utilizar para la estimación de tiempos de evacuación, los cuales son:

- Método del caudal

Este método se basa en la teoría de la evacuación de un inmueble en un máximo periodo de tiempo, dicha tasa o caudal corresponde a 60 personas cada minuto que pasan por una unidad de paso, que puede ser un pasillo o una puerta que tiene de ancho 56 cm, cabe mencionar que es aconsejable utilizar este método en recintos de audiencia pública así como en edificios escolares, ya que se cree que las personas asistentes a estos lugares son personas despiertas, alertas y que están muy probablemente en buena condición física.

- Método de la capacidad

Esta teoría se basa en que el edificio a desalojar cuenta con escaleras suficientes para recibir a todos los ocupantes, sin necesidad de moverse al exterior. Garantizando que las escaleras son lugares seguros para los ocupantes en vestíbulos del inmueble, es decir sin tener que salir, la evacuación a los puntos exteriores de seguridad se podrá llevar a cabo posteriormente de forma más lenta y compatible con posibilidades de condición física de cada persona, dicha estimación se calcula con la siguiente ecuación:

$$TS = \frac{N}{AxK} + \frac{D}{V} \quad Eq. 1$$

Donde:

TS: Es el tiempo de salida en segundos

N: Número de personas

A: Ancho de la salida en metros

K: Constante experimental; equivale a 1.3 personas/metro-segundo.

D: Distancia total del recorrido en metros

V: Velocidad de desplazamiento; equivale a 0.6 metros/segundo.

## 2.5 Códigos internacionales para estimación de tiempos de evacuación

Las metodologías para el cálculo de tiempos de evacuación que existen se basan en las condiciones físicas del lugar a evacuar y las capacidades físicas de las personas, para lo cual se han hecho métodos como el chino (2013), el de los Estados Unidos (2014).

### 2.5.1- Chino “Código para el diseño de metro” (GB50157-2013)

La anchura de la escalera de salida y el conducto de evacuación deberían permitir a todos los ocupantes, ser evacuados de forma segura en 6 minutos en caso de un incendio en horas pico, difiriendo de la CFDOM (GB50517-2003), donde estipula que el personal de la estación de la plataforma no es parte de los ocupantes, si no ayuda de guía para los ocupantes hacia una zona segura, y el tiempo se calcula de la siguiente manera:

$$T = 1 + \frac{Q_1 + Q_2}{0.9(A_1(N - 1) + A_2B)} \leq 6 \text{ min} \quad Eq. 2$$

Donde  $Q_1$  es el número de ocupantes en un tren;  $Q_2$  es el ocupante en la plataforma;  $A_1$  es la capacidad de desalojo de una escalera automática;  $A_2$  es la

capacidad de las escaleras habituales; 1 es el tiempo de respuesta del personal, N el número de salidas y B el ancho de la salida en metros.

### 2.5.2 Los Estados Unidos “NFPA130 (2014)”

En la sub-clausula 5.3.3.1 de la NFPA130 (2014) dice que no será suficiente la capacidad de salida para evacuar a los ocupantes en menos de 4 minutos.

Para calcular el tiempo de evacuación, se establece que el tiempo es el total de la suma del tiempo andando durante la ruta larga de salida y los tiempos de espera de diversos elementos de circulación utilizando la siguiente fórmula:

$$T_{total} = T + W_p + \sum_{i=1}^N W_N \quad Eq. 3$$

Siendo Ttotal el tiempo total de recorrido, T el tiempo de caminata, Wp el tiempo de espera y Wn el tiempo de pausa o espera que se presenta al encontrarse con una obstrucción o algún elemento durante la ruta de caminata como algún obstáculo físico al centro de la ruta o algunos quiebres en el pasillo que generan demoras por disminución en la velocidad que lleva alguna persona, todas las variables se suman en segundos.

### 2.5.3. Estándares Ferroviarios Japoneses JIS

En una situación de incendio en una plataforma de trenes, es necesario permitir la evacuación de ella hasta el nivel de valle en máximo 10 minutos.

JIS define al tiempo de evacuación como una división en dos categorías, la del tiempo de caminata y el tiempo de espera, y que este proceso concluye hasta que la última persona se encuentra a nivel de calle, fuera del peligro.

$$T_{total} = \sum t_i + T_{t-max} \quad Eq. 4$$

## 2.6.- Modelos para la elección de la hora de salida

A fin de investigar los determinantes de los tiempos de evacuación, el modelo Logit Ordinales es muy empleado dado que las posibles partidas de intervalos de tiempo pueden ser naturalmente ordenadas (Khattak, 1995) donde supone que:

$$\log\left(\frac{\Pr(T \leq j)}{\Pr(T > j)}\right) = \beta_0 - \sum_{i=1}^N \beta_i X_i \quad Eq. 5$$

Donde  $j$  indica el intervalo de salida,  $T$  la partida elegida,  $\beta_i X_i$  son los factores que implican el hogar que se está evacuando y si es medicamente frágil o no. La literatura ha argumentado que el comportamiento de evacuación de personas con necesidades especiales es potencialmente único y fundamental para tener en cuenta en la planificación de evacuaciones mencionan Ng ManWo *et al.* (2014).

## 2.7.- Evacuación para vehículos.

Los eventos de emergencia, tales como terremotos, huracanes, accidentes químicos, accidentes nucleares, atentados terroristas, y otros eventos de grandes multitudes tienen que evacuar una zona de peligro a una zona segura por los vehículos. A través de la observación en tiempo real y en análisis de la red de carreteras en diferentes casos de evacuación, intersecciones de retardo y la velocidad de los vehículos de evacuación en la mañana y en la noche. Un modelo dinámico de la red de carreteras está construido para la evacuación de los vehículos basado en el algoritmo de Dijkstra (1959).

En la evacuación de emergencia es necesario proporcionar la ruta más corta desde un determinado nodo de origen a otros nodos destino y utiliza el menor tiempo en todo el proceso de evacuación. Uno de los métodos más utilizados para

resolver el problema de la ruta más corta es el algoritmo Dijkstra (1959) o el algoritmo Floyd (1959). Algunos mejorando el algoritmo de la ruta óptima de navegación del vehículo tales como los de búsqueda bidireccional, de búsqueda jerárquica, genéticos y el algoritmo de la ruta más corta basada en red neuronal y así sucesivamente.

El algoritmo Floyd (1959) o simplemente de Warsall es aquel que se basa en interacciones sobre una matriz inicial  $W^0$ , que se construye a partir de matrices de adyacencia e incidencia del grafo utilizando la ecuación:

$$W^0 = \begin{cases} W_{ij} & \text{si } Ad_{ij} > 0 \\ \infty & \text{si } Ad_{ij} = 0 \end{cases} \quad Eq. 6$$

Sobre la matriz se realizan iteraciones igual al número de nodos aplicando la ecuación:

$$W^m = \min(w_{ij}^{m-1}, w_{im}^{m-1} + w_{mj}^{m-1}) \quad Eq. 7$$

Donde el algoritmo arroja como resultado una matriz de valores de rutas, la cual se almacena en la intersección correspondiente entre el nodo origen y el nodo de destino como lo demuestra Restrepo y Marin (2011).

## 2.8.- Situación para desastres naturales

El cálculo de estimaciones de tiempos de evacuación de comunidades amenazadas por huracanes ha obligado a desarrollar sofisticados modelos de flujos de evacuación en los últimos 25 años Lindell *et al.* (2007) que requieren hipótesis acerca del comportamiento de la población del área de riesgo, así como la geometría está definida por la red de carreteras o avenidas que circundan la zona, mientras que en otro solo es un subconjunto de carreteras designadas por los gerentes de evacuación.

## 2.9.-LEGION para AIMSUN

LEGION para Aimsun es un software pionero en la simulación simultánea de vehículos y peatones, permite correr simulaciones donde los peatones pueden estar involucrados en cruces viales y la interacción que tienen con las subidas y bajadas del transporte público, taxis y vehículos privados. El programa hace posible realizar muchos estudios que antes no era posible o viable llevarlos a cabo, interactuando la densidad de las personas interactuando con el flujo de tráfico. Antes, la medición de resultados del retraso de vehículo, velocidades de viaje y nivel de servicio tenían mucha incertidumbre y nula confiabilidad.

La necesidad de una transportación segura y eficiente se mantiene en aumento entre las instancias de gobierno de los países desarrollados y en vías de desarrollo, y siempre los sistemas de infraestructura pública están bajo la presión de ir mejorando continuamente. El problema se acentúa principalmente en los transportes como el metro o por medio de rieles donde intempestivamente incrementa el número de pasajeros con limitaciones físicas o de espacio disponible, el principal objetivo con las cuales se está desarrollando este tipo de programas es por la preocupación que existe entre el incremento de la población y cómo transportar a más gente con las limitaciones que tiene cada ciudad en su infraestructura existente.

LEGION es el único simulador de peatones que está calibrado con las medidas actuales de los peatones bajo perfiles de todo el mundo, las cuales son validadas por agencias independientes incluidos el Metro de Londres, Metro de Madrid y la Brigada de Incendios de Londres. Los algoritmos para los movimientos de las personas reflejan los espacios requeridos para realizarlos, las velocidades de caminar, y la habilidad de los individuos de hacer decisiones inteligentes paso a paso, factores como los tiempos de evacuación, los niveles de densidad, retrasos, tiempos de caminata, elección de ruta y otras métricas pueden ser analizadas.

### 2.9.1.-LEGION dedicado a estudios de evacuación

LEGION puede ser utilizado para la simulación y análisis de escenarios de evacuación siendo una herramienta esencial para la consultoría en este campo y para los diseños de edificaciones contra incendios, el software permite correr y evaluar evacuaciones de sitios como estaciones de tren, estadios deportivos, aeropuertos, complejos de oficinas, teatros, plazas públicas, centros de transporte, en resumen, cualquier lugar en el cual se pueden reunir las personas en adición al sistema público de transporte, se puede simular la interacción de grandes concentraciones con los espacios de estacionamiento.

El programa es un plug-in integrado para Aimsun 7 creando una potente aplicación de simulación entre peatones y transporte, entonces la parte primordial del uso de esta herramienta es la creación de los peatones, grupos de personas con características comunes usadas para el entorno del escenario, en la creación de estos entes importantes en la simulación la configuración se puede combinar y así determinar varios tipos de peatones, estas características son:

Perfil de identidad: define un modelo de comportamiento del peatón

Perfil de velocidad: define un modelo de velocidad de marcha del peatón

Equipaje: determina el ancho que va a tener un peatón.

Legion trabaja en una zona de navegación en el espacio de trabajo del escenario de Aimsun por eso se definen espacios donde los peatones se podrán mover, mediante un polígono creándolo con la herramienta de zona peatonal, algo a considerarse es que no se pueden superponer diferentes zonas peatonales.

En la creación del grafo para simular tanto cruces peatonales como inmuebles, las herramientas de creaciones de obstáculos son la polilínea o un polígono, estas zonas marcarán en un inicio las zonas por las cuales se desplazarán los peatones, aislando zonas si son bloques de obstáculos o simplemente bloqueos

al paso con líneas como muros o simplemente para marcar una zona en específico para una ruta. En grafos a nivel ciudad, esta herramienta es muy útil al momento de delimitar las manzanas, carriles de avenidas y banquetas.

Posterior a dibujar la zona peatonal y los obstáculos del grafo, se crean los centroides peatonales, centros de origen y destino (O/D) para el modelo y pueden ser de entrada como de salida de la red, siendo una configuración compuesta por conjuntos de entradas y salidas con sus respectivas matrices O/D y rutas. Un centroide de entrada peatonal es un área donde los peatones pueden ingresar a la red y se caracteriza por ser la región verde en el grafo con un tamaño mínimo de tres metros de altura y un metro de ancho. Lo mismo para las áreas de salida solo que se identifican con un color rojo.

Las rutas de demanda de las mismas son información para los peatones desde la entrada hasta su salida de la red, simulando volúmenes de gente que influyen en el tráfico de una avenida, siendo una ruta predeterminada que seguirá y cuyos elementos son la entrada, algún o algunos puntos intermediarios o puntos por donde tiene que pasar el peatón donde tomará decisiones o esperara un tiempo antes de seguir con su ruta y finalmente la salida de la red, es muy importante que se establezca el orden de los elementos de la ruta, ya que este será el camino que simulara para los peatones bajo esa demanda. Los nodos de decisión se colocan en cantidad deseada en la red, aquí existen de dos tipos: los que tienen punto focal y los que son segmentos focales, ambas son áreas en azul por las cuales pasarán los peatones, en la primera cada uno de ellos tocara el punto focal dentro de la zona, teniendo como opción la colocación del punto focal en cualquier lugar de la zona, y la segunda, el segmento focal, es solo un área a la cual se acercaran los peatones y de ahí tomar su decisión.

Semejante a los nodos de decisión se encuentran los puntos de servicio, áreas donde los peatones pueden esperar un tiempo para posteriormente continuar con la ruta indicada, esta opción es ideal para simular paneles informativos, tiendas, etc. Estos puntos tienen dos áreas diferentes, el exterior donde los peatones pueden

ser redirigidos y la interior que es donde se mantendrán en espera dando la opción de indicar el porcentaje de peatones que se verán afectados en este elemento de la ruta.

Para crear una nueva ruta O/D peatonal entre los centroides de entrada y salida se le tiene que asignar una ruta peatonal, aquí ruta por ruta se tiene que asignar puntos obligados y de espera entre el origen y el destino, de este modo se finaliza la creación de una ruta, el proceso se repite tantas rutas sean necesarias en el escenario que se va simular. Para designar la demanda que tendrán las rutas se generan las matrices O/D indicando simplemente en la ventana la cantidad de peatones en ciertas rutas hasta completar la matriz, se puede asignar porcentajes que deberán seguir estas rutas, el resto si es que es inferior al 100% seguirá el camino más corto entre los centroides, calculada por Legión.

Una vez que se haya creado la configuración peatonal por LEGION se puede simular un escenario peatón - vehículo activando la extensión de LEGION en el simulado Aimsun, donde en un proceso normal de simulación, a la demanda de tráfico se le añade la demanda peatonal, destacando entonces que tanto para vehículos como para personas las demandas tendrán que ser realizadas por matrices y no por estados de tráfico empatándolas con la hora y día de simulación vial. Para cada tipo de peatón la serie de tiempo estarán vinculados a la replicación, arrojando la siguiente información:

1. Flujo: Número de peatones en la red por hora
2. Peatones dentro: Número de peatones dentro de la red
3. Peatones fuera: Número de peatones que han salido de la red
4. Velocidad: Velocidad media de los peatones (en km/h o mph)
5. Tiempo de viaje: tiempo que les toma a los peatones en llegar al destino (segundos)
6. Tiempo de caminata: Calcula el tiempo cuando los peatones se mantengan en movimiento (en segundos).
7. Tiempo de parada: tiempo calculado cuando se mantenga el peatón interrumpido en su viaje por alguna razón (en segundos)

8. Máximo tiempo de parada: tiempo máximo que un peatón se detiene (en segundos)
9. Número de paradas: Promedio de número de paradas
10. Distancia total recorrida: La suma de toda la distancia recorrida por los peatones (en km)
11. Tiempo de viaje total: Suma de todos los tiempos de viaje por los peatones (en segundos)

## 2.10.-Normativas Internacionales para construcción de recintos

Reglamentos internacionales marcan pautas muy específicas para la construcción de recintos como auditorios, en México no existen especificaciones para esto, pero con normativa colombiana, australiana y de Nueva Zelanda nos podemos dar una idea de los aspectos básicos que se tienen que considerar al proyectar un inmueble con estas características y que aglomera grandes cantidades de personas, poniendo en primer lugar la seguridad de todos ellos. De manera general todos incluyen que se tiene que construir con materiales que no sean flamables y con iluminación adecuada, resaltando aspectos muy importantes que tienen los reglamentos australiano y colombiano:

- Reglamento Australiano:

1. Pasillos de salida entre filas con más de 10 asientos
2. No más de 42 asientos entre pasillos
3. Espacio entre filas de 300 mm si la distancia a un pasillo es menor de 3.5 m en filas de 8 asientos o 500 mm si la distancia es mayor
4. La iluminación de los pasillos tiene que estar conectada a la planta de emergencia
5. Los materiales de los asientos tienen que tener un índice flamable de 0 y un desarrollo de humo no mayor a 5

6. Los acabados de techo tendrán un índice flamable menor a 6 y un desarrollo de humo menor a 3

- Reglamento Colombiano

1. Iluminación uniforme entre 150 y 300 lux
2. Sistema de iluminación de emergencia que garantice la evacuación del recinto
3. Ventilación general o mecánica que suministre 1 pie cúbico de aire/minuto/pie y las salidas del aire tienen que ser al exterior del recinto por encima del techo
4. La distancia entre el escenario y la primera fila de asientos tiene ser tal que el ángulo de visión de una persona sentada al ver el escenario tiene que ser de 60° (Woodson, 1992)
5. Las sillas al costado de los pasillos tienen que ser completamente paralelas al pasillo
6. Pasillos mínimos de 1 metro de ancho y en las últimas filas de 1.27 m (Woodson, 1992)
7. Se recomienda que solo existan 7 butacas del centro de la fila hacia cada extremo o a cada pasillo
8. El área para las personas con discapacidad que ocupen silla tiene que ser de 1 metro de ancho por 1.20 de profundidad y estar señalizada por el símbolo internacional
9. Extintores a una distancia máxima de 15 m cada uno y cerca de las puertas de salida.

- Reglamento peruano

1. Las edificaciones para recreación y deportes se ubicarán en lugares establecidos en el plan urbano considerando la facilidad de acceso y

evacuación de personas provenientes de las circulaciones diferenciadas a espacios abiertos y facilidad de acceso a los medios de transporte

2. Se deberá diferenciar los accesos y circulaciones de acuerdo con el uso y capacidad, deberán existir accesos separados para público, personal, actores, deportistas.
3. 0.7 m<sup>2</sup> por persona como espacio mínimo para espectadores
4. Las edificaciones de espectáculos deberán contar con un espacio para atención médica de primeros auxilios cada 500 personas concentradas y desde el cual puedan ser evacuados en una ambulancia
5. Contar con un sistema de iluminación de emergencia que se active ante el corte del fluido eléctrico de la red pública
6. La distancia mínima entre dos asientos de filas contiguas será de 0.90 m cuando el ancho mínimo de ejes sea de 0.60 m y de 1.00 m cuando el ancho mínimo de ejes sea de 0.70 m, las butacas serán abatibles y con apoyabrazos
7. Los accesos a las edificaciones para espectáculos deportivos (bocatomas) y no deportivos serán eficientemente distribuidos e identificables en forma clara siendo de 400 personas la capacidad máxima por sector
8. El ancho mínimo de un pasaje de circulación transversal o longitudinal de acceso a los asientos será de 1.20 m y deberán ubicarse como máximo cada 20 filas de asientos.
9. El parámetro para el cálculo del tiempo de evacuación en estadios para eventos deportivos y no deportivos será de 4,500 espectadores por minuto.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1.-Selección de recinto, características y descripción.

La selección del recinto a estudiar se basó en la factibilidad de conseguir permisos para su estudio y en cómo se analizaría el lugar, en primera instancia los dos principales recintos de la ciudad de Querétaro, el estadio Corregidora y el auditorio Josefa Ortiz de Domínguez fueron las propuestas para seleccionar el objeto de estudio. Analizando ventajas y desventajas de los inmuebles la selección fue el auditorio Josefa Ortiz de Domínguez por tres principales razones: el auditorio es manejado por la secretaria de recintos del gobierno del estado de Querétaro, continuidad en la agenda de eventos, y la principal por el alcance de análisis que se le podría hacer en este recinto siendo de menor tamaño y óptimo para el análisis en video desde cualquier punto del recinto, resultó más factible de medir, caracterizar y analizar resultados obtenidos de eventos en el auditorio, que finalmente resultó ser el objeto de estudio de esta investigación.

##### 3.1.1 Auditorio Josefa Ortiz de Domínguez

El auditorio es un centro de espectáculos construido en 1985 en la ciudad de Santiago de Querétaro sobre la avenida Constituyentes en la colonia Villas del Sol, en las inmediaciones del centro histórico de la ciudad, es el principal recinto de la ciudad para espectáculos, y la obra estuvo a cargo del arquitecto Luis Alfonso Fernández Siurob, su más reciente remodelación ocurrió en el año 2010, y en la actualidad es operado por el Gobierno del Estado de Querétaro en el que participan además los sectores privado y social en una superficie de 11,306.99 m<sup>2</sup>.

Los espacios arquitectónicos con los que cuenta el recinto son: en el exterior cuenta con accesos del público por las tres fachadas, sur, oriente y poniente. El personal y los actores entran por las fachadas oriente y poniente respectivamente. En cuestión de estacionamientos es muy importante recalcar que el predio del

auditorio se encuentra en la esquina de Av. Constituyentes y la calle Sierra de Zimapán, pero solamente cuenta con acceso vehicular por la fachada norte, la que se encuentra por la Av. Constituyentes. Las salidas del auditorio, por dimensiones, se prestan a que el proceso de entrada y salida de los asistentes sea muy cómodo, las entradas oriente, poniente y sur tienen anchos de dos metros y tres puertas por acceso, lo que resulta en seis metros.

Obtenidos los datos, se analizan tres opciones de evacuaciones, por los videos grabados en los eventos, por las simulaciones en Aimsun y por la estimación de tiempos de evacuación por los códigos internacionales previamente citados, siguiendo el siguiente diagrama de flujo mostrado en la figura 3.1 hasta comprobar la hipótesis.

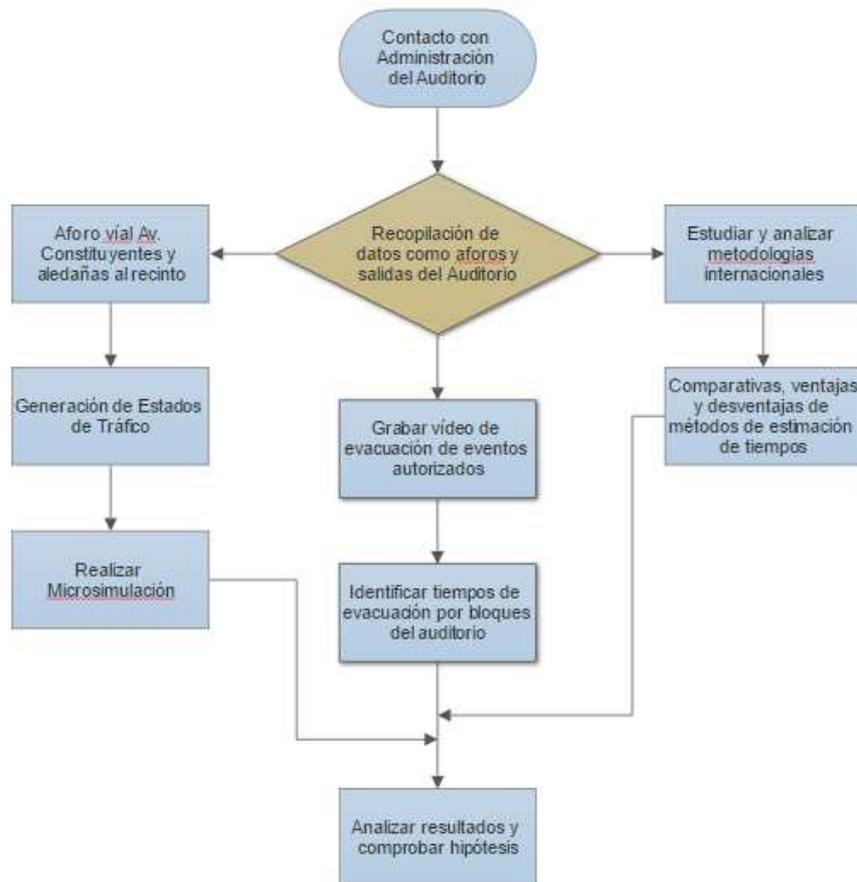


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de investigación  
Fuente: Elaboración Propia

La metodología que sigue la investigación consiste esencialmente en obtener los datos del recinto tales como aforos totales de espectadores, capacidad de vehículos en los estacionamientos, salidas y entradas al recinto tanto para personas como para automóviles como parte de la información general del recinto. Para obtener la información se consulta con los responsables del Auditorio Josefa Ortiz de Domínguez en Santiago de Querétaro.

En un primer recorrido en el auditorio se hace el reconocimiento de la infraestructura, comenzando con el exterior del auditorio se reconocen los puntos de reunión que se encuentran en las banquetas al exterior de cada salida como en la siguiente figura:



Figura: 3.2 Puntos de seguridad exterior auditorio  
Fuente: Elaboración propia

En el recorrido en las instalaciones se identifican características físicas importantes para la ETE's , esencialmente las rutas de evacuación, la señalización colocada por reglamento de protección civil en cualquier inmueble público, cuestión con la cual cumple al tener todas las rutas señalizadas y extintores debidamente colocados como se muestra en las figuras.



Figura: 3.3 Señalización de rutas de evacuación  
Fuente: Elaboración propia

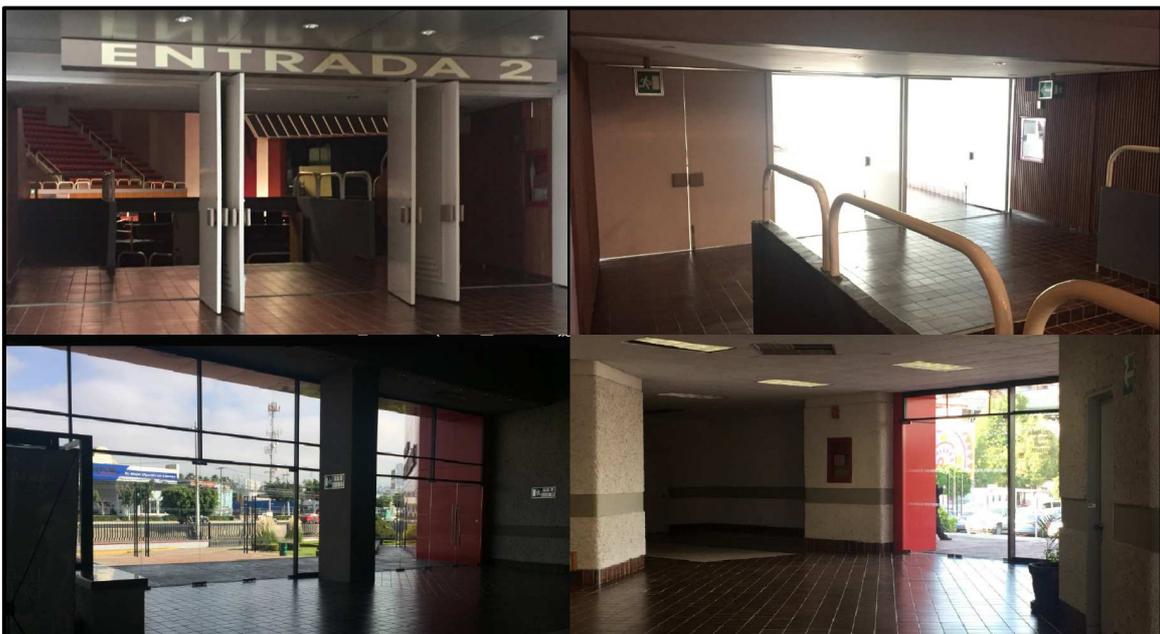


Figura: 3.4 Entradas y salidas principales del auditorio  
Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que el personal administrativo y técnico del auditorio menciona que solo se ha realizado un simulacro de evacuación recientemente y que son aproximadamente 90 personas las que trabajan en un día normal en el edificio, y que, en evento, normalmente nocturnos, solamente opera el personal técnico que son aproximadamente 50 personas. El simulacro se hizo en una mañana y que el

tiempo que midieron para evacuar todo el edificio fue de 4 minutos aproximadamente hasta los puntos de seguridad en el estacionamiento, participaron todos los trabajadores y se comenzó a medir el tiempo de salida desde las oficinas administrativas y de los sótanos, donde están las oficinas y talleres técnicos y de mantenimiento.

El uso del programa Aimsun se realiza bajo licencia de trabajo de la universidad y simulación tendrá que realizarse en simulaciones complementarias ya que la licencia actual tiene capacidad de simular simultáneamente 1000 peatones, y un aforo total a simular es de 4981 personas como máximo

El análisis de los datos se realiza a la par de los códigos, y se determinan los intervalos de tiempo para que puedan aplicarse en el modelo, por limitaciones en la licencia de LEGION para Aimsun, se tomaran bloques que evacuen por la misma salida para formar la matriz de origen destino y las rutas de salida establecidas por las rutas de evacuación y lo observado en los videos grabados.

1.-El seccionamiento del auditorio se realiza con limites en escaleras y pasillos que separan las filas, la numeración es simétrica debido a la posición en la cual se grabaron los videos.

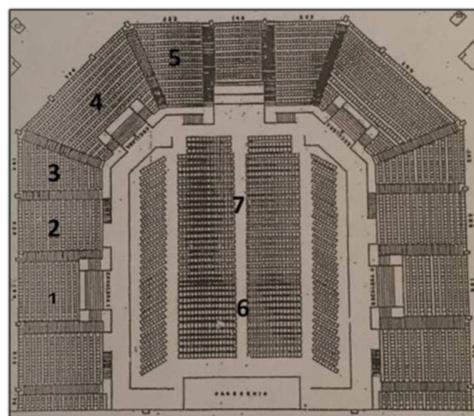


Figura 3.5 Bloque de numeración Auditorio Josefa Ortiz de Domínguez  
Fuente: Elaboración propia

2.-Se grabaron videos en los eventos a los cuales se tuvo acceso, con duraciones aproximadamente de 8 minutos, los cuales se empezaron a grabar desde el momento que el asistente se levanta de su butaca y comienzan a salir hasta que se culmina la evacuación, se tomó un ángulo de visibilidad de tal modo que se pudieran grabar la mayor cantidad de bloques posibles. Debido a que el tiempo grabado es en un desalojo normal, los asistentes no reciben ningún tipo de notificación más que el encendido de las luces del recinto en general para facilitar el caminar por los pasillos y ubicar la salida más cercana a su posición.

3.- En el análisis de los videos fueron tomadas tres personas para medir los tiempos, dos en los extremos del bloque y uno en la parte central. Posteriormente los promedios por bloque, los espectadores sentados en la parte inferior, la parte media y la superior de cada sección.

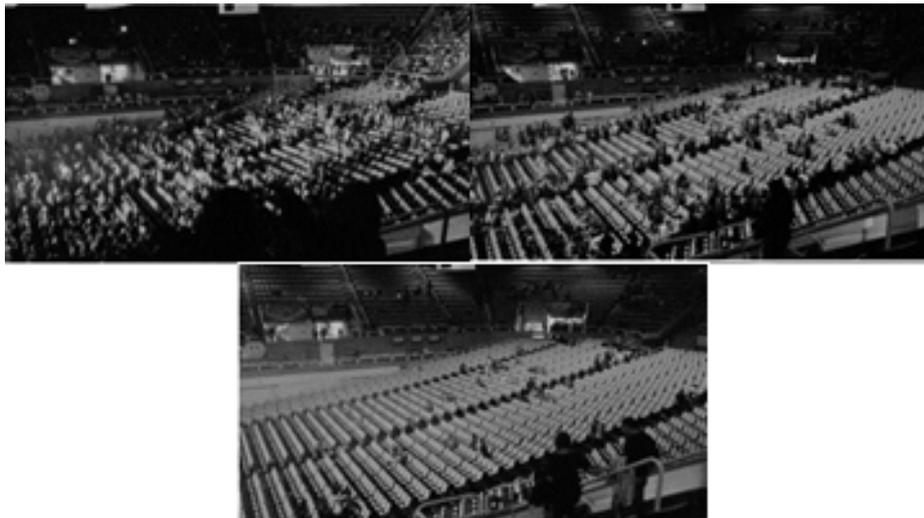


Figura 3.6. Parte superior: Inicio de la evacuación de los locales, el promedio: proceso de evacuación, inferior: complejo evacuados.

Fuente: Elaboración propia

En el vídeo grabado análisis se observó el proceso de evacuación, los cuales son el tiempo de percepción o reacción, tiempos de retardo y el tiempo hasta la propiedad está vacía, como se muestra en la figura 2.

4.- Los resultados obtenidos de los vídeos se compararon con los obtenidos en la simulación con LEGION de Aimsun.

La simulación con este software tuvo como escenario la salida de un evento al 80% y 30% de aforo, con dimensiones reales en los bloques del auditorio y 108 centroides fueron colocados que representan las salidas en las partes izquierda y derecha de las filas, en la parte inferior, media y posterior de cada bloque.

Cada una de las salidas de las 6 que dan ruta a los espectadores al exterior del recinto se simulará para los aforos antes mencionados, por lo que se tienen 12 simulaciones en total para medir tiempos y parámetros que arroja el resumen de la replicación, por en análisis de los videos previamente realizado se identifican los bloques que mayormente salen por cada una de las salidas, esta información fue utilizada para llenar las matrices O/D del programa como en la siguiente figura:

	899: salida 1	901: salida 2	902: salida 3	903: salida 4	904: salida 6	905: salida 5	Total
795: 6iim	11						11
875: 9dds							
858: 1dds							
806: 2iis	12						12
891: 10iim							
828: 8ii							
817: 4iim							
Total	182						182

Figura 3.7 Ejemplo Matriz O/D en simulación con LEGION  
Fuente: Elaboración propia

Una vez llenada la matriz con el número de peatones según la ruta que tienen que seguir, se le asigna un tiempo de simulación para esa demanda de tránsito mínimo de 10 minutos, ya que es este el tiempo que se tiene que simular para que el resumen de la replicación proporcione resultados de peatones. Con la demanda de tráfico de los peatones y el tiempo mínimo de asignación, se tiene que anexar una red sencilla en el escenario, con demanda de algún tipo de vehículo en la demanda general ya que las simulaciones con LEGION son un complemento de una simulación vial común con Aimsun, entonces al ser una herramienta adicional no permite solamente hacer replicaciones con grafos o escenarios exclusivamente

para peatones, aunque en este trabajo las simulaciones peatonales son la parte más importante del análisis de los resultados, no se tiene que dejar de lado la base principal con la que trabaja el software, quedando los grafos para cada una de las replications como la figura siguiente:

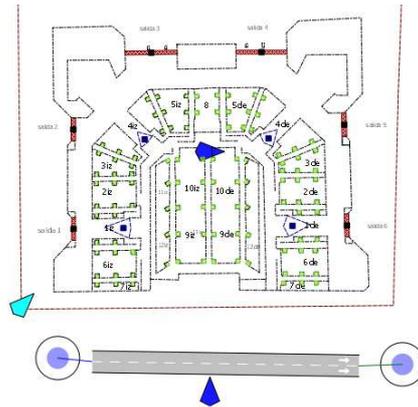


Figura 3.8 Grafo general para las replications utilizando LEGION para Aimsun  
Fuente: Elaboración propia

Con el perfil peatonal norteamericano, siendo el más próximo geográficamente que tiene como opción el programa, se corre la simulación para cada salida asignando perfiles de adultos a los entes de la replicación y sin la opción de cargar equipaje.

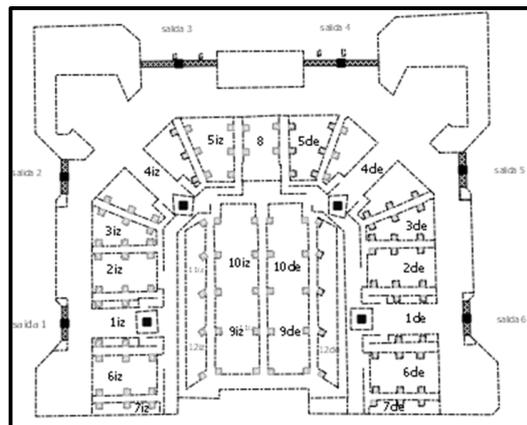


Figura 3.9 Grafo de Auditorio Josefa Ortiz de Domínguez  
Fuente: Elaboración propia

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados consta en hacer una comparación y discusión de los tiempos observados, simulados y estimados obtenidos de los videos grabados en el Auditorio Josefa, de las simulaciones en Aimsun y de las estimaciones por los códigos internacionales, primero se presentan los resultados obtenidos de las filmaciones en la Tabla 1 los cuales se midieron por bloque como se indicó en la metodología obteniendo lo siguiente:

Cuadro 4.1 Tiempos de evacuación medidos de los videos, por bloque y nivel del evento 2 (80% de capacidad).

BLOQUE	PERSONA	T.E.PAS (seg)	T.E.SAL (seg)	T.CAM (seg)	T.TOTAL (seg)	PROMEDIO (seg)
6	1	5	3	244	252	<b>172</b>
	2	3	4	167	174	
	3	2	0	86	88	
7	1	2	2	148	152	<b>104</b>
	2	1	2	83	86	
	3	0	1	73	74	
1	1	4	3	47	54	<b>77</b>
	2	1	4	92	97	
	3	2	1	77	80	
2	1	1	1	51	53	<b>67</b>
	2	5	1	63	69	
	3	2	2	74	78	
3	1	0	0	59	59	<b>77</b>
	2	3	4	72	79	
	3	3	2	87	92	
4	1	1	2	53	56	<b>85</b>
	2	2	1	83	86	
	3	2	0	111	113	
5	1	0	0	49	49	<b>64</b>
	2	1	1	63	65	
	3	1	3	73	77	

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.2 Tiempos de evacuación medidos de los videos, por bloque y nivel del evento 1 (30% de capacidad).

BLOQUE	PERSONA	T.E.PAS (seg)	T.E.SAL (seg)	T.CAM (seg)	T.TOTAL (seg)	PROMEDIO (seg)
6	1	1	0	148	149	<b>141</b>
	2	3	1	132	136	
	3	4	2	142	148	
7	1	0	0	69	69	<b>62</b>
	2	1	0	56	57	
	3	1	1	61	63	
1	1	2	1	43	46	<b>41</b>
	2	1	1	44	46	
	3	4	2	36	42	
2	1	3	0	60	63	<b>50</b>
	2	2	1	57	60	
	3	0	0	32	32	
3	1	1	0	46	47	<b>42</b>
	2	1	1	43	45	
	3	0	1	36	37	
4	1	2	2	49	53	<b>56</b>
	2	4	1	52	57	
	3	1	1	65	67	
5	1	0	1	37	38	<b>37</b>
	2	0	0	40	40	
	3	1	2	34	37	

Fuente: Elaboración propia

En Aimsun se realizaron 12 simulaciones, una por cada una de las 6 salidas que conducen hasta el exterior del inmueble incluyendo el trayecto entre el foro, vestíbulo y finalmente la salida hacia los estacionamientos o la plaza principal del inmueble y cada una de estas a un 30% y 80% de aforo. Se identificó que en los eventos analizados no se encontraron niños ni personas con alguna discapacidad por lo que los lugares asignados para ellos quedo sola y libre durante el evento y su salida, durante un evento en el cual se encuentren ocupadas estas áreas especiales se tendrá que evacuar en primera instancia a estas personas, por su vulnerabilidad y porque si bien, no obstruyen el área designada como pasillo de salida, una vez

desalojada esta área se aumenta considerablemente el espacio y evita el congestionamiento justo antes de las salidas del auditorio hacia los vestíbulos del recinto, una vez tomando en cuenta eso, se realizaron las simulaciones con el perfil de peatón adulto predeterminado por el programa añadiendo el parámetro de que no lleve equipaje de mano y que tenga un perfil de desalojo en algún evento deportivo, siendo este último el adecuado a las situaciones que presenta la simulación como posibles, obteniendo los siguientes resultados:

Cuadro 4.3 Resultados replicación evacuación con LEGION

	Salida 1		Salida 2		Salida 3		Salida 4		Salida 5		Salida 6	
	80%	30%	80%	30%	80%	30%	80%	30%	80%	30%	80%	30%
Distancia total recorrida de los peatones (km)	13.73	5.03	14.12	5.33	53.36	19.34	52.22	19.33	14.34	5.35	13.96	5.2
Flujo de peatones (peatones/h)	2676	990	2298	876	5988	2208	5970	2274	2292	870	2682	1002
Tiempo de parada de peatones (segundos)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tiempo de viaje de los peatones (segundos)	25.17	24.96	31.78	30.39	43.68	41.63	42.74	40.26	32.62	30.99	25.79	25.34
Tiempo en movimiento de los peatones (segundos)	25.17	24.96	31.78	30.39	43.68	41.63	42.74	40.26	32.62	30.99	25.79	25.34
Tiempo total de viaje de los peatones (segundos)	11227	4119	12170	4436	43591	15320	42530	15259	12463	4492	11530	4232
Velocidad de los peatones (km/h)	4.43	4.42	4.22	4.37	4.44	4.58	4.45	4.6	4.19	4.34	4.38	4.46

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de estas replicaciones se nota una disminución tanto en la velocidad de los peatones como en los tiempos en movimiento de un segundo para las salidas y que no cambia en el tiempo de parada que tendrían que hacer los

asistentes, concluyendo que con las dimensiones reales de los conductos de salida del auditorio y hasta un 80% de capacidad, sin problema aunque a una velocidad menor, el recinto podrá ser desalojado desde su butaca y hasta el exterior en 44 segundos a una velocidad de desalojo de 4.44 km/h. Estos resultados de observaron en la simulación que no se presentó congestión a diferencia de lo observado en los videos donde esperaban en la salida hasta 3 segundos para poder salir, esto debido a que la velocidad de desalojo normal, como el escenario grabado en el recinto, al ser menor, favorece ese congestión principalmente en las salidas norte.

El desempeño del desalojo del auditorio es bueno en todos los bloques que conforman el graderío, y menos eficiente en la luneta ya que no cuentan con una salida especial para esa sección, los ocupantes más cercanos al escenario son aquellos que tienen que caminar más para poder lograr llegar a una de las dos salidas que comparten con asistentes de los bloques cercanos a ellas, por lo que el desempeño de salida en las puertas del lado sur fueron las que se congestionaron más y las que presentaban tiempos de demora de hasta 3 segundos, dada la infraestructura del inmueble solo resultaría viable mejorar la salida por los costados del escenario, dos puertas que conducen al exterior pero que del lado derecho pasan a un costado del cuarto de máquinas del auditorio, siendo que ante un escenario posible de incendio y que este se origine principalmente en ese cuarto de máquinas, no sería la ruta indicada para salir por la cercanía a la zona de mayor peligro y porque sería el conducto que inicialmente se congestionaría del humo generado por el evento.

Siguiendo con la metodología planteada, se procedió a hacer la estimación de tiempos de evacuación empleando los códigos internacionales antes citados, con el fin de tener consideraciones especiales según la infraestructura estudiada, ya que las ecuaciones para estimar dichos tiempos tienen variables que poseen muchas edificaciones, pero se concentran en instalaciones de transporte público como estaciones de metro o trenes. El primero de los códigos analizados fue el americano, se usó la división por bloques del auditorio ya que se usan variables de tiempo de caminata y tiempo de espera de los peatones evacuados, dichos valores se toman

de los resultados obtenidos en el análisis de los videos, para ello se obtiene un tiempo promedio de evacuación según los bloques y se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro 4.4 Estimación de tiempos de evacuación empleando el código americano.

<i>BLOQUE</i>	<i>EVENTO 1</i>		<i>EVENTO 2</i>	
<b>6</b>	T	141	T	166
	Wp	3	Wp	4
	Wn	1	Wn	3
	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>145</b>	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>173</b>
<b>7</b>	T	62	T	102
	Wp	1	Wp	1
	Wn	1	Wn	2
	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>64</b>	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>105</b>
<b>1</b>	T	41	T	72
	Wp	3	Wp	3
	Wn	2	Wn	3
	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>46</b>	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>78</b>
<b>2</b>	T	50	T	63
	Wp	2	Wp	3
	Wn	1	Wn	2
	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>53</b>	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>68</b>
<b>3</b>	T	42	T	73
	Wp	1	Wp	2
	Wn	1	Wn	2
	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>44</b>	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>77</b>
<b>4</b>	T	56	T	83
	Wp	3	Wp	2
	Wn	2	Wn	1
	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>61</b>	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>86</b>
<b>5</b>	T	37	T	62
	Wp	1	Wp	1
	Wn	1	Wn	2
	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>39</b>	<b>Ttotal (seg)</b>	<b>65</b>

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se aplicó el código chino al auditorio con un factor de hora pico de 1.4 sugerido como mínimo en la literatura y un tiempo mínimo de espera de un segundo, se obtuvieron los resultados siguientes:

Cuadro 4.5 Estimación de tiempos de evacuación empleando el código chino.

Salida		EVENTO 1					EVENTO 2					
1	Q1	182	A1	9600	N	1	Q1	475	A1	9600	N	1
	Q2	19	A2	3700	B	1	Q2	48	A2	3700	B	1
	Tiempo Esp		1		1.5	min	Tiempo Esp		1		1.5	min
	F.Hr. pico		1.4				F.Hr.pico		1.4			
	Ocupantes		0				Ocupantes		0			
	<b>T (min)</b>		<b>1.06</b>				<b>T (min)</b>		<b>1.16</b>			
2	Q1	156	A1	9600	N	1	Q1	399	A1	9600	N	1
	Q2	16	A2	3700	B	1	Q2	40	A2	3700	B	1
	Tiempo Esp		1				Tiempo Esp		1			
	F.Hr. pico		1.4				F.Hr. pico		1.4			
	Ocupantes		0				Ocupantes		0			
	<b>T (min)</b>		<b>1.05</b>				<b>T (min)</b>		<b>1.13</b>			
3	Q1	409	A1	9600	N	1	Q1	1057	A1	9600	N	1
	Q2	41	A2	3700	B	1	Q2	106	A2	3700	B	1
	Tiempo Esp		1				Tiempo Esp		1			
	F.Hr. pico		1.4				F.Hr. pico		1.4			
	Ocupantes		0				Ocupantes		0			
	<b>T (min)</b>		<b>1.14</b>				<b>T (min)</b>		<b>1.35</b>			
4	Q1	409	A1	9600	N	1	Q1	1057	A1	9600	N	1
	Q2	41	A2	3700	B	1	Q2	106	A2	3700	B	1
	Tiempo Esp		1				Tiempo Esp		1			
	F.Hr. pico		1.4				F.Hr. pico		1.4			
	Ocupantes		0				Ocupantes		0			
	<b>T (min)</b>		<b>1.14</b>				<b>T (min)</b>		<b>1.35</b>			
5	Q1	156	A1	9600	N	1	Q1	399	A1	9600	N	1
	Q2	16	A2	3700	B	1	Q2	40	A2	3700	B	1
	Tiempo Esp		1				Tiempo Esp		1			
	F.Hr. pico		1.4				F.Hr. pico		1.4			
	Ocupantes		0				Ocupantes		0			
	<b>T (min)</b>		<b>1.05</b>				<b>T (min)</b>		<b>1.13</b>			
6	Q1	182	A1	9600	N	1	Q1	475	A1	9600	N	1
	Q2	19	A2	3700	B	1	Q2	48	A2	3700	B	1
	Tiempo Esp		1				Tiempo Esp		1			
	F.Hr. pico		1.4				F.Hr. pico		1.4			
	Ocupantes		0				Ocupantes		0			
	<b>T (min)</b>		<b>1.06</b>				<b>T (min)</b>		<b>1.16</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se analizaron los eventos aplicando el código japonés utilizando los valores obtenidos en la grabación, ya que este código solo toma como tiempo establecido para un inmueble el máximo obtenido del análisis de las rutas y del ocupante más desfavorable sumando algebraicamente sus tiempos de caminata y tiempos de espera a lo largo del trayecto, se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 4.6. Estimación de tiempos de evacuación empleando el código japonés.

BLOQUES	EVENTO 1		EVENTO 2	
6	Walk time (seg)	141	Walk time (seg)	166
	Dwell time (seg)	2	Dwell time (seg)	3
	<b>T (seg)</b>	<b>143</b>	<b>T (seg)</b>	<b>169</b>
7	Walk time (seg)	62	Walk time (seg)	102
	Dwell time (seg)	1	Dwell time (seg)	2
	<b>T (seg)</b>	<b>63</b>	<b>T (seg)</b>	<b>104</b>
1	Walk time (seg)	41	Walk time (seg)	72
	Dwell time (seg)	2	Dwell time (seg)	3
	<b>T (seg)</b>	<b>43</b>	<b>T (seg)</b>	<b>75</b>
2	Walk time (seg)	50	Walk time (seg)	63
	Dwell time (seg)	1	Dwell time (seg)	2
	<b>T (seg)</b>	<b>51</b>	<b>T (seg)</b>	<b>65</b>
3	Walk time (seg)	42	Walk time (seg)	73
	Dwell time (seg)	1	Dwell time (seg)	2
	<b>T (seg)</b>	<b>43</b>	<b>T (seg)</b>	<b>75</b>
4	Walk time (seg)	56	Walk time (seg)	83
	Dwell time (seg)	2	Dwell time (seg)	2
	<b>T (seg)</b>	<b>58</b>	<b>T (seg)</b>	<b>85</b>
5	Walk time (seg)	37	Walk time (seg)	62
	Dwell time (seg)	1	Dwell time (seg)	1
	<b>T (seg)</b>	<b>38</b>	<b>T (seg)</b>	<b>63</b>

Fuente: Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

Antes que cualquier conclusión se destaca que, de acuerdo con los puntos principales en las normas de construcción para recintos en Latinoamérica, el auditorio Josefa Ortiz de Domínguez cumple con los mínimos necesarios tanto de anchos de pasillos, de distancia entre filas y de dimensiones de puertas de salida, así como amplios lugares para los puntos de encuentro. La debilidad del inmueble radica en que, si bien tiene señalización que indica tanto ruta como salidas de emergencia y la instalación de hidrantes es la adecuada en cada salida del foro, esta carece de algún sistema de iluminación tanto a nivel de piso como de señalización que haría óptimo el reconocimiento de cualquier individuo, además que no cuenta visiblemente con los espacios de primeros auxilios o de servicios médicos de emergencia que recomienda el reglamento peruano.

De acuerdo con los resultados obtenidos al aplicar los métodos internacionales de estimación de tiempos de evacuación ningún bloque del auditorio tardaría más de 180 segundos en ser desalojado por lo que cumplen con los tiempos máximos permitidos por los códigos americano, chino y japonés con 240 segundos, 360 segundos y 600 segundos respectivamente, por lo que se cumple con la hipótesis planteada al inicio de la investigación.

Como un objeto de estudio analizó evacuaciones en conciertos, evento 1 y evento 2. La capacidad total del auditorio es de 4981 personas distribuidas en una luneta y gradas, el primer evento tuvo una asistencia del 30% y en el segundo 80%, es notable el aumento de los tiempos de evacuación de mayor asistencia, esto se percibe sobre todo en los tiempos de espera que se generan en las colas que saturan las puertas de salida y después los pasillos entre bloques. Con las grabaciones de vídeo y los resultados obtenidos en la simulación se identificó cuál de los tres métodos de estimación de tiempos de evacuación es la más viable para su implementación en un estudio de cálculo de tiempos de evacuación de edificios con características y para eventos similares.

Los resultados muestran que un peatón, en este caso, uno con la identidad norteamericana con la velocidad y el comportamiento y con un perfil de espectador

en un estadio, los resultados demuestran que el recinto fue completamente desalojado en 270 segundos, con 33.5 segundos de tiempo de viaje en promedio desde los centroides colocados y un máximo de 44 segundos, tiempo inferior al registrado en los videos, modificando el perfil del ocupante y la situación en que se encuentra en la simulación.

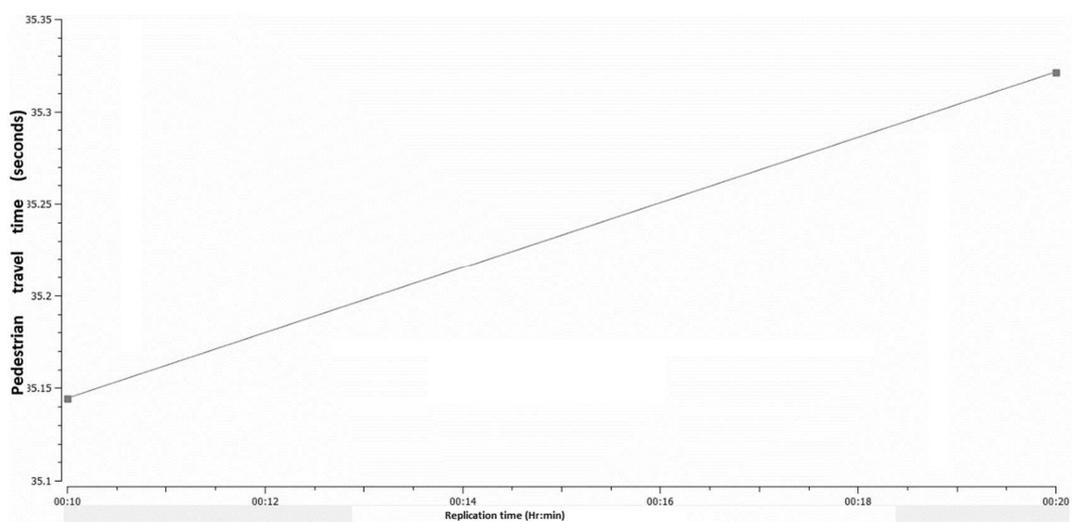


Figura 5.1 Tiempo de recorrido peatonal (segundos) LEGIÓN en AIMSUN  
Fuente: Elaboración propia

Las metodologías para el cálculo de los tiempos de evacuación que existen se basan en las condiciones físicas del lugar para evacuar y las capacidades físicas de las personas, en métodos como el chino (2013), el americano (2014) y el japonés.

Los resultados muestran que, cuando el auditorio está cerca de su capacidad máxima, el proceso de evacuación se vuelve más lento y menos eficaz. En ambos casos, los tiempos de espera que se generaron en las filas al momento de salir, se formaron cuando las capacidades de las puertas fueron superadas, para cada peatón en general su tiempo de salida no supera los dos minutos, debido a la proximidad a las puertas de salida entre bloques, además del hecho de que las

distancias recorridas en los pasillos y escaleras es la mitad que se ejecutan a través de personas evacuadas del bloque 6. Se observa que en cada bloque la persona número 1 correspondiente a la parte superior de cada uno de ellos tiene más segundos de evacuación, esto ocurre principalmente en el proceso de salida, donde tienen más segundos en el momento en que se realiza en la fila para llegar a la puerta.

La evacuación total utilizando AIMSUN tomó un tiempo de 5 minutos para un evento para el 30% de su capacidad y de 7 minutos para un evento con un 80%. El software AIMSUN simuló un evento al 100% de su capacidad y tomó 15 minutos para evacuar a todos los bloques completamente, existe una relación directa entre lo grabado con simulado, el primer escenario fue bajo condiciones que no son de emergencia, una evacuación normal, pero la segunda representó un escenario donde el peatón es asignado con perfil establecido y donde la velocidad de salida es superior.

Haciendo una comparación de los tres métodos teóricos, hay aspectos que se toman como fortalezas y debilidades en cada uno. El código chino tiene en común que toma en cuenta la anchura de las escaleras y que el lugar tiene un pasillo a través del cual los ocupantes salen, el número de salidas y de la capacidad de los mismos son considerados. Este sistema sólo funcionaría para un evento al 30% de su capacidad o hasta un 50% con simulación de altas velocidades. El código americano también sólo funciona con capacidades de entre 30% y 50% y esto es más fácil de calcular porque sólo comprende la suma de tiempos de espera por los obstáculos encontrados en la ruta de evacuación que podrían medirse en las filas de la demora generadas cuando los pasillos y salidas pasan su capacidad, y el tiempo de viaje con condiciones de flujo libre. El código japonés solo bajo ciertas consideraciones puede ser considerado en su aplicación, ya que su margen de uso va a tener una evacuación segura en 10 minutos como máximo, y el auditorio a su máxima capacidad que alcanza casi a 4700 ocupantes, 15 minutos eran necesarios, y en el análisis en las estaciones de metro ocupada casi 8 minutos para evacuar 2000 personas, el punto más crítico se presentaría al comparar las normas japonesas y las de construcción de recintos mexicanos que involucran

principalmente a las anchuras y capacidades de desalojo de las escaleras y las puertas para determinar si puede ser utilizado para la estimación o añadir un factor de corrección donde las regulaciones son muy diferentes.

La investigación realizada concluye además que la metodología usada de aplicar los códigos internacionales puede ser llevada a auditorios con capacidades de hasta 5000 espectadores y que cumplan con los puntos mas generales de los códigos internacionales para la infraestructura de edificaciones para conciertos, que cumplan con el mínimo de salidas por cada cierto número de espectadores, y que estas se encuentren bien distribuidas además que sean de los anchos mínimos, otro punto muy importante para llevar esta metodología a otros recintos similares es que los anchos de pasillos y la cantidad de butacas por filas cumplan con los mínimos que marcan los reglamentos. Cumpliendo con estas especificaciones los tiempos de evacuación cumplen con el rango de valores máximos para los cuales están diseñados.

#### 5.1 Líneas de investigación futuras

Durante el desarrollo de la investigación se detectaron debilidades y otras consideraciones que permiten seguir con la línea de investigación sobre el tema que lleven a una metodología clara para llevar a cabo en recintos de dimensiones y para aforos similares que permitan estimar los tiempos de desalojo a los cuales se someterán durante un desalojo o una evacuación, esta regulación deberá incluir como base los aspectos físicos fundamentales para que un proceso de evacuación sea seguro centrándose principalmente con que las rutas de salida sean claras, amplias y que la tasa de desocupación de las salidas sea la adecuada para que el recinto se desaloje en el menos tiempo posible.

Otro punto que se tiene que revisar en el uso de AIMSUN en la simulación de peatones es que los perfiles de usuario se especialicen o incluyan factores de respuesta ante situaciones como una explosión o un escenario lleno de humo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Goldblatt Reuben y Kevinweinisch, 2005, "Evacuation planning, human factors, and traffic engineering", *Transportation Security Training and Education*. Volumen 5, pp 13-17.

Hua Jingyi, Ren Gang, Cheng Yang, y Ran Bin, 2014, "An Integrated Contraflow strategy for multimodal evacuation", *Mathematical Problems in Engineering*. Volumen 2014, 10 pages.

Lindell, M. and Prater, C ,2007, "Critical Behavioral Assumptions in Evacuation Time Estimate Analysis for Private Vehicles: Examples from Hurricane Research and Planning." *J. Urban Plann. Dev*, Volumen 133, pp. 18-29.

Ng ManWo, Diaz Rafael, Behr Joshua, 2015, "Departure time choice behavior for hurricane evacuation planning: The case of the understudied medically fragile population", *Transportation Research Part E*. Volumen 77, pp.215-226.

Mu Nan, Song Wei-guo, Qi Xin-xin, Lu Wei, Cao Shu-chao,2014, "Simulation of Evacuation in a Twin Bore Tunnel: Analysis of Evacuation Time and Egress Selection", *Procedia Engineering*, Volumen 71, pp.333-342.

Pourrahmani, E., Delavar, M., Pahlavani, P., and Mostafavi, M. ,2015, "Dynamic Evacuation Routing Plan after an Earthquake." *Nat. Hazards Rev.*, Volumen 16, 16 pages.

Proulx Guylene, 1995, "Evacuation time and movement in apartment buildings", *Fire Safety Journal*, Volumen 24, pp.229-246.

Restrepo Pedro y Marin Luis, 2011, "Un método computacional para la obtención de rutas optimas en sistemas viales", *Dyna*. Volumen 78, pp.112-121

Ronchi Enrico, Nietouriz Francisco, Criel Xavier, P.Reilly, 2015, "Modelling large-scale evacuation of music festivals", *Case Studies in Fire Safety*. Volumen 5, pp. 11-19

Siikonen Marja-liisa, Hakonen Henri, 2002, "Efficient evacuation methods in tall buildings", *Elevator Technology* 12. 14 pages.

Zhao Xing, Ren Gang, Fan Chao, and Ding Chen-zi, 2012, "A simulation-based dynamic stochastic route choice model for evacuation", *Mathematical Problems in Engineering*, Volumen 2012, pp. 1-18.

Zhao Yonghui, Hu Haiyan, 2011, "Prediction of transient responses of a folding wing during the morphing process", *Aerospace Science and Technology*, Volumen 24, pp. 89-94.

Zhou Ji-biao, Chen Hong, Yang Jing, and Yan Jiao, 2014, "Pedestrian evacuation time model for urban metro hubs based on multiple video sequences data", *Mathematical Problems in Engineering*. Volumen 2014, 11 pages.

Urbanik II Thomas, 2000, "Evacuation time estimates for nuclear power plants", *Journal Hazardous Materials*, Volumen 75, pp. 165-180.

Lindell Michael K., 2006, "EMBLEM2: An empirically based large scale evacuation time estimate model", *Transportation Research Part A*, Volumen 42, pp. 140–154.

Mu Nan, Song Wei-guo, Qi Xin-xin, Lu Wei, Cao Shu-chao, 2014, "Simulation of Evacuation in a Twin Bore Tunnel: Analysis of Evacuation Time and Egress Selection", *Procedia Engineering*, volume 71, pp.333 – 342.

- Zhao Gang, Li Yan-feng, Cui Yan-qiang, Zhao Wei-han, 2016, "A comparative analysis on the evacuation time of atrium-style metro Station", *Procedia Engineering*, Volumen 135, pp. 33 – 39.
- Zhao Xing, Feng Ming-jie, Li Hui-ying, Zhang Teng, 2016, "Optimization of Signal Timing at Critical Intersections for Evacuation", *Procedia Engineering*, Volumen 137, pp.334 – 342.
- Ulrich Armel, Wagoum Kemloh, Steffen Bernhard, Seyfried Armin, Chraibi Mohcine ,2013, "Parallel real time computation of large scale pedestrian evacuations", *Advances in Engineering Software*, Volumen 60-61, pp.98–103.
- Abulhassan Yousif, Davis Jerry, Sesek Richard, Gallagher Sean, Schall Mark, 2016, "Establishing school bus baseline emergency evacuation times for elementary school students", *Safety Science*, Volumen 89, pp.249–255.
- Hajek Bruce, 1991, "Bouns on evacuation time for deflection routing", *Distributed Computing*, Volumen 5, 6 pages.
- Chen Po-Han, Feng Feng, 2006, "A fast flow control algorithm for real-time emergency evacuation in large indoor areas", *Fire Safety Journal*, Volumen 44, pp. 732–740.
- Chow W.K., 2006, "Waiting time' for evacuation in crowded areas", *Building and Environment*, Volumen 42, pp. 3757–3761.
- Chow W.K., M.Y. Ng Candy, 2006," Waiting time in emergency evacuation of crowded public transport terminals", *Safety Science*, Volumen 46, pp. 844–857.

- Guanquan Chu, Jinhui Wang, Qingsong Wang, 2011, "Time-dependent fire risk assessment for occupant evacuation in public assembly buildings", *Structural Safety*, Volumen 38, pp. 22–31.
- Fang Zhixiang, Li Qingquan, Li Qiuping, D. Han Lee, Wang Dan, 2010, "A proposed pedestrian waiting-time model for improving space-time use efficiency in stadium evacuation scenarios", *Building and Environment*, Volumen 46, pp.1774-1784.
- Fang Zhixiang, Li Qiuping, Li Qingquan, D. Han Lee, Shaw Shih-Lung, 2012, "A space-time efficiency model for optimizing intra-intersection vehicle-pedestrian evacuation movements", *Transportation Research Part C*, Volumen 31, pp.112–130.
- García-Ojeda J.C., Bertok B., Friedler F., Fan L.T.,2013, "Building-evacuation-route planning via time-expanded process-network synthesis", *Fire Safety Journal*, Volumen 61, pp.338–347.
- Golmohammadi Davood, Shimshak Daniel, 2010, "Estimation of the evacuation time in an emergency situation in hospitals", *Computers & Industrial Engineering*, Volumen 61, pp.1256–1267.
- Khalid Ruzelan, Kamal Mohd, Nawawi1 Mohd, Kawsar Luthful A., Ghani Noraida A., Kamil Anton A., Mustafa Adli, 2014, "The evaluation of pedestrians' behavior using M/G/C/C analytical, weighted distance and real distance simulation models", *Discrete Event Dyn Syst* , Volumen 26, pp.439–476.
- Lindell Michael K. , 2006, "EMBLEM2: An empirically based large scale evacuation time estimate model", *Transportation Research Part A*, Volumen 42, pp.140–154.

- Olsson P.A., Regan M.A., 2011, "A comparison between actual and predicted evacuation times", *Safety Science*, Volumen 38, pp. 139-145.
- Pauls Jake, 1986, "Calculating Evacuation Times for Tall Buildings", *Fire Safety Journal*, Volumen 12, pp. 213-236.
- Průibyl Pavel, Průibyl Ondřej, 2013, "Effect of tunnel technological systems on evacuation time", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volumen 44, pp.88–96.
- Proulx Guylene, 1994, "Evacuation Time and Movement in Apartment Buildings", *Fire Safety Journal*, Volumen 24, pp. 229-246.
- Mohaimin Sadri Arif., V.Ukkusuri Satish, Murray-Tuite Pamela, 2013, "A random parameter ordered probit model to understand the mobilization time during hurricane evacuation", *Transportation Research Part C*, Volumen 32, pp.21–30
- Wang Li, Yang Lixing, Gao Ziyou, Li Shukai, Zhou Xuesong, 2015, "Evacuation planning for disaster responses: A stochastic programming framework", *Transportation Research Part C*, Volumen 69, pp.150–172.
- Wang Jing, Zhao Haifeng, Winter Stephan, 2014, "Integrating sensing, routing and timing for indoor evacuation", *Fire Safety Journal*, Volumen 78, pp.111–121.
- Xie Qimiao, Wang Jinhui, Lu Shouxiang, Hensen JanL.M., 2015, "An optimization method for the distance between exits of buildings considering uncertainties based on arbitrary polynomial chaos expansion", *Reliability Engineering and System Safety*, Volumen 154, pp.188–196.

- Guowei Zhang, Guoqing Zhu, Guanglin Yuan, Yong Wang, 2016, “Quantitative risk assessment methods of evacuation safety for collapse of large steel structure gymnasium caused by localized fire”, *Safety Science*, Volumen 87, pp.234–242.
- Lindell Michael K. , 2006, “EMBLEM2: An empirically based large scale evacuation time estimate model”, *Transportation Research Part A*, Volumen 42, pp. 140–154.
- Liu Xiao-dong, Song Wei-guo, Huo Fei-zhou, Jiang Zi-gang , 2014, “Experimental Study of Pedestrian Flow in a Fire-protection Evacuation Walk”, *Procedia Engineering*, Volumen 71, pp.343 – 349.
- Cai Yu, Lin Zhen-yao, Mao Jun, Bai Guang, Hu Jia-wei , 2016, “Study on law of personnel evacuation in deep buried metro station based on the characteristics of fire smoke spreading”, *Procedia Engineering*, Volumen 135, pp. 544 – 550.
- Jiang Ze-min, Zhang Pei-hong, Shang Rong-xue, Tian Xiang-liang , 2014, “Investigation and Simulation on Human Evacuation Behaviour in Large Hospital Building in Shenyang”, *Procedia Engineering*, Volumen 71, pp. 101 – 106.