

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**“EVALUACIÓN MACROSCÓPICA DEL DESPLAZAMIENTO
PEATONAL EN LA AV. DINTILHAC A PARTIR DE UN
ESTUDIO MICROSCÓPICO”**

Tesis para obtener el Título de Ingeniera Civil, que presenta el bachiller:

RAISSA CHIRSTYN ZUÑIGA BAUTISTA

Asesor: Ing. Félix Israel Cabrera Vega

Lima, Octubre del 2016

RESUMEN

El estudio del desplazamiento peatonal ha sido un tema de interés para varios investigadores. A pesar de que numerosas investigaciones se han realizado para grupos peatonales con propósito de viaje obligatorio, son escasas las ocasiones en donde el objeto de estudio son universitarios con propósitos de viaje recreacionales. Es por tal motivo que en la presente investigación se realiza un estudio macroscópico del transporte peatonal en una vía principal dentro del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú, denominada Av. Dintilhac, la cuales es exclusiva para viandantes que en su mayoría jóvenes universitarios.

Para tal finalidad, se recolecta información macroscópica del desplazamiento peatonal en tramos representativos de esta avenida y también las características físicas del entorno, mediante técnicas manuales y filmaciones, para luego poder construir un modelo para la micro simulación de la red peatonal en el programa Viswalk 8.0. Posteriormente a realizar la calibración, la validación y las simulaciones necesarias para rescatar información macroscópica (principalmente las velocidades y densidades peatonales) y así obtener, luego de análisis estadísticos de los resultados con niveles de confianza adecuados, la gráfica del diagrama fundamental y su respectiva fórmula. De este modo, se derivan diversas gráficas y fórmulas que permiten el análisis del desplazamiento peatonal en la Av. Dintilhac.

Se finaliza la investigación con comparaciones con estudios previos a diferentes tipos de peatones, con la conclusión de que nuestro modelo se asemejaría en gran medida a estos modelos planteados con anterioridad, pero debido a la diferencia en la naturaleza del uso de la Av. Dintilhac (más social y de recreación que para viajes obligatorios), para una misma velocidad, las densidades serían menores. Además, se realiza la calificación de la calidad del desplazamiento mediante el uso de los niveles de servicio sugeridos por la H.C.M. (2000), en la cual se determinó que el nivel de desempeño de la Av. Dintilhac es aceptable, ya que, en espacios de tiempo de 10 minutos sería E, y en un intervalo de 30 minutos sería B. Por último, se proporcionan sugerencias para la modificación de la infraestructura de la avenida a partir de las gráficas ya obtenidas y en las cuales la densidad peatonal es uno de los ejes.

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA



PUCP

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Evaluación macroscópica del desplazamiento peatonal en la Av. Dintilhac a partir de un estudio microscópico".
 Área : Movilidad y Transporte - Investigación
 Asesor : Ing. Felix Israel Cabrera Vega
 Alumno : RAISSA CHRISTYN ZUÑIGA BAUTISTA
 Código : 2010.0246.412
 Tema N° : # 54
 Fecha : Lima, 12 de setiembre del 2016



INTRODUCCIÓN

El diseño de la infraestructura peatonal se asocia comúnmente a las variables macroscópicas de densidad, flujo y velocidad. Asimismo, el propósito de viaje, el clima y los tipos de peatones que se desplazan son factores que deben considerarse. Existen diversos estudios que consideran un propósito de viaje obligatorio (Ej. ir al trabajo), pero son reducidos los casos donde los peatones son jóvenes universitarios que se desplazan con fines de paseo.

Por lo mencionado anteriormente, se evalúa microscópicamente el desplazamiento peatonal en la Av. Dintilhac (PUCP), durante los jueves culturales, con la finalidad de obtener expresiones macroscópicas que representen las principales características del desplazamiento. Con esto sería posible plantear futuras modificaciones en el diseño y gestionar el funcionamiento de la Av. Dintilhac.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar las características de los desplazamientos peatonales en la Av. Dintilhac en la Pontificia Universidad Católica del Perú para determinar un modelo macroscópico.

Objetivos específicos

Determinar las relaciones macroscópicas del desplazamiento peatonal en la Av. Dintilhac, a partir de la micro simulación realizada con el software VISWALK 8.0. Además, comparar el modelo macroscópico obtenido para la Av. Dintilhac con los obtenidos en otros estudios. Finalmente, determinar si el flujo peatonal que circula regularmente por la Av. Dintilhac requiere de un mayor ancho de vía.

yu

HIPÓTESIS

El desplazamiento peatonal genérico de la Av. Dintilhac se asemeja al de los fluidos en movimiento y es posible representarlo a partir de un análisis microscópico. Además, el modelo macroscópico obtenido predice menores valores de capacidad en comparación a los casos donde el propósito de desplazamiento es diferente. Finalmente, la demanda

FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍA

PUCP

peatonal se acerca a la capacidad de la vía durante periodos de tiempo menores a los 15 minutos.

PROGRAMA DE TRABAJO

El desarrollo de la tesis considerará los siguientes temas:

- a) Planteamiento del problema, objetivos e hipótesis de la investigación
- b) Revisión de la literatura - marco teórico: características del desplazamiento peatonal, espacio público y desplazamiento peatonal, modelos peatonales, comparación de software microscópicos.
- c) Metodología de la investigación.
- d) Resultados.
- e) Conclusiones y recomendaciones.

METODOLOGÍA

La recolección y análisis de la información se desarrollará en 6 etapas: la recolección de los datos de campo mediante técnicas manuales y filmaciones; la extracción de la información de los videos en forma manual; la construcción de la red en VISWALK 8; la calibración y validación del modelo mediante pruebas no paramétricas y un nivel de confianza del 95%; las corridas del modelo con los diferentes valores de los parámetros del modelo de la fuerza social y el análisis estadístico de los resultados.

REVISIONES

Primera Revisión:

- Objetivo general y objetivos específicos.
- Hipótesis de la investigación.
- Marco teórico (revisión de la literatura).

Segunda Revisión

- Metodología del trabajo.
- Recolección de datos de campo.

Tercera Revisión:

- Procesamiento y análisis de la información de campo.
- Conclusiones y recomendaciones.

NOTA
Extensión máxima: 100 páginas.




VB°
Dr. Rafael Aguilar
Director de Investigación

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE ECUACIONES.....	vi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Objetivos de la investigación.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivo específico.....	3
1.3. Hipótesis del proyecto.....	3
1.4. Alcances y limitaciones de la investigación.....	3
1.5. Procedimiento de la investigación.....	3
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	5
2.1. Características del desplazamiento peatonal.....	5
2.1.1. El peatón.....	5
2.1.2. Velocidades de desplazamiento.....	8
2.2. Espacio público y desplazamiento peatonal.....	10
2.2.1. Niveles de servicio.....	13
2.2.2. La importancia del peatón en la movilidad.....	15
2.3. Modelos peatonales.....	17
2.3.1. Modelos macroscópicos.....	19
2.3.2. Modelos microscópicos.....	24
2.3.3. Modelos híbridos.....	34
2.4. Comparación de softwares basados en entorno microscópico.....	34
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	38
3.1. Consideraciones del caso de estudio: Av. Dintilhac.....	39
3.1.1. Definición de los límites del proyecto.....	40
3.1.2. Definición del periodo de tiempo.....	41
3.1.3. Inspección visual.....	41

3.2. Recolección de datos para el estudio del tráfico peatonal en la Av. Dintilhac.....	42
3.3. Simulación de la zona en estudio en Viswalk 8.0.....	43
CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN VISWALK 8.0.....	47
4.1. Datos de entrada para la micro-simulación.....	47
4.2. Construcción del modelo para la micro-simulación.....	54
4.3. Calibración y validación.....	55
4.4. Generación del modelo macroscópico a partir de la micro-simulación...	60
CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....	64
5.1. Diagrama fundamental en la Av. Dintilhac y ajustes de tendencia.....	65
5.2. Descripción del flujo peatonal en la Av. Dintilhac.....	67
5.3. Comparación del flujo peatonal en la Av. Dintilhac con estudios peatonales previos.....	72
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elipse corporal, dimensiones recomendadas para un peatón. Recuperado de Rouphail. et. al. (1998).....	5
Figura 2. Burbujas espaciales. Recuperado de Georgia Department of Transportation (2003).....	6
Figura 3. Distribución normal de las velocidades peatonales en una estación de tren. Fuente: Davidech et. al. (2013).....	9
Figura 4. Ejemplos de diagramas fundamentales extraídos de diversos experimentos. Fuente: Curtis et. al. (2014).....	9
Figura 5. Representación de la frecuencia de los tipos de actividades de acuerdo a la calidad del espacio público. Fuente: Gehl (2011)	12
Figura 6. Programa de los 10 pasos. Adaptado de Newurbanism.org (2015).....	16
Figura 7. Tipos de grillas. Fuente: Nietzsche (2013).....	27
Figura 8. Representación gráfica de la fuerza de manejo. Adaptado de Zeng (2014)	28
Figura 9. Metodología para el estudio de peatones. Adaptado de Teknomo (2002)..	38
Figura 10. Ubicación de la Av. Dintilhac (Tontódromo PUCP). Fuente: Google Earth (2016).....	39
Figura 11. Desplazamiento peatonal en la Av. Dintilhac. Fuente: Propia (2016).....	40
Figura 12. Definición de los límites del proyecto. Fuente: Propia (2016).....	41
Figura 13. Metodología para la simulación. Fuente: Propia.....	44
Figura 14. Proporciones de giro provenientes de la Biblioteca Central y del Centro de Innovación Académica. Fuente: Propia.....	49
Figura 15. Proporciones de giro provenientes de C.A.P.U. y de la Tesorería General. Fuente: Propia.....	50
Figura 16. Proporciones de giro provenientes de la Cafetería Central. Fuente: Propia.....	50
Figura 17. Geometría de la Av. Dintilhac. Fuente: Propia.....	51
Figura 18. Distribución de velocidades peatonales del en sección A. Fuente: Propia.....	53
Figura 19. Distribución de velocidades peatonales en Sección B. Fuente: Propia....	54
Figura 20. Implementación de geometría, rutas estáticas y flujos peatonales. Fuente: Propia.....	55

Figura 21. Definición de Sección A en el modelo. Fuente: Propia.....	56
Figura 22. Simulación del modelo. Fuente: Propia.....	56
Figura 23. Gráfica del intervalo de confianza de la diferencia de medias para la calibración. Fuente: Propia.....	58
Figura 24. Definición de la sección B e ingreso de nuevos flujos peatonales para la segunda simulación. Fuente: Propia.....	59
Figura 25. Gráfica del intervalo de confianza de la diferencia de medias para la validación. Fuente: Propia.....	60
Figura 26. Diagrama fundamental de la Av. Dintilhac. Fuente: Propia.....	65
Figura 27. Diagrama fundamental con línea de tendencia lineal. Fuente: Propia.....	66
Figura 28. Gráfica del flujo peatonal vs. densidad en la Av. Dintilhac. Fuente: Propia.....	69
Figura 29. Gráfica de velocidad vs. flujo en la Av. Dintilhac. Fuente: Propia.....	70
Figura 30. Gráfica del flujo peatonal vs. módulo de área en la Av. Dintilhac. Fuente: Propia.....	71
Figura 31. Gráfica de la velocidad vs. módulo de área. Fuente: Propia.....	71
Figura 32. Comparación entre estudios previos y el actual. Fuente: Propia.....	72
Figura 33. Líneas de tendencia para la relación velocidad vs. densidad. Fuente: Kretz et. al. (2015).....	73
Figura 34. Teoría establecida de la relación velocidad vs. densidad. Adaptado de Pushkarev y Zupan (1975).....	74
Figura 35. Teoría establecida de la relación velocidad vs. flujo peatonal. Adaptado de Pushkarev y Zupan (1975).....	75
Figura 36. Teoría establecida para la relación velocidad vs. módulo de área. Adaptado de Pushkarev y Zupan (1975).....	75
Figura 37. Relación gráfica de flujo peatonal vs. módulo de área. Adaptado de Fruin (1971).....	76
Figura 38. Superposición de los niveles de servicio sugeridos por la HCM (2014) Fuente: Propia.....	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de peatón. Adaptado de Agencia de Transporte de Nueva Zelanda (2009).....	7
Tabla 2. Criterios para los niveles de servicio en vía peatonal. Adaptado de TRB (2003).....	14
Tabla 3. Comparación entre las características para la construcción del modelo. Adaptado de Alexandersson et. al. (2013).....	35
Tabla 4. Comparación entre las observaciones del comportamiento del peatón. Adaptado de Alexandersson et. al. (2013).....	36
Tabla 5. Comparación entre los rendimientos del programa. Adaptado de Alexandersson et. al. (2013).....	37
Tabla 6. Volumen peatonal en el sentido Complejo de Innovación Académica hacia la Biblioteca Central en la sección A. Fuente: Propia.....	47
Tabla 7. Volumen peatonal en el sentido Biblioteca Central hacia complejo de Innovación Académica en la sección A. Fuente: Propia.....	48
Tabla 8. Volumen peatonal de diferentes rutas en la Av. Dintilhac en la sección B. Fuente: Propia.....	48
Tabla 9. Flujos peatonales por ruta en la Av. Dintilhac en la sección B. Fuente: Propia.....	48
Tabla 10. Velocidades peatonales en la Sección A de la Av. Dintilhac. Fuente: Propia.....	52
Tabla 11. Velocidades peatonales en la Sección B de la Av. Dintilhac. Fuente: Propia.....	53
Tabla 12. Velocidades promedio de la Sección A obtenidas de la primera simulación. Fuente: Propia.....	57
Tabla 13. Velocidades peatonales en la sección B resultantes de la segunda simulación. Fuente: Propia.....	59
Tabla 14. Flujos para la simulación. Fuente: Propia.....	61
Tabla 15. Flujos para la simulación. Fuente: Propia.....	61
Tabla 16. Flujos para la simulación. Fuente: Propia.....	62
Tabla 17. Flujos para la simulación. Fuente: Propia.....	62

Tabla 18. Flujos para la simulación. Fuente: Propia.....	63
Tabla 19. Flujos para la simulación. Fuente: Propia.....	63
Tabla 20. Resultados de densidad y velocidad para los diferentes flujos.....	64
Tabla 21. Coeficientes de determinación para diferentes líneas de tendencia. Fuente: Propia.....	66

LISTA DE ECUACIONES

(1) Ecuación de velocidad.....	19
(2) Ecuación de densidad.....	19
(3) Primera ecuación del flujo peatonal.....	20
(4) Segunda ecuación del flujo peatonal.....	20
(5) Ecuación del módulo de área.....	20
(6) Ecuación de conservación de masa.....	22
(7) Ecuación de intención de desplazamiento de la población A.....	22
(8) Ecuación de la velocidad promedio de la población A.....	22
(9) Ecuación de la velocidad en función a la densidad para un flujo unidireccional	23
(10) Ecuación de la fuerza de manejo en el modelo de fuerzas sociales.....	28
(11) Ecuación de la fuerza social/peatón en el modelo de fuerzas sociales.....	29
(12) Ecuación de la fuerza granular en el modelo de fuerzas sociales.....	29
(13) Ecuación de la dirección tangencial de partícula α a la partícula β	29
(14) Ecuación final para la motivación del peatón en el modelo de fuerzas sociales.	30
(15) Ecuación de la velocidad en la Av. Dintilhac.....	67
(16) Ecuación del flujo peatonal en la Av. Dintilhac en función a la densidad.....	67
(17) Ecuación del flujo peatonal en la Av. Dintilhac en función al módulo de área.....	67
(18) Ecuación de la velocidad en la ciudad de Bangkok.....	76
(19) Ecuación del flujo peatonal en la ciudad de Bangkok.....	76

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Caminar no es solo considerado un medio más de transporte, el rol de esta actividad va más allá de esto. Además de su fin utilitario, se le puede considerar potencialmente como una actividad recreacional y, mayormente, se le debe considerar también como una actividad social (Silva, 2012). Mientras se camina, se dispone de tiempo y distancias cortas, lo cual posibilita a los sentidos el observar objetos, detalles y a las demás personas (Gehl, 2001). Esta actividad se desarrolla en entornos peatonales, ya sean públicos o privados, y son reservados al tránsito de personas a pie. La importancia del espacio público radica en que fue concebido desde un inicio como el espacio en donde se desarrolla la expresión, y es apropiada por la sociedad que hace uso de ésta, para reflejar el carácter y la identidad de la comunidad. Además, esta área es considerada de naturaleza multidimensional, por lo que se debe tomar en cuenta los siguientes ámbitos: social, físico-territorial, cultural, político y económico. La configuración físico-territorial de estos espacios es la que permite que las dimensiones antes mencionadas se puedan relacionar, desarrollar y adaptarse a las dinámicas de los que se encuentran presentes.

En este contexto, la Pontificia Universidad Católica del Perú es una comunidad académica conformada por maestros, alumnos, graduados, personal de servicio y visitantes que diariamente recibe en su campus ubicado en el distrito de San Miguel. En sus inmediaciones recibe un gran flujo vehicular y peatonal, ocasionando tráfico tanto vehiculares como peatonales. La Av. Dintilhac (la cual atraviesa longitudinalmente el campus universitario) constituye la principal vía peatonal de la universidad y su uso presenta la naturaleza multidimensional descrita anteriormente. A causa de los diversos usos que presenta, esta área recibe un intenso tráfico de personas y, en horas punta, da la impresión que el volumen de peatones parece haber superado el ancho actual de la vía. Estos hechos pueden llegar a generar aglomeraciones no deseadas, influyendo directamente en la calidad de desplazamiento del público usuario de dicha universidad.

1.1. Planteamiento del problema

La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), considerada una de las más importantes universidades de nuestro país, se encuentra ubicada en el distrito de San Miguel, a tres cuadras de la Av. La Marina y el Centro Comercial Plaza San Miguel, limitada por la Av. Universitaria y la Av. Riva Agüero, así como por las Calles Los Tulipanes y Urubamba. La PUCP cuenta con más de 20 mil alumnos, soportando diariamente en sus instalaciones un intenso tráfico peatonal y vehicular. Dentro de los numerosos accesos que se encuentran en el recinto, la Av. Dintilhac constituye la principal vía peatonal y es la predilecta de la mayoría de usuarios.

Existen una serie de factores que influyen en el correcto desempeño académico de una institución educativa, entre ellos: el factor tiempo. El intenso tráfico de personas que soporta esta senda y los diversos usos que presenta, pueden llegar a generar congestión que influye en el libre desplazamiento. La optimización de los procesos mediante la eliminación de “tiempos muertos”, que son productos de actividades que no corresponden al entorno y que ocasionan el retraso del cumplimiento de los objetivos que posee cada usuario (alumnos, profesores y visitantes del campus), permitirá agilizar el dinamismo del flujo de los procesos, disminuyendo de esta forma las tardanzas.

Si se toman en cuenta las razones mencionadas anteriormente, es necesario evaluar de manera macroscópica el desempeño peatonal en la Av. Dintilhac, mediante el uso de modelos macroscópicos y la observación de sus características más destacables para poder posteriormente tomar las medidas necesarias para cumplir con los requerimientos de desplazamiento de los usuarios.

Si se desea evaluar macroscópicamente el desplazamiento de los peatones, es preciso antes recalcar que los modelos macroscópicos han sido empleados continuamente en el análisis del tráfico vehicular y que los criterios que considera han sido aplicados sin mayores variaciones en el ámbito peatonal. Como es de esperarse, escasos estudios han sido realizados para comprobar la veracidad de tales criterios e inclusive el modelamiento del tránsito de peatones no ha sido considerado a lo largo de los años como un tema central de investigación.

Por tal motivo, el estudio del tráfico dirigido exclusivamente a los peatones y su posterior modelamiento, representan temas de gran valor en la actualidad, en especial tras haberse re direccionado de manera correcta, los intereses del diseño del espacio urbano para devolver la ciudad al peatón.

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Evaluar las características de los desplazamientos peatonales en la Av. Dintilhac en la PUCP para determinar un modelo macroscópico.

1.2.2. Objetivos específicos

El objetivo general será logrado al cumplir objetivos específicos, como lo es el representar ciertas características microscópicas, que tengan influencia en el desplazamiento peatonal macroscópico de la Av. Dintilhac, en un modelo que se simulará en el software VISWALK 8.0. A partir de la simulación realizada, se deberá establecer una relación entre las principales características macroscópicas de la vía en estudio. Además, es preciso comparar el modelo macroscópico propio de la Av. Dintilhac con modelos propuestos por otros autores, para poder evaluar el desempeño de la Av. Dintilhac. Finalmente, se deberá determinar si la infraestructura es favorable para el desplazamiento óptimo de los peatones que lo utilizan.

1.3. Hipótesis del proyecto

Las hipótesis en las que se basará la presente investigación es, en primer lugar, que el desplazamiento peatonal de la Av. Dintilhac se asemeja a los modelos fluidos dinámicos. En segundo lugar, se asume que es posible representar el desplazamiento peatonal de manera macroscópica a partir de un análisis microscópico de los peatones. Por último, se considera que las características cualitativas (como las actividades sociales) son determinantes para la descripción del flujo peatonal.

1.4. Alcances y limitaciones de la investigación

El estudio se circunscribirá a investigar el movimiento peatonal en la Av. Dintilhac, durante el semestre regular de clases. Cubrirá únicamente el periodo regular mañana-tarde, durante las horas que la universidad permite el ingreso de alumnos, profesores, personal administrativo y visitantes. Además, no se tomará en cuenta el efecto del tráfico vehicular en las vías aledañas. Finalmente, la recolección de información se realizará mediante drones y conteos manuales.



CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Características del desplazamiento peatonal

2.1.1. El peatón

Se denomina peatón a la persona que utiliza un área de la vía para desplazarse, sin hacer uso de algún vehículo, ya sea motorizado o no. La importancia del acercamiento al peatón surge debido a que es una componente fundamental en el tránsito y uno de los elementos más vulnerables en un contexto vial.

En el estudio de tráfico, ya sea peatonal o vehicular, los peatones juegan un papel muy importante, ya que se toman en cuenta las distintas trayectorias que pueden seguir estos y las características de desplazamiento que puedan influenciar en el estudio que se está realizando.

2.1.1.1. Dimensiones

Los manuales de diseño indican que el espacio peatonal está basado en las dimensiones del cuerpo, simplificado mediante una elipse de 50 cm x 60 cm., con lo cual abarca un área total de 0.3 m². Además, se recomienda considerar una zona buffer de 0.8 m² cuando el viandante se desplaza.

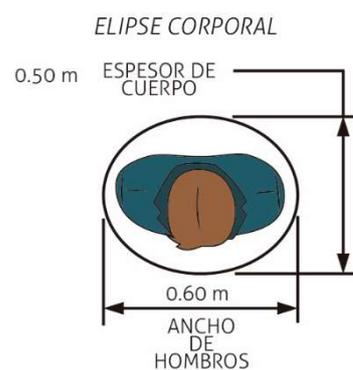


Figura 1. Elipse corporal, dimensiones recomendadas para un peatón. Adaptado de Rouphail et. al. (1998)

Así mismo, es importante tomar en cuenta las dimensiones para una persona que se desplaza en silla de ruedas en una vía libre, la dimensión recomendadas por la Agencia de Transportes de Nueva Zelanda (NZTA, 2009) es de 1.2 m de ancho. Sin embargo,

se debe considerar un círculo de 1.60 m de diámetro para poder realizar las maniobras necesarias por el usuario.

De la misma forma, en el mismo documento se menciona que para que un peatón a pie y un ciudadano en silla de ruedas puedan sobrepasarse, es necesario un ancho de acera libre mínimo de 1.5 m. En cuanto a dos peatones en silla de ruedas, el ancho de acera requerido es de 1.8 m.

En áreas de alto tráfico peatonal donde varias líneas de peatones se forman, el Departamento de Transportes de Georgia (GDOT) (2003) ha podido describir luego de amplios estudios que, en promedio, dos personas a pie que caminan uno junto a otro, usan un promedio de 1.4 m. para desplazarse. De la misma forma, tres personas requieren 2.6 m. y, 4 personas, 3.9 m como mínimo. Estas distancias incluyen áreas buffer adecuadas entre cada peatón.

En el mismo manual, se menciona que existen distancias visuales preferidas sin obstrucción que garantizan el confort del peatón en diferentes situaciones, ya sea atendiendo un evento público, de compras, caminando bajo circunstancias normales y caminando por placer. A esto lo llaman burbujas espaciales.

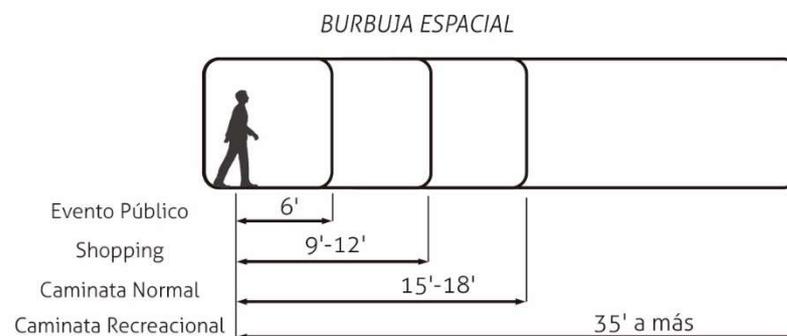


Figura 2. Burbujas Espaciales. Adaptado de Georgia Department of Transportation (2003)

2.1.1.2. Tipos de peatón:

La clasificación de los peatones de acuerdo a sus habilidades es de gran ayuda para poder considerar las repercusiones de las características de sus desplazamientos particulares en el desplazamiento del grupo, así como también para tener en cuenta los requerimientos de cada uno para su óptimo desplazamiento. Existen para ello diversas maneras de realizar esta categorización.

Por un lado, la NZTA (2009) ha clasificado a los peatones de acuerdo a sus características de movilidad, de la siguiente manera:

Tabla 1. Tipos de Peatón. Adaptado de Agencia de Transporte de Nueva Zelanda (2009)

<i>Tipo de Peatón</i>	<i>Sub-grupo</i>
A pie	Peatón sin restricciones de movilidad Corredor/trotador Peatón adulto Peatón joven Peatón minusválido Peatón mayor de edad Peatón con perro guía Peatón con discapacidades sensoriales Peatón con bastón
Sobre ruedas	Peatón con patines en línea Peatón con patines de cuatro ruedas Peatón sobre patinetas Peatón sobre scooter Peatón con coches de bebés
Movilidad limitada	Peatón sobre scooter para minusválidos Peatón sobre silla de ruedas manual Peatón sobre silla de ruedas eléctrico Peatón con andador

Por otro lado, el Departamento de Transportes del Reino Unido. (2012) ha designado una clasificación para los tipos de peatones de acuerdo la siguiente clasificación para los tipos de peatones. Por ejemplo, el peatón “commuter” prefiere una ruta directa y rápida sin importar la calidad del ambiente en el que se desplaza. En cambio, el “comprador o caminante por placer”, se interesa también en los accesos fáciles, pero en ambientes atractivos para comprar y rutas agradables. El peatón clasificado como “persona minusválida” requiere accesos fáciles y bien definidos, con especial cuidado en la ubicación del mobiliario y decoraciones en el exterior. La satisfacción de sus necesidades satisfará también los requerimientos de los demás peatones, especialmente los de las personas de la tercera edad, niños pequeños, personas con compras pesadas, etc. Por último, el “niño” requiere una alta segregación de las vías motorizadas y otras medidas para reducir la dominancia de los vehículos.

2.1.2. Velocidades de desplazamiento

Las velocidades con las que se desplazan los peatones se ven directamente afectadas por factores microscópicos. Tal es el caso de los factores propios del peatón, como la edad, género y condición física. Además, influyen características del viaje realizado por el peatón, como el propósito por el cual es realizado, la familiaridad con la ruta por la que se desplaza, la distancia del viaje (usualmente, el peatón acepta 300 metros como distancia máxima de desplazamiento sin el uso de otro medio de transporte) y las cargas que transporta. También se toma en cuenta las características de la ruta, como el ancho, la gradiente, la superficie, el atractivo del entorno, los resguardos presentes a lo largo de la ruta, las densidades peatonales y las demoras presentadas en los cruces. Por último, se puede incluir factores referentes a la influencia de las características del medio ambiente, como el clima.

La mayoría de personas, según la NZTA (2009), se desplazará a velocidades entre 0.8 y 1.8 m/s. Una persona adulta saludable se desplazará aproximadamente a velocidades de 1.5 m/s. Según Rastogi, et. al. (2010) los peatones que van mirando escaparates lo hacen a una velocidad de 1 m/s y los peatones en un área educacional se desplazan a aproximadamente 1.42 m/s.

En estudios previos de Lv et. al. (2013), se describe el comportamiento peatonal dentro de un pasaje mediante la relación entre la velocidad y el avance. Si se comparan con vehículos, se determina que el movimiento del peatón resulta ser más libre y flexible, siendo además menos complejo. Sin embargo, el movimiento del peatón y de un vehículo son similares en forma unidimensional. Por ejemplo, en un pasillo, donde puede ser comparado a un solo carril para el automóvil y la velocidad de ambos se ve afectada en función a la velocidad del sujeto que va adelante.

Otros factores que, como se indicó con anterioridad, influyen en el desplazamiento, son la distancia y la expectativa. Por ejemplo, algunos peatones prefieren seguir a otros en lugar de seguir su propio camino, por lo que se puede considerar el seguimiento de peatones como el comportamiento básico de movimiento peatonal. Además, cabe recalcar que Davidich et. al. (2013) mencionan que la velocidad de un flujo peatonal se encuentra distribuida en forma normal, tal como se comprueba en su investigación realizada en una estación de tren, comprobándose además las velocidades promedio antes mencionadas.

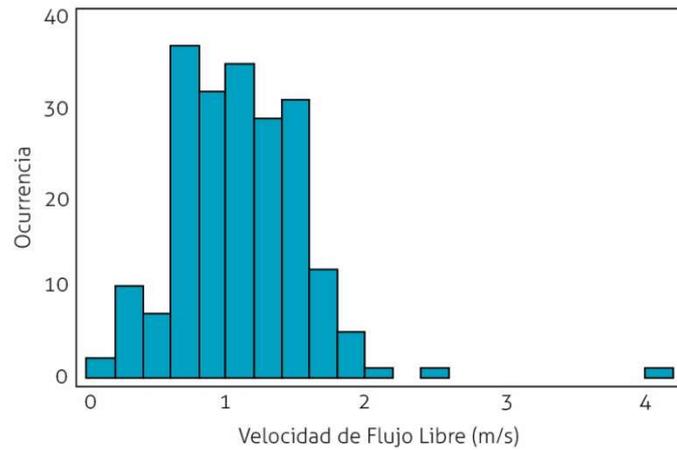


Figura 3. Distribución normal de las velocidades peatonales en una estación de tren. Fuente: Davidech et. al. (2013)

Por otro lado, la velocidad también se ve altamente influenciada por las densidades que se presentan en el entorno. A los diagramas resultantes de esta relación se les denomina comúnmente “diagramas fundamentales”. Producto de diversos experimentos, Curtis et. al. (2014) presenta claramente la dependencia entre la velocidad y la densidad, comparando los resultados de diversos autores que investigaron el fenómeno con anterioridad. Entre los más destacables se encuentran los estudios de Weidmann (1993) y Helbing et.al. (2007).

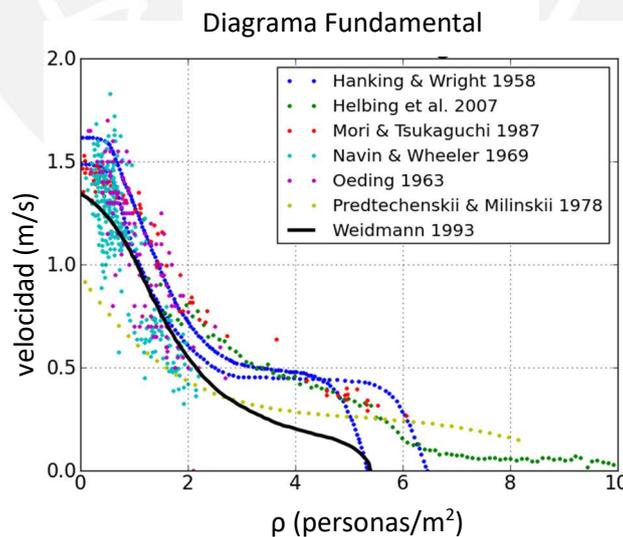


Figura 4. Ejemplos de diagramas fundamentales extraídos de diversos experimentos. Fuente: Curtis et. al. (2014)

2.2 Espacio público y desplazamiento peatonal

El desplazamiento peatonal se realiza en las vías de tránsito público, facilitando ámbitos de autodeterminación de la persona o el ejercicio de derechos fundamentales (trabajo, salud, alimentación, descanso, etc.) y que, como tales, constituyen un elemento instrumental sumamente importante, el cual obedece a la satisfacción plena a la realización de una diversidad de objetivos particulares. Sin embargo, siendo las vías de tránsito público libres en su alcance y utilidad, puede ser, en determinadas circunstancias, objeto de regulaciones y de restricciones.

De acuerdo a ello, Therakomen (2001) afirma que la configuración física del espacio urbano y la atracción influyen en el comportamiento espacial de los peatones. El espacio urbano no comprende solamente elementos físicos como construcciones, calles, plazas, cuadras, árboles, etc., sino además a las personas moviéndose y actuando dentro de ellos. En ese sentido, cualquier elemento, por más sencillo que sea, puede significar infinidad de posibilidades, dependiendo de cómo se actúa por encima de otros elementos y como se reacciona ante ellos. Por ende, el empleo del espacio depende en gran medida de su diseño, del momento y de las personas que se encuentren presentes para su uso, así como el uso de otros espacios que se encuentren a su alrededor. En consecuencia, únicamente una modificación en el tamaño o la configuración (separación, unión, dispersión o mezcla), podría influenciar tanto en el espacio como sus alrededores.

Al respecto existen diversas publicaciones que han remarcado la importancia de la relación entre la infraestructura y el comportamiento. Entre ellos destaca Hall (1996), quien muestra cómo las diferentes culturas usan el espacio que los rodea. Así mismo, remarca la importancia del uso activo que las personas hacen de estos ambientes y la manera en que lo integran, no únicamente a través de las reacciones hacia estos lugares, sino también a través de las interacciones sociales que se desarrollan en ellos.

Es por ello que es necesario que la vía cumpla una serie de requisitos para que la misma pueda ser considerada como una vía de calidad. Entre estos requisitos, se considera que los más importantes son la conveniencia para el usuario, la seguridad para su uso diario y la satisfacción de los requerimientos de confort para que el desplazamiento y la estancia sean cómodos y placenteros. Para ello, el trayecto debe ser atractivo y limpio, con elementos interesantes para observar mientras el peatón se desplaza y se

debe ofrecer facilidades para la interacción social. Otras características que los viandantes consideran importantes en una vía de calidad son, por ejemplo, la implementación de resguardos frente a acciones climáticas o de otra índole, la amplia visibilidad que se pueda ofrecer al peatón en su trayecto y el fácil acceso a otros tipos de movilidad.

Estas propiedades pueden ser reconocidas como necesidades del peatón para que este realice viajes típicos, tales como viajes al colegio o al centro de trabajo, visitas sociales y eventos, reuniones, desplazamientos por salud y realización de ejercicios, cumplimiento de diligencias, viajes de recreación, actividades extracurriculares, combinación de los anteriores y viajes multimodales (Washington State Department of Transportation, 1997).

De acuerdo a Gehl (2011), se pueden identificar patrones en la vida de los peatones, por lo cual realiza una clasificación de las actividades externas en los espacios públicos en una ciudad, en tres categorías: actividades necesarias, actividades opcionales y actividades sociales.

En cuanto a las actividades necesarias, éstas incluyen diligencias como ir al trabajo, comprar, esperar un bus o una persona, realizar diligencias, etc. Al ser necesarias estas actividades, se realizan todo el año, bajo cualquier condición, y son poco influenciadas por el ambiente en que se realizan.

Por otro lado, las actividades opcionales incluyen acciones como tomar un paseo, tomar sol, sentarse en los alrededores, etc. Por lo tanto, estas actividades se realizan si es que el peatón lo desea y si las condiciones son apropiadas. En consecuencia, son especialmente dependientes de las condiciones físicas del exterior.

Por último, las actividades sociales incluyen actividades como los saludos y conversaciones, niños jugando, actividades comunales y contactos pasivos que escuchan y ven al resto de personas. Estas actividades dependen de la presencia de otros peatones en las inmediaciones, ocurriendo espontáneamente. Esto implica que las actividades sociales son soportadas indirectamente por las actividades necesarias y opcionales.

Se debe recalcar que existe una estrecha relación entre la calidad física del entorno y las actividades, descritas anteriormente que se desarrollan en estas. Gehl (2011) considera que, a mayor calidad del espacio, es mayor la periodicidad de las actividades.

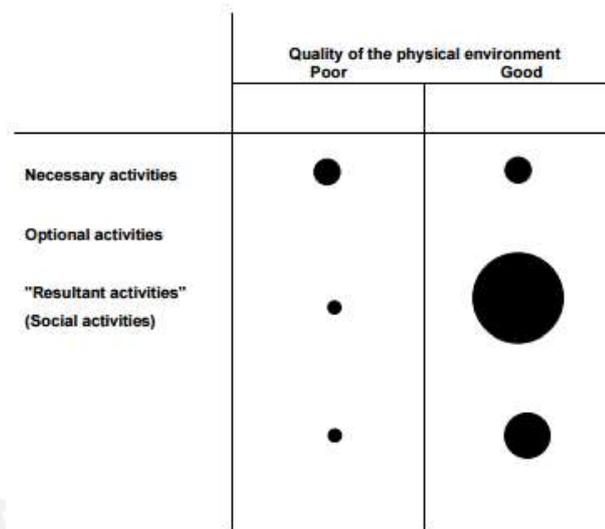


Figura 5. Representación de la frecuencia de los tipos de actividades de acuerdo a la calidad del espacio público. Fuente: Gehl (2011)

Por último, Johansson (2013) menciona que, durante la planificación de infraestructuras para el tráfico de vehículos y peatones, es sumamente necesario pronosticar diversas situaciones de tráfico. Algunos elementos de la misma son sensibles a la densidad del flujo de peatones, por ejemplo, pasajes donde solo puede pasar uno a la vez.

En cuanto a los estudios del desplazamiento peatonal se refiere, Brščić, et. al. (2014) realizaron investigaciones del comportamiento de los peatones en diversas condiciones, observando el desplazamiento de las personas en áreas contiguas a un centro comercial en el lapso de un año. Para ello, se observó la dependencia entre el tiempo y el espacio mediante el uso de las variables de densidad y velocidad de los peatones.

Se pudo comprobar que efectivamente, conforme la densidad aumenta, la velocidad decrece y mantienen ambos cierta relación. Sin embargo, la densidad es independiente al tiempo. Esto se fundamentó en las velocidades variables (altas en horas punta o en días laborables, bajas en días no laborables o en horas tardías) que corresponden a una misma densidad. Esto quiere decir entonces, y reafirmado la teoría antes mencionada, que el tipo de actividades y el tipo de viaje influyen significativamente en el

desplazamiento peatonal. Además, observaron estadísticamente una correlación positiva entre la velocidad del peatón con la altura de las personas, un efecto que es menos notorio en los fines de semana. Por lo tanto, la investigación mencionada sugiere la observación de diversos factores para el estudio de la velocidad de grupos peatonales, aun si es que el entorno es fijo.

De la misma forma, en investigaciones acerca del comportamiento de los peatones, se reafirmó la existencia de relaciones con particularidades del trayecto y del área por donde transitan. En la investigación de Soto (2012) realizada en la ciudad de Los Ángeles en los Estados Unidos de América, se analizan los aspectos espaciales, sociales y económicos en tres áreas peatonales, con el fin de identificar los factores cualitativos y cuantitativos que influyen en el dinamismo de los peatones y la forma en que se da esta dependencia. De esta forma, se logra en la investigación una relación lineal, en el índice de dinamismo propuesto, ajustado a la realidad.

2.2.1 Niveles de servicio

Marquez (2013) indica que el nivel de servicio es un método mediante el cual se evalúa el rendimiento de una instalación de transporte. Es una medida cualitativa que describe las condiciones de flujo de tráfico de la instalación y la percepción del usuario de estas condiciones en el área de evaluación. En áreas peatonales, estas condiciones dependen de un número de factores que no pueden ser estimados directamente, algunos de los cuales son factores como confort, tiempo de viaje, conveniencia y libertad de maniobra, todos mencionados anteriormente.

2.2.1.1 Tipos de niveles de servicio peatonal

Las áreas peatonales fueron motivo de preocupación para tener los mismos niveles de servicio que las carreteras y autopistas. Fruin (1971) fue uno de los que trabajó en este campo para lograr esta meta. Él determinó que, si el número de peatones se incrementa en un espacio específico, la comodidad y libertad de movimiento desciende resultando en alta capacidad y congestión de este espacio en particular. Como resultado, decidió aplicar los mismos seis niveles de servicio para el análisis de caminos en áreas peatonales. Subsecuentemente, después del excelente logro que alcanzó en las áreas peatonales, su trabajo fue tomado para empezar otra evaluación y dar, de este modo, la guía para los

niveles de servicio para otras instalaciones, tales como las escaleras y para las colas de espera.

Para ello, se utilizan letras para representar a los niveles de servicio; se empieza por el nivel de servicio A, que indica unas condiciones de operación excelente; y termina con el nivel de servicio F, que indica las peores condiciones de operación. A continuación, se muestra una tabla tomada del Transit Capacity and Quality of Service Manual (Transport Research Board, 2003), el cual difiere del presentado en el Highway Capacity Manual (2000). La principal diferencia recae en que los valores mostrados en el HCM son representativos para banquetas y esquinas de calle; sin embargo, los valores presentados en el TRB son usados típicamente para instalaciones de transporte público.

Tabla 2. Criterios para los niveles de servicio en vía peatonal. Adaptado de TRB (2003)

NS	Módulo de área (m ² /peatón)	Flujo (peatón/min/m)	Velocidad promedio (m/s)
A	≥3.30	0 - 23	≤1.32
B	2.30 - 3.30	23 - 33	1.27 - 1.32
C	1.40 - 2.30	33 - 49	1.22 - 1.27
D	0.90 - 1.40	49 - 66	1.15 - 1.22
E	0.50 - 0.90	66 - 82	0.77 - 1.15
F	≤0.50	variable	≤0.77

2.2.1.2 Procedimientos de evaluación para determinar la capacidad en áreas peatonales

El método de evaluación del nivel de servicio es importante para permitir que un especialista determine si la instalación está trabajando con el nivel de operación deseado o si una mejora debe ser implementada.

Según Márques (2013), el procedimiento de evaluación actual del nivel de servicio de un área peatonal debe ser realizado para evaluar el rendimiento del área en estudio. Si el nivel de servicio actual es muy bajo, la condición del área será incómoda para los peatones debido a la gran multitud de personas. Por lo tanto, es necesario determinar el nuevo ancho de área peatonal y, de este modo, dar solución al problema.

Por un lado, el HCM (2000) ha usado la relación volumen-capacidad y velocidad peatonal para determinar los niveles de servicio para un área peatonal en donde los viandantes se encuentran en espera, como las esquinas de calle y, por el otro, el TRB (2003) utiliza el espacio entre personas para volumen peatonal como medida para determinar los niveles de servicio de un pasillo. Debido a que en el área de estudio los peatones se desplazan de manera continua y sin realizar paradas, es preferible que la investigación se base en los valores designados por el TRB.

2.2.2. La importancia del peatón en la movilidad

La movilidad se ha convertido en una de las más grandes preocupaciones en un gran número de ciudades en el mundo, el funcionamiento ineficiente del modelo actual, dominado por los vehículos motorizados, obliga a la población en general a adoptar un modelo de movilidad más sostenible, otorgándole ahora el rol protagónico a los peatones.

A pesar de que muchas veces no se considere en el caminar como un medio de transporte más, es imprescindible reconocerlo como tal, pues es el más fundamental y de éste dependen casi todas las actividades realizadas por el ser humano (Fruin, 1971). Entre sus características más significativas se encuentran que es el medio más accesible, pues todos dentro de sus posibilidades pueden realizarlo; es el más sostenible, ya que no genera contaminante alguno y es el menos costoso, pues no cuesta dinero. Adicionalmente, posee cualidades relacionadas a la calidad de vida, pues fomenta la actividad física de las personas y es, junto con la bicicleta, unos de los pocos medios que permiten una experiencia sensorial completa entre el usuario y su entorno.

Todos estos rasgos transforman al desplazamiento peatonal en una alternativa apropiada, con creces, a la hora de transportarse.

Con respecto a la relación entre el desplazamiento peatonal y otros medios de transporte, es posible demostrar que existe una correlación de interdependencia bastante estrecha. Esto se debe a que, en primer lugar, los viajes realizados por otros medios son complementados normalmente por caminatas, siempre apropiadas para tramos cortos (Valenzuela-Montes, 2015). En segundo lugar, es relevante y mandatorio el conocimiento y el análisis del comportamiento de los peatones en el

espacio público, como en estaciones de tránsito. Por último, la elección del medio de transporte a usarse dependerá en gran parte de la accesibilidad, el sentimiento de seguridad y comodidad que tengan los peatones en sus desplazamientos.

En consecuencia, se debe replantear la figura del peatón por su fuerte relevancia en la movilidad urbana. Priorizar sus necesidades en lugar de las de los vehículos motorizados es necesario para el desarrollo de un modelo de movilidad sostenible.

Ciudades alrededor del mundo se han comprometido ya con la estrategia de convertirse en “ciudades peatonales” por los beneficios económicos y sociales, productos de ser una ciudad variada y vital debido a la posibilidad de los peatones de poder caminar a través de zonas variadas, como tiendas, restaurantes, cafés, mercados al aire libre, vecindades libres de automóviles e inclusive hasta los centros de trabajo. Algunas ciudades modelo son Venecia (que, a pesar de ser una ciudad densa en términos peatonales, el desplazamiento resulta ser placentero y relajante), Vauban, París y Copenhague. Otras como Los Ángeles, Chengdu y Nueva York ya están realizando grandes esfuerzos para conseguir retornar la ciudad a los peatones, inclusive haciendo uso de tecnologías modernas, como aplicaciones para celulares.

Es interesante el programa de 10 pasos que Copenhague ha seguido para cumplir este objetivo (Newurbanism.org, 2015). En la figura 6 se muestra un diagrama con dichos pasos.

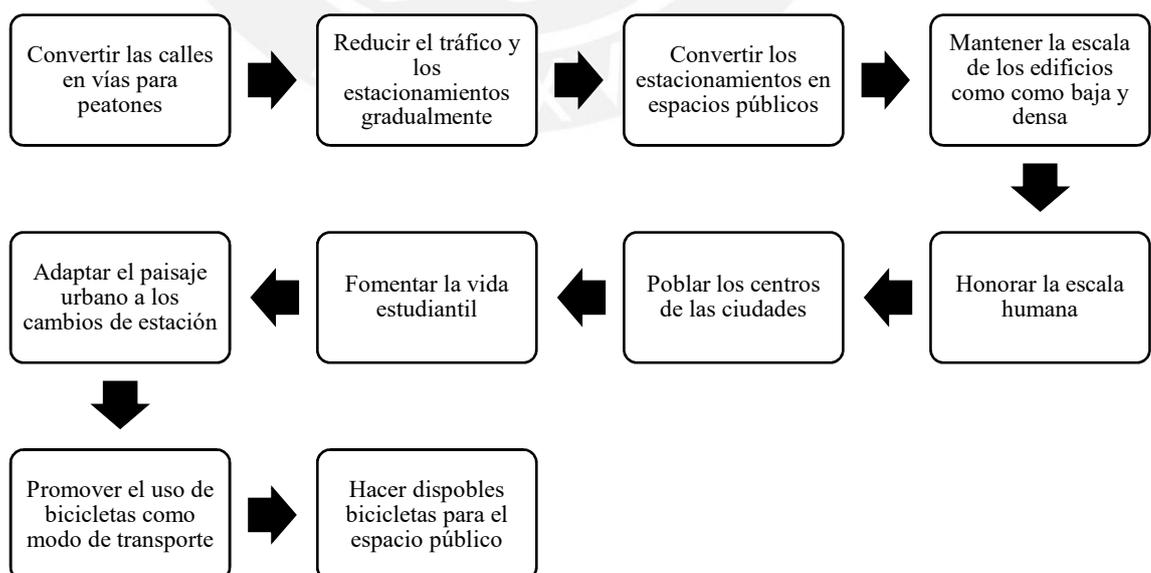


Figura 6. Programa de los 10 pasos. Adaptado de Newurbanism.org (2015)

2.3. Modelos peatonales

Según Johansson (2013), el modelar y simular el flujo o tráfico de pasajeros, equivale a representarlo dentro de una estructura matemática. Estas estructuras matemáticas pueden conllevar eventualmente a simulaciones, lo cual nos permitirá estudiar varias situaciones de tráfico a través de su representación virtual, lo cual resulta en un método más sencillo que el estudiar el tránsito directamente. En consecuencia, esta posibilidad resulta de vital interés para un investigador, en especial cuando el tipo de tráfico en el que estamos interesados aún no existe en la realidad, pudiendo de este modo pronosticarlo.

Un ejemplo de modelamiento peatonal es el presentado por Marisamynathan (2014), quien utilizó pruebas estadísticas e investigó el comportamiento de los peatones en una intersección en función de la velocidad de cruce, del cumplimiento de las señales de tránsito y de la interacción peatón - vehículo bajo condiciones de tráfico mixto.

En un caso similar, donde también se investigan a los peatones en los cruces peatonales, Papadimitriou et. al. (2015), desarrolla modelos de elección de cruce peatonal basados en las vías, el tráfico y los factores humanos. Desarrollaron los modelos del comportamiento peatonal basado en las vías y características del tráfico, observando en los modelos que las opciones de cruce de peatones son afectadas significativamente por el tipo de vías, de flujo y de control del tráfico. Luego realizaron un análisis de componentes principales, observando tres elementos del comportamiento de peatones que emergen en el cruce: toma de riesgos y optimización (tendencia de cruce del peatón en la mitad de la cuadra para ahorrar tiempo, etc.), conservación (el peatón percibe mayor riesgo de cruce a mitad de la cuadra, frecuentes en los usuarios de transporte público) y peatones por placer (que, junto a los peatones frecuentes, caminan por salud, placer, etc.).

Otro ejemplo de modelación peatonal, es el presentado por Liebig et. al. (2012), los cuales realizan el modelamiento de las trayectorias y proponen una estimación del volumen de tráfico (que resultan ser sumamente interesantes para análisis de riesgo, evaluación de la calidad de servicio, clasificación de la ubicación y aplicaciones de análisis de movilidad), basado en un proceso de regresión Gaussiana, el cual incorpora información topológica y conocimiento de trayectorias preferidas.

Es así que diversas investigaciones hacen uso de herramientas estadísticas para hallar el modelo apropiado, pero existen otros como Pellegrini et. al. (2010), donde se utilizan modelos de comportamiento social para la predicción del movimiento de un peatón y, a través de la simulación, se consigue un modelo estocástico. Para ello, se consideraron múltiples hipótesis para los posibles comportamientos, utilizando el principio de modelos de incertidumbre. Además, se demuestra que la capacidad de predicción se incrementa considerablemente conforme aumenta el número de simulaciones. De esta manera, a medida que se avanza en el proyecto, la ecuación se transforma de una ecuación determinística a una ecuación estocástica.

Además, Hillier et. al. (1993) indica que una cantidad considerable de modelos para el movimiento peatonal urbano han sido adaptados de modelos empleados en estudios vehiculares. Es en estos modelos donde el potencial de generación de rutas en formas construidas (construcciones o bloques urbanos) es el aspecto más relevante en ser analizado, el tráfico es el problema más frecuente y el objetivo de diseño peatonal es poder adaptar el espacio peatonal a la atracción. En resumen, este modelo aplica la teoría de la atracción del movimiento peatonal, en la cual el movimiento se capta desde y hacia formas de infraestructura que poseen diferentes grados de atracción, y el diseño se encamina a cómo hacer frente a las consecuencias locales de esta atracción. Sin embargo, estas teorías de atracción no inciden sobre la configuración espacial de la trama urbana (calles, cuadras, paseos, etc.), pero resulta fácil de demostrar que la configuración puede tener efectos en el movimiento, los cuales son independientes de los elementos atrayentes.

De acuerdo a Zampieri et. al. (2009), existen varios tipos de representaciones descriptivas para el movimiento de peatones y el ambiente donde este ocurre. Al construir un modelo del comportamiento, se procura entender las características relacionadas al mismo. La dificultad que se encuentra es la falta de herramientas para modelar y simular la variación de las tasas de movimiento en términos de cambios en el entorno urbano para la validación de dicha variación a través de datos reales.

En ese sentido se ha desarrollado una gran cantidad de modelos para brindar explicaciones al fenómeno, tales como modelos de cola (Hoogendorm y Boy 2004; Lovas, 1994), modelos de matriz de transición (Helbing et. al., 2001, Kurose y Hagishima, 1995), modelos estocásticos (Ashford, 1976), modelos de elección de ruta

(Hoogendoorn y Bovy, 2004), los cuales resultan ser similares a otros empleados para describir el comportamiento de peatones en situaciones críticas como en evacuaciones de emergencia o fuego.

Como se ha podido apreciar, las estrategias para modelar el comportamiento peatonal son diversas y, Berres (2013), menciona que existen dos tipos principales de modelos: los modelos macroscópicos y los modelos microscópicos. Estos serán descritos en los siguientes incisos.

2.3.1. Modelos macroscópicos

Los modelos macroscópicos estudian la conducta de los peatones en términos de sus propiedades más globales relacionadas a las características de un flujo continuo. Para este fin, es preciso equilibrar las relaciones de la densidad de la partícula, en donde se interpreta al transeúnte como partículas, intensidad del flujo, velocidad del flujo, etc. (Murgante et. al., 2013).

Al igual que en el caso del flujo continuo y, tal como se va a poder apreciar en párrafos subsiguientes, los parámetros como velocidad, densidad, flujo peatonal y módulo de área, son recurrentes en los modelos macroscópicos, por lo que su definición es fundamental. Por ejemplo, se tiene que la velocidad de un peatón (v) está definida por la relación entre la distancia de avance en el sector analizado (L) y el tiempo que le toma al peatón realizar ese desplazamiento (t), lo cual generalmente resulta en unidades kilómetros/hora. En consecuencia, la ecuación es la siguiente:

$$v = \frac{L}{t} \quad (1)$$

El segundo parámetro, la densidad (ρ), se define con el número de peatones (N) que ocupan un área específica (A) en un momento dado. Las unidades a usar son peatones/metros². La ecuación correspondiente se muestra a continuación:

$$\rho = \frac{N}{A} \quad (2)$$

El flujo peatonal (q) es la frecuencia por la cual los peatones atraviesan por un punto o sección transversal de una calzada. Está definido entonces, por el cociente del número de peatones (N) que pasan por la sección entre un intervalo de tiempo (T); y el

resultado se da en términos de peatones/metro/hora, peatones/metro/minuto o peatones/metro/segundo. Se formula, de este modo, la ecuación mostrada a continuación:

$$q = \frac{N}{T} \quad (3)$$

Como consecuencia de la ecuación clásica de flujos vehiculares, basada en las ecuaciones de fluidos, se puede también derivar el flujo peatonal del siguiente modo:

$$q = v * \rho \quad (4)$$

Finalmente, el parámetro módulo de área (M), es el recíproco de la densidad. Las unidades usadas son m²/peatón y cuantifica la cantidad de área disponible por cada peatón.

$$M = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

Para entender la influencia de estas variables anteriormente definidas, y otras de menor recurrencia, Gonzáles (2011) realizó analogías entre las multitudes peatonales y los flujos granulares, en especial en situaciones de pánico. El autor resume estas analogías en que los trayectos de los peatones se asemejan a las líneas de corriente en fluidos, que es notable la presencia de un contacto “viscoso” en flujos bidireccionales y que la aparición de corrientes de flujo en multitudes es similar a los lechos de ríos. Además, en comparación con el fenómeno de segregación o estratificación en medios granulares, se encuentran similitudes en la organización de las líneas por donde caminan los peatones, siendo estas de dirección uniforme y, al igual que un reloj de arena, el paso del peatón es oscilatorio al atravesar cuellos de botella. A semeja, así mismo, el paso de personas a una propagación de ondas, empujando siempre hacia adelante. Finalmente, en situaciones de pánico que, si se obstruye la salida de un grupo de peatones, el comportamiento sería semejante al paso de medios granulares a través de salidas reducidas.

Así mismo, en la actualidad, se ha logrado demostrar que el modelado macroscópico del flujo de peatones se asemeja a la dinámica de gases, especialmente en ocasiones cuando la densidad de transeúntes es alta.

Por su parte Johansson (2013) refiere a que los modelos macroscópicos modelan las propiedades macroscópicas de manera directa, sin referirse en forma explícita a su

naturaleza microscópica. Esta clase de modelos se basa en la insignificancia de la información que se pierde al promediar los detalles microscópicos.

Este método ha tenido un éxito relativo desde el punto de vista físico, basado en la distancia significativa entre la escala de fenómenos microscópicos y los macroscópicos, así como en el inmenso número de grados de libertad microscópicos correspondientes a un estado macro. Cuando se realiza la aplicación de este método para estimar las variables de un modelo macroscópico, las cuales corresponden a promedios, se puede realizar simulaciones microscópicas para poder determinar dichos promedios requeridos. Esto será explicado a más detalle en el siguiente inciso.

De la misma manera, Twarogowska et. al. (2004) estipuló que los modelos macroscópicos peatonales y los correspondientes a los modelos de tráfico vehicular, se fundamentan en las ecuaciones diferenciales parciales, las cuales, como ya se mencionó anteriormente, se derivan de la dinámica de fluidos, de la contabilización para la conservación de la masa y, eventualmente, en una ecuación de equilibrio de impulso. Estos modelos visualizan al tráfico como un medio continuo, caracterizado con los valores promedio como la densidad y la velocidad. Estos estudios fueron derivados de los modelos macroscópicos estudiados por Whitman, Lighthill y Richards desde el año 1955 y, en la actualidad, sus investigaciones se encuentran establecidos correctamente desde el punto de vista matemático y en las aplicaciones de ingeniería.

Estos modelos se emplearon en el tráfico peatonal a partir del año 2002 gracias a los trabajos de Hughes, quien definió a la multitud como un fluido pensante e introdujo un modelo que combinaba una ley de conservación escalar dependiente de la conservación de la masa con una ecuación que describe la dirección del movimiento, basado en la distribución de la densidad en el dominio.

En términos generales, los modelos se enuncian del modo siguiente:

Consideramos un dominio conectado bidimensional $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ los cuales corresponden a alguna infraestructura de desplazamiento equipada con una o más salidas. El límite del dominio $\partial\Omega = \Gamma_0 \cup \Gamma_w$ se encuentra formado por el límite de salida Γ_0 y la barrera Γ_w , que, al ser obstáculos, son impenetrables por los peatones. Los modelos macroscópicos se derivan de la dinámica de fluidos, los cuales se fundamentan en la ecuación de conservación de masa.

$$\begin{aligned} \rho_t + \operatorname{div}(\rho \vec{v}) &= 0 \\ t > 0, x &\in \Omega \end{aligned} \quad (6)$$

Donde $\rho_t = \rho(t, x)$ es la densidad peatonal y $\vec{v} = \vec{v}(t, x) \in \mathbb{R}^2$ es la velocidad media. La ecuación se encuentra limitada ya sea por una relación fenomenológica que define el campo vectorial, $\vec{v} = V(\rho)\vec{\mu}$ en los llamados modelos de primer orden o por una ecuación adicional de equilibrio de impulso para la aceleración en los modelos de segundo orden. La función de velocidad $V(\rho): [0, \rho_{max}] \rightarrow \mathbb{R}^+$ se asume que es decreciente.

Marno (2007) cita a los autores Helbing y Viscek (1999) quienes observaron las interacciones entre dos subpoblaciones “a” y “b”, las cuales poseen diferentes intenciones de desplazamiento, y desarrollaron un modelo continuo. Entonces la ecuación para la población “a” resulta ser igual a la ecuación anteriormente descrita.

$$\frac{\partial \rho_a(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho_a(x, t)\vec{v}_a(x, t)) = 0 \quad (7)$$

Donde $\rho_a(x, t)$ es la densidad de la población, $\vec{v}_a(x, t)$ es la velocidad promedio de la población, perpendicular a la dirección de la intención de desplazamiento y proporcional a la frecuencia de las interacciones que un peatón de la población encuentra con otros peatones. Además, la distancia promedio Δx que un peatón se mueve a un lado cuando evade a los otros peatones, resulta en la siguiente expresión:

$$\vec{v}_a(x, t) \approx -c(\Delta x)^2 \left(C_{aa} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} + C_{ab} \frac{\partial \rho_b}{\partial x} \right) \quad (8)$$

Donde c es el pre factor que permite disminuir la velocidad en zonas congestionadas y $C_{ab} > C_{aa}$ relacionan a las áreas espaciales utilizadas, desarrollado en términos de un parámetro de medición de los efectos de congestión y las condiciones de auto - organización, lo cual agrega un término de difusión a la ecuación anterior para poder determinar la estabilidad.

No obstante, Marno (2007) menciona que Helbig también desarrolló un modelo de dinámica de fluidos basado en un modelo cinético de gases de Boltzman, haciendo los términos equivalentes para un modelo de presión y temperatura, trascendiendo en las ecuaciones para la densidad de masa, de impulso y de energía. Sin embargo, estas

ecuaciones resultan ser algunas veces complejas, independientemente de que se obtengan resultados razonables.

Por otro lado, Karmnová (2014) propone otro modelo macroscópico, el cual es semejante al propuesto por Weidmann. Los parámetros usados para describir las relaciones que se presentan en el movimiento peatonal, son también la velocidad y la densidad. Esta expresión para el flujo unidireccional es lo que se presenta líneas abajo:

$$V(\rho) = v_f \left[1 - e^{-\gamma \left\{ \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{max}} \right\}} \right] \quad (9)$$

Donde:

$V(\rho)$	es la velocidad en función a la densidad
v_f	es la velocidad final libre (no es afectado por otros obstáculos ni peatones)
ρ	es la densidad en un determinado momento
γ	es un parámetro obtenido empíricamente
ρ_{max}	es la densidad máxima

En éste, Karmnová acrecienta ciertas diferencias importantes entre el comportamiento del peatón y del vehículo motorizado, y analiza la densidad por segmentos debido a las incompatibilidades entre los flujos peatonales y vehiculares, que es consecuencia de los múltiples flujos de entrada y salida para una misma sección de análisis. La principal observación en la investigación es la posibilidad de utilizar múltiples entradas y salidas de flujo en la sección de un camino peatonal en un modelo macroscópico, de modo que se puede aplicar la adición de entradas y salidas en los parámetros de la ecuación.

Sin embargo, Marno (2007) refiere que la principal dificultad correspondiente a los modelos macroscópicos es que no permiten analizar el comportamiento individual, como la desaceleración o desvío por persona. A pesar de que en presencia de densidades elevadas se sugiere que el desplazamiento peatonal funciona como el flujo de un fluido o flujo granular; los modelos macroscópicos no toman en cuenta los efectos de la auto-organización de las personas o su maniobrabilidad. Como ejemplo tenemos que, en situaciones de pánico, está demostrado que las personas no tienden a

tomar el curso más racional de acción. Otro ejemplo es que las personas tienden a seguir a una multitud, amontonándose alrededor de una salida bloqueada en una habitación llena de humo, independientemente de que otras salidas se encuentren disponibles. Este modelo de flujo expondría a la multitud moviéndose igual a todas las salidas.

2.3.2. Modelos microscópicos

En los modelos microscópicos, se considera a los peatones como sujetos individuales que interactúan entre sí, involucrando sus características particulares, tales como sexo, edad, velocidad, etc. Johansson (2013) menciona que en el modelo de simulación microscópica los componentes son peatones individuales virtuales. En las poblaciones heterogéneas, estos tipos de modelos resultan útiles debido a que existen diversos tipos de peatones cuyas particularidades afectan al tráfico en diversas formas.

Por su parte Dridi (2015) manifiesta que, en los modelos microscópicos, los peatones son observados como partículas individuales, cuyas interacciones son determinados por reglas físicas y sociales. Los principales tipos de modelos microscópicos son los modelos de fuerza social, celular autómatas, modelos de cola, entre otros.

De acuerdo a lo expresado por Johansson (2013), los modelos microscópicos describen a todos los peatones aisladamente, la interacción con otros peatones y el medio ambiente. Esto significa que, en contraste con el enfoque macroscópico, no hay un proceso de cálculo de promedios que resulte en pérdida de los detalles, así como la heterogeneidad de la población puede ser directamente incluida en el modelo.

Sin embargo, es interesante tomar en cuenta las investigaciones que fundamentan que ha sido posible derivar expresiones macroscópicas a partir de una relación. Por ejemplo, Helbing, (1998) presenta una bifurcación sistemática de ecuaciones macroscópicas para el flujo de tráfico de una autopista. Para ello, se parte de ecuaciones con un enfoque cinético, mediante las cuales se describe el movimiento de un vehículo en particular (enfoque microscópico), presentando ecuaciones macroscópicas del tráfico relacionadas a la hidrodinámica de fluidos con las variables densidad, velocidad promedio y variación de velocidad de vehículos. Así mismo, los resultados de los modelos de la simulación se confrontan con los datos de tráfico empíricos. Esta investigación demuestra la forma en la cual los modelos de tráfico

macroscópicos pueden ser sistemáticamente derivados de sencillas ecuaciones de movimiento para vehículos, considerado esencial para aumentar la velocidad de simulaciones de tráfico.

Así mismo, Marno (2002) presenta un caso similar pero enfocado en los peatones. En su investigación, desarrolló modelos microscópicos de comportamiento peatonal individual en multitudes. Éstos incluyen términos de modelos de la psicología humana, tales como el deseo de mantener una cierta distancia de los demás. Dicho estudio utiliza una transformación desarrollada del tráfico para pasar de un modelo microscópico a un modelo macroscópico, conservando factores psicológicos bajo la utilización de técnicas de divisiones dimensionales.

Como se mencionó con anterioridad, los modelos microscópicos pueden ser clasificados en cuatro tipos, cuyas categorías están parcialmente traslapadas y no bien definidas. Así, se tienen los modelos basados en celular autómatas, los modelos basados en agentes, los modelos de teoría de juegos y los modelos basados en fuerza. Por otro lado, Marno (2002) considera dos modelos adicionales: el modelo conductual/social y el modelo basado en inteligencia artificial.

A continuación, se describen los modelos que son usados con mayor frecuencia.

2.3.2.1. Modelos celular autómatas

De acuerdo a Nitzsche (2013), la simulación en celular autómatas (CA) divide el dominio de la simulación en celdas, las cuales deben ser regulares de modo que formen una cuadrícula regular y cada celda tenga un valor de estado proveniente de un conjunto finito de posibles estados.

Johansson (2013) indica que son modelos caracterizados por ser discretos en tiempo y espacio, constituyendo al principio la única práctica de simulación microscópica, esto es debido a la potencia de cálculo limitada de la cual se tenía referencia. En este tipo de modelos, cada unidad espacial es llamada celda y puede ser ocupada por un peatón o por un obstáculo, lo cual representaría a que el tamaño de un peatón se fije como una constante sobre la población, hay un movimiento mínimo que debe hacerse y debería ser como mínimo una celda por vez. Si bien es cierto que la discretización espacial resulta ser una burda aproximación, la ganancia computacional que brinda resulta ser sustancial comparada con una representación espacial continua, siendo su principal

ventaja en comparación con otros modelos. Además, con algunas simples reglas de actualización y ciertas propiedades generales, los modelos son posibles de obtener de manera analítica.

En un modelo CA la siguiente celda preferida es aquella que reduce la distancia restante hacia el destino del peatón cuya trayectoria es, sin embargo, modificada por la presencia de otros peatones, de acuerdo a la idea de la repulsión potencial alrededor de cada peatón. El potencial en una celda es la suma de los potenciales de los otros peatones y, al decidir la celda de desplazamiento, el peatón sustrae el potencial de cada celda vecina de su respectiva distancia ganada, asociada con cada celda, y luego desplazada a la celda con el valor más alto. Para permitir diferentes velocidades de los peatones, se utiliza un esquema de actualización secuencial, el mismo que permite a los peatones más rápidos poder moverse con mayor frecuencia que los lentos y, a su vez, evitar la necesidad de la aplicación de normas para la resolución de conflictos necesarias para esquemas de actualización paralelos.

Todos los peatones que tienen el mismo objetivo se marcan como un grupo, determinando los siguientes estados en una celda: vacía, obstáculo u ocupada por un peatón del grupo $1 \dots N$.

Los peatones solo pueden moverse a celdas vacías, la actualización de las variables de estado las cuales representan el movimiento de los peatones se hace después de cada paso y depende del estado de las celdas vecinas y un conjunto de reglas para el periodo $t \rightarrow t + 1$

Nitzsche (2013), también refiere que este tipo de modelos aplicado al desplazamiento peatonal, contrasta del modelo clásico celular autómatas debido a que el número de población por celda se limita a solo un peatón como máximo.

De acuerdo al autor, la cuadrícula debe ser regular, es decir debe estar formada por la misma clase de polígonos, existiendo hasta tres tipos de cuadrícula o grilla, que se muestran a continuación.

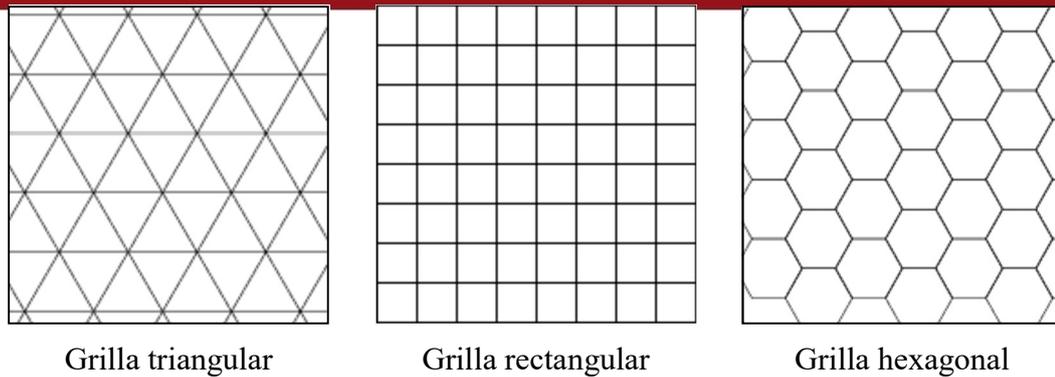


Figura 7. Tipos de grillas. Fuente: Nietzsche (2013)

2.3.2.2. Modelos de la fuerza social

Los modelos basados en fuerzas describen a los peatones en un espacio continuo, modelando la reacción de los mismos a su entorno en término de un conjunto de fuerzas, los cuales no son fuerzas físicas, sino que, por el contrario, describen las motivaciones de los peatones.

Marno (2002) manifiesta que el modelo conductual de fuerza se relaciona con uno de los principales modelos que ha sido desarrollado desde enfoques de psicología social, admitiendo así diferentes tipos de comportamientos. Este modelo asume que el comportamiento en situaciones de conflictos puede ser descrito mediante la adición de fuerzas que reflejan diferentes influencias del medio ambiente. Este enfoque ha sido aplicado tanto a formación de opinión, migración y modelamiento de tráfico de peatones.

Al tomar en cuenta las fuerzas exteriores ejercidas sobre el peatón, es necesario antes explicar las relaciones de las principales leyes de la dinámica y sus relaciones con el modelo. Gonzales (2011) explica que al igual que la primera Ley de Newton, el peatón cambia su movimiento rectilíneo debido a las fuerzas exteriores ejercidas por objetos situados en su entorno (obstáculos, puertas, fuentes, plantas, etc.). Con respecto a la segunda ley de Newton, se puede diferir que las fuerzas externas ejercidas sobre el peatón, ocasionan un aumento o reducción de su velocidad, por ende, se generan aceleraciones o desaceleraciones. Por último, se puede demostrar que la tercera ley de Newton no es válida en el modelo de fuerza social a causa de que las fuerzas externas

sobre el viandante son ejercidas en un solo sentido. No se presentan fuerzas sobre el peatón en sentido contrario, mucho menos de la misma magnitud.

Al respecto Shiwakoti et. al. (2008) menciona que Helbing, mediante los modelos de fuerza social, reconoce que la multitud se encuentra conformada por individuos pensantes que reaccionan ante eventos alrededor de ellos. De este modo en este modelo microscópico, la dinámica de cada partícula o peatón (α), se encuentra establecida mediante tres tipos de fuerzas: fuerza de manejo (F_D), fuerza social/peatón (F_P) y la fuerza granular (F_G) a través de las siguientes expresiones:

$$\bar{F}_D = m_\alpha \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha) \quad (10)$$

Donde:

m_α	Es la masa de las partículas.
v_α^0	Es la velocidad deseada.
\vec{v}_α	Es la velocidad actual.
\vec{e}_α	Es el vector unitario que apunta a la meta deseada.
τ_α	Es el tiempo de relajación.

Se puede entender mejor esta relación con la siguiente imagen:

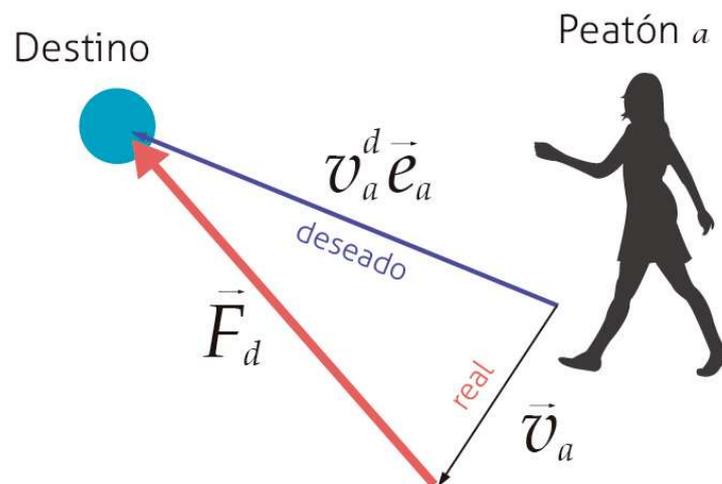


Figura 8. Representación gráfica de la Fuerza de Manejo. Adaptado de Zeng (2014)

$$\bar{F}_p = \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^{N_p} A_\alpha \exp\left(\frac{\varepsilon_{\alpha\beta}}{B_{ph}}\right) \vec{e}_{\alpha\beta}^n \left(\lambda_\alpha + (1 - \lambda_\alpha) \frac{1 + \cos\varphi_{\alpha\beta}}{2} \right) \quad (11)$$

Donde:

N_p Es el número total de partículas en el sistema.

A_α y B_{ph} Son constantes relacionada con la fuerza y con la influencia de la interacción social.

$\vec{e}_{\alpha\beta}^n$ Es el vector normalizado apuntando desde la partícula α hasta la partícula β .

$\varphi_{\alpha\beta}$ Corresponde al ángulo entre la dirección del movimiento y la dirección del objeto ejerciendo la fuerza repulsiva.

λ_α Se trata de un parámetro que toma en cuenta el hecho que lo que pasa frente al peatón tiene un gran impacto que las cosas que ocurren detrás.

$$\bar{F}_G = \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^{N_p} [(\varepsilon_{\alpha\beta} k_n) \vec{e}_{\alpha\beta}^n (\varepsilon_{\alpha\beta} k_t \vec{v}_{\beta\alpha}) \vec{e}_{\alpha\beta}^t] \theta(\varepsilon_{\alpha\beta}) \quad (12)$$

Donde:

$\vec{e}_{\alpha\beta}^t$ Indica la dirección tangencial correspondiente.

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = R_\alpha + R_\beta - D_{\alpha\beta} \quad (13)$$

$D_{\alpha\beta}$ Es la distancia entre el centro de la masa de la partícula con radio R_α y R_β

k_n y k_t Son las constantes normal y tangencial respectivamente

$\vec{v}_{\beta\alpha} = \vec{v}_\beta - \vec{v}_\alpha$ Es la diferencia de la velocidad tangencial

$\theta = 1$ si $\varepsilon_{\alpha\beta} \geq 0$ (por ejemplo, en una situación de pánico) o

$\theta = 0$ en otro caso (por ejemplo, en una situación normal)

De esta manera, se puede plantear una ecuación para la motivación total del peatón $\bar{F}_a(t)$. Debido a que todas las ecuaciones anteriormente descritas afectan a la decisión del peatón al mismo momento; se asume que el efecto total es dado por la suma de todas las fuerzas en este caso. Como resultado se obtiene:

$$\bar{F}_a(t) = \bar{F}_D(v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha, \vec{v}_\alpha) + \sum \bar{F}_G(\vec{e}_{\alpha\beta}^t, \vec{v}_{\beta\alpha}, \varepsilon_{\alpha\beta}) + \sum \bar{F}_P(\vec{e}_{\alpha\beta}^n, \varphi_{\alpha\beta}) \quad (14)$$

2.3.2.3. Reseña de softwares basados en modelos microscópicos

Kotusevski et. al. (2009) menciona que uno de los sistemas que más se ha empleado es la simulación computarizada de la red de tráfico, de modo que resulta más común el experimentar con redes de tráfico en un entorno simulado computarizado debido a que experimentar con tráfico en el mundo real no resulta práctico. En ese sentido, los científicos han trabajado con diferentes estrategias para simular sistemas de tráfico bajo las categorías: macroscópica, microscópica e híbrida.

Con el objetivo de investigar las diferentes estrategias de simulación de tráfico Alexandersson et. al. (2013) realizan una descripción acertada de dos programas frecuentemente utilizados, tales como Viswalk y Legion. Así mismo, Al-Azzawi (2004) describe otros programas que han sido usados para diferentes fines. Se describirán a detalle los programas mencionados en los siguientes incisos.

i. Exodus:

Galea (2013) adoptó un modelo de fluidos dinámicos para que se alineen con simulaciones discretas de movimientos peatonales. Este es un modelo mundialmente usado, el programa Exodus fue diseñado para simular la evacuación de una cantidad cuantiosa de personas de edificios de múltiples pisos. El modelo rastrea la trayectoria del individuo al escapar ellos de un edificio por efecto de riesgo de fuego o peligro toxico. Este modelo adhiere también datos estadísticos.

ii. Rampage

Este software se basa en la reacción de individuos ante diversas situaciones y sigue las ecuaciones usadas en la teoría de gases de Boltzmann. La principal fuente de calibración ha sido el trabajo realizado por Fruin.

iii. Sistema de evaluación de flujo peatonal (PFES)

Es un modelo basado en movimientos predefinidos de la multitud. Las grillas están basadas sobre el plano del sitio por donde los peatones, y cada grilla indica una dirección general, un flujo peatonal y una relación de velocidad-densidad predeterminada. Este modelo es efectivo, pero como todo sistema en su categoría, depende de la habilidad del operador el crear las grillas correctas. Cabe recalcar que este sistema también se basa en el modelo de Fruin.

iv. Egress

Al igual que el sistema PFES, este modelo es basado en el uso de grillas usando una técnica de inteligencia artificial para determinar cómo un agente reaccionará ante una variedad de circunstancias. El software se basa principalmente en el modelo celular automático en el cual la transición de peatones de célula a célula se produce en la ocupación de las células.

v. Viswalk

Es un add-on del software base Vissim, desarrollado por la compañía alemana Planung Transpor Verkehr AG (PTV). La construcción del modelo es realizada en un modo de edición especial y los peatones pueden moverse en áreas en vez de conectores, como es el caso del transporte vehicular. En cuanto al movimiento de los peatones, este se realiza por la suma de fuerzas atractivas y repulsivas basados en mecánicas Newtonianas. Estas fuerzas provienen del destino pre-determinado y de otros peatones, obstáculos y atracciones. De este modo el modelo reproduce las dinámicas peatonales que describen sus cualidades, como los fenómenos de auto-organización en la formación de colas.

vi. Legion

Es un software destinado a la simulación microscópica de peatones usado, por ejemplo, para eventos como los Juegos Olímpicos. El movimiento de peatones es simulado a

través de un sistema multi-agente, donde cada peatón es un agente autónomo con un set de reglas que controlan su movimiento, dándoles inteligencia artificial. De esta manera, cada peatón evalúa la factibilidad de las opciones con el fin de encontrar la ruta que requiera mínimo esfuerzo. Lo hace en primera instancia a un nivel macro, con la búsqueda del camino más corto, para luego proceder en un nivel micro con la evaluación de las posibilidades para optimizar su próximo paso. En este programa, es posible alterar varios parámetros para estudiar los efectos del incremento de densidades en la multitud entre otros. Además, la simulación proporciona dos perspectivas, siendo la primera una visión de la naturaleza de las dinámicas de las multitudes; y la segunda, el programa puede ser usado para probar o refutar relaciones observadas en las multitudes (como si es que doblar el ancho de una ruta de salida doblará el flujo de personas).

vii. Pedroute y Paxport

Pedroute es un software desarrollado inicialmente para el estudio del movimiento peatonal en las estaciones del “London Underground” y posteriormente implementado hasta producir una variante llamada Paxport para usarlo específicamente en intercambiadores de transporte. Se usan conceptos de la HCM/ Fruin LOS y se basan en que los datos representen certeramente la interacción entre las multitudes y la geometría local. El énfasis del modelo recae en las formas espaciales (layout), debido a la influencia en el comportamiento de los flujos peatonales, por lo que el programa usa relaciones matemáticas entre densidad en las áreas disponibles para caminar y velocidad peatonal. Sin embargo, se ha comprobado que el programa no representa certeramente las velocidades de los peatones, y presenta imprecisiones en los cruces de flujos, explanadas y otros efectos locales.

viii. Nomad

En este programa, las acciones de los peatones son determinadas por las diferentes actividades que cada uno tiene planeado realizar mientras se encuentra en las instalaciones aptas para caminar. En este software, se determinan las áreas donde es más probable que las actividades se realicen y las rutas más factibles entre éstas. Por otro lado, los peatones no caminan en una trayectoria lineal y predeterminada, sino que las rutas con trayectorias continuas en un espacio continuo. Con ello, se pueden distinguir dos niveles del comportamiento peatonal: área de la actividad y elección de

ruta (nivel táctico) y comportamiento para caminar (nivel operacional). El primer nivel presentado depende de las condiciones de tráfico peatonal prevalecientes. Cuando un camino se encuentra congestionado, a pesar de que el peatón busque seguir la ruta más corta, prefiere evitar este camino si es que encuentra buenas alternativas para desplazarse (como cerca a vitrinas de tiendas, áreas iluminadas, escaleras eléctricas, etc.). Luego de alejarse de la ruta más corta, buscará una nueva ruta más corta a partir de donde se encuentra. En el segundo nivel (referente a aceleraciones y procesos de interacción) se basa en hechos empíricos y teorías del comportamiento peatonal.

ix. Simped

El software fue diseñado para analizar los impactos de los diseños de las estaciones y su layout. En éste, se puede cuantificar el LOS de los peatones mientras se desplazan a través de una estación y mientras esperan en una plataforma o en el pasillo. La técnica usada es la misma que en el programa Pedroute. Como el layout de la edificación de la estación influencia el comportamiento de los flujos peatonales, se usan relaciones macroscópicas entre la densidad de las áreas peatonales y las velocidades del peatón para modelar el comportamiento. La elección de rutas y la realización de actividades está basada en peatones individuales.

x. Pedflow

Este programa está relacionado con un modelo microscópico del movimiento del peatón en un ambiente urbano congestionado. Los peatones son modelados como agentes autónomos viajando a un destino predeterminado y reaccionando a obstáculos de acuerdo a reglas de comportamiento. Éstas reglas deben obtenerse empíricamente, combinando técnicas de observación y entrevistas para identificar y cuantificar diferentes comportamientos. Se usa comúnmente para evaluar los cambios de infraestructura destinados a promover el caminar en las urbes. Para verificar el modelo, se usan varios experimentos en los cuales el área que va a ser modelado es grabada por cámaras de video antes y después del cambio de infraestructura.

Con ello, Al-Azzawi (2004) indica que Exodus y Legion son programas comúnmente usados para simular la evacuación de personas desde un edificio de varios pisos. Rampage modela las reacciones reflejo de las personas basadas en las características de la escena local. Los modelos de fuerza social como Viswalk, son adecuados para examinar las características de grupos específicos de peatones (distribuciones

estadísticas de sus velocidades de desplazamiento, tiempo de viajes, etc.). PFES, Egress y Pedflow definen las áreas de desplazamiento en mallas y se centra en un análisis a nivel micro de los movimientos de multitudes. Pedroute y Paxport pueden ser usados para estudios en áreas amplias. Pedroute, una variación de Paxport y Simped, son usados para estudios en estaciones. Por último, Nomad es útil en estudios de diseño en donde se cambiará el uso de las áreas de una intermediación.

2.3.3. Modelos híbridos

O también llamados modelos mesoscópicos. Este tipo de modelo fue desarrollado por Karmnová (2014), a partir de la combinación del modelo microscópico y macroscópico. Para ello analizaron diversos modelos macroscópicos del flujo peatonal, propuestos por reconocidos autores y realizaron una comparación objetiva entre estas para destacar las principales ventajas de cada modelo. Dicha investigación determina que los modelos macroscópicos pueden ahorrar significativamente tiempos de cálculo, siendo conveniente la utilización cuando no sea necesario el estudio de la interacción con el peatón. Indica además que el modelo microscópico será utilizado en zonas complicadas o en áreas de interés, y la macroscópica en el resto.

2.4. Comparación de softwares basados en un entorno microscópico

Además, Alexandersson et. al. (2013) realizaron comparaciones entre los dos programas que se usan más ampliamente. De esta forma, se analizaron los programas Viwalk 5.4 y Legion 7.0. Se tomaron en cuenta el comportamiento del peatón y la evaluación de su performance. Las tablas 3 y 4 muestran lo descrito anteriormente.

Tabla 3. Comparación entre las características para la construcción del modelo. Adaptado de Alexandersson et. al. (2013)

<i>Construcción del Modelo</i>		<i>Viswalk 5.4</i>	<i>Legion 7.0</i>
Geometría	Construcción	Sencillo. Sensible a los detalles del diseño y a las múltiples áreas.	Muy sencillo. Las rutas de los vehículos son obstáculos. Los peatones pueden quedarse atorados en las esquinas.
	Modificación	Muy buena. Coordenadas en los mensajes de error ayudan a encontrar no continuidades.	Muy buena. Los obstáculos son generados de objetos existentes, archivos CAD o dibujados manualmente.
Demanda del tráfico	Construcción	Sencillo. La correlación entre la matriz OD y las rutas es indistinguible.	Muy sencillo. La correlación entre la matriz OD y las rutas OD es clara.
	Modificación	Muy buena. Posibilidad de usar tanto las rutas como la matriz OD, inclusive ambas.	Muy buena. Puede usar solo la matriz OD o una combinación con las rutas OD.
Interacción con los vehículos	Construcción	Muy sencillo. La prioridad está definida por el usuario.	Muy sencillo. Los peatones tienen la prioridad.
	Modificación	Muy buena. La prioridad puede ser cambiada fácilmente y cualquier de los modos de transporte puede ser prioridad.	Limitado. El cambiar la prioridad es problemático y excluye la libre elección de rutas.
Transporte Público	Construcción	Ligeramente difícil. Numerosos elementos de construcción requieren varias configuraciones y parámetros.	Sencillo. Requiere varias configuraciones, pero la construcción es lógica.
	Modificación	Buena. Puede ser modificado con facilidad.	Ligeramente limitado. No puede ser modificado en detalle.

Se resalta que, si bien Legion facilita la construcción del modelo con parámetros predeterminados, Viswalk ofrece más posibilidades para la modificación del mismo. Por otro lado, se debe tener especial cuidado con las limitaciones en Legion en cruces peatonales, para ello es necesario tener conocimiento sobre el control de señales a cambio de oponerse a aplicar la elección libre de la ruta. Existen menos dificultad en este aspecto al usar Viswalk.

Tabla 4. Comparación entre las observaciones del comportamiento del peatón. Adaptado de Alexandersson et. al. (2013)

<i>Comportamiento del peatón</i>		<i>Viswalk 5.4</i>	<i>Legion 7.0</i>
Parámetros del comportamiento	Por defecto	Buena. Comportamiento razonable al parar o esperar. Sin embargo, caminan directo hacia otro peatón y luego realizan un giro abrupto.	Muy buena. Comportamiento razonable al caminar, parar o esperar.
	Modificación	Muy buena. Todos los parámetros pueden ser cambiados. Sin embargo, se requiere conocimiento acerca de los modelos de fuerza social.	Deficiente. Es fácil cambiar el perfil de la entidad. Sin embargo, las descripciones de los perfiles de la entidad no están disponibles.
Elección de ruta	Por defecto	Buena. Todos los peatones con el mismo par OD eligen la misma ruta. Los obstáculos y pasajes angostos tienen influencia, pero no la situación del tráfico ni los cruces peatonales.	Muy buena. Se puede elegir rutas ligeramente distintas. Los obstáculos y pasajes angostos tienen influencia, pero no la situación del tráfico ni los cruces peatonales.
	Modificación	Muy buena. Puede ser modificado por los cambios de infraestructura, puntos intermedios, rutas parciales para los cuales el usuario elige el método para elegir la ruta y por las dinámicas potenciales.	Bastante escasa. Puede ser modificado por los cambios de infraestructura y por las rutas OD, pero el método de elección de ruta y los parámetros de auto-navegación en un nivel macroscópico, no pueden ser cambiados ni examinados.
Velocidad	Por defecto	Muy buena. Distribución de velocidades predeterminada y la variación de velocidades es observada.	Muy buena. Distribución de velocidades predeterminada y la variación de velocidades es observada.
	Modificación	Muy buena. Los usuarios pueden elegir entre diferentes distribuciones de velocidades o definir una nueva distribución.	Deficiente. Es fácil cambiar la velocidad del perfil. Sin embargo, descripciones de los perfiles de velocidad no se encuentran disponibles.

Viswalk presenta más ventajas en cuanto la posibilidad de cambiar el método de elección de ruta. Esta posibilidad no se presenta en Legion. Otra posibilidad ofrecida con mayores beneficios por Viswalk es la modificación el comportamiento del peatón a detalle. En Legion esta opción es limitada. Además, la disponibilidad de información de los parámetros del peatón es bastante mejor en Viswalk. Ambos programas simulan

a los peatones de manera congruente y el comportamiento por defecto y la elección de ruta es similar.

Tabla 5. Comparación entre los rendimientos del programa. Adaptado de Alexandersson et. al. (2013).

Medida del rendimiento		Viswalk 5.4	Legion 7.0
Visualización	Por defecto	Buena. Los peatones se pueden visualizar bien, tanto su apariencia como movimiento. Sin embargo, la red no incluye, por defecto, características visuales como marcas del camino.	Muy buena. Los peatones se pueden visualizar bien, tanto su apariencia como movimiento. La red incluye automáticamente características como las marcas del camino y señales de tránsito.
	Modificación	Muy buena. La apariencia del peatón en 3D puede ser modificada a detalle.	Muy buena. La apariencia del peatón en 3D puede ser modificada a detalle.
Valores numéricos de salida	Disponibilidad	Muy buena. Varios valores de salida están disponibles y los efectos hacia y del peatón pueden ser detectados. Sin embargo, archivos de valores de salida son requeridos.	Buena. Varios valores de salida están disponibles y los efectos hacia y del peatón pueden ser detectados. Sin embargo, solo están disponibles valores de salida compilados.
	Modificación	Muy buena. El usuario puede definir el área de medición, tanto tamaño como locación.	Deficiente. Solo objetos existentes pueden definir el alcance de las mediciones.
Relevancia estadística	Disponibilidad	Buena. Es fácil realizar varias simulaciones, pero los archivos de resultados no son compilados automáticamente.	Muy buena. Fácil de hacer varias simulaciones y los resultados promedios son obtenidos automáticamente.
	Modificación	Muy buena. Se puede escoger número de corridas y semillas aleatorias.	Muy buena. Se puede escoger número de corridas y semillas aleatorias.

En Viswalk, la visualización de la simulación es más clara y con más sentido en la vista 3D, comparado con lo mostrado por Legion, en el cual no es muy clara. Sin embargo, Legion presenta un entorno más amigable para las visualizaciones en 2D; en Viswalk se requiere más esfuerzo para presentar un video agradable. En cuanto a los datos de salida, Viswalk permite al usuario definir el área de medición, lo cual es una ventaja frente a Legion.

En base a las comparaciones presentadas, se concluye que la mejor opción representa el paquete Viswalk por las grandes ventajas que ofrece.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

El estudio del tráfico peatonal es el punto de partida para el conocimiento del desempeño de una carretera, avenida, calle, etc. En el presente capítulo, explicaremos la metodología para realizar un estudio de tráfico peatonal en términos generales y, posteriormente, se evaluará el tráfico peatonal de la Avenida Dintilhac analizando sus variables macroscópicas a partir de un estudio microscópico. Este análisis nos permitirá deducir nuevas formulaciones y, además, se podrá hallar eventualmente la capacidad de la vía.

Así, tenemos que Teknomo (2002) ofrece un interesante esquema de clasificación de la metodología empleada para un estudio de tráfico peatonal. Ver Figura 9.

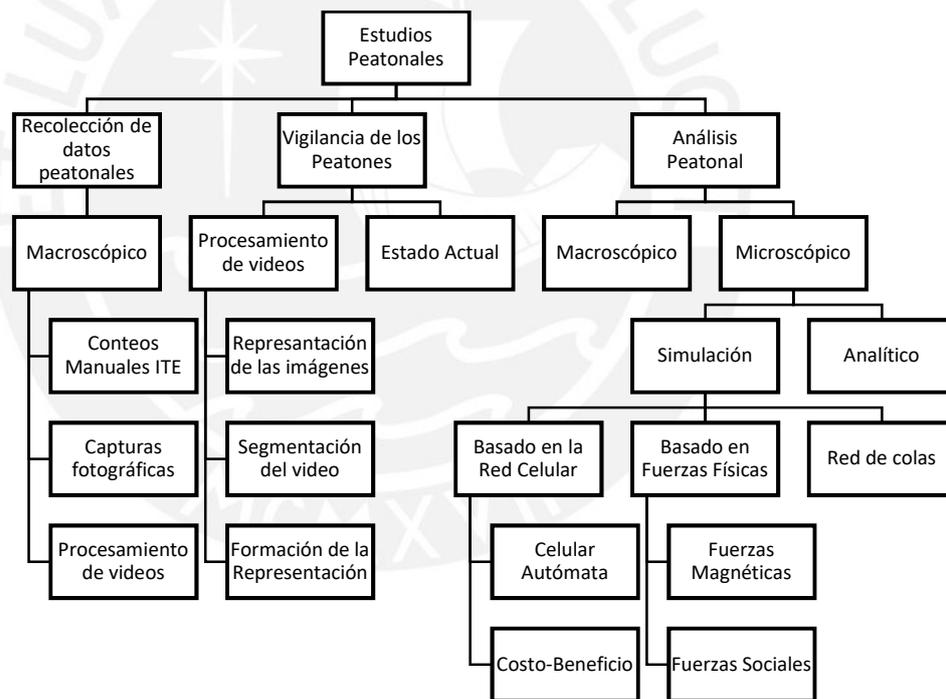


Figura 9. Metodología para el estudio de peatones. Adaptado de Teknomo (2002)

El presente proyecto tomó esta metodología como base para el desarrollo del proyecto. Para ello, se consideró la siguiente secuencia: recolección de datos peatonales de origen macroscópico por medio de conteo manuales y procesamiento de videos; vigilancia de peatones en su estado actual; el análisis peatonal, se realizó en primera estancia de manera microscópica, por lo que se realizaron simulaciones basadas

esencialmente en las fuerzas sociales; para finalmente, analizar a los peatones en su estado macroscópico.

3.1 Consideraciones del caso de estudio: Av. Dintilhac

La avenida Dintilhac es la principal avenida peatonal de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por esta vía transcurren diariamente miles de personas y desde esta, se accede a varios puntos importantes de la universidad. En la Figura 10, se muestra en planta una vista de la vía de estudio en la cual se observa los diversos ingresos. En la Figura 11 se observa el flujo peatonal de la vía en una hora pico.

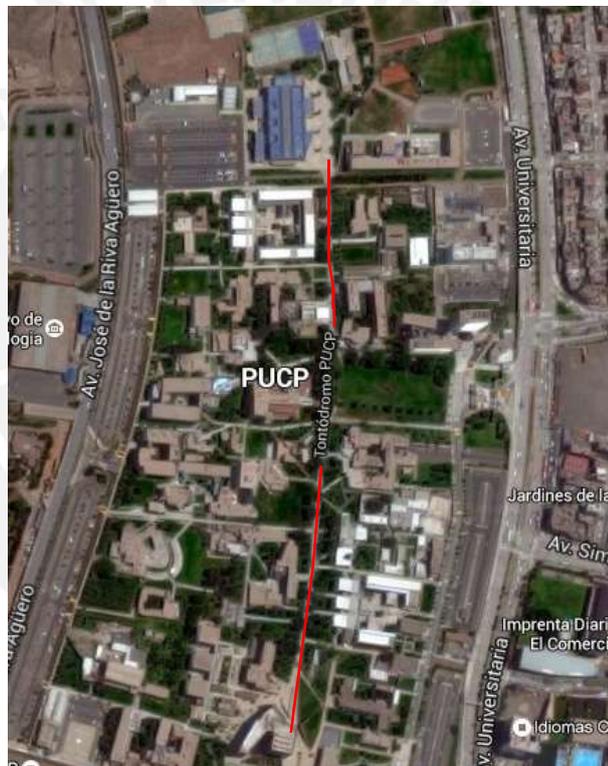


Figura 10. Ubicación de la Av. Dintilhac (Tontódromo PUCP). Fuente: Google Earth (2016)



Figura 11. Desplazamiento peatonal en la Av. Dintilhac. Fuente: Propia

La avenida Dintilhac tiene un ancho constante de 4.5 metros y una longitud en total de 550 metros aproximadamente. En los últimos años, se ha notado el incremento del flujo peatonal de la vía y, por esta razón, se ha decidido evaluar el tránsito peatonal para determinar si ha llegado o está por llegar a su capacidad máxima de flujo. Para llevar a cabo la evaluación, se han recolectado datos del flujo peatonal en la avenida Dintilhac siguiendo dos técnicas de recolección diferentes, las cuales se mencionarán más adelante. Esta recolección de información, se ha realizado en dos diferentes fechas, ambas cuando se pueden observar flujos picos en la avenida a causa del llamado “jueves cultural”.

Para proceder con la investigación, se ha tenido las siguientes consideraciones, basadas en la información obtenida del Protocolo para la Simulación en Vissim (Oregon D.O.T., 2011).

3.1.1 Definición de los límites del proyecto

Los límites que se proponen dependen de la “zona de influencia”, el cual comprenden la red peatonal de los alrededores. Por lo tanto, la zona de influencia incluye el área de estudio y las redes aledañas que tengan un impacto en las dinámicas del área de estudio. Esto puede significar tomar en cuenta intersecciones o distancias

considerables de la red en estudio, con la finalidad de que en el modelo se consiga obtener comportamientos ajustados a la realidad. Ver figura 12.

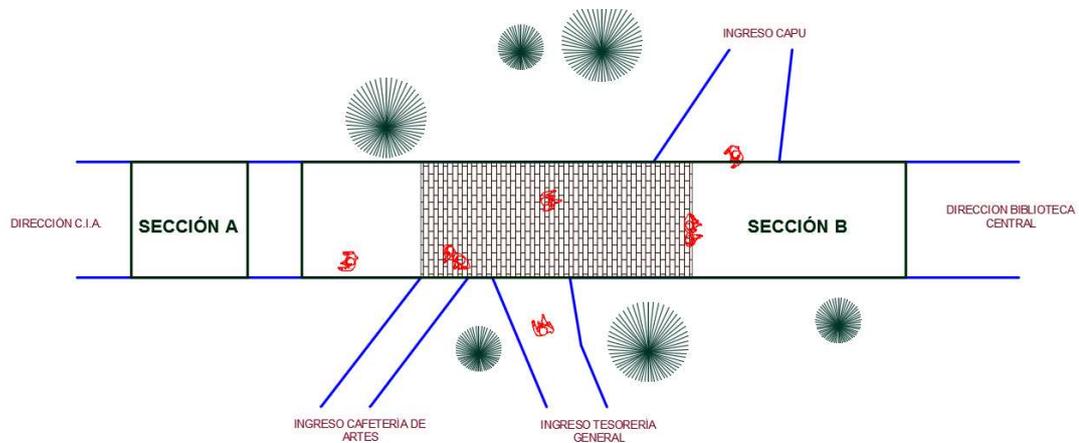


Figura 12. Definición de los límites del proyecto. Fuente: Propia

3.1.2 Definición del periodo de tiempo

El periodo de estudio del modelo es la suma del “seeding period” y la duración de la simulación adecuada para la recolección de datos. El “seeding period” es el tiempo desde que empieza la simulación hasta que la red tenga el número necesario de peatones para que se pueda considerar un modelo representativo, también puede ser llamado “warm up time”. Este tiempo no puede ser menor a 10 minutos. En cuanto a la duración del modelo, deberá ser determinado de acuerdo al análisis de los datos recolectados en el campo. En la presente investigación, se recolectaron un set de datos el día 24 de marzo del 2016, en un lapso de tiempo de 1 hora; y otro set de datos el día 07 de abril del 2016, en un intervalo de tiempo de media hora.

3.1.3 Inspección visual

Como parte de la definición del alcance, se debe realizar por lo menos una visita al área de estudio durante la hora pico y/o durante el lapso de tiempo en donde se puedan observar condiciones especiales en el proyecto, para así determinar si el área de estudio deberá ser extendida más allá de los límites iniciales. También se puede determinar otras necesidades, como nuevos registros de información, metas en los objetivos de calibración y dónde el modelo debe ser calibrado. En este caso de estudio, se realizó el reconocimiento de la Avenida Dintilhac y, a partir de ello, se eligieron dos secciones

a estudiar, las cuales se denominarán sección A y B. En la figura 12 se pueden apreciar ambas secciones. Así mismo, se definió que la sección A servirá para realizar la calibración del modelo y la sección B para hacer la validación del modelo peatonal.

3.2 Recolección de datos para el estudio del tráfico peatonal en la avenida Dintilhac

Los datos recolectados para un estudio de tráfico peatonal se asocian a la zona de estudio, a las necesidades y a las herramientas que dispone el investigador. Según Al-Azzawi (2004), se pueden usar diversas técnicas para la recolección de datos. A continuación, se mencionarán las que serán usadas para el presente proyecto.

i. Métodos de recolección manual de datos peatonales

Esta técnica es ampliamente usada por planificadores peatonales para analizar velocidades y densidades, y se utilizó para realizar las mediciones en la sección B el día 07 de abril del año 2016, para la validación del modelo. Antes de empezar la recolección de información, se registraron las rutas que los peatones usan para desplazarse a través de la Av. Dintilhac. Luego se requirió, en primer lugar, de un empadronador que realicen una inspección observacional en intervalos cortos de tiempo (10 minutos), con un cronómetro como herramienta. Para ello, se definió un área determinada y se midió el tiempo que demora el peatón en atravesarlo. Como resultado, se obtuvo la velocidad al caminar. En segundo lugar, otro grupo de empadronadores, ubicados cada uno en cada ingreso hacia la Av. Dintilhac, contaron el número total de peatones que ingresaban al lugar de estudio en los mismos intervalos de tiempo (10 minutos). Los conteos de peatones se realizaron con la ayuda de contadores de peatones digitales y análogos.

Se debe tener especial cuidado al emplear este método ya que la problemática recae en los errores humanos que se puedan cometer y las limitaciones que resultan de las observaciones en tiempos cortos. Además, a veces es necesario cubrir áreas extensas, por lo que puede ser poco práctico este método.

A pesar de que el área observada fue relativamente extensa, se empleó el método sin inconvenientes ya que no se registraron peatones que no salieran de la zona observada; es decir, no hubo alguno que hiciera paradas prolongadas en el trayecto.

Adicionalmente, el uso de las herramientas proporcionadas fue adecuada para las magnitudes que se registraron y así, no se perdió información.

ii. Estudio de videos

Con la disponibilidad de grabación de videos, capacidad de retroceder las imágenes y reproducirlas a una velocidad baja, el uso de videograbadoras para registrar el tráfico y transporte se popularizó en gran medida. La técnica consiste en que, una vez grabados los videos, se reproducen en el laboratorio y se extraen los datos manualmente. Es ventajoso en el sentido que las mediciones son precisas gracias a las herramientas del reproductor de video, es fácil de administrar y bastante útil en periodos de estudio largos. Lastimosamente, se puede requerir largos periodos de tiempo para procesar las imágenes, más aún cuando hay varios peatones.

De este modo, para realizar la recolección de información en la sección A para la validación, se utilizó este método. Se estudió un video registrado el día 24 de marzo del 2016 obtenido gracias a la grabación mediante un dron que sobrevoló la sección A, con el especial cuidado de no perder la visualización de los límites de la sección que servirían para contabilizar a los peatones que ingresaban al sector observado. Posteriormente, solo fue necesario un empadronador que realizara la extracción manual de la información (misma que en la sección B), a través de las repetidas reproducciones del video.

3.3 Simulación del modelo de la zona en estudio en Viswalk 8.0

Con la información peatonal recolectada anteriormente, incluidos datos acerca de la geometría de la zona en estudio, se procedió con el desarrollo del modelo inicial en el programa Viswalk 8.0 con los datos geométricos, con la precaución de no cometer errores en este proceso.

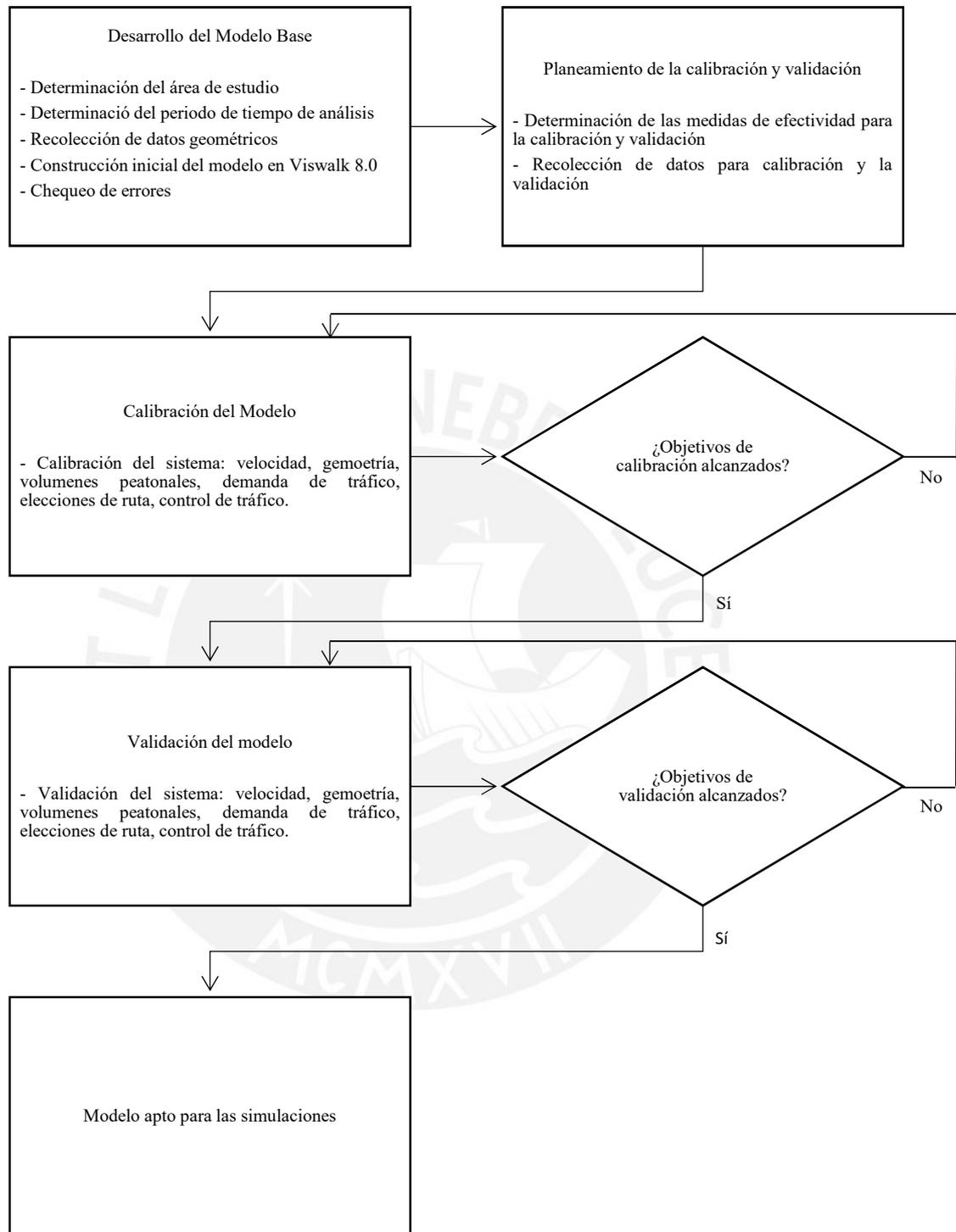


Figura 13. Metodología para la simulación. Fuente: Propia.

Luego se planteó las medidas de efectividad necesarias para poder verificar que el modelo se encuentra calibrado y validado. Estos parámetros pueden ser tanto cualitativos o cuantitativos. Por ejemplo, se verifica que, tanto en la calibración como en la validación, la animación del desplazamiento peatonal generada en el programa para el sector evaluado se asemeje a lo observado en la realidad. Así mismo, se certifica que los resultados promedios de velocidades obtenidos luego de las simulaciones para cada etapa, se encuentren dentro del intervalo de confianza del 95% para la diferencia de medias de dos distribuciones normales. Para ello, fue necesario ingresar la información del tráfico peatonal para la calibración y validación de manera independiente, y realizar las simulaciones para obtener los resultados promedios de velocidades.

A continuación, los resultados obtenidos tras cada simulación fueron analizados mediante el programa libre por internet StatKey, el cual permite hallar las diferencias de medias e intervalos de confianzas entre una población ya conocida (obtenida de la recolección de información), y otra población aleatoria, producto de las permutaciones generadas por el programa. De cumplirse los estándares propuestos tanto en la calibración como en la validación, se puede afirmar que el modelo construido en Viswalk 8.0 refleja la realidad.

Por último, se procede con la simulación de modelo con el fin de obtener los resultados necesarios para la investigación. Para ello, se realizaron cambios en los flujos peatonales para simular el modelo la cantidad de veces que sea necesario con el fin de obtener resultados de velocidad y densidad que permitan describir una tendencia en el diagrama fundamental. Los valores máximos de densidad y velocidad fueron hallados de manera aproximada en la simulación por el alto coste computacional que requeriría hallar dichos puntos de manera exacta. Los flujos se cambiaron multiplicando un flujo peatonal base por un factor determinado a criterio de la persona que realizó la simulación, de manera que el volumen peatonal incremente o decrezca de acuerdo a lo requerido. Para obtener resultados representativos de lo que pudiere acontecer para cada flujo ingresado en el sistema, para cada simulación se deben realizar un número n de corridas. Lo recomendado es que, como mínimo, se realicen 20 corridas del modelo para cada caso de flujo peatonal; y la información que se extrajo fueron los resultados de velocidad y densidad promedio.

Las configuraciones no se cambiaron respecto a lo que se realizó en la calibración, por lo que las mediciones se realizaron en la sección B, con el mismo número semilla y el mismo intervalo de registro de información.



CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN VISWALK 8.0

El programa Viswalk 8.0, desarrollado por la empresa PTV, al ser una herramienta de software para la simulación microscópica del tránsito peatonal basado en el modelo de fuerzas sociales, se usó para representar el tráfico peatonal de la avenida Dintilhac. La metodología usada para realizar la investigación puede apreciarse en la figura 13 del capítulo anterior.

4.1 Datos de entrada para la micro-simulación

Diversas características microscópicas del desplazamiento peatonal son recolectadas para poder construir un modelo en el programa de simulación, para que éste represente certeramente la realidad. Sin embargo, no todas las características serán incluidas en el modelo, ya que hay que tener en cuenta que los peatones en la Av. Dintilhac presentan cierta homogeneidad y el tomarlas en cuenta no influirán significativamente en los resultados.

i. Datos de volúmenes peatonales

Los datos de volúmenes peatonales implican el conteo de peatones que atraviesan una “valla” (un límite del área de estudio) en un periodo de tiempo. De estos volúmenes se infieren los flujos peatonales (peatones/hora), los cuales serán ingresados directamente al programa como “pedestrian inputs”, tanto para la calibración como para la validación y simulación del modelo.

En las tablas 6 y 7, se presentan los volúmenes peatonales en la sección A, entre las 12:00 – 13:00 horas del día 24 de marzo.

Tabla 6. Volumen peatonal en el sentido Complejo de Innovación Académica hacia la Biblioteca Central en la sección A. Fuente: Propia

HORA	VOLUMEN ACUMULADO	VOLUMEN PARCIAL
12:00-12:10	271	271
12:10-12:20	573	302
12:20-12:30	780	207
12:30-12:40	915	135
12:40-12:50	1081	166
12:50-13:00	1280	199

Tabla 7. Volumen peatonal en sentido Biblioteca Central hacia Complejo de Innovación Académica en la sección A. Fuente: Propia

HORA	VOLUMEN ACUMULADO	VOLUMEN PARCIAL
12:00-12:10	270	270
12:10-12:20	499	229
12:20-12:30	715	216
12:30-12:40	866	151
12:40-12:50	989	123
12:50-13:00	1077	88

En la tabla 8, se muestran los volúmenes peatonales recolectados manualmente en la sección B, entre las 12:30 – 13:00 horas del día 07 de abril. Cabe resaltar que se contabilizaron los volúmenes provenientes de cada ruta que ingresa a la sección en estudio.

Tabla 8. Volumen peatonal de diferentes rutas en la Av. Dintilhac en la sección B. Fuente: Propia

Intervalos de Tiempo/Rutas	Biblioteca Central - C.I.A.	C.I.A. - Biblioteca Central	C.A.P.U. - Av. Dintilhac	Tesorería - Av. Dintilhac	Cafetería de Artes - Av. Dintilhac
12:30 - 12:40	99	80	4	15	12
12:40 - 12:50	121	264	14	9	14
12:50 - 13:00	136	326	15	9	14
Total	356	670	33	33	40

En la tabla 9, se presenta la deducción de los volúmenes peatonales en la sección B (con los datos mostrados en la tabla 8) en el intervalo de tiempo de una hora.

Tabla 9. Flujos peatonales por ruta en la Av. Dintilhac en la sección B. Fuente: Propia

ORIGEN - DESTINO	VOLUMEN PEATONAL (PEATONES/HORA)
Biblioteca Central - C.I.A.	712
C.I.A. - Biblioteca Central	1340
C.A.P.U. - Av. Dintilhac	66
Tesorería - Av. Dintilhac	66
Cafetería de Artes - Av. Dintilhac	80

ii. Proporciones de giro:

Para cada origen, existen determinados lugares de destino y, para cada uno de estos pares (origen-destino), existen porcentajes que describen la cantidad de peatones que se dirigen de un determinado lugar a otro, a los cuales se les denomina proporciones de giro.

Estas rutas son provenientes de la Biblioteca Central, el Centro de Innovación Académica, el C.A.P.U, la Tesorería General y la Cafetería de Artes. Para mejor apreciación, se muestran imágenes con las posibles rutas y sus respectivas proporciones de giro (ver figuras 13, 14 y 15). Estos datos sirven para definir las rutas estáticas, son inamovibles, y se usaron para la validación del modelo y las posteriores simulaciones, ya que el Sector B es el empleado para estas etapas y, por ser el más extenso, es en donde influyen las rutas definidas.

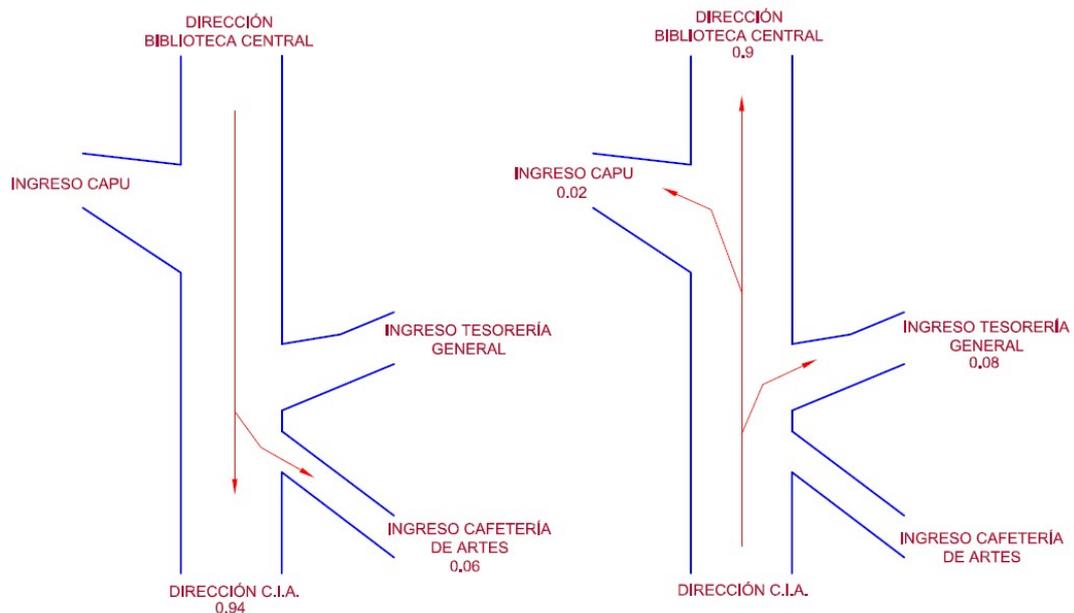


Figura 14. Proporciones de giro provenientes de la Biblioteca Central y del Centro de Innovación Académica.
Fuente: Propia

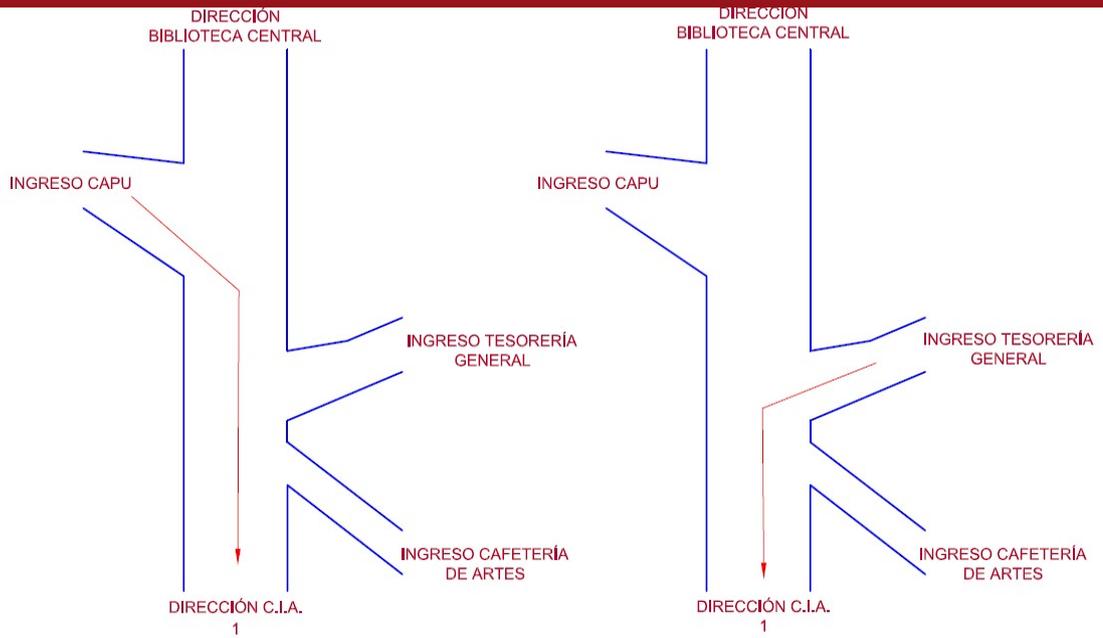


Figura 15. Proporciones de giro provenientes de C.A.P.U. y de la Tesorería General. Fuente: Propia

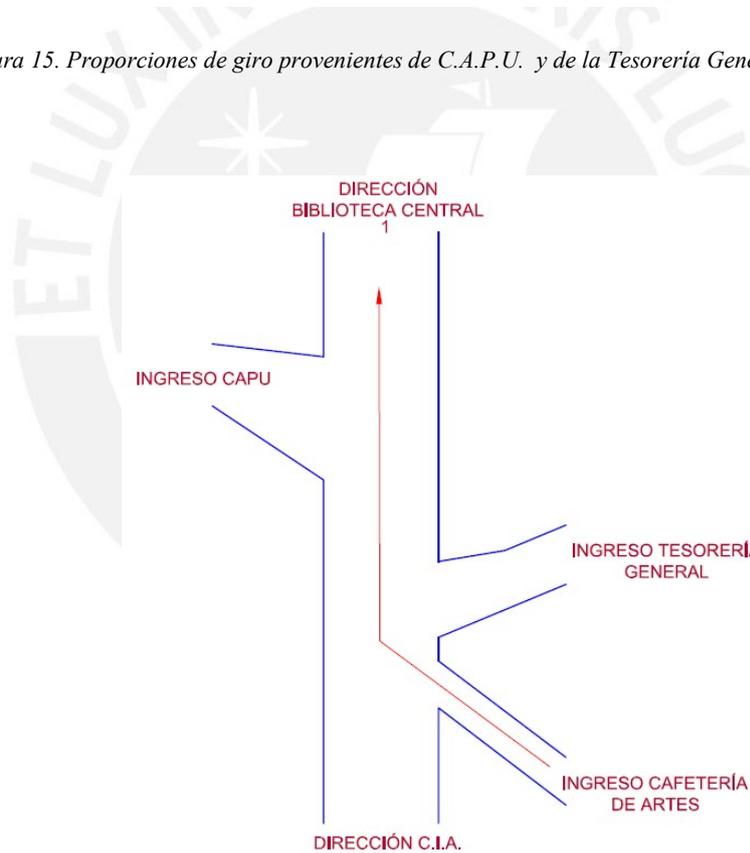


Figura 16. Proporciones de giro provenientes de la Cafetería Central Fuente: Propia

iii. Geometría:

Se realizó la planimetría de la vía para definir la geometría aproximada de la zona en estudio. Esta geometría se trazó en un programa de dibujo computacional. Se debe tener las dimensiones con la mayor aproximación posible, pues respecto a esto se basan las capacidades de la vía. En la figura 17, se muestra la geometría que se importa al programa Viskwalk 8.0.

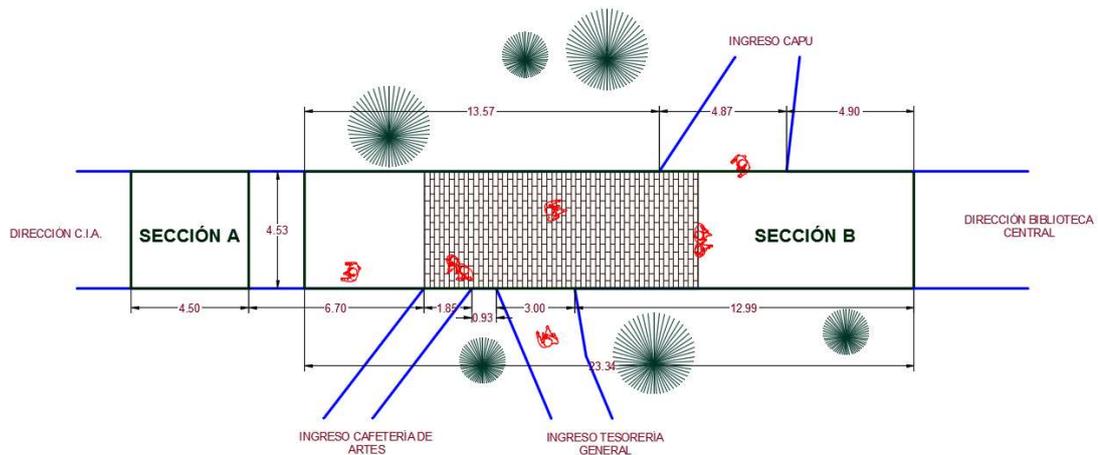


Figura 17. Geometría de la Av. Dintilhac. Fuente: Propia

iv. Velocidades peatonales:

Se tomaron los tiempos en que los peatones se demoran en desplazarse desde el inicio hasta el final de la zona en estudio. Con ello, y con la longitud del tramo por el que se desplazaron, se puede deducir las velocidades de desplazamiento peatonal. Las mediciones se realizaron al escoger al primer peatón que cruzaba el límite de cada sección, luego de terminar la toma del tiempo del peatón previo. Las velocidades a lo largo de la sección A se presentan en la tabla 10 y, a continuación, se visualiza la distribución de frecuencias versus las velocidades que le corresponde (ver figura 18).

Tabla 10. Velocidades peatonales en la Sección A de la Av. Dintilhac. Fuente: Propia

Velocidades(km/h)		Velocidades (m/s)	
3.95	3	1.11	0.84
3.12	3	0.87	0.84
3.12	3	0.87	0.84
3.95	5.4	1.11	1.51
3.95	3.6	1.11	1.01
4.26	3.86	1.19	1.08
3.95	3.52	1.11	0.99
3.38	4.91	0.95	1.37
3.38	4.38	0.95	1.23
3.38	4.5	0.95	1.26
3.38	2.7	0.95	0.76
3.38	2.7	0.95	0.76
3.45	2.7	0.97	0.76
3.45	2.7	0.97	0.76
3.45	5.06	0.97	1.42
3.45	5.06	0.97	1.42
4.26	3.31	1.19	0.93
3.6	3.31	1.01	0.93
2.75	3.6	0.77	1.01
2.75	4.63	0.77	1.30
2.75	4.15	0.77	1.16
3.6	5.59	1.01	1.57
3.6	3.45	1.01	0.97
3.6	3.45	1.01	0.97
3.6	3.6	1.01	1.01

Histograma de Velocidades (km/h)
Normal

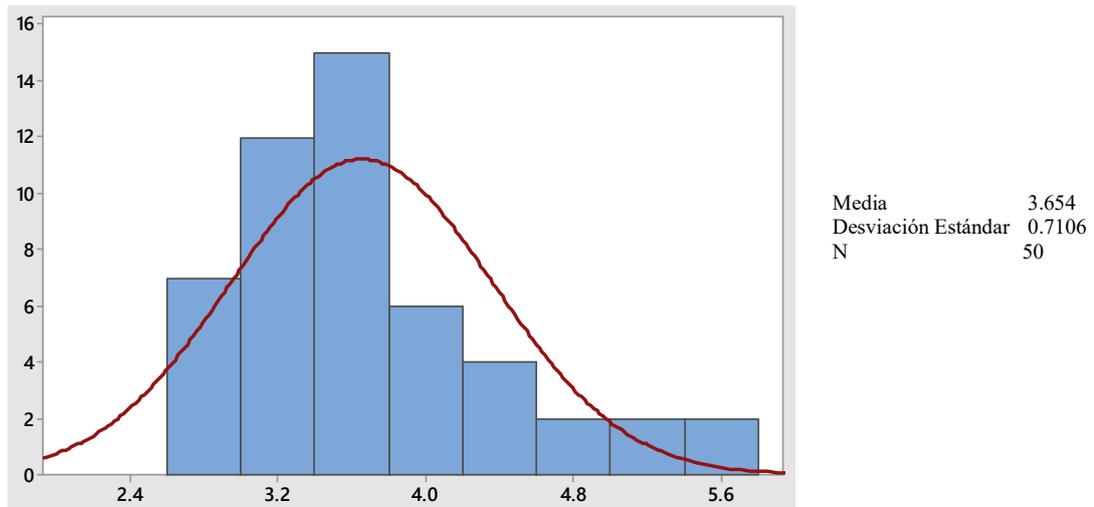


Figura 18. Distribución de velocidades peatonales en sección A. Fuente: Propia

Tabla 11 Velocidades peatonales en la Sección B de la Av. Dintilhac. Fuente: Propia

Velocidad (km/h)		Velocidad (m/s)	
4.00	4.67	1.12	1.31
4.42	4.94	1.24	1.38
5.25	4.94	1.47	1.38
4.94	4.94	1.38	1.38
4.42	4.20	1.24	1.18
3.50	4.20	0.98	1.18
4.20	4.67	1.18	1.31
5.60	4.67	1.57	1.31
3.82	6.00	1.07	1.68
4.94	5.25	1.38	1.47
4.67	3.65	1.31	1.02
5.25	4.42	1.47	1.24
4.94	4.42	1.38	1.24
5.60	4.20	1.57	1.18
4.20	4.94	1.18	1.38

Histograma de Velocidades (km/h)

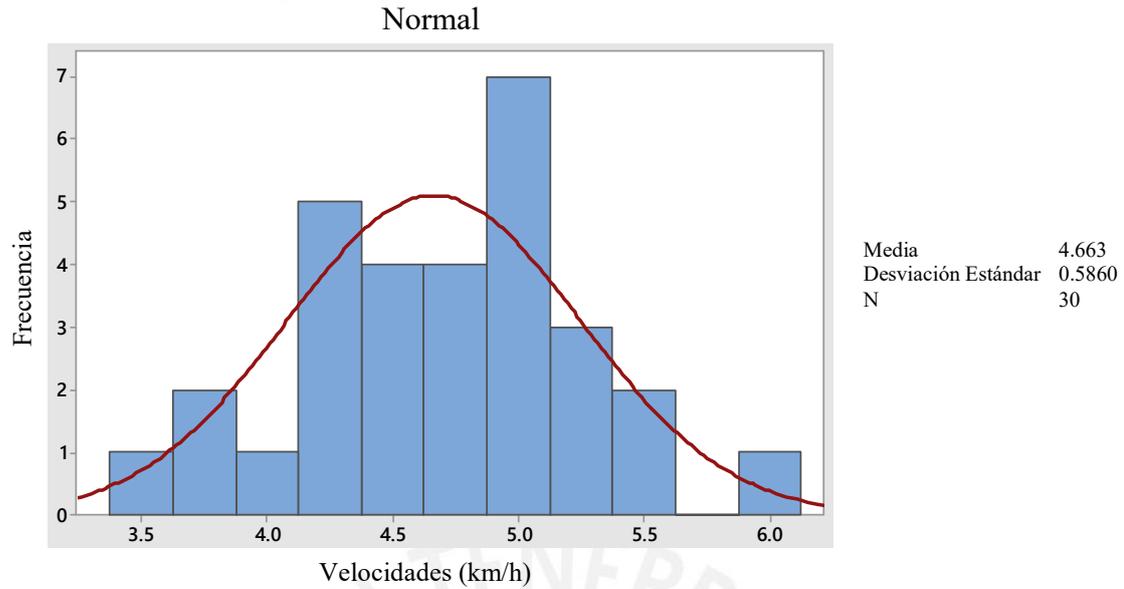


Figura 19 Distribución de velocidades peatonales en Sección B. Fuente: Propia

Además, como datos estadísticos de los histogramas representados en la figura 18 y figura 19, se dedujo que, a lo largo de la sección A, la velocidad peatonal promedio es de 4.66 km/h, mientras que a lo largo de la sección B hay una velocidad de peatón promedio de 3.65 km/h. Es importante resaltar que a pesar de que la sección B es extensa (23.34m.) para realizar este tipo de estudios (generalmente se seleccionan zonas de estudio de dimensiones menores), los datos recuperados en la sección B son igual de válidos, ya que se dieron condiciones similares a la sección A; es decir, no hubo peatones que se detuvieran, por lo que se apreciaba un flujo continuo.

4.2 Construcción del modelo para la micro-simulación

Los datos ingresados sirven para la construcción del modelo, el cual incluye las dos secciones A y B. Además, se implementaron las rutas estáticas con los flujos peatonales por hora respectivos. Inicialmente, se usaron los datos de volúmenes en la sección A (ver figura 20).

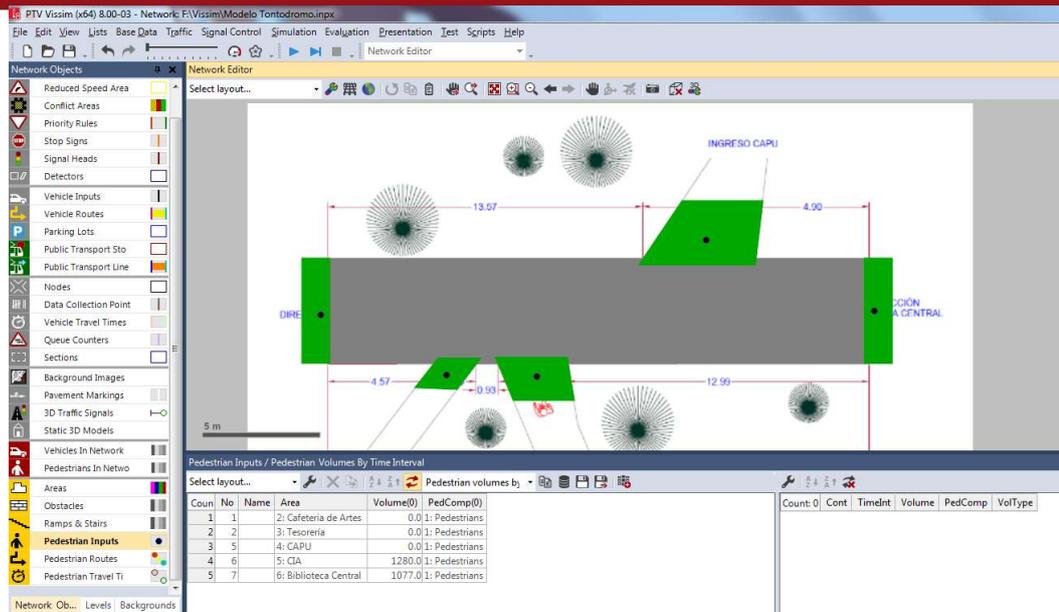


Figura 20. Implementación de geometría, rutas estáticas y flujos peatonales. Fuente: Propia.

4.3 Calibración y validación

Markowski (2008) señala que un modelo solo estará calibrado si se extrae información del mundo real a partir de las observaciones y el modelo refleja fielmente la realidad. Cuando se utiliza un programa de simulación, el modelo realizado debe ser ajustado hasta que se comporte de acuerdo a los parámetros establecidos que dictaminan si el modelo es válido o no. Para ello, los ajustes son realizados en los procesos de calibración y validación.

Para la presente investigación, se usaron los datos de volúmenes de la sección A y de la sección B, para la calibración y validación respectiva. Para la calibración, se insertaron los datos de volúmenes tomados del día 24 de marzo, se definió la Sección A y se configuró para que se registraran los resultados en esta zona.

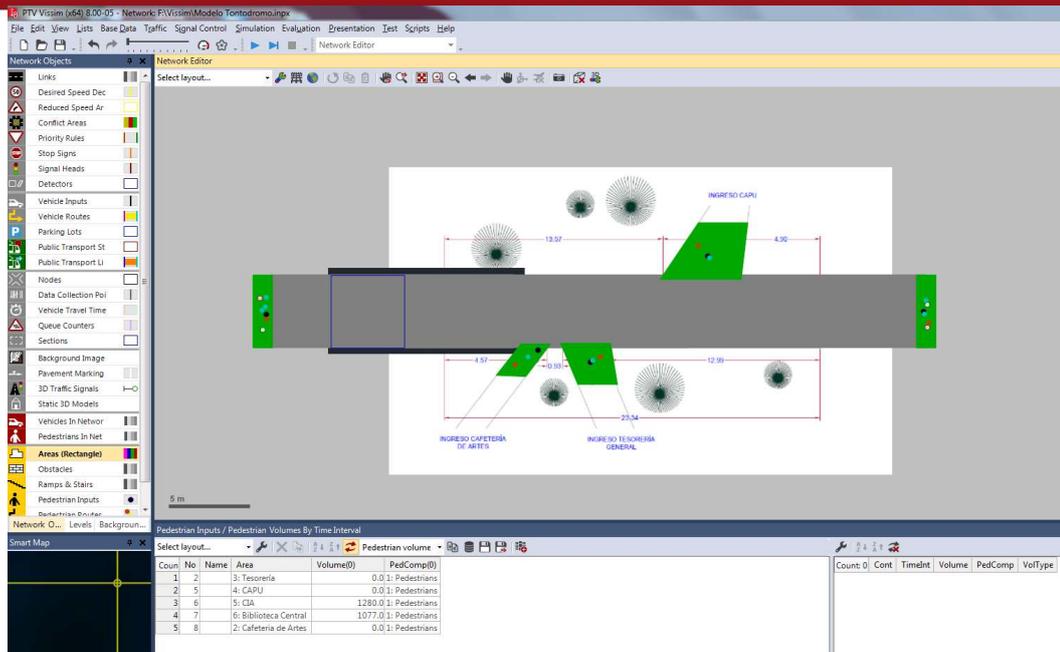


Figura 21. Definición de Sección A en el modelo. Fuente: Propia

Posteriormente, se simuló con un número de semilla 42, escogido aleatoriamente, y con un total de 20 corridas, con registro de datos desde el segundo 600 (debido al “warm up time”) hasta los 3600 segundos, tiempo total en que se tomaron los datos en la realidad.

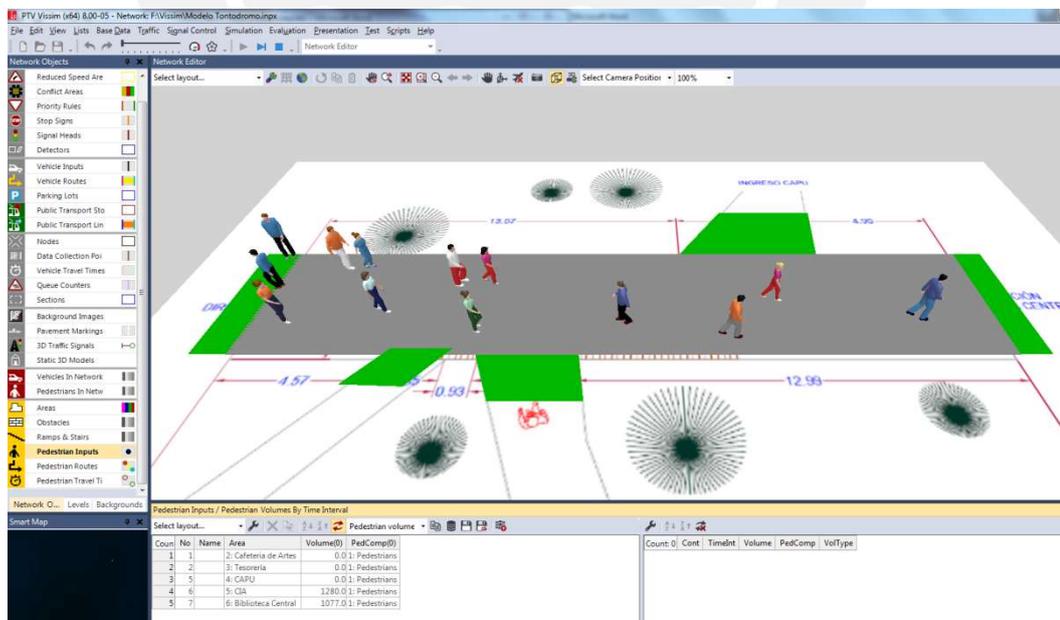


Figura 22. Simulación del modelo. Fuente: Propia

Los resultados principales a tomar en cuenta, en esta etapa, son los de las velocidades peatonales. Se extrajeron de la lista de resultados las siguientes velocidades promedios correspondientes a las 20 corridas realizadas (ver figura 12).

Tabla 12. Velocidades promedio de la Sección A obtenidas de la primera simulación. Fuente: Propia

Velocidades (km/h)	
3.63	3.69
3.7	3.72
3.68	3.69
3.64	3.68
3.72	3.69
3.67	3.67
3.7	3.67
3.69	3.69
3.68	3.68
3.68	3.72

A continuación, se procedió a emplear intervalos de confianza de las diferencias de medias, utilizando el programa online StatKey. Para ello se compararon las diferencias de medias de dos sets de datos: los obtenidos mediante la simulación con el programa Viswalk (el cual se llamará S1), y los obtenidos en la sección A (el cual se llamará S2). Para verificar que las diferencias de medias con otros sets de datos aleatorios no difieran en gran medida con la diferencia de medias de S1 y S2, se consideró 10000 permutaciones.

Se visualiza seguidamente, la gráfica del intervalo de confianza de la diferencia de medias para la calibración (ver figura 23).

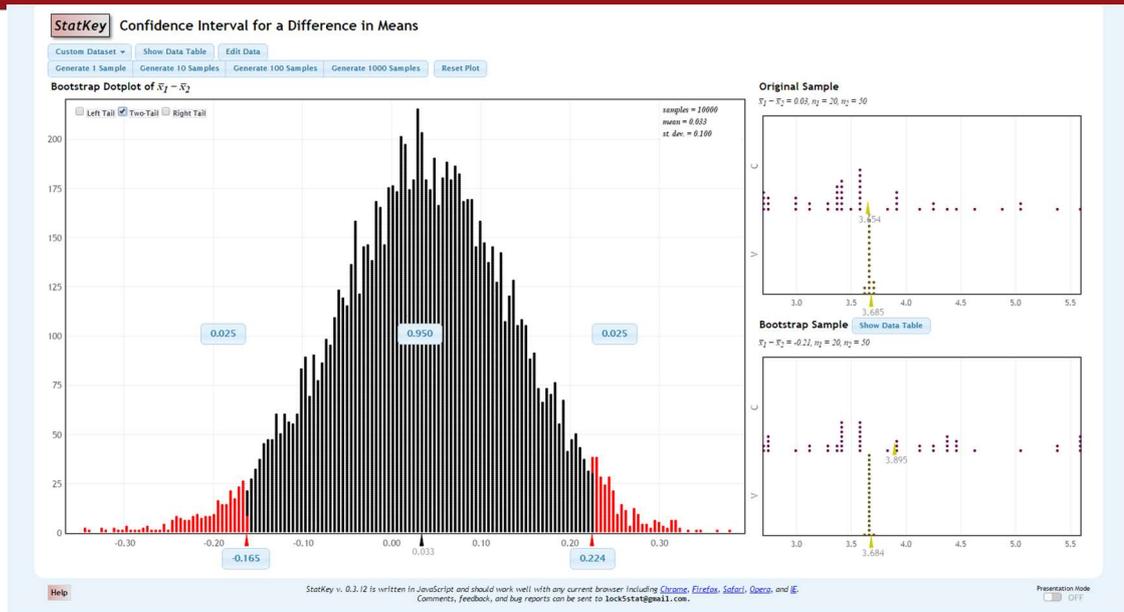


Figura 23. Gráfica del Intervalo de Confianza de la Diferencia de Medias para la Calibración. Fuente: Propia

Se observa entonces, que la diferencia de medias entre los sets mencionados anteriormente ($S1 - S2 = 0.03$) se encuentra muy cercano a la diferencia de medias entre el universo aleatorio ($X1 - X2 = -0.21$). Además, la diferencia $S1 - S2$ se encuentra en el intervalo de diferencias de medias con alto grado de confiabilidad (95%). En la figura 23, este intervalo es el coloreado de negro. Por lo tanto, se comprueba que el modelo se encuentra calibrado.

De la misma manera se realiza la validación. Esta vez, se comparan las velocidades obtenidas de la sección B con las velocidades obtenidas de una segunda simulación (ver tabla 13), realizada con un cambio en los flujos peatonales. Se debe tomar en cuenta que, al ser las velocidades medidas en la sección B, se debe crear esta misma sección en el modelo para el registro de velocidades para la validación (figura 24).

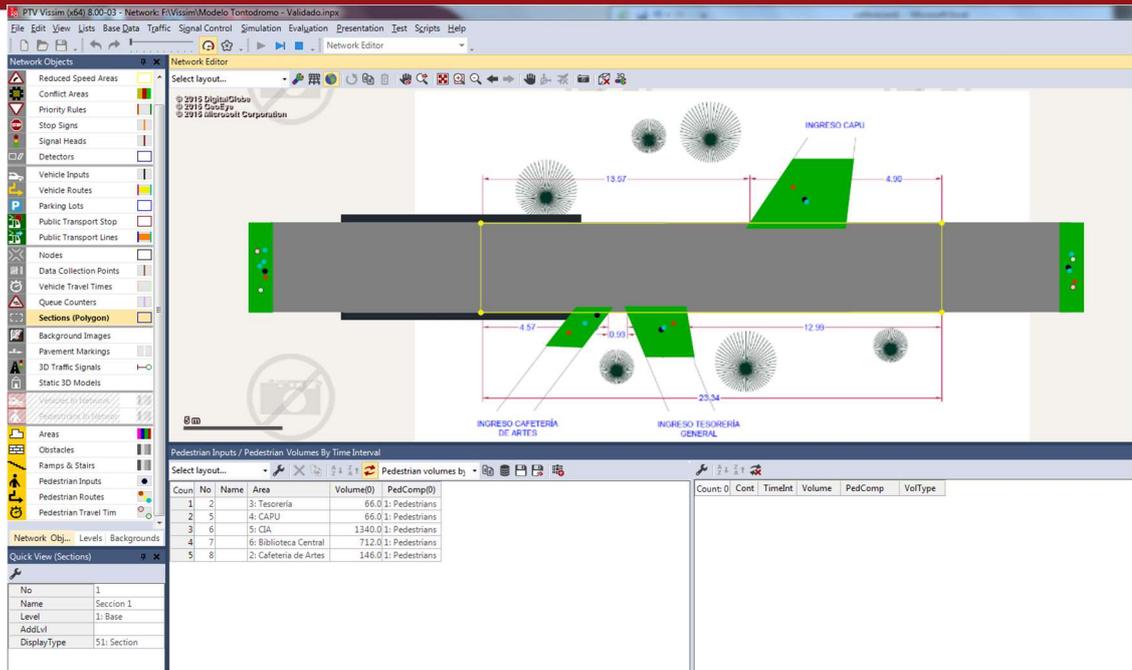


Figura 24. Definición de la sección B e ingreso de nuevos flujos peatonales para la segunda simulación. Fuente: Propia

Tabla 13. Velocidades peatonales en la sección B resultantes de la segunda simulación. Fuente: Propia

Velocidades (km/h)	
3.66	3.69
3.7	3.72
3.67	3.68
3.67	3.68
3.72	3.68
3.68	3.65
3.69	3.66
3.7	3.67
3.65	3.65
3.67	3.69

Estos datos nuevamente caen en el intervalo de confianza que se considera aceptable (95%), por lo que se determina que el modelo también se encuentra validado. Ver figura 25.

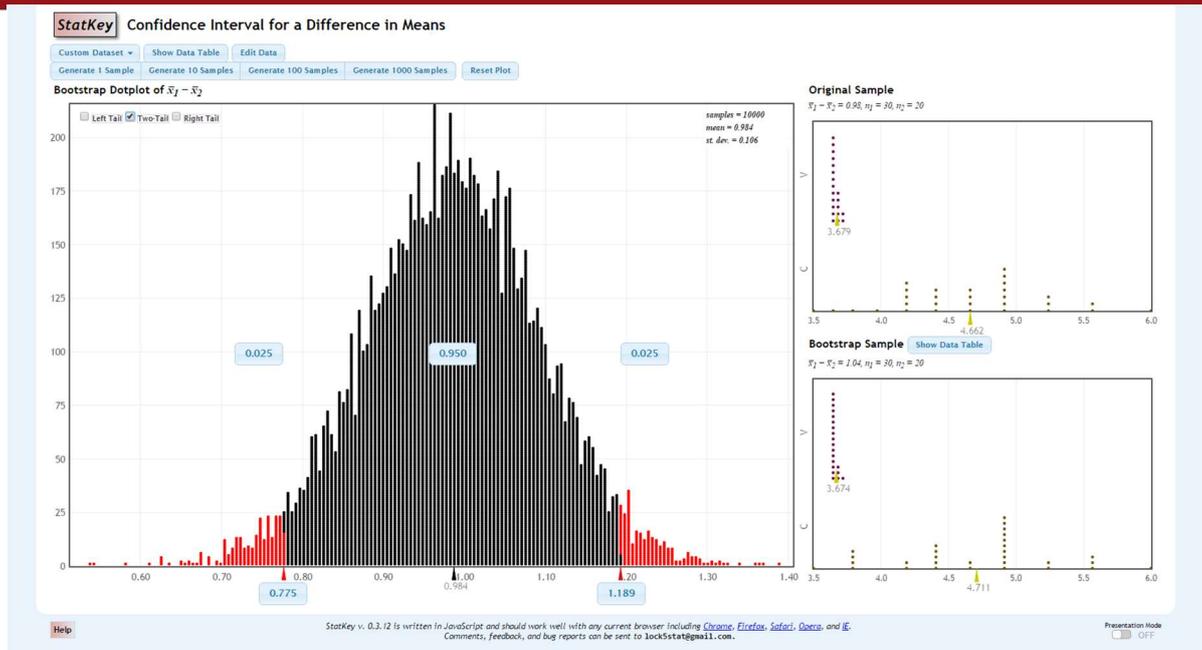


Figura 25. Gráfica del Intervalo de Confianza de la Diferencia de Medias para la Validación. Fuente: Propia

4.4 Generación del modelo macroscópico a partir de la micro-simulación

Se define a la simulación como el proceso de diseñar un modelo matemático o lógico de un sistema real, y realizar una serie de experimentos, haciendo uso del ordenador, para describir, explicar y predecir el comportamiento en la realidad (Bieda, 2012).

En general, una vez que el modelo de micro simulación se encuentre calibrado y validado, se procede a utilizarlo para determinar el modelo macroscópico. Para ello, se modificaron los flujos peatonales para simular el modelo 27 veces. Para cada simulación se realizaron 20 corridas del modelo y se realizaron las mismas configuraciones que en la calibración para que se registren, en cada caso, la velocidad y densidad promedio correspondientes en la sección B.

Los flujos peatonales fueron modificados mediante la multiplicación de los flujos usados para la calibración (registrados por cada ingreso en la sección B), por factores que incrementaran dichos volúmenes. Al usarse estos flujos peatonales, la presencia de más de dos entradas y/o salidas significaría que no se esté presentando un flujo continuo.

Como últimas consideraciones, se señala que el número semilla y los intervalos de registro de información fueron los mismos a los usados en las etapas de calibración y validación.

Los diversos flujos peatonales ingresados se presentan en las tablas proporcionadas a continuación (tabla 14, tabla 15, tabla 16, tabla 17, tabla 18 y tabla 19).

Tabla 14. Flujos para la Simulación. Fuente: Propia

	Calibración	Simulación 1	Simulación 2	Simulación 3	Simulación 4
CIA - Biblioteca Central	1340	2680	5360	10720	4020
Biblioteca Central - CIA	712	1424	2848	5696	2136
CAPU - Av. Dintilhac	66	132	264	528	198
Tesorería - Av. Dintilhac	66	132	264	528	198
Cafetería de Artes - Av. Dintilhac	146	292	584	1168	438

Tabla 15. Flujos para la Simulación. Fuente: Propia

	Simulación 5	Simulación 6	Simulación 7	Simulación 8	Simulación 9
CIA - Biblioteca Central	6700	8040	2010	3350	4690
Biblioteca Central - CIA	3560	4272	1068	1780	2492
CAPU - Av. Dintilhac	330	396	99	165	231
Tesorería - Av. Dintilhac	330	396	99	165	231
Cafetería de Artes - Av. Dintilhac	730	876	219	365	511

Tabla 16. Flujos para la Simulación. Fuente: Propia

	Simulación 10	Simulación 11	Simulación 12	Simulación 13	Simulación 14
CIA - Biblioteca Central	6030	4958	5628	5226	5762
Biblioteca Central - CIA	3204	2634	2990	2777	3062
CAPU - Av. Dintilhac	297	244	277	257	284
Tesorería - Av. Ditlihac	297	244	277	257	284
Cafetería de Artes - Av. Ditlihac	657	540	613	569	628

Tabla 17. Flujos para la Simulación. Fuente: Propia

	Simulación 15	Simulación 16	Simulación 17	Simulación 18	Simulación 19
CIA - Biblioteca Central	6298	6566	6432	6834	6164
Biblioteca Central - CIA	3346	3489	3418	3631	3275
CAPU - Av. Dintilhac	310	323	317	337	304
Tesorería - Av. Ditlihac	310	323	317	337	304
Cafetería de Artes - Av. Ditlihac	686	715	701	745	672

Tabla 18. Flujos para la Simulación. Fuente: Propia

	Simulación 20	Simulación 21	Simulación 22	Simulación 23	Simulación 24
CIA - Biblioteca Central	5896	5829	5963	5923	5869
Biblioteca Central - CIA	3133	3097	3168	3147	3119
CAPU - Av. Dintilhac	290	287	294	292	289
Tesorería - Av. Ditlihac	290	287	294	292	289
Cafetería de Artes - Av. Ditlihac	642	635	650	645	640

Tabla 19. Flujos para la Simulación. Fuente: Propia

	Simulación 25	Simulación 26	Simulación 27
CIA - Biblioteca Central	6097	6137.2	9380
Biblioteca Central - CIA	3240	3261	4984
CAPU - Av. Dintilhac	300	302	462
Tesorería - Av. Ditlihac	300	302	462
Cafetería de Artes - Av. Ditlihac	664	669	1022

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

En el presente capítulo, se analizarán los resultados obtenidos después de realizar la simulación del modelo de estudio. Cada una de las 27 simulaciones fueron corridas 20 veces; es decir, en total se realizaron 540 corridas en el software. De la serie de datos que se obtuvieron por cada simulación, se rescataron tan solo los resultados de densidad y velocidad promedio, los cuales son las variables macroscópicas que se deseaban encontrar para la evaluación de la Av. Dintilhac.

En la tabla 20 se muestran los resultados de densidad y velocidad obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas, y se incluye también los resultados obtenidos en la calibración.

Tabla 20. Resultados de densidad y velocidad para los diferentes flujos peatonales. Fuente: Propia

	Densidad (p/m ²)	Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)		Densidad (p/m ²)	Velocidad (km/h)	Velocidad (m/s)
Calibración	0.14	3.69	1.03	Simulación 14	0.63	3.05	0.85
Simulación 1	0.13	3.69	1.03	Simulación 15	0.89	2.74	0.76
Simulación 2	0.28	3.49	0.97	Simulación 16	2.77	1.11	0.31
Simulación 3	0.65	3.02	0.84	Simulación 17	2.07	2.27	0.63
Simulación 4	4.47	0.49	0.14	Simulación 18	3.17	0.84	0.23
Simulación 5	0.44	3.284	0.92	Simulación 19	4.09	0.5	0.14
Simulación 6	4.11	0.5	0.14	Simulación 20	3.84	0.53	0.15
Simulación 7	4.35	0.48	0.13	Simulación 21	4.23	0.49	0.14
Simulación 8	0.2	3.59	1.00	Simulación 22	1.01	2.57	0.71
Simulación 9	0.36	3.39	0.94	Simulación 23	1.92	1.9	0.53
Simulación 10	0.54	3.17	0.88	Simulación 24	2.19	2.26	0.63
Simulación 11	1.79	1.96	0.54	Simulación 25	1.31	2.42	0.67
Simulación 12	0.58	3.11	0.86	Simulación 26	2.29	1.47	0.41
Simulación 13	0.87	2.84	0.79	Simulación 27	2.44	1.43	0.40

5.1 Diagrama fundamental en la Av. Dintilhac y ajustes de tendencia

Las densidades y velocidades obtenidas con el programa Viswalk 8.0, se graficaron en un diagrama de dispersión para poder obtener el diagrama fundamental (ver figura 26), el cual muestra la relación entre ambas variables para su posterior análisis.

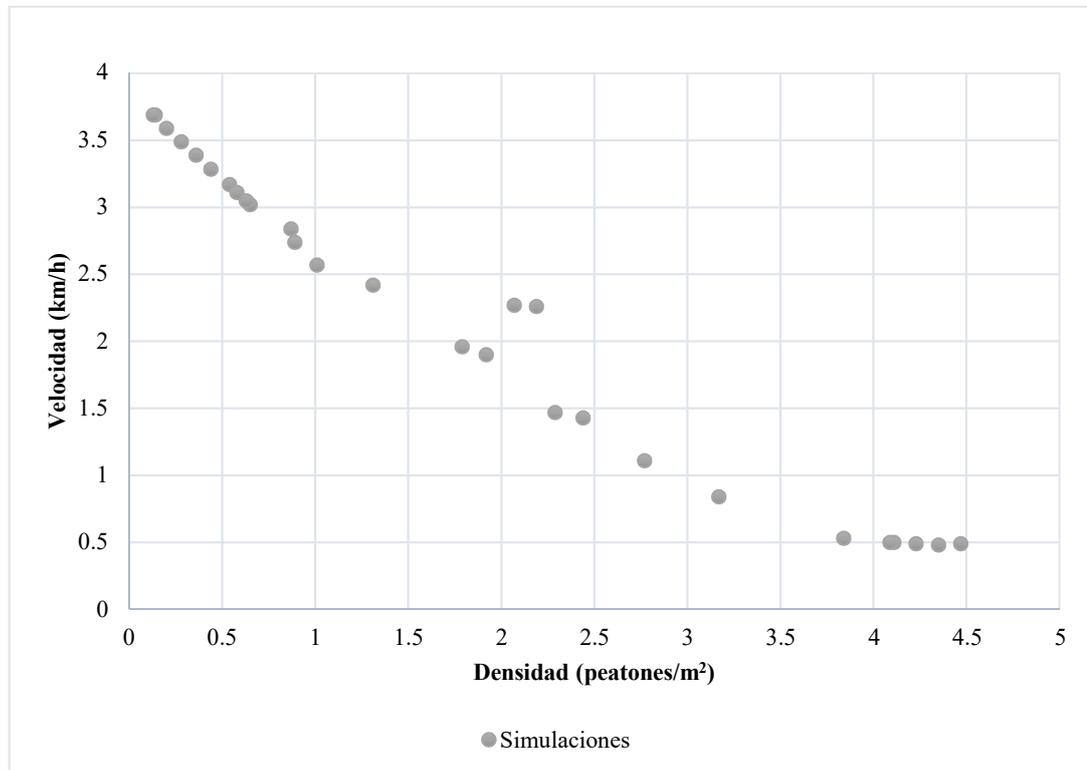


Figura 26. Diagrama Fundamental de la Av. Dintilhac. Fuente: Propia

A continuación, se analizó cual línea de tendencia describe mejor los puntos graficados en el diagrama fundamental para, de esta forma, hallar una ecuación que relacione ambas variables velocidad (v) versus densidad (ρ). La ecuación que se halle será una predicción de lo que pudiera suceder en la realidad, y la calidad de esta predicción será determinada por la intensidad de la covariación entre ambas variables. Una medida de la fortaleza de la ecuación es el coeficiente de determinación (R^2), cuyo objetivo es determinar la calidad del modelo para replicar los resultados y la proporción de variación de la variable Y explicada por la variable X. Los valores de este coeficiente pueden variar de 0 a 1: si R^2 es igual a 0, quiere decir que la variable X tiene nula capacidad de predecir la variable Y; y si el valor de R^2 llegara a ser 1, la variable X explicaría cabalmente la variación de Y sin errores.

Es así que se aplicaron al diagrama tres tipos de líneas de tendencia: ajuste lineal, ajuste exponencial y ajuste logarítmica. Los coeficientes de determinación respectivos a cada ajuste se muestran en la tabla 21 para las comparaciones necesarias.

Tabla 21. Coeficientes de determinación para diferentes líneas de tendencia. Fuente: Propia

Línea de tendencia	R ²
Exponencial	0.9668
Lineal	0.9671
Logarítmica	0.895

Por lo tanto, de acuerdo a lo explicado con anterioridad, se determina que el ajuste tipo lineal es el que se debe usar para representar las variaciones en el flujo peatonal en la Av. Dintilhac, ya que es la tendencia cuyo R² es más próximo a la unidad.

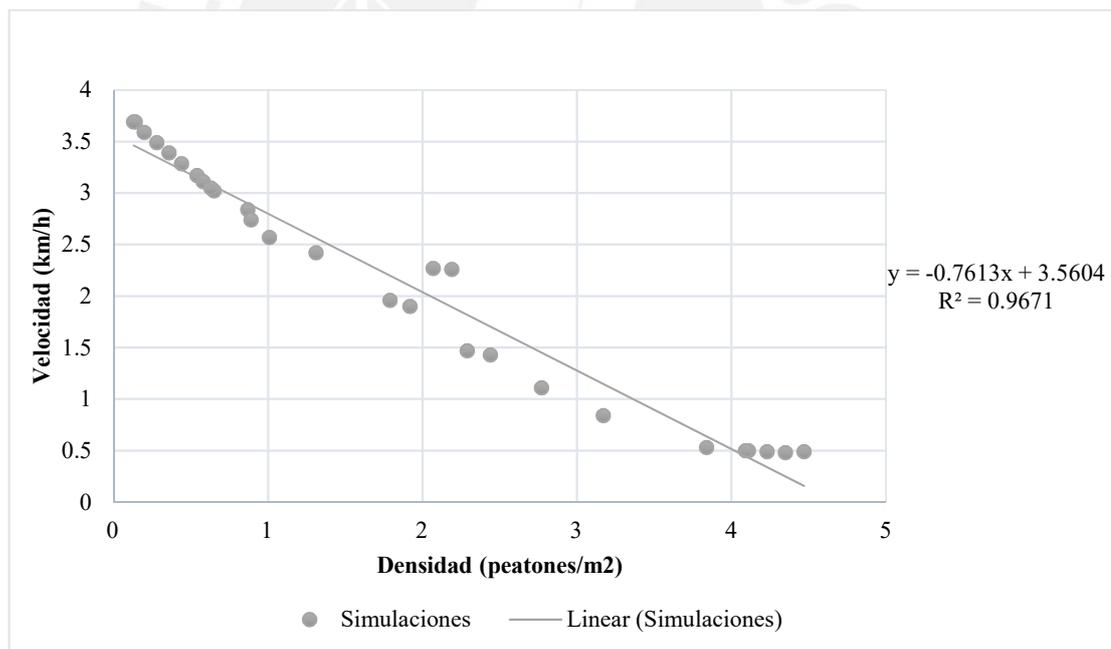


Figura 27 Diagrama fundamental con línea de tendencia lineal. Fuente: Propia

En consecuencia, la expresión que representa la variación de la velocidad (km/h) en función a la densidad peatonal (p/m^2) es la siguiente:

$$v = -0.7613\rho + 3.5604 \quad (15)$$

Luego, en la ecuación 14 se igualaron a 0 tanto la velocidad como la densidad, para determinar los valores máximos de cada variable en la Av. Dintilhac. En consecuencia, se halló que la velocidad máxima es $v_{\max}=3.56$ km/h o $v_{\max}=0.989$ m/s, y la máxima densidad es $\rho_{\max}=4.68$ p/m^2 .

Es importante resaltar que, al haberse incluido flujos extras que ingresaban al sistema provenientes de las diferentes entradas en la sección B en estudio, en teoría ya no se presentaría un flujo continuo. Sin embargo, los flujos extras no tienen mayor efecto en el modelo, no interfieren de gran manera en el modelamiento del desplazamiento peatonal pues los resultados son semejantes a los que se obtienen en la sección A (la cual presenta un flujo netamente continuo) y, al igual que en estudios previos, se puede representar fielmente el desplazamiento mediante una ecuación lineal

5.2 Descripción del flujo peatonal en la Av. Dintilhac

El parámetro que permite un mayor y mejor análisis del tráfico peatonal, en secciones de estudio como la presentada en la actual investigación, es el del flujo peatonal (q). Análogamente a la teoría de los fluidos dinámicos, es posible inferir esta variable mediante la multiplicación de la velocidad y la densidad, cuya relación entre ambos ya ha sido hallada con anterioridad. Consecuentemente, se determinó que el flujo peatonal ($p/m/h$) en la vía es una ecuación tipo cuadrática y es dada en función a la densidad (p/m^2):

$$q = -761.3\rho^2 + 3560.4\rho \quad (16)$$

Así mismo, se puede describir el flujo peatonal en función al módulo de área (M):

$$q = -761.3/M^2 + 3560.4/M \quad (17)$$

Para poder determinar la máxima capacidad en la Av. Dinilihac, se derivó la ecuación 18 del flujo peatonal, con lo cual se halló que el máximo flujo que soporta la vía se presenta cuando la densidad es igual a $\rho=2.34$ peatones/ m^2 . Con el reemplazo de esta

variable en la ecuación, se obtuvo que $q_{\max}=4163$ p/h/m, valor que se encuentra muy por encima del flujo que se da en la actualidad, ya que representa poco menos que el cuádruple de los flujos registrados en la actualidad, si se toma en cuenta el flujo por hora, el cual es 1236 p/h/m (resultado del promedio de las mediciones en la sección A y en la sección B). Sin embargo, es posible apreciar que, en intervalos más cortos de tiempos, se pueden llegar a registrar flujos peatonales mayores. Tal es el caso que se presenta en intervalos de 10 minutos, en los cuales se pudo notar que un flujo peatonal promedio (en las secciones A y B) de 521 p/10 min/m, es equivalente a 3126 p/h/m. Para este escenario, la brecha se acorta drásticamente, pero aún hace falta cerca del 25% del flujo máximo para llegar a la condición crítica. En cualquier caso analizado, se deduce que aún hay una brecha considerable para llegar al flujo peatonal máximo en la Av. Dintilhac, inclusive si se considera el peor escenario. Es importante recalcar las mediciones se realizaron durante solo dos horas distribuidos en distintos días, lo cual es una limitación en la investigación. Es preciso realizar más mediciones para poder tener un análisis con mayor precisión acerca del estado actual de la Av. Dintilhac.

Es importante recalcar lo que significaría llevar al flujo máximo en el presente caso. Como el flujo máximo (representado en otras unidades) es de 2 p/s/m, esto se puede interpretar que, en un segundo, dos peatones deben atravesar una zona de un 1m. Si se toma en cuenta que el ancho de cuerpo de un peatón promedio es de 0.60 m., el ancho mínimo requerido para que dos personas atravesen una zona es de 1.20 m. En casos extremos como los que se presentan para el flujo máximo, las burbujas espaciales no se respetan, es decir, se modifica la forma en que el peatón se desplaza con personas a su alrededor, pues acepta que los demás peatones invadan su espacio personal.

La gráfica del flujo peatonal vs. densidad (ver figura 28) resulta ser una parábola invertida y se puede apreciar con claridad la relación entre estas dos variables. El máximo flujo en la vía es el punto representado por el vértice de la parábola, y es posible visualizar claramente las diferencias entre los flujos actuales y el flujo máximo.

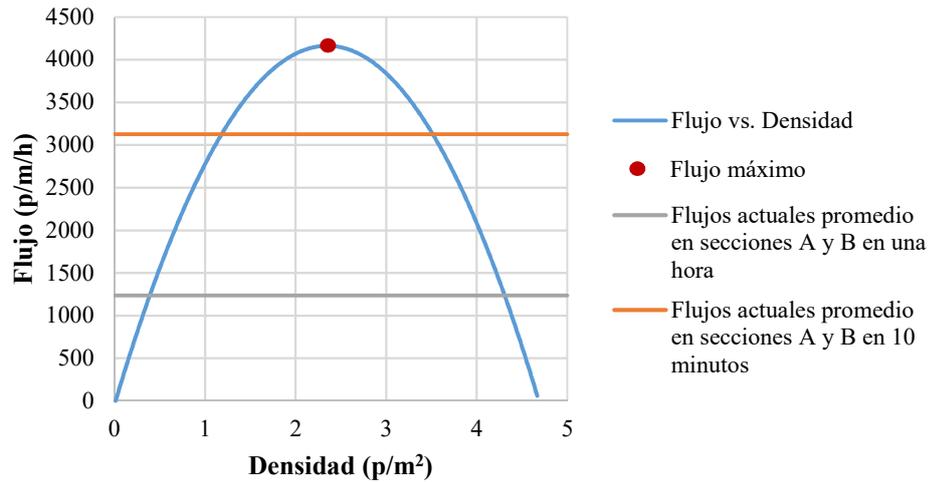


Figura 28. Gráfica del flujo peatonal vs. densidad en la Av. Dintilhac. Fuente: Propia

Con estos resultados y con el despeje de las ecuaciones 15 y 17, el módulo de área que le corresponde al máximo flujo en la Av. Dintilhac es $M=0.43 \text{ m}^2/\text{peatón}$ y la velocidad resulta ser $v=1.78 \text{ km/h}$. Se puede entonces inferir mediante la gráfica, que la densidad va en aumento conforme el flujo peatonal incrementa hasta llegar al flujo máximo. En este punto, la densidad sigue en aumento, pero ya el flujo disminuye a causa de las dificultades que se presentan en el desplazamiento, con lo que se impide que las personas se trasladen y se generen atascos.

La densidad apreciada en campo no es excesiva y permite un desplazamiento medianamente libre. Por lo tanto, nos encontramos aproximadamente en la primera intersección, tanto en las observaciones en intervalos de una hora como en la de 10 minutos, con densidades de 0.38 p/m^2 y 1.17 p/m^2 respectivamente (ver figura 28).

Otra forma de evaluar el desempeño de la vía, es mediante la relación de la velocidad vs. el flujo peatonal (ver figura 29). En esta gráfica, se puede apreciar que cuando el flujo peatonal es 0, la velocidad del peatón es la máxima ($v=3.56 \text{ km/h}$). El peatón entonces, se desplaza a mayor velocidad cuando se encuentra con menor cantidad de interferencias. Conforme el flujo aumenta, como es de esperar, la velocidad disminuye por los obstáculos que se presentan en el camino del peatón. El flujo aumenta hasta llegar a su punto máximo, momento en el cual empieza a decrecer por las altas congestiones que impiden que los peatones circulen. En esta etapa, la velocidad sigue decreciendo.

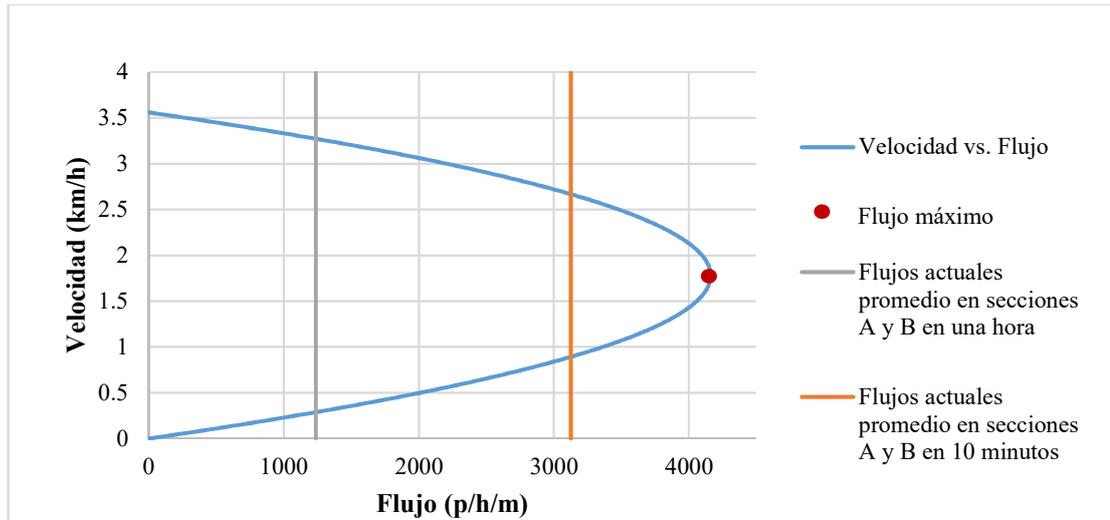


Figura 29. Gráfica de la velocidad vs. flujo en la Av. Dintilhac. Fuente: Propia

La grafica anterior también muestra el estado actual para la visualización de la brecha existente entre esta etapa y el punto máximo. Por observación en el campo, se puede inferir que la velocidad actual, observada en intervalos de una hora y 10 minutos, es la de la intersección superior ($v=3.25$ km/h y $v=2.67$ km/h respectivamente), lo cual concuerda aproximadamente con las velocidades tomadas en la recolección de datos. Esto comprueba lo hallado analíticamente. Las variaciones y diferencias que se encuentra, se deben al ajuste que hizo a un comportamiento de tipo lineal.

La figura mostrada a continuación (figura 30), la cual relaciona el flujo peatonal y el módulo de área, demuestra que cada peatón dispone de mayor área para su desplazamiento cuando el flujo peatonal es menor. A medida que aumenta el flujo peatonal, esta área disminuye paulatinamente hasta llegar al flujo peatonal límite, a partir del cual el módulo de área decrece dramáticamente a causa de la imposibilidad de desplazamiento. El módulo de área correspondiente a este punto máximo, como ya se mencionó con anterioridad, es de 0.43 m²/p. Por observaciones en el campo, el módulo de área actual es el de la segunda intersección en la gráfica, el cual es de 2.65 m²/peatón para el intervalo de una hora, y 0.85 m²/peatón para el intervalo de 10 minutos.

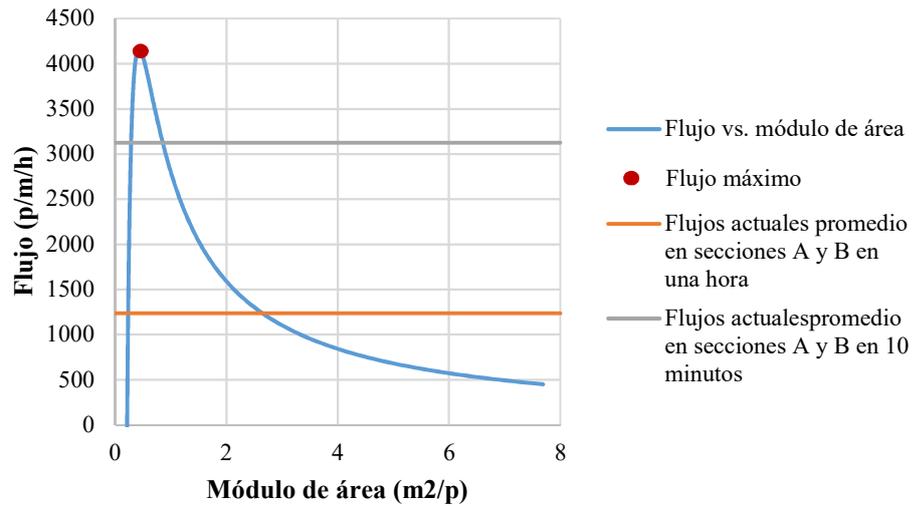


Figura 30. Gráfica del flujo peatonal vs. módulo de área en la Av. Dintilhac. Fuente: Propia

Por último, en la figura de la velocidad vs. el módulo de área, se puede apreciar que la velocidad es casi constante hasta un módulo de área de aproximadamente $4 \text{ m}^2/\text{peatón}$. Luego, la velocidad empieza a decrecer gradualmente hasta el módulo correspondiente al flujo máximo, tras lo cual la velocidad decrece casi de manera proporcional al módulo de área. El estado actual del flujo peatonal de la vía en estudio, se encuentra en la segunda zona descrita, donde de forma progresiva las velocidades decrecen. Esto sugiere que a medida que el área por peatón incrementa, éste factor influye cada vez menos a la velocidad promedio de los peatones.

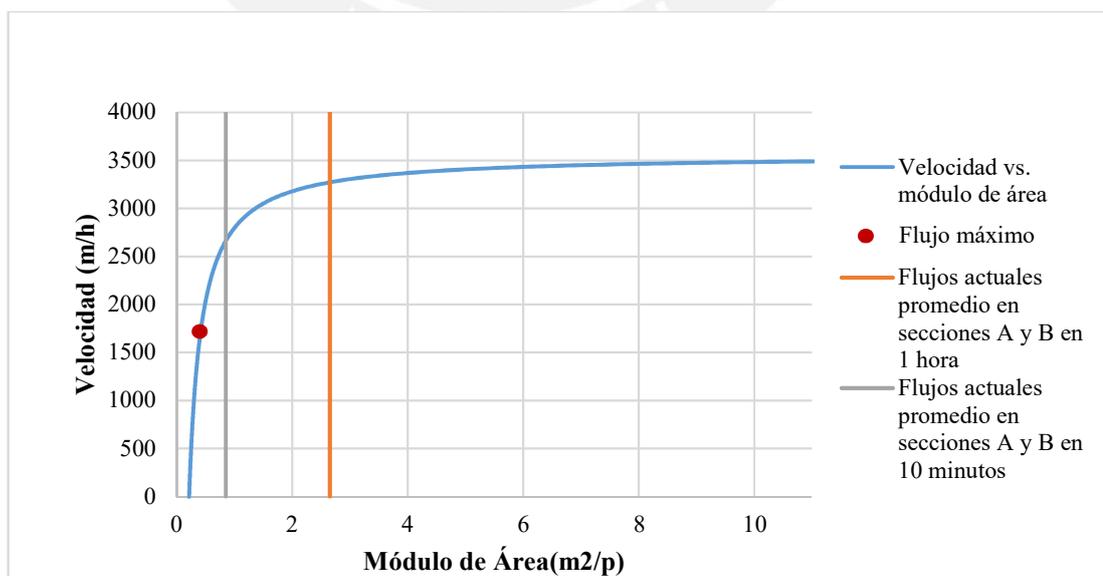


Figura 31. Gráfica de la velocidad vs. módulo de área. Fuente: Propia

5.3 Comparación del flujo peatonal en la Av. Dintilhac con estudios peatonales previos

En primer lugar, se comparó el diagrama fundamental obtenido en la presente investigación con los obtenidos en otros estudios (ver figura 32). Como se puede apreciar, el diagrama fundamental hallado en otros estudios muestra velocidades considerablemente mayores a las obtenidas en nuestro caso de estudio. Sin embargo, se debe considerar que los resultados concernientes a las velocidades del caso de estudio actual, se acercan más a los datos provenientes del estudio de Helbing et. al. (2007) que a los de los demás autores. Esto se puede justificar debido a que algunos estudios se han realizado en zonas de paso, es decir, en donde los transeúntes circulan en lugares públicos para llegar a algún destino (trenes, centros laborales, etc.). En algunos casos, estos lugares constituían cuellos de botella para el tránsito peatonal. En consecuencia, el desplazamiento era una herramienta para realizar otra actividad determinada diferente al de caminar y, por lo tanto, el transeúnte se desplaza con mayor celeridad.

Por otro lado, las densidades máximas mostradas en la figura 33 varían en grandes proporciones a las obtenidas en nuestra investigación. De la misma forma, se explica debido a que, en las zonas en estudio, al no tener fines recreacionales sino meramente utilitarias, el peatón tiende a aceptar mayores densidades a coste del confort.

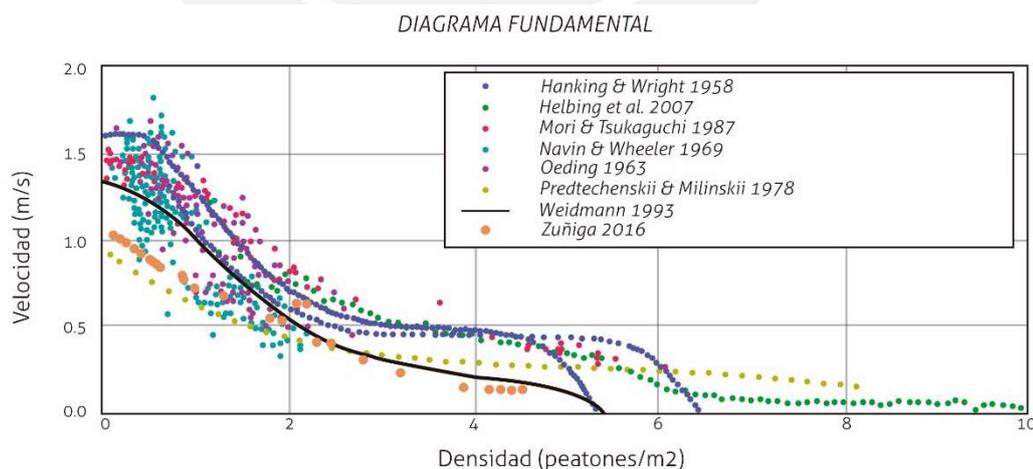


Figura 32. Comparación entre estudios previos y el actual. Fuente: Propia

Los diagramas fundamentales se han aproximado anteriormente a líneas de tendencia para poder realizar estudios del desplazamiento peatonal. Kretz et. al. (2015) explican en su investigación, que la mejor forma de aproximarlos funciones circulares (también es posible aplicar una función elipsoidal) que tengan un punto de inflexión con curvatura igual a 0 (ver figura 34). En este caso, se debe tomar en cuenta que las curvaturas son distintas a diferentes velocidades y densidades. Lo explicado anteriormente se puede apreciar también en el diagrama fundamental del presente estudio (ver figura 28).

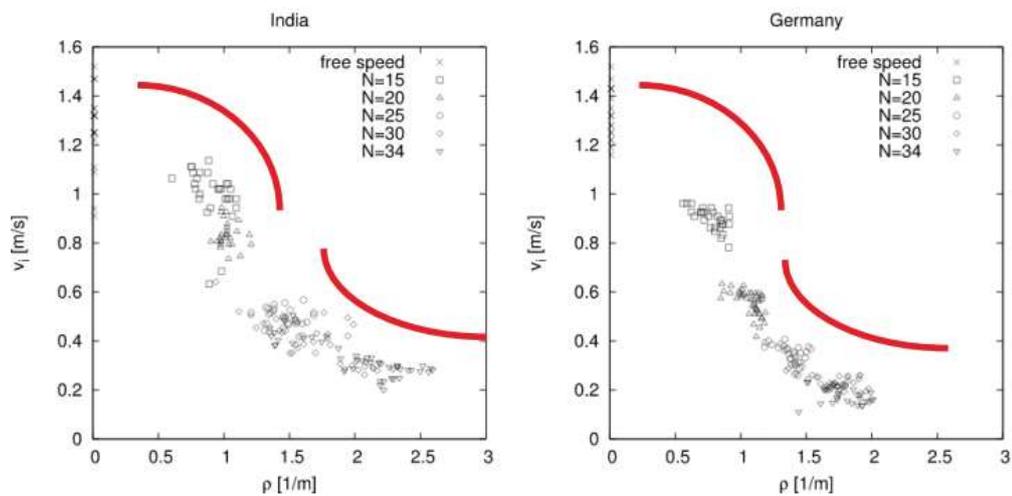


Figura 33. Líneas de tendencia para la relación velocidad vs. densidad. Fuente: Kretz et. al (2015)

Sin embargo, al igual que en la investigación realizada por Al-Azzawi (2004), la línea de tendencia usada es lineal. Esta tendencia también se ajusta, con alto grado de fiabilidad, a los puntos graficados en la dispersión, además de ser práctico para el posterior estudio del desplazamiento peatonal. Se puede apreciar en la figura 34 las líneas de tendencia presentadas en la investigación de Al-Azzawi (2004). Cabe recalcar que los gráficos son compatibles con las teorías que se basan en la metodología del HCM (2000).

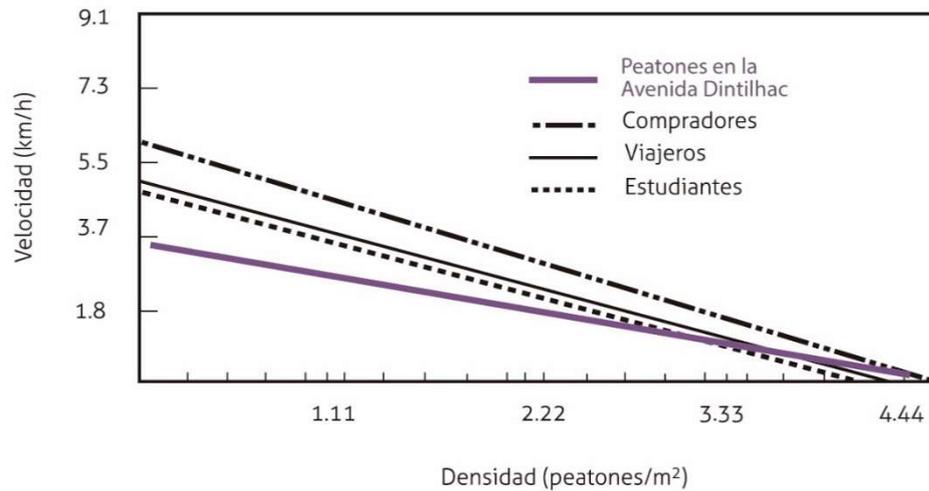


Figura 34. Teoría establecida de la relación velocidad vs. densidad. Adaptado de Pushkarev y Zupan (1975)

Al igual que en la presente investigación, la relación velocidad vs. densidad se ajusta a una ecuación lineal. La velocidad promedio máxima en la avenida Dintilhac, resultado del ajuste lineal realizado, no concuerda con los hallados por Pushkarev y Zupan (1975) para el caso de los peatones estudiantes (mayor a $v=5.5$ km/h). En realidad, en la Av. Dintilhac las velocidades son significativamente menores a cualquier velocidad mostrada, en las cuales las diferencias pueden llegar a ser hasta de un 22%. Si bien en el estudio previo se hicieron observaciones específicas a estudiantes, estas se realizaron para comparar el efecto de las características físicas en contraste a los demás tipos de peatones, y la manera en que influyen sus respectivos objetivos de desplazamiento. Para los 4 grupos de peatones presentados por Pushkarev y Zupan, el desplazamiento es una herramienta para lograr un objetivo; lo cual difiere del estudio de los alumnos en la Av. Dintilhac, para los cuales el caminar puede constituir un fin propiamente dicho, al ser considerado una actividad social y recreacional.

Cabe considerar que las densidades se acercan más a los datos hallados, en la cual la densidad máxima en la vía de estudio es aproximadamente un 5% mayor a lo que se gráfica correspondiente a los estudiantes de los estudios previos.

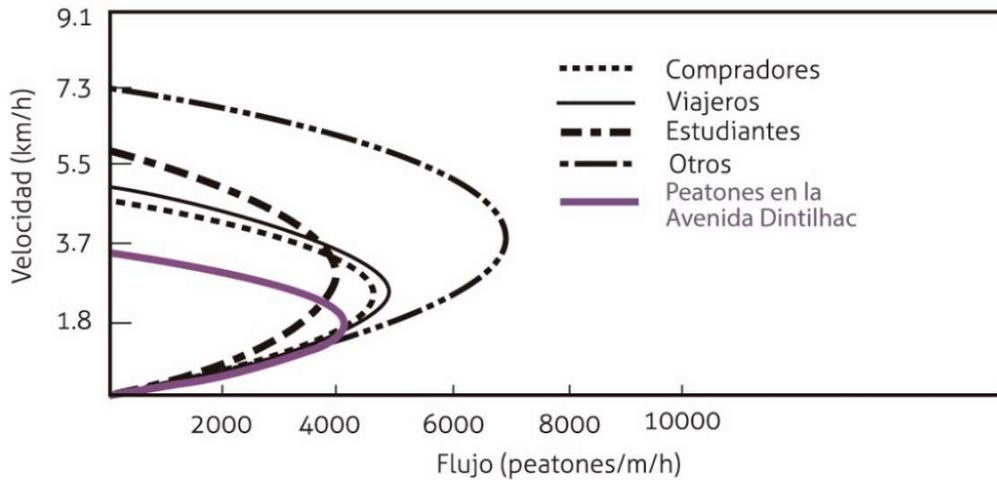


Figura 35. Teoría establecida de la relación velocidad vs. flujo peatonal. Adaptado de Pushkarev y Zupan (1975)

Asimismo, se hizo la comparación de los flujos peatonales máximos de diferentes tipos de peatones. Este valor se obtuvo de las relaciones de velocidad vs. flujo peatonal. En la figura 36, se observa que los flujos peatonales máximos son similares a los obtenidos de la av. Dintilhac (con excepción de aquellos estudios concernientes a peatones denominados como “otros”), tan solo se puede aproximar una variación de 6%.

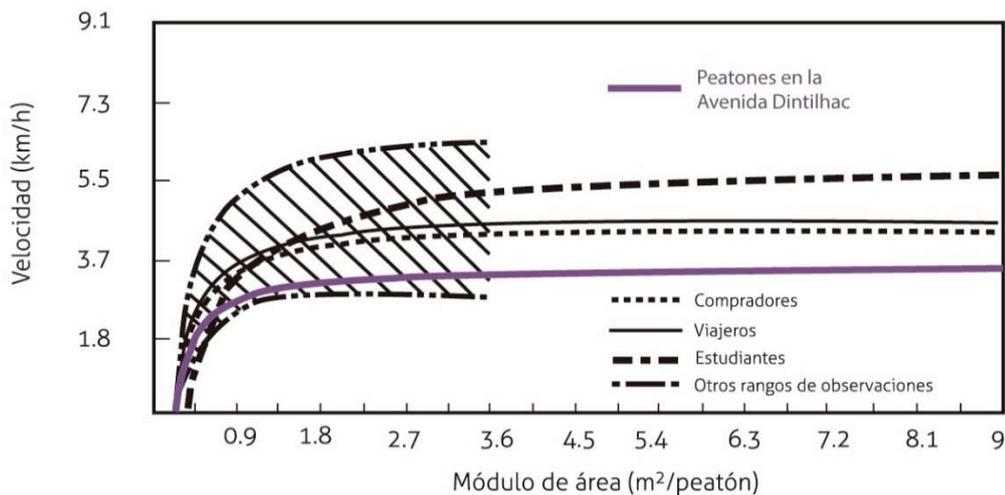


Figura 36. Teoría establecida para la relación velocidad vs. módulo de área. Adaptado de Pushkarev y Zupan (1975)

Con respecto a la gráfica velocidad vs. módulo de área (ver figura 37), se aprecia que la gráfica se asemeja la hallada para la Av. Dintilhac. En esta ocasión, es importante resaltar que, a partir del módulo de área igual a $4 \text{ m}^2/\text{peatón}$, en ambas investigaciones, la velocidad no se ve influenciada por el incremento de este parámetro y, de la misma

forma, el módulo de área que les corresponde al máximo flujo permitido, es aproximadamente de $0.45 \text{ m}^2/\text{peatón}$.

Por último, se analiza la gráfica presentada en el HCM (2000), la cual muestra la relación entre el flujo peatonal y el módulo de área desarrollado por Fruin (1971). Con ello, se verifica que la forma de la gráfica es similar a la obtenida en nuestra investigación y, consecuentemente, los valores también son semejantes.

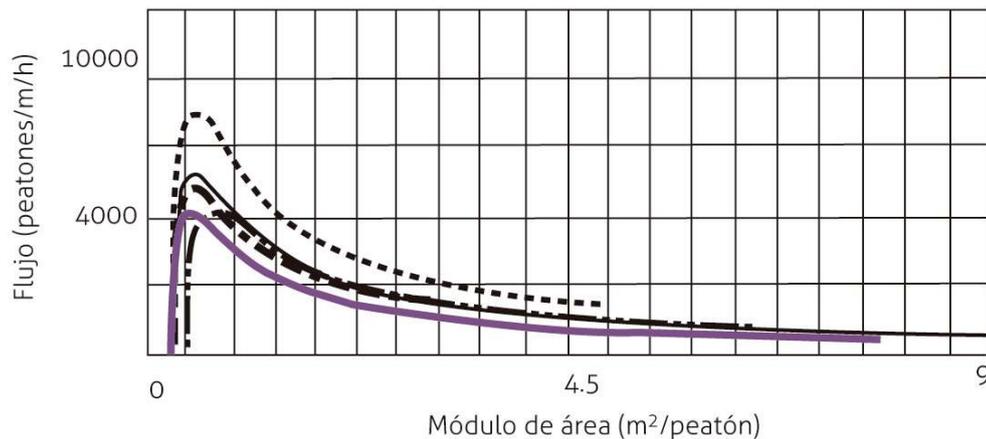


Figura 37. Relación gráfica de flujo peatonal vs. módulo de área. Adaptado de Fruin (1971)

En otro estudio realizado por Tanaboriboon et.al. (1989) en la ciudad de Bangkok, también se determinó que las ecuaciones que mejor describe la relación entre la velocidad y la densidad, y la ecuación del flujo peatonal en las vías peatonales de esta ciudad, son las mostradas a continuación:

$$v = 4.371 - 0.788\rho \quad (18)$$

$$q = 4371\rho - 788\rho^2 \quad (19)$$

En consecuencia, se obtiene que la densidad es de $\rho=2.77 \text{ peatones/m}^2$ para un flujo peatonal máximo de $q_{\text{max}}=6061 \text{ peatones/m/h}$ y con una velocidad igual $v=2.19 \text{ km/h}$. Así mismo, las velocidades y densidades máximas obtenidas son $v_{\text{max}}=4.37 \text{ km/h}$ y $\rho_{\text{max}}=5.55 \text{ peatones/m}^2$. En cuanto al módulo de área correspondiente al máximo flujo peatonal, este es $M=0.36 \text{ m}^2/\text{peatón}$. Estos valores son mayores a los obtenidos en la Av. Dintilhac, a excepción del módulo de área que, en consecuencia, debe ser menor. Esto puede explicarse si se toma en consideración que las vías en estudio en Bangkok fueron vías peatonales públicas, en calles o avenidas importantes, por lo cual los

desplazamientos son más veloces y pueden soportar mayores densidades. Además, factores externos, que son considerados como microscópicos, pueden ser los que afecten estos parámetros.

Finalmente, en la siguiente gráfica se observa la relación de flujo vs. módulo de área, pero esta vez se superponen los niveles de servicio recomendados en la HCM (2000). Las líneas verticales determinan los límites de cada nivel expuestos en dicho manual.

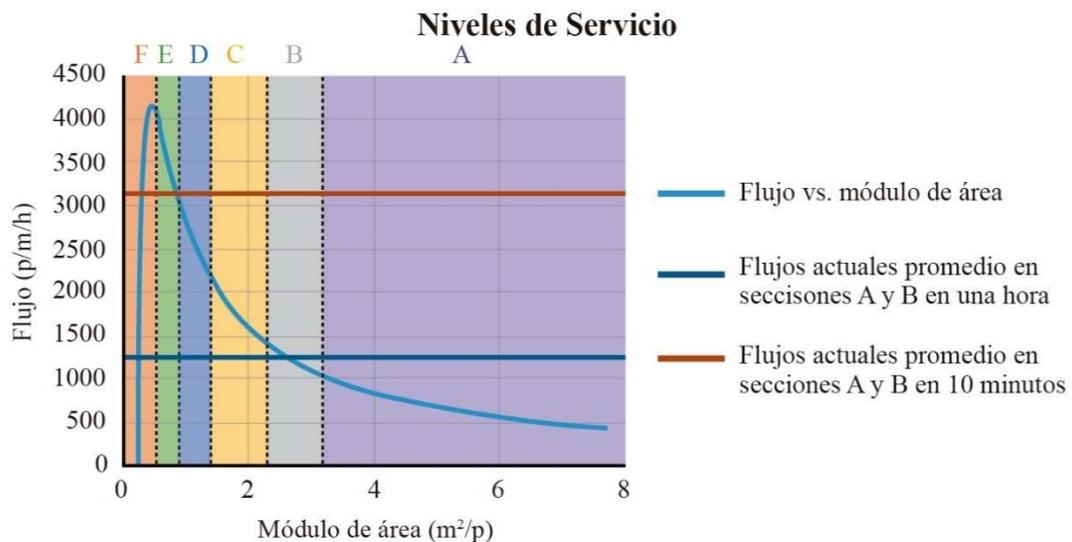


Figura 38. Superposición de los niveles de servicio sugeridos por la HCM (2014). Fuente: Propia

La calificación del estado actual de la Av. Dintilhac se encuentra determinado por la segunda intersección del gráfico con las líneas de flujo peatonales actuales, tanto para un intervalo de una hora como en un intervalo de 10 minutos. Por lo tanto, se tiene que el nivel de servicio en la vía está categorizado como nivel B en el primer caso, y como E en el segundo. Cualitativamente, se afirma que, en intervalos de tiempo grandes, generalmente el desplazamiento es libre, se presenta una situación favorable para el tránsito peatonal. Sin embargo, la situación se puede tornar crítica en intervalos menores, pues las velocidades y la habilidad de pasar cierta zona se restringe significativamente, se crean dificultades para los peatones. Si bien situaciones críticas ya se presentan en intervalos cortos de tiempo, donde se tiende a llegar al límite de capacidad de la avenida, se recomienda que, en el intervalo de una hora, de llegarse al intervalo de nivel de servicio E hallado en la gráfica, se realicen cambios en la avenida. Cabe recalcar que el módulo de área que le corresponde al flujo máximo, se encuentra dentro del rango del nivel F, con lo cual se corrobora que los niveles sugeridos por el

manual son una buena guía para la evaluación del desempeño de la vía en estudio. Sin embargo, para determinar precisamente el límite del nivel F, este debe coincidir con el punto de flujo máximo. Se puede apreciar que, en el caso de la avenida Dintilhac, este punto se encuentra ligeramente desplazado hacia la izquierda, por lo que encontrar niveles de servicio que se ajusten de manera exacta y precisa a la vía en estudio, queda para futuras investigaciones.

Además, la gráfica (figura 38) también puede ser una herramienta práctica para el diseño de la vía peatonal en base a los niveles de servicio. El factor por el que se amplía la vía en estudio, es decir, por el que se ensancha la Av. Dintilhac, es el mismo factor por el que se escala el eje correspondiente al flujo peatonal en las gráficas en donde intervenga esta variable, sin causar variaciones en el eje contrario. Por consiguiente, la vía aceptará mayores flujos peatonales y, para el caso de la gráfica flujo peatonal – densidad, esta última se mantendrá sin variaciones, por lo que para una misma densidad (luego del escalamiento), ahora se aceptará mayores flujos peatonales. De la misma manera, a cada flujo le corresponderá un nuevo valor de módulo de área, y el caso es similar para las demás gráficas halladas. En conclusión, si se desea hallar las densidades que se presentarán en una vía al modificarse el ancho de ésta y el nivel de servicio que supondría, solo será necesario modificar los ejes correspondientes al flujo peatonal de manera proporcional a la ampliación de la senda. Con ello, se podrán tomar decisiones de modificación y diseño de la Av. Dintilhac.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la presente investigación, se evaluaron las características de los desplazamientos peatonales en la Av. Dintilhac en la Pontificia Universidad Católica del Perú. Para ello, se procedió primero a modelar el sistema en el programa Viswalk 8.0 con los datos producto de la observación directa y de las grabaciones de video. Después de realizar las simulaciones en el software, se obtuvieron resultados con el objetivo de generar un diagrama fundamental que relacionaría las variables macroscópicas de velocidad “ v ” (km/h) y densidad “ ρ ” (p/m^2) del desplazamiento peatonal en la vía en estudio. Para la descripción de esta relación, se concluiría que un ajuste de tendencia lineal es la que mejor representa esta relación. La ecuación es presentada a continuación:

$$v = -0.7613\rho + 3.5604$$

Con dicha ecuación, se pueden despejar los valores máximos de las variables macroscópicas que se relacionan. Para situaciones ideales, como en el caso de no existir flujo peatonal, es decir $\rho=0$, la velocidad máxima sería del orden de $v_{\max}=3.56$ km/h o $v_{\max}=0.99$ m/s. En cambio, para situaciones en que la $v=0$ debido a las altas conglomeraciones, la densidad sería de $\rho_{\max}=4.68$ p/m^2 .

A pesar de que la zona analizada (sección B) presenta flujos que ingresan por tres entradas adicionales, sería posible idealizar el desplazamiento peatonal en la Av. Dintilhac como un flujo continuo, ya que los volúmenes adicionales no tendrían mayor incidencia en el tránsito de la vía en estudio. Se llegaría a esta conclusión luego de encontrar semejanzas al comparar diagramas fundamentales de estudios anteriores (los cuales también usaron ecuaciones lineales), cuyas zonas de estudio representarían un flujo netamente continuo. Además, la validación se realizó en una zona de menor dimensión y en donde el flujo sí sería continuo (sección A), por lo que quedaría de este modo demostrado que la suposición sería la correcta al presentarse situaciones similares.

Una vez comprobado que la hipótesis planteada es válida, se procedió a encontrar una relación para el flujo peatonal (q) en la vía en estudio, con el uso de la teoría de fluidos, para lo cual la ecuación resultante sería una del tipo cuadrática:

$$q = -0.7613\rho^2 + 3.5604\rho$$

Otra forma de representar el flujo peatonal (p), es hacerlo en función al módulo de área (M), para lo cual la ecuación sería la siguiente:

$$q = -0.7613/M^2 + 3.5604/M$$

Así mismo, es posible despejar los valores máximos para estas ecuaciones, en las cuales se presentarían situaciones críticas. Por lo tanto, el máximo flujo peatonal que soporta la vía sería de $q_{\max}=4163$ p/m/h, el cual se presentaría con una densidad igual a $\rho=2.34$ peatones/m², un módulo de área de $M = 0.43$ m²/peatón y una velocidad de $v= 1.78$ km/h.

Luego de observaciones en el campo, se pudo determinar la situación actual de la zona en estudio. A pesar de que los flujos peatonales en el intervalo de una hora no son elevados, pues se presentan flujos medianamente libres; en intervalos más cortos, como el de 10 minutos, se presentaron flujos que llegarían hasta triplicar el flujo total de una hora. Por ejemplo, en la actualidad el flujo peatonal promedio en un intervalo de una hora sería de 1236 peatones/m/h. No obstante, en el intervalo de 10 minutos, el flujo peatonal llegaría a ser de 3126 p/h/m. Se deduce entonces que aún hay una brecha amplia para llegar al flujo peatonal máximo en la Av. Dintilhac en el primer caso, pero por momentos, esta brecha se acortaría drásticamente, y se acercaría en gran medida a la máxima capacidad de la avenida. Es importante considerar que, en los próximos años, se podría llegar a la máxima capacidad de la vía aún en intervalos de tiempo grandes, y la situación se tornaría aún más crítica en lapsos de tiempo cortos.

Al realizar la comparación del gráfico del diagrama fundamental obtenido en nuestra investigación, con aquel adaptado de Curtis et. al. (2014), se concluye que la dispersión de los puntos graficados sería similar. Sin embargo, las densidades máximas de la investigación actual, en comparación con aquellas de la mayoría de los estudios incluidos en la gráfica, podrían llegar a variar en grandes proporciones. Esto es justificable debido a que las zonas estudiadas por Curtis serían zonas de paso para los peatones, en donde ya se presentarían altas conglomeraciones de personas; y los peatones se desplazan para llegar a un punto objetivo, para lo cual el grupo caminaría con mayor premura y aceptaría mayores densidades. Se podría decir entonces que, en

estos casos, influye más el grupo de peatones que se encuentran detrás de una persona y que ellos impulsan al grupo de peatones a desplazarse con mayor velocidad.

Esto es diferente en el caso de la Av. Dintilhac, en donde para la misma velocidad, las densidades serían menores. El confort es importante en esta vía peatonal, por lo que los peatones preferirían disminuir la velocidad a sacrificar del espacio libre que disponen. Por lo tanto, para el grupo de peatones de esta investigación, la influencia recaería en el grupo de peatones que se encuentra delante de la persona, y actuaría como una especie de barrera que provoca la disminución de la velocidad o que impediría que, para una velocidad, la densidad incremente.

También se realizaron comparaciones con las gráficas obtenidas según Pushkarev y Zupan (1975), y se aprecia que las gráficas concernientes a las relaciones entre el flujo peatonal y los demás parámetros, serían semejantes a los del presente estudio. Una vez más se comprobaría que, acertadamente, se ha usado una línea de tendencia lineal para describir el diagrama fundamental.

Sin embargo, se visualiza que las velocidades promedio no concordarían con los mostrados para los estudiantes, los cuales para Pushkarev y Zupan son mayores a $v=5.5$ km/h. Las velocidades obtenidas en nuestra investigación serían significativamente menores a cualquier velocidad mostrada, donde las diferencias podrían llegar a ser hasta de un 22%, a pesar de que las densidades del estudio previo se acercan a los datos hallados para la Av. Dintilhac. Como se dijera con anterioridad, si bien se hicieron mediciones específicas a estudiantes en el estudio anterior, el objetivo de este grupo peatonal fue también llegar a un punto objetivo, por lo cual, por ejemplo, el caminar constituiría una herramienta para llegar a otro medio de transporte. En contrapuesta a ello, en la Av. Dintilhac, el caminar podía constituir un fin por sí mismo, pues sería considerado para los peatones en esta vía como una actividad recreacional y para la sociabilización. Es por ello que las velocidades tenderían a ser menores en la vía de paseo estudiada. Asimismo, se hizo la comparación de los flujos peatonales máximos de diferentes tipos de peatones. Los resultados serían similares a los obtenidos de la Av. Dintilhac, con variaciones de tan solo el 6% aproximadamente.

Con respecto a la gráfica velocidad vs. módulo de área, se infiere que la velocidad no se vería influenciada ya por el incremento del módulo de área a partir de $M=4$ m²/peatón, en cualquier caso. Esto se evidencia debido a que la velocidad del peatón,

por razones físicas, tiene un límite. Por más que disponga de espacio para desplazarse con velocidades mayores, no lo hará (salvo casos excepcionales) ya que esto significaría que el peatón se encuentre trotando o corriendo. Por otro lado, tanto en estudios anteriores como en el presente caso, el módulo de área que le corresponde al máximo flujo permitido sería aproximadamente de $0.45 \text{ m}^2/\text{peatón}$, por lo que se respalda las gráficas obtenidas para la av. Dintilhac.

En el estudio realizado por Tanaboriboon et. al. (1989), con una ecuación de velocidad en función a la densidad también lineal, se obtendría que los resultados obtenidos del desplazamiento peatonal en la ciudad Bangkok serían todos significativamente mayores a los obtenidos en la avenida Dintilhac. Se exceptúa el módulo de área que, al ser el inverso de la densidad, debiera ser menor.

Al igual que en los estudios presentados por Curtis et. al. (2014), las diferencias entre los valores de las variables macroscópicas, serían debido a que el estudio en la ciudad de Bangkok fue realizado en vías peatonales públicas aledañas a calles o avenidas importantes. En consecuencia, los desplazamientos en estas vías serían más veloces a causa, posiblemente, de la finalidad del viaje y por factores externos microscópicos que pueden modificar el comportamiento del peatón. Asimismo, estas vías podrían soportar mayores densidades, las aglomeraciones en este caso serían con frecuencia aceptadas por el peatón debido al tipo de uso que se le da a coste del confort.

Tal como se dijera líneas arriba no es aconsejable que la Av. Dintilhac se desempeñe de la misma manera que en las zonas estudiadas en Bangkok. Es recomendado evitar esta situación debido a que el uso de la vía en estudio podría llegar a ser recreacional y con fines sociales. Las altas densidades con velocidades mayores no se darían en este caso, al igual que las aglomeraciones; pues estas no serán admitidas por el viandante.

Finalmente, se tiene que el nivel de servicio en la vía Dintilhac estaría categorizado como nivel B si se analiza un intervalo de una hora, y como nivel E en un intervalo de 10 minutos. Por el momento, se podría considerar aceptable este desempeño, pues las congestiones no son constantes y se despeja con facilidad. Sin embargo, se espera que el alumnado en la universidad continúe en aumento y, por lo tanto, se exigirá mayor demanda a la vía. En este escenario, las modificaciones en la infraestructura de la avenida serán necesarias.

Para tomar decisiones para la modificación y diseño de la Av. Dintilhac, se podría tomar en cuenta las gráficas en donde el flujo peatonal constituye un eje. Para ello, es posible escalar el eje del flujo peatonal por un factor, el cual será el mismo por el que se ampliará el ancho de la vía estudiada. Con la gráfica resultante, se podrían tomar al menos medidas preliminares para la mitigación de efectos indeseados por altos tráficos peatonales. Si se desea realizar un diseño basado en los niveles de servicio, sería posible tomar en cuenta aquellos expuestos por la HCM (2000), ya que son una buena guía para la evaluación del desempeño de la vía. Es preferible que el nivel de desempeño sea al menos C en un intervalo de tiempo de una hora y, para que se cumpla este requerimiento, de llegarse a niveles de desempeño de D a F sería necesario modificar la geometría de la vía para así mejorar la calidad del servicio, lo cual resultaría en que ésta soporte un mayor flujo peatonal y que la densidad correspondiente sea menor.

Como última consideración, el punto de flujo máximo debe coincidir con el límite del nivel F para poder concluir que los niveles de servicio pertenecen exclusivamente a la avenida peatonal estudiada.

Entre las recomendaciones otorgadas en el presente estudio, se sugiere que antes de llegar a un escenario en donde se presente la máxima capacidad de la Av. Dintilhac, como fue descrito con anterioridad, se realicen las modificaciones adecuadas para evitarlo. Las medidas que se deben tomar tendrían el propósito de evitar que, en intervalos de una hora, se llegue siquiera a un nivel de desempeño E, para lo cual es sugerido que se amplíe el ancho de la vía y así no permitir esta situación desfavorable. Además, se deberían idear alternativas para disminuir el flujo peatonal o crear desvíos peatonales para garantizar un nivel de desempeño adecuado para esta avenida. Por último, es recomendable que en futuros estudios se determinen los rangos de los niveles de servicio propios de la Av. Dintilhac, debido a que se encontró que el flujo máximo se encontraría desplazado a la izquierda del límite propuesto por el HCM (2000).

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Al-Azzawi, M. (2004). *Factors affecting pedestrian walking speeds* (Doctoral dissertation, Napier University).

Alexandersson, S., & Johansson, E. (2013). *Pedestrians in microscopic traffic simulation* (Doctoral dissertation, Master's Thesis s. 1, Chalmers University of Technology).

Berres, S., Huth, F., Shwandt, H. & Bärwolff, G. (2013). *Simulation model of crossing pedestrian movements for infrastructure planning*. En 22nd National Conference of the Australian Society for Operations Research, Adelaide, Australia, December 1-6, 2013.

Bieda, B. (2012). *Stochastic analysis in production process and ecology under uncertainty*. Springer Science & Business Media.

Brščić, D., Zanlungo, F., & Kanda, T. (2014). Density and Velocity Patterns during One Year of Pedestrian Tracking. *Transportation Research Procedia*, 2, 77-86.

Curtis, S., & Manocha, D. (2014). Pedestrian simulation using geometric reasoning in velocity space. En *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012* (pp. 875-890). Springer International Publishing.

Davidich, M., & Köster, G. (2013). Predicting pedestrian flow: A methodology and a proof of concept based on real-life data. *PLoS one*, 8(12), e83355.

Dextre, J., & Avellaneda, P. (2014). *Movilidad en zonas urbanas* (1a ed.). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Dridi, M. (2015). *Simulation of High Density Pedestrian Flow: Microscopic Model*. *arXiv preprint arXiv:1501.06496*.

Duane, C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogram. Eng. Remote Sens*, 37, 855-866.

Federal Requirements (1990). *Americans with Disabilities Act*.

Fruin, J. (1971). *Pedestrian planning and design* (No. 206 pp).

Gehl, J. (2011). *Life between buildings: using public space*. Island Press.

Gehl, J., & Gemzoe, L. (2001). *Winning back the cities-the European experience*. En Australia: walking the 21st century, international conference, 2001, Perth, Western Australia.

Georgia Department of Transportation (2003). *Pedestrian & Streetscape Guide*.

Hall, E. T. (1981). *La dimensión oculta*. siglo XXI.

Helbing, D. (1998). From microscopic to macroscopic traffic models. En A perspective look at nonlinear media (pp. 122-139). Springer Berlin Heidelberg.

Helbing, D., Johansson, A., & Al-Abideen, H. Z. (2007). Dynamics of crowd disasters: An empirical study. *Physical review E*, 75(4), 046109.

Hillier, B., Penn, A., Hanson, J., Grajewski, T., & Xu, J. (1993). Natural movement-or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environ Plann B*, 20(1), 29-66.

Hughes, R. (2002). A continuum theory for the flow of pedestrians. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(6), 507-535.

Johansson, F. (2013) Microscopic modeling and simulation of pedestrian traffic. Linköping Studies in Science and Technology. Thesis No.1629. Licentiate Thesis. Department of Science and Technology Linköping University, SE-60174 Norrköping, Sweden. Norrköping.

Karmnová, A. (2014). A Review on Macroscopic Pedestrian Flow Modelling. *Acta Informatica Pragensia*, 2(2), 39-50.

Karmnová, A. (2014, Marzo). Macroscopic Pedestrian Flow Model Based on Traffic Flow Model. En Conference of Informatics and Management Sciences, 2014 (pp. 302-304). Information and Communication Technologies.

Kittelson, P., Quade, K., & Hunter-Zaworski, K. M. (2003). Transit capacity and quality of service manual. *Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, DC*.

Kotusevski, G., & Hawick, K. (2009). A review of traffic simulation software.

Kretz, T., Lohmiller, J., & Schlaich, J. (2015). The Inflection Point of the Speed-Density Relation and the Social Force Model. *arXiv preprint arXiv:1507.04935*.

Liebig, T., Xu, Z., May, M., & Wrobel, S. (2012). Pedestrian quantity estimation with trajectory patterns. In *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases* (pp. 629-643). Springer Berlin Heidelberg.

Lv, W., Fang, Z., Wei, X., Song, W., & Liu, X. (2013). Experiment and Modelling for Pedestrian Following Behavior Using Velocity-headway Relation. *Procedia Engineering*, 62, 525-531.

Manual, H. C. (2000). HCM 2000. *Washington, DC: Transportation Research Board*.

Marisamynathan, V. (2014). Study on pedestrian crossing behavior at signalized intesections. *Journal on Traffic and Transportation Engineering (Enlgish Edition)*, 1(2), 103-110.

Markowski, M. (2008). *Modeling behavior in vehicular and pedestrian traffic flow*. ProQuest.

Marno, P. (2002, Septiembre). *Crowded – Macroscopic and Microscopic Models for Pedestrian Dynamics. (Reporte de análisis numérico No. 4-2002)*. The University of Reading: Department of Mathematics.

Murgante, B., Misra, S., Carlini, M., Torre, C., Nguyen, H. Q., Taniar, D. & Gervasi, O. (Eds.). (2013). *Computational Science and Its Applications--ICCSA 2013: 13th International Conference, ICCSA 2013, Ho Chi Minh City, Vietnam, June 24-27, 2013, Proceedings* (Vol. 7973). Springer.

Newurbanism.org, (2015). *Pedestrian Cities*. [online] Disponible en <http://www.newurbanism.org/pedestrian.html> [Acceso 25 Nov. 2015].

New Zeland Transport Agency (2009). *Pedestrian planning and design guide*.

Oregon, D. O. T. (2011). *Protocol for Vissim Simulation*.

Papadimitriou, E., Lassarre, S., & Yannis, G. (2015). Introducing Human Factors in Pedestrian Crossing Behavior Models. En *Transportation Research Board 94th Annual Meeting* (No. 15-2974).

Pellegrini, S., Ess, A., Tanaskovic, M., & Van Gool, L. (2010). Wrong turn-no dead end: a stochastic pedestrian motion model. En *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2010 IEEE Computer Society Conference on* (pp. 15-22). IEEE.

Pushkarev, B. & Zupan, J. M. (1975). Capacity of walkways. *Transportation Research Record*, 538, 1-15.

- Rastogi, R., Thaniarasu, I., & Chandra, S. (2010). Design implications of walking speed for pedestrian facilities. *Journal of transportation engineering*, 137(10), 687-696.
- Rouphail, N., Hummer, J., Allen, P., & Milazzo, J. (1998). *Recommended Procedures for Chapter 13, Pedestrians, of the Highway Capacity Manual. FHWA-RD-98-107*. Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington, DC.
- Shiwakoti, N., Sarvi, M., & Rose, G. (2008). Modelling pedestrian behaviour under emergency conditions—State-of-the-art and future directions. In *Australasian Transport Research Forum (ATRF), Australia* (Vol. 31, pp. 457-473).
- Silva, P. (2012). The importance of pedestrian spaces: the city of Porto.
- Soto, M. (2012). Pedestrian Areas in Los Angeles: Influence of design features and market area on pedestrian activity. A case study of three commercial strips.
- Tanaboriboon, Y., & Guyano, J. (1989). Level of service standards for pedestrian facilities in Bangkok: A case study. *ITE journal*, 59(11), 39-41.
- Teknomo, K. (2002). Microscopic pedestrian flow characteristics: Development of an image processing data collection and simulation model. Diss. *Tohoku Univ.*
- Therakomen, P. (2001). Mouse. class--The Experiments for Exploring Dynamic Behaviors in Urban Places.
- Valenzuela-Montes, L., & Talavera-García, R. (2015). Entornos de movilidad peatonal: una revisión de enfoques, factores y condicionantes. *EURE (Santiago)*, 41(123), 5-27.
- Woody, T. (2006). Calibrating freeway simulation models in VISSIM. *University of Washington*.
- Zampieri, F., Rigatti, D., & Ugalde, C. (2009). Evaluated model of pedestrian movement based on space syntax, performance measures and artificial neural nets. In *Proceedings of the 7th international space syntax symposium* (pp. 1-8).
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 22(11), 1330-1334.