



Determinación del tiempo medio de espera para el cruce de peatones en un punto de mayor flujo vial del Periférico de Mérida mediante una simulación Monte Carlo

Determination of the average waiting time for pedestrian crossing at a high-traffic point on the Periférico in Mérida through a Monte Carlo simulation

Jorge-Lugo^{5,6}

Marisela-Chi⁷

Jesús-Escalante⁸

Jorge-Santos

María Fernanda Cortina-León

Mario-Pérez

Resumen

Este trabajo aborda la problemática del cruce peatonal debido a un incremento del tráfico vehicular urbano. Particularmente preocupante es la situación del periférico de Mérida, Yucatán que soporta aproximadamente 100,000 vehículos diarios, triplicando actualmente su capacidad original. A pesar de la construcción de puentes peatonales estos han mostrado poca efectividad, además de ser insuficientes y no siempre adecuados. En 2023, este periférico se clasificó entre las cinco vías más peligrosas de México, resaltando la necesidad urgente de abordar esta problemática de movilidad. Se plantea un algoritmo en Python diseñado para calcular el tiempo promedio que un peatón necesita para cruzar el anillo periférico, teniendo como parámetros el flujo vehicular

5 Facultad de Matemáticas. Universidad Autónoma de Yucatán

6 Autor para correspondencia: jorge.lugo@correo.uady.mx

7 Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán.

8 Cuerpo Académico de Competitividad e Innovación Tecnológica. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Autónoma de Yucatán.

y el tiempo de paso del peatón. Se probaron y compararon diferentes escenarios de cruce: normal (9 seg.), rápido (6 seg.) y lento (para personas de la 3ª. edad o con discapacidad) con tres velocidades (12, 15 y 18 seg.).

Palabras clave: Simulación Monte Carlo, algoritmo en Python, tráfico vehicular

Abstract

This work addresses the issue of pedestrian crossings due to an increase in urban vehicular traffic. Particularly worrying is the situation of the Mérida peripheral via, which supports approximately 100,000 vehicles daily, currently tripling its original capacity. Despite the construction of pedestrian bridges to reduce accidents, they have shown little effectiveness, in addition to being insufficient and not always accessible. In 2023, this peripheral via was classified among the five most dangerous roads in Mexico, highlighting the urgent need to address these mobility and road safety problems. An algorithm is proposed in Python designed to calculate the time that a pedestrian needs to cross the peripheral via, taking into account the vehicular flow. Three types of crossing were tested: normal (9 sec.), fast (6 sec.) and slow (for elderly or disabled people) with three speeds (12, 15 and 18 sec.).

Keywords: Monte Carlo simulation, algorithm in Python, traffic flow

Introducción

De manera natural las ciudades en el mundo presentan un crecimiento poblacional. Este incremento en el número de habitantes se debe a factores tales como la natalidad, las migraciones o la estancia temporal de turistas. En algunos casos este aumento de la población implica un aumento de la cantidad de vehículos automotores que circulan por sus vialidades. Este hecho provoca una serie de problemáticas viales como congestionamientos, percances automovilísticos, contaminación auditiva y visual, así como daños al medio ambiente; sin olvidar el estrés emocional que provoca en todos los ciudadanos y repercute significativamente en su calidad de vida.



Hace algunos años se estimaba que el 75% de los vehículos registrados en el estado estaban circulando en la ciudad de Mérida principalmente en las vías principales como Paseo de Montejo, Cupules, Jacinto Canek, el centro histórico y el periférico. Para el año 2020, la cantidad de vehículos en circulación alcanzó la cifra de 902,783, lo que representó un aumento de 29,651 en comparación con el año anterior (1). Se considera que esta tasa de crecimiento vehicular ha crecido constantemente durante los tres años siguientes, lo que significó un aumento anual del 5%, considerablemente mayor si se compara con el crecimiento poblacional, el cual oscila entre el 1.7% y el 2.9% (2).

De acuerdo con un reporte estadístico del INEGI, el parque vehicular en Yucatán creció 77% en diez años, al pasar de 323,247 vehículos en 2010 a 572,310 en 2021. Este número contrasta con el modesto incremento del 17.38% en el uso del transporte público (3). Esta discrepancia señala un deficiente servicio de transporte público que ha favorecido la proliferación de vehículos privados. Es preocupante el caso del periférico de Mérida, donde circulan aproximadamente 100,000 vehículos diariamente, tres veces más de lo que originalmente fue diseñado para soportar (3). En el año 2023, el periférico de Mérida se ha clasificado entre las cinco vialidades más peligrosas y mortales a nivel nacional (4), solamente es superado por el periférico de Guadalajara, la autopista México-Veracruz, la carretera de Chapala y el periférico del Estado de México-Ciudad de México, mencionados en orden descendente de peligrosidad.

El periférico de Mérida es un circuito vial de alrededor 50 km de longitud que rodea la ciudad, en sus límites laterales se encuentran fábricas, comercios, colonias, plazas comerciales y edificios habitacionales. Se encuentra dividida en dos caminos pavimentados separados por un espacio verde de alrededor de 10 metros de ancho. Tanto en el circuito interior como el circuito exterior que componen esta vía pública están divididos en tres carriles: el carril derecho de circulación se considera reservado tradicionalmente para los vehículos ligeros, los de baja velocidad, o aquellos pesados como remolques o autobuses. Los otros dos carriles de circulación, el central y el izquierdo, son usados por lo general por automóviles particulares. Por reglamento, el carril izquierdo debe ser usado para realizar rebases por lo que implica que

en él transitan los vehículos con mayor velocidad. Contigua a esta doble vía y a lo largo de gran parte de su recorrido existen numerosas colonias que presentan tanto gran flujo vehicular como peatonal, en especial las zonas norte y oriente de Mérida. Debido a esta concurrencia de estos factores mencionados la mayoría de los accidentes fatales que ocurren en esta vía se deben por la necesidad apremiante de las personas por llegar a su destino laboral o el hogar, ya que se ven orillados a cruzar intempestivamente esta congestionada vialidad, arriesgando de este modo sus vidas. Este grupo vulnerable incluye tanto peatones como toda persona con vehículo no motorizado.

Ante esta situación, la Secretaría de Seguridad Pública de la entidad ha tomado medidas para reducir la alta tasa de accidentes, que se estima en alrededor de 8 diarios (5). Estos accidentes incluyen atropellamientos, salidas de la carretera y choques por alcance. Las medidas implementadas incluyen el uso de radares para detectar vehículos que exceden los límites de velocidad y el sistema operativo "Carrusel", donde dos patrullas circulan a una velocidad constante entre 80 km/h y 90 km/h ocupando los tres carriles (6). Sin embargo, la persistente tasa de accidentes demuestra que estas medidas no han sido completamente efectivas para reducir el riesgo de atropellamiento. Con respecto a los puentes peatonales existen alrededor de 18 a lo largo de todo el periférico lo que es insuficiente para los casi 50 km de longitud que tiene (casi 3 km de distancia entre cada uno si su distribución fuera uniforme, pero en realidad no es así). Además muchos de éstos no tienen la infraestructura necesaria para que peatones con discapacidad o personas con vehículos no motorizados puedan cruzarlos, por lo que la gente se ve obligada a cruzar por debajo de ellos.

Hasta la fecha, no se dispone de estudios o investigaciones científicas que aborden de manera integral esta problemática local. Ante la evidente falta de éxito en la resolución del problema se justifica la necesidad de explorar nuevas soluciones y enfoques más efectivos. En este trabajo mediante el uso del método de Monte Carlo, se realiza una simulación computacional del flujo vial en el circuito periférico. Es importante mencionar que el algoritmo de Monte Carlo es una técnica matemática estadístico numérico que utiliza la generación de números



aleatorios para el estudio de fenómenos complejos cuyos resultados son difíciles de obtener con exactitud. En otras palabras, una simulación de Monte Carlo es un modelo computacional que utiliza la probabilidad en su estructura matemática interna para incluir elementos de aleatoriedad durante el proceso de obtención de resultados o predicciones. Por ejemplo, este método es útil para simular la aleatoriedad de las transacciones comerciales en una cadena de valor y de los resultados obtenidos se evalúa el nivel de riesgo económico (7).

En nuestro caso, la aleatoriedad en el tiempo de cruce de los vehículos nos permitirá modelar matemáticamente un flujo vehicular y, con base en esto, obtener una serie de diferentes tiempos de espera hasta que el peatón logra cruzar el Periférico. Con estos datos se halla el promedio temporal cuyo valor aportará información importante sobre las implicaciones que tiene los cambios de la densidad vehicular y de las características del peatón en este tiempo promedio. Esto permitirá hacer un análisis más detallado de la problemática y con ello tomar las decisiones más adecuadas para aminorar este tiempo de espera.

Funcionamiento del algoritmo

El algoritmo escrito en lenguaje de programación Python calcula el tiempo medio de espera que una persona necesita para cruzar el anillo vial. Este calculo considera la velocidad de paso del peatón y las ventanas de tiempo aleatorio que existe entre dos vehículos consecutivos para cada uno de los tres carriles. La idea principal del algoritmo es imitar el razonamiento del peatón a la hora de toma de decisiones para cruzar sin verse en una situación de atropellamiento. Es decir, únicamente cruzará si existe la certeza de que en cada cruce exista una ventana de tiempo que le permita cruzar el siguiente carril, en caso contrario, se mantendrá detrás de la línea de acotamiento de la carretera en espera del momento propicio.

Para hacer la situación más realista se establece que el transeúnte únicamente considerará los vehículos más próximos de cada carril, por lo que el programa generará ventanas de tiempo de acuerdo con tres funciones de densidad de probabilidad. El tiempo medio de las ventanas de cruce se determina tomado la velocidad máxima de cada carril y la distancia sugerida entre vehículos que propone el reglamento. En este

contexto los automóviles tendrán una separación temporal media de cuatro segundos. Sin embargo, los conductores de los carriles de mayor velocidad mantienen distancias menores a la sugerida por el reglamento de vialidad por lo que la separación temporal es mucho menor. Esto último trae como consecuencia una mayor frecuencia de accidentes en los carriles central y extremo izquierdo.

A continuación se mostrarán algunos resultados obtenidos con el algoritmo considerando diferentes tipos de transeúntes y algunas características del flujo vehicular. En la Figura 1 se muestra el cruce transversal que realiza un peatón de los tres carriles de la vía. Los puntos de colores representan las posiciones temporales de los vehículos en cada uno de los tres carriles, los azules para los vehículos para el carril de la derecha (o de baja velocidad), los puntos naranjas para el carril central y los puntos verdes para el carril de la izquierda. Así también mediante una línea roja punteada se muestra la posición temporal del peatón conforme va cruzando transversalmente la vía. Este cruce es perpendicular a la orilla de la carretera.

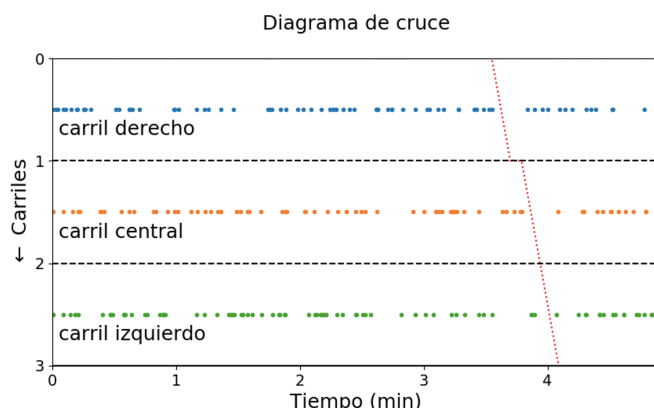


Figura 1. Línea de tiempo del cruce transversal de los tres carriles del periférico.

Para determinar el tiempo de espera promedio se realizaron mil pruebas de cruce, aunque el número de pruebas puede incrementarse los resultados no cambian significativamente. La Figura 2 muestra la distribución de tiempos de espera para una persona que cruza un carril en 9 segundos (el cual es el tiempo promedio estimado en la zona de observación). Este tipo de cruce realizado en nueve segundos será categorizado como *cruce normal*. En este caso, el tiempo medio de espera es alrededor de 23 minutos. Por otro lado, si las personas cruzan la vía

en menos tiempo, por ejemplo, seis segundos, su tiempo de espera es de solamente 2.4 minutos. Este tipo de cruce será reconocido como un *cruce rápido*, ver la Figura 3. La comparación de tiempos de espera explica el porqué algunas personas optan por cruzar corriendo la vía.

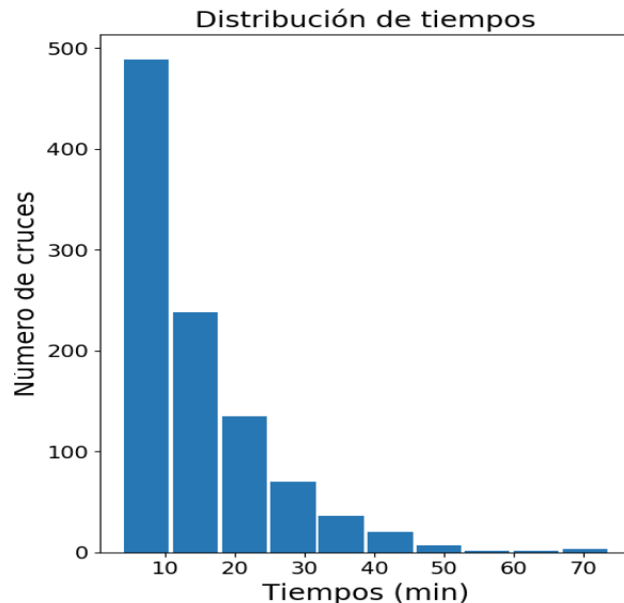


Figura 2. Distribución de tiempos con cruce normal.

Ahora se considera el caso de una persona con paso lento que podría representar a alguna persona con discapacidad motora, o quizá una persona de la tercera edad. En este caso, estas personas pueden requerir más tiempo que los nueve segundos en promedio para cruzar un carril. Para estudiar estos casos se establecieron tres tiempos de cruce: doce, quince y dieciocho segundos. Cada uno de estos cruces fueron categorizados como *cruces lentos*. Para el primer caso de doce segundos, la Figura 3 muestra los resultados de mil pruebas de cruce. Se obtuvo una media de 49.81 minutos y desviación estándar de quince minutos. En esta figura se observa que alrededor del 60% de los tiempos fueron superiores a una hora, lo cual es un tiempo bastante largo si se considera que la persona con alguna discapacidad, o de tercera edad, se encuentra esperando bajo sol o con lluvia al pie de la carretera. Además se debe recordar que esta persona necesitará un tiempo similar para cruzar el segundo circuito vial que compone al periférico de Mérida.

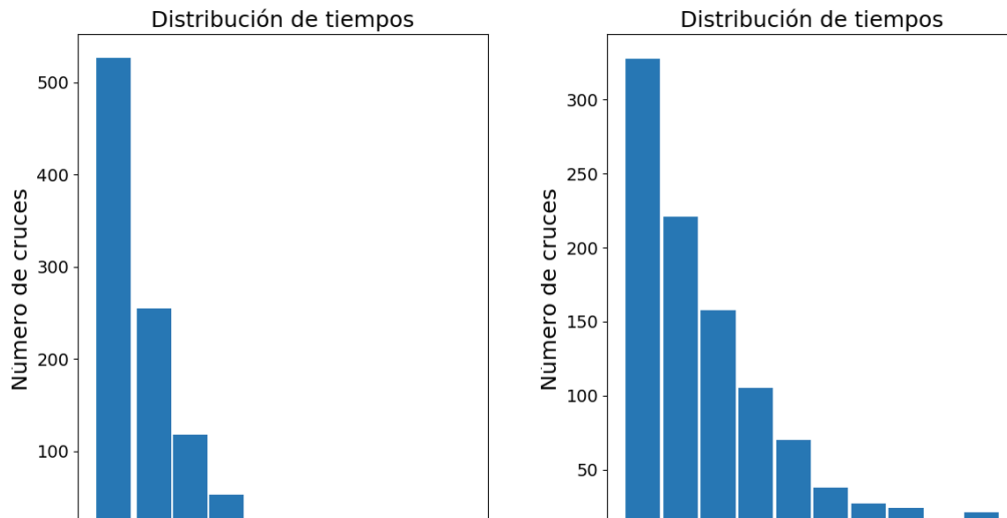


Figura 3. Distribución de tiempos con cruce rápido (izq.) y cruce lento (der.)

Para quince y dieciocho segundos de cruce la Figura 4 muestra las distribuciones de tiempo después de mil pruebas. En este caso los resultados muestran una situación crítica, ya que una persona con cierto inconveniente físico la mayoría de las veces tendría que esperar un poco más de cuatrocientos minutos (el límite de espera establecido en el programa). De nueva cuenta, esto explicaría el porqué la gente se arriesga a realizar el cruce, a pesar de que existe en muchos casos la posibilidad de un desenlace fatal.

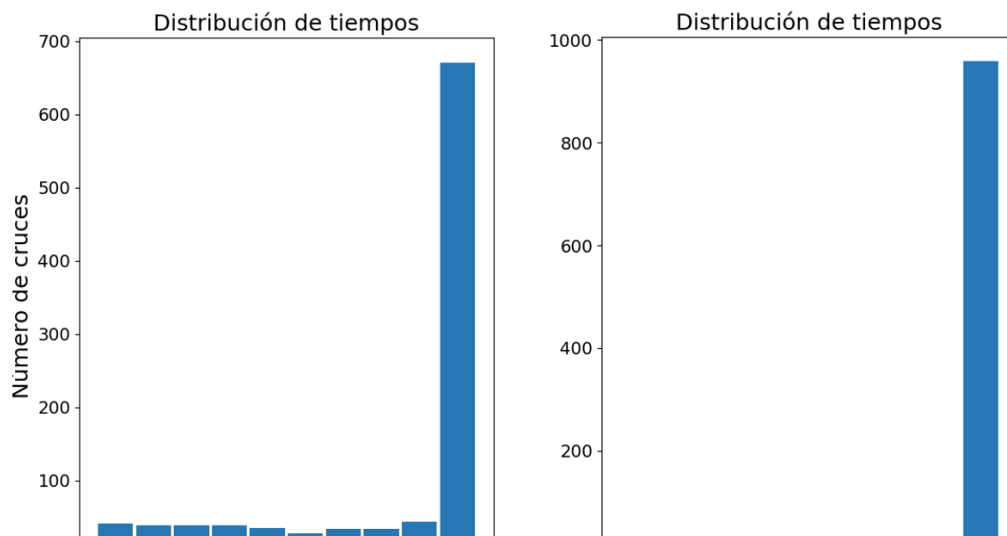


Figura 4. Distribuciones de tiempo con cruce lento, 15 segundos (izq.) y 18 segundos (der.).



Ahora se considera el caso cuando el flujo vehicular es ligeramente mayor; es decir, la separación entre vehículos es menor por lo que existe mayor tránsito, para esto, se tomó un intervalo de separación promedio de tres segundos entre dos vehículos consecutivos en el carril izquierdo. Si solamente el carril izquierdo está más congestionado que los otros dos carriles, la Figura 5 muestra una distribución de tiempos con un tiempo esperado medio de treinta y siete minutos. Comparando este valor con el tiempo medio esperado cuando existe un flujo vehicular moderado se observa que solamente un segundo de diferencia menor es suficiente para que una persona promedio necesite esperar diecisiete minutos más que lo normal. Este resultado avala la estrategia del llamado *método carrusel* que la policía de tránsito ha aplicado para reducir el número de accidentes viales y evitar con ello pérdidas humanas.

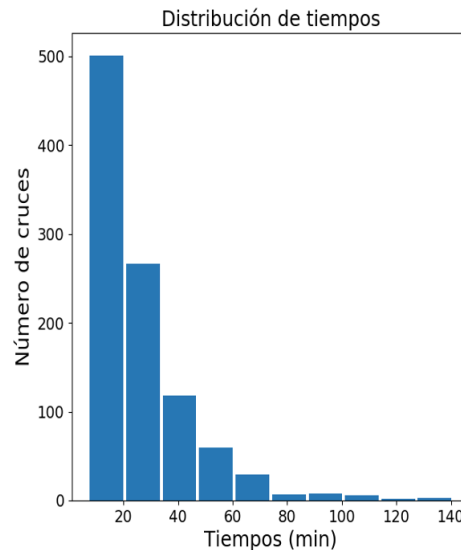


Figura 5. Distribución de tiempos con cruce normal y con el carril izquierdo congestionado.

De forma similar si existe mayor congestionamiento en el carril derecho o central los tiempos medios de espera se incrementan de forma muy similar al caso anterior siendo ligeramente mayor si el congestionamiento ocurre en el carril central. En la Figura 6 se muestra las distribuciones en cada uno de los carriles. Es decir, el tiempo de espera es similar independientemente de cuál carril esté congestionado.

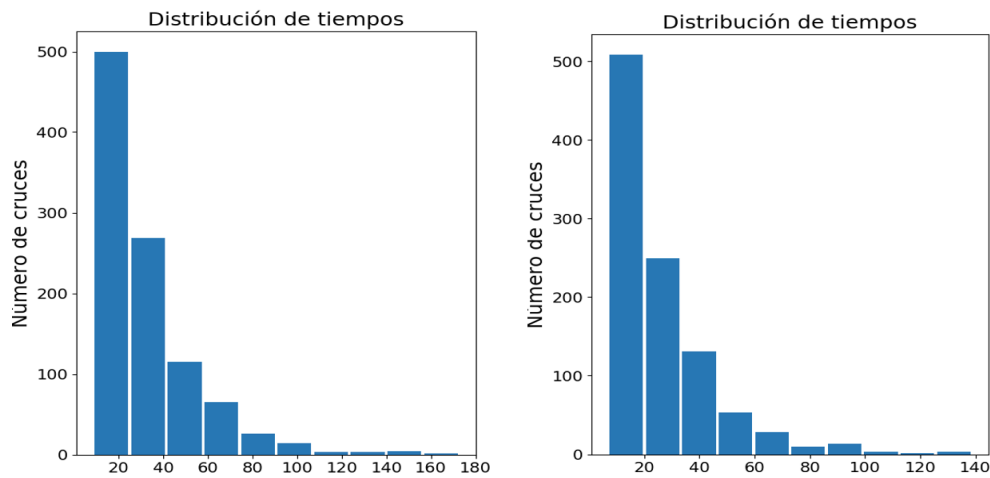


Figura 6. Distribuciones de cruce normal con congestionamiento únicamente en un carril, central (izq.) o derecho (der.).

En el caso extremo en el que los tres carriles están saturados tenemos la situación que se ilustra en la Figura 7. Aquí la media es de ciento veintinueve minutos, muy arriba en comparación con los veintitres minutos de espera durante un tránsito moderado. Por el contrario, si el tránsito vehicular disminuye a un lapso promedio de cinco segundos entre automóviles, entonces la situación mejora a un tiempo medio de solamente siete minutos. En la Figura 7 se puede observar este contraste de tiempos de espera.

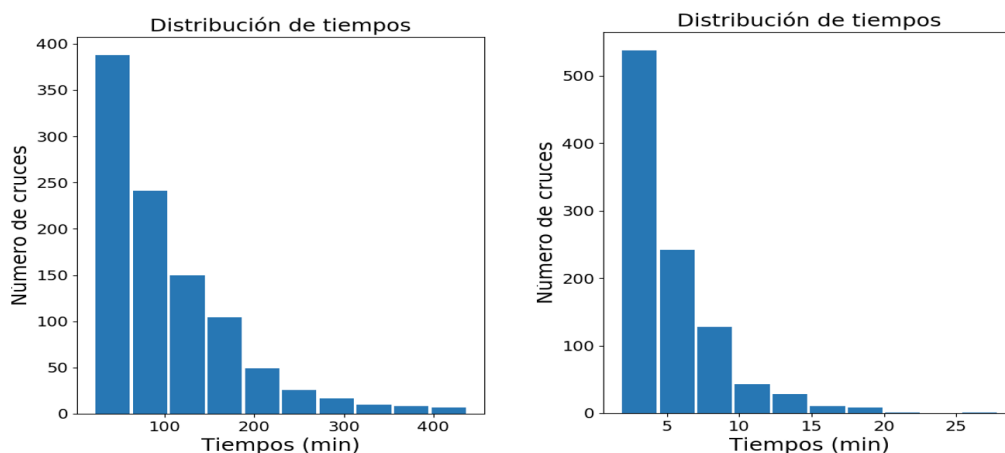


Figura 7. Distribuciones de tiempos de cruce normal con todos los carriles congestionados (izq.) o menos congestionados (der.).

Si la persona es capaz de realizar un cruce rápido de los carriles, su tiempo de espera, aún en tránsito congestionado, sería de solo nueve minutos de espera en promedio. La distribución de tiempos se muestra



en la Figura 8. Sin embargo, esta disminución del tiempo de espera incrementa su posibilidad de sufrir un atropellamiento, ya que puede resbalarse o caer al pavimento y los vehículos no tendrían suficiente distancia de frenado con los tres segundos de separación que existe entre ellos. Es por esta situación que se sugiere evitar correr al cruzar los carriles. Por el contrario, si el peatón tiene un lento andar, su tiempo de espera es casi de seis horas, que el tiempo que se puso de límite para desistir en cruzar.

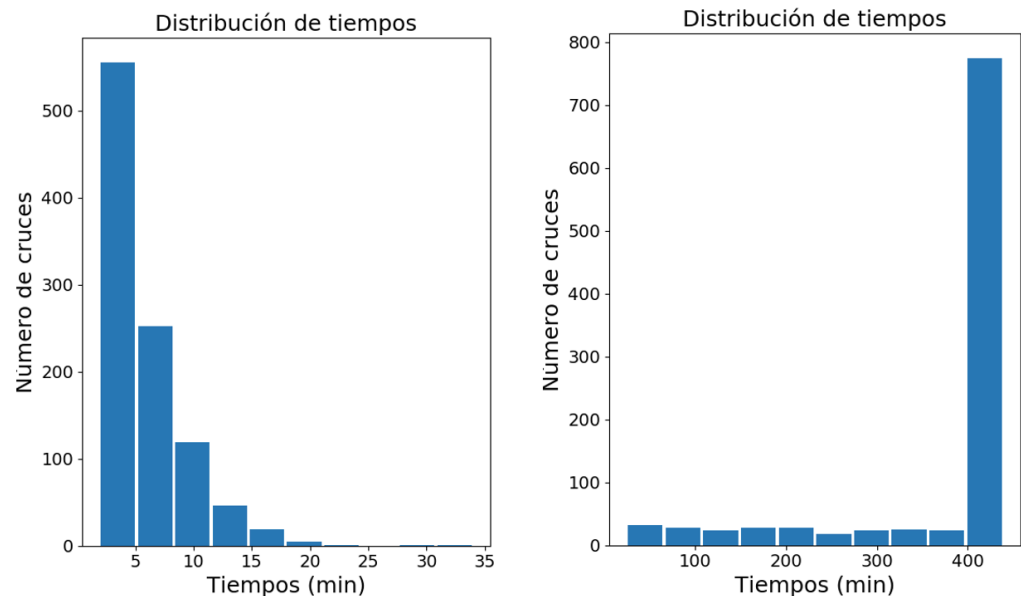


Figura 8. Distribuciones con cruce rápido (izq.) o lento (der.) y carriles congestionados.

Conclusiones

Se calcula los diferentes tiempos que los peatones esperan hasta lograr cruzar los tres carriles del periférico de Mérida. Con los resultados obtenidos se concluye que con un cruce normal y un tránsito moderado alrededor del 60% de las personas esperan aproximadamente diez minutos, y que un 80% de ellas esperan poco menos de veinte minutos. Pero si el peatón tiene paso rápido, la espera se reduce de un 80% a una espera de poco menos de dos minutos (ver Figura 2). Al realizar un cruce lento el tiempo de espera va aumentando directamente con un mayor tiempo de cruce, de estar sesgado a la izquierda a tener un sesgo

a la derecha implicando un mayor tiempo de cruce, en este caso de casi tres horas de espera. Ver Figuras 3 y Figura 4.

De los resultados de la simulación se puede observar como se incrementan los tiempos de espera de acuerdo con el congestionamiento de cada carril (ver Figuras 5 y 6) y cuando los tres carriles están igualmente congestionados. Un punto a resaltar es que existe una clara disminución de este tiempo de espera cuando los tres carriles no están congestionados y tienen menos densidad vehicular, comparar ambas gráficas de la Figura 7. Esta diferencia de flujos vehiculares se ve acrecentada cuando la persona tiene un cruce rápido (posibilidad de correr) en comparación con una persona con alguna imposibilidad de hacerlo rápido (Figura 8). Es importante mencionar que la simulación no considera que los vehículos cambian de carril, ni que cambian sus velocidades, o que existen rebases. Por lo que los resultados pueden variar con lo observado, ya que también un cruce se puede efectuar si los conductores disminuyen su velocidad o esquivan al peatón que está en el proceso de cruce. Otro aspecto que es necesario contemplar es hacer una recopilación más exhaustiva de mayor número de puntos de cruce, a diferentes horas y días de la semana. Por lo que este trabajo es una aproximación a una problemática compleja que actualmente afecta a la ciudad de Mérida.



Referencias

- [1] S/N. 2021. Yucatán con más autos, más tránsito y nula educación vial. Informatyucatan, 28 de diciembre, sección Local. Disponible en <https://informatyucatan.com/yucatan-con-mas-autos-mas-transito-y-nula-educacion-vial/>
- [2] S/N. 2022. En 20 años, el parque vehicular de Yucatán aumentó un 400%. Yucatán Ahora, 7 de enero, sección Mérida. Disponible en <https://yucatanahora.mx/en-20-anos-el-parque-vehicular-de-yucatan-aumento-un-400/>
- [3] Casares Cámara, Hernán. 2023. Falta de transporte público causa aumento de vehiculos particulares en Mérida. Diario de Yucatán, 6 de abril, sección Mérida. Disponible en <https://www.yucatan.com.mx/merida/2023/04/06/falta-de-transporte-publico-causa-aumento-de-vehiculos-particulares-en-merida-396382.html>
- [4] S/N. 2023. Periférico de Mérida, en el top de las vías más peligrosas. Sol-Yucatán, 10 de mayo, sección Locales. Disponible en <https://solyucatan.mx/periferico-de-merida-en-el-top-de-las-vias-mas-peligrosas/>
- [5] S/N. 2021. Periférico de Mérida, obsoleto y mortal. Peninsular Punto medio. 1 de agosto, sección Local. Disponible en <https://puntomedio.mx/periferico-de-merida-obsoleto-y-mortal/>
- [6] S/N. 2020. Implementan el operativo carrusel para reducir accidentes en el Periférico de Mérida. Novedades Yucatán, 9 de marzo, sección Mérida. Disponible en <https://sipse.com/novedades-yucatan/asi-funciona-operativo-carrusel-accidentes-merida-periferico-358381.html>
- [7] Escalante Euán, Jesús Francisco. 2019. Valoración del riesgo en un modelo multinivel de suministro. Tesis doctoral, UPC, Departament d'Estadística i Investigació Operativa. DOI 10.5821/dissertation-2117-173277. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/173277>