

Comparación de procesos de evacuación en edificaciones residenciales multifamiliares

Evacuation processes comparison in multi-family residential buildings

Ph.D. Jose Agustin Vallejo-Borda¹

¹Grupo de investigación AVR, Universidad de Investigación y Desarrollo, Colombia, <https://orcid.org/0000-0001-6873-1086>, Email: jvallejo1@udi.edu.co

Como citar: J. A. Vallejo, "Comparación de procesos de evacuación en edificaciones residenciales multifamiliares", *Revista Ingenio*, 17 (1), pp.49-55, 2020.

Fecha de recibido: 01 de agosto de 2019
Fecha aprobación: 08 de noviembre de 2019

RESUMEN

Palabras claves:

Evacuación, Seguridad,
Viswalk, Vivienda de
interés social.

En esta investigación se desarrolla una comparación en los tiempos de evacuación de un proyecto de vivienda de interés social (VIS) que se puede generar a partir de cambios puntuales en sus dimensiones y del tipo de construcción (i.e., VIS, no VIS). Para esto inicialmente se obtuvieron los planos arquitectónicos de dos proyectos residenciales multifamiliares y por medio de la herramienta computacional Viswalk® se corrieron varios escenarios de evacuación modificando las densidades de las edificaciones y las dimensiones de elementos de evacuación de acuerdo con las normativas comparadas. Por medio de este proceso se encontró que incrementando las medidas de los elementos de evacuación (i.e., ancho de puertas, escaleras, otros medios de evacuación y longitud de descansos) se logra un mínimo aumento en la eficiencia de la evacuación de las edificaciones. Adicionalmente, se encontró que las edificaciones VIS presentan mayor eficiencia en evacuaciones debido a la distribución arquitectónica de dichas edificaciones que reducen los desplazamientos dentro de la edificación. Por medio de este artículo se podrán desarrollar construcciones más consientes en términos del diseño de los elementos de evacuación para que cumplan su función.

ABSTRACT

Keywords:

Evacuation, Safety,
Viswalk, Subsidized
housing.

In this investigation, it is developed an evacuation time comparison of a social interest housing considering changes in the architectural dimension and with no social interest housing projects. The architectural plan for two housing projects was obtained. Then, using Viswalk® software, it was simulated different evacuation scenarios modifying occupancy densities and the architectural dimension of evacuation elements considering different construction codes. Through this process, it was found that increases in the evacuation element (e.g., door and stairs width) sizes do not produce a significant increase in the efficiency of the evacuation process. Besides, it was found that the social interest housing projects have higher efficiency in terms of evacuation time because these projects minimize the displacement length inside the buildings. In sum, it could be developed a construction that considers the evacuation elements design ensuring that these elements accomplish their objective.

1. Introducción

La construcción de vivienda de interés social (VIS) es una opción utilizada en los últimos tiempos para disminuir el déficit de vivienda en el país, donde se ha evidenciado un crecimiento en la construcción de este tipo de edificaciones [1]. Los nuevos proyectos de vivienda tipo VIS han sido diseñados para cumplir las normas referentes a sismo resistencia a nivel estructural. En el caso colombiano, es necesario seguir los lineamientos establecidos en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Esta norma contempla en el título K la normatividad en temas de evacuación y a la vez, en el mundo es utilizada como referencia la NFPA 5000 (National Fire Protection Association) para un fin similar.

Las evacuaciones en edificaciones son procesos subsecuentes a desastres tanto naturales como de origen antrópico que juegan un papel principal para evitar mayores desastres y muertes [2]. Un elemento esencial en evacuaciones es el tiempo de evacuación que se toman los ocupantes para evacuar una edificación. Sin embargo, no es claro si el tiempo de evacuación puede influenciarse con intervenciones puntuales de los elementos de evacuación (i.e., ancho de puertas, escaleras, otros medios de evacuación y longitud de descansos) de acuerdo con las recomendaciones de las diferentes normativas (e.g., NSR – 10, NFPA 5000). Adicionalmente, tampoco se han desarrollado comparaciones objetivas en términos de eficiencia de las evacuaciones cuando se consideran en conjunto

Autor para correspondencia

Correo electrónico: jvallejo1@udi.edu.co (Jose Agustin Vallejo-Borda)



La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)

tanto edificaciones VIS como no VIS.

Lo expuesto anteriormente motivó a generar el presente estudio donde se identificaron las influencias sobre los tiempos de evacuación que tienen las modificaciones puntuales a los elementos de evacuación. Adicionalmente, también se busca comparar objetivamente los tiempos de evacuación de un proyecto VIS con un proyecto no VIS en términos de las mismas modificaciones a los elementos arquitectónicos. Si bien se ha establecido en diversos estudios la importancia de involucrar elementos subjetivos de las personas cuando interactúan directamente con su entorno [2], en el presente estudio solo se consideró la intervención sobre elementos físicos de la infraestructura para conocer el impacto de dichos cambios en una situación hipotética donde no hay respuesta a una emergencia real.

El resto de este documento contiene primero, una revisión de referencias asociadas a los principales componentes a considerar en ejercicios de evacuación en edificaciones; segundo, una sección de metodología donde se explica el desarrollo de los escenarios y los modelos utilizados para comparar cada uno de los casos (i.e., VIS y no VIS); tercero, una sección de resultados donde se evidencia la eficiencia en tiempos de evacuación de las diferentes edificaciones una vez se incorporan las recomendaciones de las normativas (i.e., NSR – 10 y NFPA 5000); cuarto, una sección de discusión donde se explican las similitudes y diferencias entre los tipos de edificación y las influencias sobre sus tiempos de evacuación por los cambios arquitectónicos asociados a los elementos ; y finalmente, se presenta una sección de conclusiones.

2. Evacuación de edificaciones

Durante los diferentes procesos de evacuación que se puedan presentar en una edificación residencial multifamiliar, son muchas las áreas de la edificación que se ven involucradas en el proceso. Por un lado, están los espacios de cada una de las unidades residenciales, sin embargo, también están presentes las zonas principales de evacuación de la edificación. En el momento en que las personas ingresan a la zona principal comenzarán a interactuar con los demás ocupantes y es en este punto donde los expertos podrán identificar los puntos críticos del proceso de evacuación. Estos puntos críticos han sido denominados cuellos de botella y son aquellos puntos específicos de áreas continuas que presentan una reducción en su ancho efectivo o una afluencia de flujo de personas superior para el que fue diseñado. Debido a esto, no logran soportar el flujo de personas presente antes del punto de reducción, generando así demoras y colas entre las personas que lo usan y desean continuar

por este camino [3].

Otro aspecto que es necesario tener en cuenta es el comportamiento de las personas (e.g., tranquilidad, pánico) al enfrentar una situación de riesgo que los obligue a evacuar de forma oportuna. Estos comportamientos pueden ser evaluados, y las reacciones negativas pueden ser mitigadas por medio de características arquitectónicas que mejoren la sensación de confort y tranquilidad. Este efecto puede ser logrado con alturas libres de entrepiso de mayor dimensión a lo común, o por medio de la disminución de recorridos para llegar a los medios de evacuación [4].

En una caminata cotidiana generalmente el destino al que se tiene planeado llegar se conoce con anterioridad. De esta forma la persona ha seleccionado una ruta previamente y está en capacidad de seguir la ruta preparada en su mente. A pesar de esto, en un caso de evacuación la situación cambia al ser un evento sorpresa que no permite crear un pensamiento claro sobre qué hacer. Por esta razón se pueden presentar evacuaciones reales donde los ocupantes de las edificaciones intenten salir lo más rápido posible, generando conflictos con otros ocupantes de la edificación o accidentes que puedan retrasar el proceso completo de evacuación. Por esto, es necesario contar con medidas preventivas para responder a estos comportamientos naturales de las personas. Estas medidas pueden ser grandes anchos en las zonas utilizadas para evacuación o generar más de un medio de evacuación o egreso de la edificación [4].

Uno de los principales indicadores utilizados para medir un proceso de evacuación es el tiempo de egreso de la edificación, el cual no será único y dependerá tanto del tamaño de la edificación como de su densidad de ocupación. La importancia del tiempo de egreso radica en que dicho tiempo representa el aumento o disminución del riesgo sobre los ocupantes de la edificación. Es decir, a mayor tiempo gastado en la evacuación, mayor será el riesgo que corren los ocupantes. Este tiempo deberá ser medido desde el momento en que se produce el incidente que obliga la evacuación, hasta el momento en el que la última persona sale de la edificación [5].

Por otro lado, es necesario conocer la densidad o la ocupación de la edificación a analizar para diseñar estándares cuantitativos y cualitativos a la medida de las necesidades identificadas. Como se mencionó anteriormente, si bien el tiempo de egreso es fundamental en los procesos de evacuación, este tiempo será función de la ocupación de la edificación. Para ilustrar, se asume que no se destinará el mismo tiempo para evacuar un edificio con 6 apartamentos a evacuar

un edificio con 30 apartamentos, a pesar de que estos se pudiesen encontrar en la misma área o incluso uno junto al otro [6].

La relación existente entre las variables previamente mencionadas (i.e., tamaño de la edificación y densidad de ocupación) y los tiempos de evacuación puede ser estudiada por medio de modelos matemáticos. En el desarrollo de modelos que permitan evaluar procesos de evacuación es necesario también conocer información asociada a los ocupantes de las edificaciones. Es por esto por lo que la velocidad de desplazamiento de las personas debe ser calculada considerando sus diferencias. Se ha establecido que los ocupantes de las edificaciones caminan a una velocidad de 1.5 metros por segundo en situaciones normales. Sin embargo, dicha velocidad puede variar entre 0.10 y 1.8 metros por segundo dependiendo del lugar (e.g., corredor, escaleras) o situación (e.g., normalidad, emergencia) [7].

Para medir el tiempo de evacuación de una edificación residencial multifamiliar se pueden utilizar un sin número de métodos. Uno de los métodos más reconocidos es el método del caudal donde se indica una salida constante de 60 personas por minuto. Sin embargo, el método del caudal presenta inconsistencias debido a que en situaciones reales es poco probable la existencia de una tasa constante sostenida en el tiempo [7]. Otro de los métodos es el de capacidad que fue desarrollado de manera experimental por lo que su aplicación y desempeño puede cambiar en diferentes contextos [8]. Finalmente, una de las prácticas más recomendadas, pero menos extendida para proyectos de vivienda multifamiliar es medir tiempos de evacuación por medio de herramientas computacionales que permitan conocer el tiempo de evacuación de la edificación por medio de simulaciones [9].

Los métodos anteriormente descritos hacen referencia a una situación típica de ocupación de un edificio residencial multifamiliar. Sin embargo, para realizar una evaluación completa de los procesos de evacuación es recomendado probar diferentes escenarios (e.g., ocupación normal, ocupación extrema) a los que pueda estar sometida la edificación [10].

En el contexto normativo colombiano referente a evacuaciones se cuenta con dos recursos que se pueden utilizar. El primero de ellos es el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR – 10) que involucra en uno de sus capítulos información asociada a los medios de evacuación en edificaciones

residenciales [11]. Adicionalmente, se comparará con los estándares solicitados por la National Fire Protection Association de los Estados Unidos en su código de construcción y seguridad en edificaciones NFPA 5000 [12]. Considerando los aspectos arquitectónicos requeridos en la evacuación (e.g., puertas, escaleras), se encuentra que la norma utilizada en los Estados Unidos (i.e., NFPA 5000) es más conservadora al solicitar medios de evacuación que cuenten con medidas más amplias que las presentadas por la colombiana (i.e., NSR – 10). En la tabla 1 se presentan las medidas mínimas solicitadas por cada una de las normas en los principales elementos de evacuación.

Tabla 1. Medidas estipuladas por códigos de construcción.

Elemento	Unidades	NSR - 10	NFPA 5000
Ancho puertas	mm	800	810
Ancho escaleras	mm	1200	1420
Longitud descansos	mm	1200	1220
Ancho otros medios de evacuación	mm	1000	1120

3. Metodología

Para la presente investigación se llevan a cabo tres procesos metodológicos: (i) preparación del material para modelación, (ii) carga de un modelo al software y desarrollo de simulación y (iii) comparación de los resultados. El presente estudio se basó en dos proyectos de vivienda multifamiliar por lo que los resultados solo representan dichos proyectos. Adicionalmente, se consideró la modificación en elementos físicos de la arquitectura de las edificaciones (i.e., ancho de puertas, escaleras, otros medios de evacuación y longitud de descansos). Es decir, los resultados no representan efectos de la percepción de los ocupantes o su respuesta ante una emergencia real.

3.1 Material para modelación

Para el presente estudio se utilizaron 2 casos de estudio en 2 edificaciones multifamiliares residenciales donde una es tipo VIS. Para estos casos de estudio se desarrolló inicialmente una evaluación de la situación real de las edificaciones a nivel arquitectónico, específicamente considerando las medidas de los elementos principales de evacuación (ver tabla 2).

Tabla 2. Medidas de elementos de evacuación en los proyectos.

Elemento	Unidades	VIS	No VIS
Ancho puertas	mm	900	1000
Ancho escaleras	mm	1000	1170
Longitud descansos	mm	1160	1200
Ancho otros medios de evacuación	mm	1000	1200

Posteriormente se implementaron cambios arquitectónicos necesarios a los modelos arquitectónicos para que cada una de las edificaciones cumpliera con las medidas mínimas que se establecen por cada norma (ver Tabla 1). En los casos que las medidas reales de la edificación sean mayores a las estipuladas por la norma se conservará la medida real (ver Tabla 1 y Tabla 2). Las medidas utilizadas en cada uno de los modelos arquitectónicos usados en esta investigación se presentan en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Medidas del escenario VIS.

Elemento	Unidades	NSR - 10	NFPA 5000
Ancho puertas	mm	900	900
Ancho escaleras	mm	1200	1420
Longitud descansos	mm	1200	1220
Ancho otros medios de evacuación	mm	1000	1120

Tabla 4. Medidas del escenario no VIS.

Elemento	Unidades	NSR - 10	NFPA 5000
Ancho puertas	mm	1000	1000
Ancho escaleras	mm	1200	1420
Longitud descansos	mm	1200	1220
Ancho otros medios de evacuación	mm	1200	1200

3.2 Simulación de escenarios

Para desarrollar los modelos descritos anteriormente se hará uso de la herramienta computacional Viswalk® de PTV Group. Para poder correr los modelos es necesario primero tener los planos arquitectónicos en una extensión soportada por Viswalk® (e.g., AutoCAD) para cada uno de los escenarios. Posteriormente se deben establecer las características de la población (e.g., sexo) y de la edificación (e.g., ocupación) para especificarlo en las simulaciones. En el caso del presente estudio se asume una distribución de sexo donde el 52% serán de sexo femenino y el restante 48% de sexo masculino [13], al igual que diferentes ocupaciones de las viviendas (i.e., 2, 4, 5 y 10 personas por apartamento). Otras variables sociodemográficas (e.g., edad) no fueron consideradas en el presente estudio.

3.3 Aproximación metodológica

Para el desarrollo de esta investigación se asumió una relación lineal entre la ocupación de la edificación y el tiempo de evacuación de esta, dado que la variable dependiente a considerar (i.e., tiempo de evacuación) es de naturaleza continua. Por esta razón, el modelo propuesto para analizar los diferentes datos es un modelo de regresión lineal. En este caso específico se busca conocer los valores que una variable Y (tiempo de evacuación para el presente estudio) puede tomar para diferentes variables X de acuerdo con la ecuación 1.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (1)$$

Donde Y es la variable dependiente que en el caso de este estudio es el tiempo de evacuación en segundos; β_0 es el termino constante asociado a la función y representa el punto donde la línea cruza el eje de las ordenadas; β_1 es el parámetro que indica el impacto sobre la variable dependiente por el cambio en una unidad del valor de la variable independiente; X es la variable independiente que en el caso de este estudio es la densidad de ocupación de la edificación (i.e., personas/área); y ε es el termino de error que se asume con distribución con valor esperado 0 y varianza σ^2 (i.e., supuesto de homocedasticidad) [14].

4. Resultados

Una vez corrido el modelo para cada escenario (i.e., VIS y no VIS), se obtuvieron los resultados siguiendo cada uno de los escenarios evaluados (i.e., real, NSR-10 y NFPA-5000). Para todos los escenarios se hace una comparación basada en la densidad de las edificaciones. Como se mencionó en la metodología, esta comparación busca conocer la tasa a la que cambia el tiempo de

evacuación de acuerdo con la densidad existente en las edificaciones. En la figura 1 se observa una diferencia de pendientes entre los casos VIS y no VIS. En el caso del proyecto VIS se puede observar una menor pendiente que presentan los procesos de evacuación. Lo anterior permite sugerir que la evacuación en el proyecto VIS es realizada con mayor eficiencia que en el proyecto no VIS debido a que una menor pendiente en el modelo representa menores tiempos de evacuación en función de la densidad de ocupación de la edificación. Una vez se comparan las dos pendientes directamente se encuentra una diferencia de pendientes del 59% considerando el caso no VIS como base.

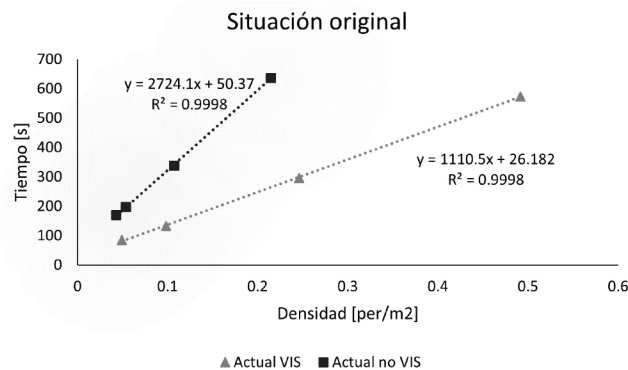


Figura 1. Eficiencia de la evacuación escenario arquitectónico sin modificaciones.

En la figura 2 se observa que también hay una diferencia en las pendientes entre los casos VIS y no VIS. Claramente es observable la menor pendiente que presentan los procesos de evacuación para el caso del proyecto VIS. Lo anterior señala que la evacuación en el proyecto VIS para el caso donde se utilizan las recomendaciones de la NSR – 10 es realizada de forma más eficiente que en el proyecto no VIS. En este caso, al comparar las dos pendientes se encuentra una diferencia de pendientes del 62% considerando el caso no VIS como base.

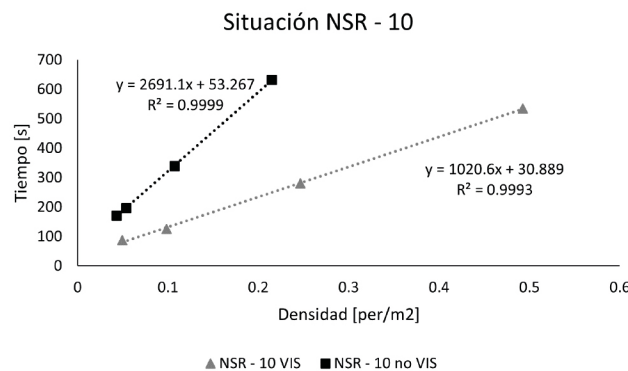


Figura 2. Eficiencia de la evacuación escenario NSR-10.

Finalmente, en la figura 3 se observa que similar a los casos anteriores también hay una diferencia de pendientes entre los casos VIS y no VIS. De forma similar, es observable la menor pendiente que presentan los procesos de evacuación para el caso del proyecto VIS. Lo anterior confirma que la evacuación en el proyecto VIS es realizada con mayor eficiencia que en el proyecto no VIS. Adicionalmente, en este caso, al comparar las dos pendientes se encuentra una diferencia de pendientes del 63% considerando el caso no VIS como base.

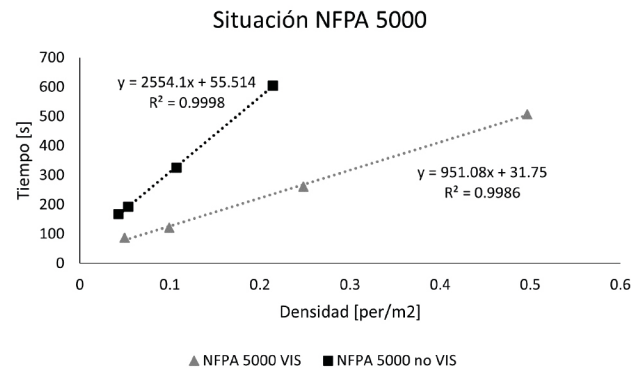


Figura 3. Eficiencia de la evacuación escenario NFPA 5000.

Una vez comparadas las pendientes de todos los escenarios, se observa una tendencia asociada a la aplicación de las diferentes recomendaciones. En la tabla 5 se pueden observar los valores asociados al β_1 , los cuales una vez comparados entre sugieren las medidas más eficientes. En el caso de seguir lo indicado en la NSR – 10 genera una disminución en la pendiente asociada al tiempo de evacuación de 1.21% para la vivienda no VIS y de 8.09% para la vivienda VIS. Cuando se considera la situación propuesta por la NFPA 5000 se observa una disminución asociada a la pendiente de 6.24% para la vivienda no VIS y de 14.36%. En cualquier caso, los resultados sugieren que, al realizarse perturbaciones geométricas a los proyectos, se podrá tener un mayor impacto en los proyectos VIS.

Tabla 5. Eficiencia en la evacuación de los diferentes escenarios.

Escenario	VIS	No VIS
Original	2724.1	1110.5
NSR-10	2691.1	1020.6
NFPA 5000	2554.1	951.08

5. Discusión

Al momento en que inicia una evacuación las zonas principalmente ocupadas de una edificación son los distintos apartamentos. A pesar de esto rápidamente la concentración pasa a las zonas de escaleras y corredores. Lo anterior indica que una vez se inicie la evacuación ya no son importante áreas de apartamentos. A partir de este momento la importancia recae en los medios de evacuación. Entre los espacios de las edificaciones que toman mayor importancia en evacuaciones están las escaleras y corredores que llegan a las escaleras. Como se mencionó anteriormente de forma rápida estos lugares llegan a concentrar toda la capacidad de las edificaciones VIS y no VIS. Por esta razón es necesario en estos lugares generar el espacio adecuado para procesos de evacuación.

Actualmente en proyectos VIS los medios de evacuación son restringidos por el poco espacio que se tiene previsto para ellos. Lo anterior debido al bajo presupuesto que se tiene para este tipo de proyectos. Resultado de esto en la actualidad los proyectos VIS intentan dar un ancho suficiente para la salida de una persona a la vez. Por otro lado, los recorridos que realizan estas personas son muy cortos. En muchas ocasiones solo basta con abrir la puerta de cada apartamento para encontrarse inmediatamente en los medios de evacuación. Paradójicamente este factor de poco espacio puede ser el causante de una eficiencia positiva en términos de evacuación como se puede observar a partir de los resultados de esta investigación.

Por otro lado, se encuentran los proyectos no VIS. Esta clase de proyectos generan espacios donde muchas veces hay corredores largos y amplios. Este tipo de espacios dan una sensación de tranquilidad a los ocupantes de las edificaciones. Sin embargo, esta aparente tranquilidad puede ser contraproducente al momento de evacuar. Los largos y amplios corredores presentes en proyectos no VIS genera a su vez largos recorridos de evacuación. Al tener largos recorridos de evacuación en las edificaciones se cuenta también con tiempos más elevados para poder realizar una evacuación efectiva. Finalmente, esto representa una disminución de la eficiencia del ejercicio de evacuación en este tipo de edificaciones como lo muestran los resultados de la presente investigación.

En cuanto a las modificaciones a la arquitectura de las edificaciones se observaron mejoras en la eficiencia con la intervención de las medidas de los elementos de evacuación. Inicialmente se observó que el factor más determinante son los anchos de los medios de

evacuación donde la eficiencia de la evacuación se mejora por incrementos en los anchos de las escaleras y en el aumento de la longitud de sus descansos. Esta mejora en la evacuación puede estar relacionada con el aumento de capacidad generado en los medios con mayor ocupación durante el proceso.

6. Conclusiones

A partir de los resultados de esta investigación se concluye que las medidas que deben tener los medios de evacuación (i.e., ancho de puertas, escaleras, otros medios de evacuación y longitud de descansos) deberán permitir como mínimo el tránsito de personas en ambos sentidos. Lo anterior porque de esta manera se genera espacio suficiente para que las personas de la edificación evacuen de forma simultánea al acceso del personal de emergencia que esté atendiendo el evento. Sin embargo, al momento de modelar esta condición no se evidenciaron impactos relevantes en los tiempos de evacuación por los aumentos en las medidas de los medios de evacuación simulados en esta investigación.

Por otro lado, se identificó que la longitud del recorrido impacta directamente y de forma significativa la eficiencia del proceso de evacuación al estar correlacionado positivamente con el tiempo que se debe destinar al proceso de evacuación. Esta conclusión se fundamenta en la comparación de los casos VIS y no VIS. En el caso de los proyectos VIS al tener restricciones en los espacios se reduce la longitud de recorridos generando una alta eficiencia en los procesos de evacuación. Caso contrario sucede con las edificaciones multifamiliares no VIS en donde debido al aumento de la longitud de los diferentes espacios arquitectónicos se impacta negativamente la eficiencia de sus procesos de evacuación. Por estas razones, si el propósito al realizar cambios arquitectónicos en un edificio es lograr disminución en los tiempos de evacuación se deberá disminuir la longitud del recorrido.

Finalmente, las simulaciones desarrolladas en el presente estudio solo consideraron modificación en elementos físicos de las edificaciones. Sin embargo, futuros estudios deberían incorporar elementos subjetivos de las personas con la finalidad de entender como las percepciones y comportamientos de los ocupantes de la edificación impactan los procesos de evacuación en emergencias reales. Adicionalmente, esta investigación también podrá ser tomada como punto de partida para evaluar edificaciones diferentes a residencias multifamiliares considerando sus contextos y características específicas.

7. Agradecimientos

El autor agradece a PTV Group por facilitar la licencia educativa para el desarrollo de la presente investigación y a la Ingeniera Ana Ozuna por la guía en el desarrollo de la tesis que inspiró la realización de este artículo.

8. Referencias

- [1] Cámara Colombiana de la Construcción, “Informe de Gestión 2018 - 2019,” 2019.
- [2] C. Şahin, J. Rokne, and R. Alhajj, “Human behavior modeling for simulating evacuation of buildings during emergencies,” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 528, p. 121432, Aug. 2019.
- [3] P. P. E. Kachroo, S. Amin Wadoo, S. J. Al-nasur, and A. Shende, “Intelligent Evacuation Systems,” in *Pedestrian Dynamics*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 107–120.
- [4] N. Waldau, P. Gattermann, H. Knoflacher, and M. Schreckenberg, Eds., *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [5] S. C. Pursals and F. G. Garzón, “Basic principle for the solution of the building evacuation problem,” *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 2, no. 3, pp. 499–516, 2009.
- [6] C. O. Soto Soto, “Elaboración de un Plan de Emergencia y Evacuación Edificio Nahmías de la Universidad Austral de Chile,” Universidad Austral de Chile, 2009.
- [7] L. Shi, Q. Xie, X. Cheng, L. Chen, Y. Zhou, and R. Zhang, “Developing a database for emergency evacuation model,” *Build. Environ.*, vol. 44, no. 8, pp. 1724–1729, 2009.
- [8] J. A. Vallejo-Borda, “Evaluación de procesos de evacuación en edificaciones residenciales multifamiliares por medio de la herramienta computacional Viswalk,” Universidad de los Andes, 2012.
- [9] J. S. Tubbs and B. J. Meacham, *Egress design solutions : a guide to evacuation and crowd management planning*. John Wiley & Sons, 2007.
- [10] T. S. Shen, “Building egress analysis,” *J. Fire Sci.*, vol. 24, no. 1, pp. 7–25, 2006.
- [11] A. colombiana de ingeniería sísmica- AIS, “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10,” Scielo, 2010.
- [12] National Fire Protection Association, *Building construction and safety code : NFPA 5000*, 2011 ed. Quincy, Mass. SE - 505 p. : il., mapas ; 28 cm: National Fire Protection Association, 2011.
- [13] Departamento Administrativo Nacional de Estadística, “Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV 2018,” Dane, 2018.
- [14] S. P. Washington, M. G. Karlaftis, and F. Mannering, *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. CRC Press, 2010.