

Un modelo de equilibrio dinámico y simulación para el análisis de flujos peatonales en grandes eventos expositivos.

David Canca Ortiz¹, Fernando Guerrero López¹, Fernando Jiménez Canelada¹

¹ Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros. Av. De los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. dco@us.es, fergue@esi.us.es, jmgs@esi.us.es, canelada@esi.us.es.

Palabras clave: Equilibrio de usuario, Distribución dinámica, Asignación, Simulación.

RESUMEN

Este trabajo presenta un nuevo modelo dinámico de distribución y asignación de flujos peatonales (Dynamic Distribution and Assignment Simulation – DDAS- Model) basado en técnicas de simulación en tiempo discreto y en asignación dinámica de rutas. A diferencia del modelo clásico de planificación de transporte en cuatro etapas, el modelo propuesto incorpora las etapas de distribución y asignación de forma entrelazada y dinámica a lo largo de un horizonte específico de tiempo, y por tanto no caracteriza la demanda de forma explícita como matrices origen-destino de desplazamientos. En cada instante, los individuos que deben comenzar nuevos desplazamientos intentan minimizar su tiempo de viaje hacia destinos que les son interesantes bajo la hipótesis de búsqueda de un equilibrio de usuario que no llega a producirse dado el carácter dinámico del proceso. El modelo permite el estudio en detalle de importantes eventos expositivos (ferias y exposiciones internacionales) y se aplica a modo de ejemplo a la Exposición Internacional de Zaragoza 2008, simulando un día tipo, con la afluencia de casi 100.000 individuos a lo largo de 17 horas. El modelo puede ser aplicado en contextos no peatonales, sirviendo como base para el estudio de fenómenos que sugieren la atracción de vehículos hacia determinadas zonas, tales como parkings en zonas céntricas de ciudades.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la década de los 60 y 70 se desarrollaron numerosos modelos para el análisis, toma de decisiones y predicción de flujos de peatones en los centros comerciales y de zonas de negocios de grandes ciudades. El desarrollo de estos modelos se concretó a finales de los años 70 en la utilización de la metodología de cuatro etapas que ha pasado a ser clásica en la planificación del transporte en áreas urbanas, metropolitanas y estudios regionales. Se consideraban modelos de generación y atracción de viajes a partir del estudio del uso del suelo, distribución y posterior asignación sobre una red bajo el supuesto de un comportamiento que debería llevar al equilibrio de usuario, ver Ortúzar y Willumsen 1994.

Kagan et al 1978, perfilaron un modelo de planificación de flujos peatonales (Pedestrian Planning Process), incluyendo una fase de modelado de la demanda, una de diseño y una de evaluación. Este modelo pretendía ayudar en el desarrollo de la red de medidas dedicadas a la mejora de los movimientos peatonales, particularmente en el área central de las ciudades con el fin de asegurar el intercambio eficaz al modo peatonal de transporte.

Hass y Morrall, 1967, desarrollaron una encuesta sobre el comportamiento de peatones a través de túneles entre los edificios más importantes y los aparcamientos de la Universidad de Carleton, en Ottawa, Canadá. El objetivo del estudio era el desarrollo de un modelo de comportamiento peatonal que permitiera su uso para el diseño de futuras instalaciones. Pushkarev y Zupan en 1971 y Behnam y Patel en 1977 estimaron volúmenes de peatones en zonas urbanas de alta densidad a partir de estudios de uso del suelo y mediciones de flujos peatonales en localizaciones específicas.

Davis, King, y Robertson 1991, describen un método de medición y predicción de los volúmenes de flujos peatonales en intersecciones para la evaluación de tiempos en instalaciones basadas en semáforos. Matlick en 1996, utilizó la distribución poblacional, porcentajes de encuestas procedentes de estudios nacionales y datos de actividad en el centro de las ciudades para predecir el número de potenciales viajes peatonales en determinados corredores.

Ercolano, Olson, y Spring 1997, utilizando información recopilada de forma rutinaria por diversos proveedores de servicios de transporte estimaron la demanda en hora punta de viajes peatonales en zonas suburbanas y en expansión. Este tipo de planes peatonales se han usado frecuentemente para determinar la localización de medios al servicio de los peatones como cruces peatonales, rediseño de tiempos semafóricos, pasos de cebrá, aceras, etc.

Ness, Morrall, y Hutchinson 1969, aplicaron un modelo gravitatorio como técnica para la estimación de volúmenes de peatones en el área de Toronto. El centro comercial y de negocios se dividió en diferentes zonas y los arcos peatonales fueron codificados dependiendo de la configuración de las calles y de las localizaciones de los centroides de las zonas. Se tomaron medidas sobre generación y atracción de las diferentes zonas de oficinas y de los terminales de líneas de transporte público. Al mismo tiempo se consideraron factores de fricción y se confeccionaron caminos mínimos para la realización de los viajes como datos de entrada al modelo gravitatorio de distribución. Los caminos mínimos se calibraron a partir de la medición de tiempos de viaje, tiempos de espera en intersecciones, atracción de las diferentes calles y penalizaciones por giros.

Este es la base del enfoque seguido en el presente trabajo, si bien se trata no de la búsqueda de un equilibrio sino de una sucesión de equilibrios en un sistema dinámico que evoluciona a lo largo de una jornada completa. La atracción que ejercerán los edificios sobre los individuos varía a lo largo del día en función de eventos que puedan producirse en los diferentes pabellones y que se suponen programados con antelación, lo que redundará en el conocimiento de los mismos por parte de los peatones. La percepción que tienen los peatones sobre los diferentes caminos hacia su próximo destino varía para cada uno de ellos, efectuándose una clase de asignación estocástica.

El objetivo del modelo es el análisis no sólo del sistema de transporte en el interior del recinto, pudiéndose considerar tramos mecanizados, escaleras mecánicas, conveyors o cintas, o vehículos de paseo, bicicletas o pequeños vehículos eléctricos, trenes interiores, etc. También es objetivo primordial el estudio de capacidades de los distintos tipos de tramos del viario, calles, tramos de acceso a pabellones, pasarelas, plazas, así como de las colas en los accesos a pabellones, las capacidades e estos y las tasas de servicio medidas como tiempos de visita y su variación en función de los diferentes eventos programados.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

2.1. Descripción del escenario.

Sea $G=\{N,A\}$ el grafo que describe la red, formada por N , conjunto de nodos y A conjunto de arcos. En principio, se puede asumir sin pérdida de generalidad que N es constante respecto al tiempo al igual que A . No obstante, como se verá posteriormente, el modelo asume diferentes comportamientos temporales en los nodos y arcos, por tanto la propia topología, esto es, los conjuntos de nodos y de arcos podrían considerarse sin ningún problema dependientes del tiempo, $G(t)=\{N(t), A(t)\}$.

A su vez $N=\{E, P, C\}$, donde E es el conjunto de pares de nodos asociados a elementos visitables (pabellones, restaurantes, cines, y en general cualquier zona sobre la que se desee conocer la afluencia temporal de visitantes), P es el conjunto de nodos que permiten el acceso a la red (al recinto o escenario en general) y C es el conjunto de intersecciones o cruces del viario.

Cada elemento visitable e_j se ha modelado mediante dos nodos, uno de entrada y otro de salida. Esto es así con el objeto de conceder un realismo mayor al modelo, ya que resulta habitual que la entrada a un determinado edificio este conectada a una zona de la red y la salida a una zona diferente. Por tanto $E=\{e_{e_j}, e_{s_j}\}$ representan la entrada y salida de un elemento e_j genérico perteneciente al conjunto E de elementos visitables.

Se utilizará el índice s para representar elementos de acceso a la red. Así, se representarán mediante p_s a un elemento del conjunto P de nodos de acceso al escenario. Los nodos del grafo incluidos en C , intersecciones genéricas del viario propio del escenario, se representarán como c_k .

Los arcos del conjunto A se denotan genéricamente mediante el índice a . Cada elemento de A une dos nodos del escenario. Tendremos arcos que unen nodos del viario, arcos de entrada a los elementos expositivos o visitables, y por tanto que sirven de unión entre el viario y dichos elementos, arcos de salida de los edificios o elementos visitables, por tanto que comunican estos edificios con el resto del viario y arcos internos entre cada par de nodos (e_{e_j}, e_{s_j}) de un elemento expositivo, esto es, arcos interiores a los edificios. Es posible que en determinados elementos expositivos sea conveniente considerar una sucesión de arcos internos. Esta aproximación tiene sentido cuando se desea, por ejemplo, diferenciar la afluencia de visitantes a diferentes plantas del edificio.

Los elementos expositivos $e_j \in E$ actúan como puntos de atracción de los visitantes, que denotaremos mediante el índice i . Esta atracción depende de las características propias del elemento j -ésimo y del tiempo t mediante cierta ley que se supondrá en principio conocida $Atracción(e_j, t)=f(e_j, t)$. De esta manera, la atracción de un cierto edificio sobre los visitantes al recinto se supone variable a lo largo del día.

Habitualmente estas variaciones se corresponden con instantes específicos en los que se presenta algún tipo de espectáculo. Es frecuente que de forma cotidiana, un pabellón presente una atracción especial a determinadas horas, coincidiendo con la proyección de un largometraje, una obra de teatro o algún espectáculo de luz y sonido.

Con el objeto de dotar de mayor realismo el efecto de la atracción sobre el público la función de atracción $f(e_j,t)$ deberá contener dos factores, una capacidad de atracción intrínseca al edificio y un factor disuasorio y dinámico que dependerá del grado de ocupación del mismo y por tanto será función del tiempo. Este segundo factor tiene el cometido de desanimar al público en su intento de acceso al pabellón cuando la espera prevista en la cola de acceso sea desmesurada. Posteriormente se presentará alguna formulación para la misma.

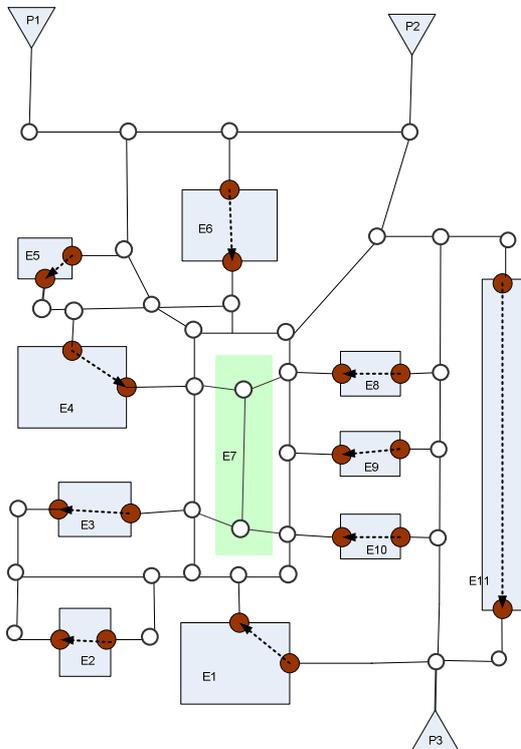


Figura 1. Ejemplo de modelo de un recinto

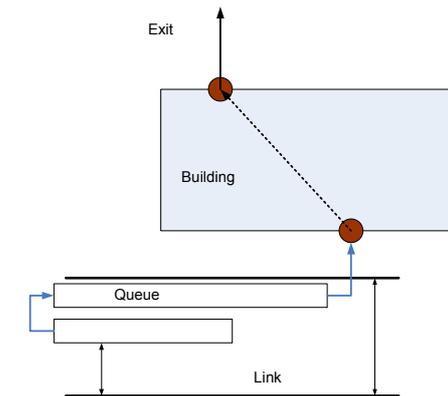


Figura 2. Modelado de colas en arcos compartidos

Es importante señalar algunas de las posibilidades del modelo. En primer lugar, un mismo edificio puede ser analizado en varias plantas. Cada una de ellas se puede considerar como un pabellón comunicado con las otras plantas mediante arcos que representan las escaleras o rampas de acceso. A este nivel de detalle se necesitará formalizar la atracción planta a planta. Los lugares abiertos tales como plazas o jardines se pueden modelar de varias formas. Una primera forma apunta hacia el uso de una malla de arcos y nodos que den cobertura espacial a la plaza. Una forma más sencilla es la que recoge la figura 1. El pabellón nº 7 es en realidad una plaza y se modela mediante un único arco de anchura suficiente como para acoger un número elevado de individuos. Los círculos en color blanco representan los nodos del viario y los sombreados la entrada y salida de cada pabellón (a excepción del nº 7) cuyo tratamiento se ha diferenciado al tratarse de un espacio abierto. Todos los arcos del viario se consideran bidireccionales. Los arcos internos de cada pabellón son de una única dirección, que va de la entrada a la salida del edificio.

Otro aspecto importante es que aunque en general se considerarán espacios reservados a la formación de colas de acceso en las entradas de los edificios, al margen de los tramos

que conectan la red con los pabellones, en algunos casos puede ocurrir que, dada la topología de la red, el espacio dedicado a la espera a la entrada de los edificios (cola de acceso) reste capacidad a los arcos de la red, contribuyendo a una mayor congestión. Para estas situaciones el modelo considera un método de formación de colas en zig-zag que a medida que crecen se repliegan sobre si mismas provocando una disminución de la anchura de los tramos sobre las que se sitúan (figura 2).

2.2. Consideraciones dinámicas del modelo.

Dependiendo del grado de detalle deseado y del tipo de información demandado al modelo, es posible recurrir a un modelo dinámico de eventos discretos, sin necesidad de modelar cada uno de los individuos, o a un modelo más complejo en el cual resulta imprescindible modelar el comportamiento individual de cada visitante.

En el caso de que se desee conocer la ocupación media de los edificios, las colas y su evolución temporal así como el grado de congestión en la red, se podría optar por la primera opción. Por otro lado, si estamos interesados, por ejemplo, en medir la distancia media recorrida por cada individuo, el tiempo medio de visita, el tiempo medio o la distribución de tiempos que los visitantes dedican a caminar o el número medio de pabellones visitados por cada persona puede resultar más conveniente recurrir a un modelo algo más complejo y rico. Este último tipo es el que se aborda en este trabajo.

Se utilizará el índice i para representar de forma genérica a cada uno de los visitantes que acceden al recinto a lo largo de una jornada.

Se recurre a una simulación en tiempo discreto, dividiendo la jornada en intervalos de valor constante Δt . Para un cierto instante t dentro del intervalo de análisis T , numerosos visitantes se encuentran dentro del recinto. Paseando por los arcos del mismo, en dirección a ciertos elementos visitables, en las colas previas a los elementos expositivos o en el interior de los mismos (cines, restaurantes, pabellones, plazas,..). Una fotografía estática del instante t proporcionaría la información propia de ese momento, conoceríamos el número de personas en la cola de cada pabellón, en cada arco en sus dos sentidos y dentro de cada edificio. En un instante posterior $t+\Delta t$, muchos de los individuos del sistema habrá tomado una determinada decisión (aquellos individuos que terminan su visita a un determinado edificio, o que acaban de ver una película o que termina de almorzar..), otros se encuentran inmersos en el proceso de ejecutar cierta decisión que tomaron con cierta anterioridad (varios Δt antes), por ejemplo caminan en dirección a cierto edificio (siguiendo determinado camino) para realizar una nueva visita, se dirigen a la salida, continúan almorzando, etc. Otros individuos habrán abandonado el sistema, como consecuencia de una decisión anterior y también en ese mismo Δt , se habrán incorporado nuevos visitantes a nuestro escenario.

2.2.1. Datos del modelo

Se considera conocida la topología y algunos datos relativos a los elementos visitables y arcos. Concretamente la longitud y anchura de los arcos y la superficie de los pabellones, plazas, restaurantes y demás edificios de interés.

Se consideran conocidos: El tiempo total de simulación T en horas, el número total de visitas a lo largo del período de simulación, representado por N y su distribución

temporal a lo largo del período T . Llamaremos $E(h)$, $h=1\dots T$ al porcentaje de visitantes al recinto durante la hora h -ésima y $S(h)$ al número de visitantes que lo abandonan en la citada hora. Así pues en la hora h -ésima, el número de personas o visitantes que llegan al recinto es $N \cdot E(h)$. Se supondrá que la entrada de estos visitantes se distribuye uniformemente a lo largo de la hora h -ésima. A efectos prácticos, el número de visitantes que llegan al sistema en Δt es por tanto $N \cdot E(h) \cdot \Delta t / 60$ (considerando Δt medido en minutos).

La discretización horaria no supone pérdida de generalidad, ya que el modelo puede suponer un nivel de detalle en la afluencia de visitantes en tiempos del orden de Δt . Sin embargo, a efectos prácticos, la disponibilidad de información a efectos de predecir la asistencia de público no suele superar una consideración de carácter horario*.

Al mismo tiempo se supondrá conocido, para la hora h -ésima, el porcentaje de individuos que entra y sale por cada puerta. $EP(h,s)$ y $SP(h,s)$, $h=1\dots T$, s perteneciente a P , es decir la distribución espacial de entradas y salidas, sólo a efectos de número.

Como cada intervalo horario se divide en un número de $60/\Delta t$ períodos Δt , se supondrá para cada uno de estos intervalos de la hora h -ésima la misma cantidad de visitantes y de salidas, es decir que las llegadas y salidas se realizan de manera uniforme a lo largo de la hora h .

Por tanto, para cada $h=1\dots T$ y cada Δt , se generan los correspondientes individuos en las puertas para su entrada en el recinto y por otra parte se encaminan hacia las salidas el correspondiente número de visitantes que deben dejar el recinto. Evidentemente, la creación y destrucción se realiza conceptualmente de forma diferente. Los peatones generados en las puertas se inyectan en los tramos de entrada al recinto, donde, dependiendo de la densidad de los mismos alcanzarán cierta velocidad de desplazamiento.

Respecto a la forma en que se seleccionan los individuos que deben abandonar el escenario caben varias posibilidades. Se podrían seleccionar los que más pabellones han visitado, los que están más cercanos a las salidas, etc. En este trabajo hemos considerado un doble criterio, seleccionar aquellos individuos que más tiempo llevan en el recinto y han visitado mayor número de edificios. Por otra parte, una vez elegidos los individuos que en t deciden abandonar el recinto, queda por resolver el problema de hacia que puerta o deben dirigirse. En este sentido se han barajado tres posibilidades. En primer lugar encaminarlos hacia la puerta más cercana. En segundo lugar hacia la misma puerta por la que entraron. Por último realizar una asignación aleatoria de la puerta de salida. La primera de las opciones no parece la más razonable. Es muy posible que después de varias horas de vista en el interior del recinto, la puerta más cercana sea precisamente la que menos interesa para salir del mismo, bien porque supone estar tremendamente alejado del lugar en que se estacionó el vehículo particular o del acceso al transporte público más conveniente. Las otras dos opciones han sido consideradas y su selección se considera un parámetro de usuario a la hora de ejecutar la simulación.

Evidentemente, la salida real del individuo i -ésimo se produce con cierto retraso, dependiente para cada individuo, de su posición en el recinto, de la distancia hasta la puerta que le ha sido asignada (no necesariamente la mas cercana) y de la congestión que existe sobre el resto de arcos del viario. Esto responde al funcionamiento real de

este tipo de exposiciones, es fácil comprobar como las puertas del recinto se suelen cerrar 20 o 30 minutos después de la hora de cierre de los pabellones, dando tiempo a que los visitantes evacuen el recinto.

Respecto a la forma en que los visitantes que deben salir se encaminan hacia las salidas, lo que se hace es calcular para cada uno de ellos la ruta mínima hacia la puerta que les ha sido asignada de forma aleatoria. En el cálculo de las rutas se tiene en cuenta el tiempo de viaje en los arcos, que resulta ser consecuencia de la densidad que estos soportan, obviamente ésta varía cada Δt . Una vez que el usuario decide seguir una ruta, lo hace con todas sus consecuencias, es decir no realiza una revisión del camino elegido de forma temporal o espacial, sino que lo sigue con convencimiento de que en su momento era el mejor.

Este comportamiento no es el mismo para los visitantes que se mueven en el interior del recinto, como se verá posteriormente. Ellos si pueden realizar variaciones de sus intenciones de visita en ciertos momentos, por ejemplo cuando comprueban que una elección les lleva a un edificio en el que, al llegar, la cola es excesiva. Respecto a los visitantes que entran o aquellos que están en el recinto y acaban de completar su visita a un determinado edificio, el encaminamiento hacia su siguiente destino se realiza en base a un modelo gravitatorio, de manera que los usuarios resultan atraídos por los elementos a visitar. Para ello es preciso calcular la atracción que los edificios, plazas, restaurantes, etc. ejercen sobre los visitantes.

2.2.2. Atracción de edificios.

Para modelar la atracción de un edificio sobre los visitantes consideraremos en primer lugar una tracción intrínseca (independiente del estado del edificio, esto es, del número actual de visitantes que soporta). Consideramos que la atracción intrínseca de un edificio es proporcional a su superficie. Evidentemente este modelo es válido cuando la funcionalidad de los edificios es similar, por ejemplo cuando hablamos de pabellones en una exposición internacional. En caso de que la finalidad de los edificios sea poco homogénea sería conveniente realizar otra suposición.

$$Atrac_In(e_j, h) = L_o S_u(e_j) FT(e_j, h) \quad \forall e_j \in E, h = 1..T \quad (1)$$

Donde $S_u(j)$ es la superficie útil del elemento j -ésimo, L_o una constante que permite referir la atracción intrínseca a una superficie mínima estándar y $FT(e_j, t)$ es una función que permite variar la atracción de cada elemento visitable de forma temporal a lo largo del horizonte de simulación, de manera que la atracción intrínseca de un cierto pabellón resulte mayor a determinadas horas del día. La superficie útil se puede especificar para cada uno de los edificios. En el caso de los pabellones de un recinto expositivo, para cada edificio se suele considerar del orden de 0.65 por la superficie total. En general

En relación con la duración de la visita a un determinado elemento, postularemos que el tiempo máximo que un individuo esta dispuesto a esperar en la cola de un edificio para realizar una visita depende de varios factores. En principio, parece que mientras mayor sea la superficie de un pabellón mayor será el número de cosas a ver y por tanto mayor debería ser el tiempo de máximo de espera. Lo mismo ocurre si consideramos el tiempo

de visita como un factor influyente en el máximo tiempo de espera, si el tiempo de visita es mayor, se supone que la espera máxima para entrar puede ser mayor.

$$T_max_queue(e_j, h) = \delta' L_o S_u(e_j) FT(e_j, h) = \delta' Atrac_In(e_j, h) \quad (5)$$

De manera que el tiempo máximo de espera se convierte en una función lineal de la atracción intrínseca del pabellón. La expresión (5) es la utilizada en el caso práctico que acompaña la descripción del modelo.

Por otro lado, como se comentó anteriormente la atracción que ejerce un pabellón en un momento dado es función de la atracción intrínseca del pabellón (principalmente como consecuencia de su superficie, aunque pueden aparecer otros factores entre los que destaca la nacionalidad o experiencia del país anfitrión, y la existencia de espectáculos a determinada hora del día, considerado por medio del factor temporal FT). Además de la tracción intrínseca, el estado del pabellón, esto es, el número de personas que se encuentran visitándolo en la actualidad y de forma más específica el tamaño de la cola de espera debe influir en el visitante. Si la llegada a un pabellón se produce en un instante en que se encuentra totalmente colapsado, el visitante debería dirigirse hacia otro pabellón. Más aún, si consideramos que en el momento de decidir hacia dónde dirigirá su próxima visita el usuario dispusiera de información completa, es decir, conociera la situación o estado de todos los pabellones en ese instante, tomaría una decisión informada. Algo equivalente al paradigma usado por Wardrop (1952) para la formulación de sus principios, información completa y comportamiento egoísta del usuario, para formular las condiciones de equilibrio en una red de tráfico.

Se postulará entonces un funcional para la atracción del pabellón en el instante t de manera que se considere el tiempo de cola esperado

$$Atrac(e_j, t) = Atrac_In(e_j, h) f(T_queue(t), T_visit(e_j, h), T_max_queue(e_j, h)) \quad (7)$$

$$\forall e_j \in E, h = 1..T, t \in (h, h+1)$$

Siendo T_visit el tiempo de visita en la hora h -ésima, T_max_queue , el tiempo máximo que los visitantes están dispuestos a esperar y $T_queue(t)$ el tiempo en cola medio en el instante t . La funcional f debe garantizar que cuando el tiempo de visita es muy grande, el interés por visitar el pabellón debe ser mayor (el pabellón tiene más cosas que mostrar a sus visitantes), mientras que cuando el tiempo de cola en t es grande, la atracción debe verse mermada. Hemos considerado una función tipo

$$f(x) = (1 - x^\alpha)$$

$$con x = \left(\frac{T_queue(e_j, t) + T_visit(e_j, h)}{T_max_queue(e_j, h) + T_visit(e_j, h)} \right) \quad (8)$$

Es importante señalar que tanto el tiempo de visita como el tiempo máximo en cola están relacionados con la superficie útil del edificio. En el segundo caso, a partir de la expresión (5), con el factor temporal $FT(e_j, h)$. Mayores superficies producen mayores tiempos de visita y de espera. En el caso en que la atracción máxima se haga corresponder con un factor $FT=1$, el aumento de superficie proporciona un cociente T_visit/T_max_queue que permanece constante. Si FT es mayor que la unidad,

aumentos en la superficie útil del edificio suponen aumentos de T_{max_queue} mayores que los de T_{visit} y como consecuencia x disminuye, provocando un efecto creciente en la atracción.

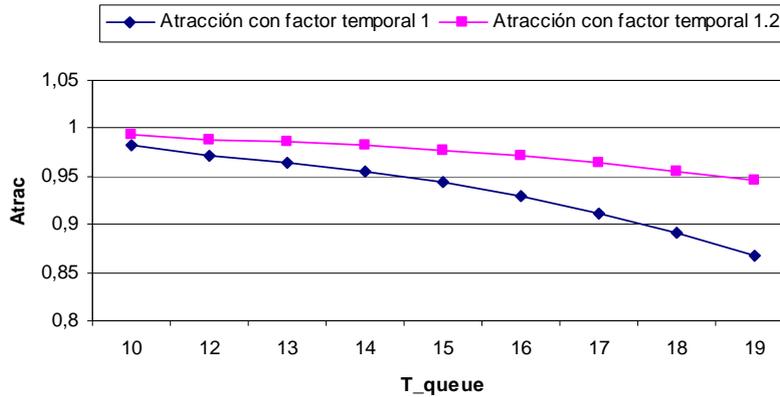


Figura 3. Variación de la atracción en función del tiempo de espera en cola y del factor de atracción FT.

2.2.3. Análisis en arcos. Nivel de servicio.

Como sugirió May en 1990, las características del flujo de tráfico se pueden clasificar en dos categorías, nivel microscópico y nivel macroscópico. El nivel microscópico involucra el comportamiento individual de entidades o individuos con características propias (velocidad, aceleración e interacciones con otras entidades). Muchos de los modelos utilizados para el análisis de problemas peatonales han seguido un enfoque macroscópico. El análisis macroscópico de flujos peatonales fue sugerido por Fruin 1971 y después fue adoptado por otros autores y organizaciones TRB 1985, ITE 1994. El aspecto fundamental de estos estudios es la localización especial y el uso de las infraestructuras. Las interacciones entre peatones se agregan a nivel macroscópico mediante relaciones velocidad-densidad. En otras ocasiones resulta imprescindible representar el comportamiento individual de los peatones. En estos casos se recurre a un tipo de modelo microscópico que recoge las interacciones entre los individuos. Este es el enfoque usado para analizar procesos de evacuación de edificios, Teknomo, 2006.

En el caso más general se ha optado por utilizar una expresión de la velocidad de peatón como función de la densidad del arco, de acuerdo a los datos extraídos del Highway Capacity Manual edición del 2000.

$$v(a,t) = f(d(a,t)) \quad \forall a \in AP \subset A \quad (9)$$

Dónde v es la velocidad media de desplazamientos sobre el arco a en t , y d es la densidad en el arco a en el instante t , AP es el subconjunto de arcos peatonales. Denotaremos por AM el subconjunto de arcos mecanizados sin desplazamiento de vehículos (rampas, escaleras y cintas mecánicas para transporte de personas) y AV el conjunto de arcos asociados a modos con utilización de vehículos. En concreto, para el conjunto de arcos peatonales se ha utilizado la expresión:

$$v(a,t) = 60,37 - 14,16 d(a,t) \quad \forall a \in AP \subset A$$

obtenida mediante regresión lineal de los datos recogidos en el Highway Capacity Manual con un coeficiente de determinación R^2 de valor 0,995.

La densidad del arco se obtiene en función de la ocupación del mismo y de su superficie.

$$d(a,t) = Ocup(a,t)/(length(a) \cdot width(a,t)) \quad (10)$$

Siendo $Ocup(a,t)$ el número de ocupantes del arco a en el instante t , $length(a)$ la longitud del arco y $width(a,t)$ la anchura del arco a . Normalmente esta permanece constante con el tiempo, excepto en aquellos arcos que además de servir para el desplazamiento soportan una cola de entrada a un edificio, tal y como se comentó en la descripción del modelo, Figura 2.

Por otra parte, la ocupación en el arco en el instante t se obtiene a partir de la dinámica de la simulación a partir de los ocupantes en $(t-\Delta t)$, agregando las nuevas llegadas y descontando los que han abandonado el tramo en el último Δt . La caracterización del tiempo de viaje en arcos permite establecer diferentes niveles de servicio HCM. Así, el tiempo medio para recorrer el arco a en el instante t , $T(a,t)$ vale

$$T(a,t) = length(a)/v(a,t)$$

Y por tanto la densidad del arco $I(a,t)$ será

$$I(a,t) = d(a,t)v(a,t)$$

A partir de la Intensidad se puede definir el nivel de servicio del arco $Nserv(a,t)$

Tabla 1. Niveles de servicio.

Level of service- $Nserv(a,t)$	
A	$I(a,t) \leq 7$
B	$I(a,t) \leq 23$
C	$I(a,t) \leq 33$
D	$I(a,t) \leq 49$
E	$I(a,t) \leq 82$

2.2.4. Selección de destino

La toma de decisiones sobre los pabellones a visitar por los usuarios a lo largo de su permanencia en el sistema registrará todo el flujo de tráfico en los arcos y su nivel de servicio, el tamaño de las colas que se formarán cuando lleguen a sus destinos, y los resultados en cuanto a visitas, ocupación y atracción de los diferentes elementos que pueden ser visitados.

Es conveniente definir los conjuntos $NVisit(i) = \{e_k\}$, formado por los el conjunto de edificios y pabellones (elementos) que ya han sido visitados por el individuo i -ésimo.

La selección del destino de un usuario del sistema tiene lugar en cuatro posibles situaciones:

- El usuario u acaba de entrar al sistema, se encuentra en el nodo puerta P y debe seleccionar el primer elemento a visitar (el usuario no tenía ningún nodo destino asignado previamente).
- El usuario ha terminado la visita a un determinado elemento (anterior destino) y se encuentra en el nodo puerta asociado a la salida de dicho elemento. El usuario seleccionará el siguiente elemento a visitar. En ese caso el usuario seleccionará los posibles teniendo en cuenta los previamente visitados.
- El usuario llega al nodo destino que se corresponde con su ruta actual, pero el elemento destino presenta un número de individuos en cola tal que el tiempo estimado de espera en cola supera el máximo T_{max_queue} para ese elemento. En ese caso el usuario seleccionará un nuevo posible destino. En la elección tendrá en cuenta los pabellones previamente visitados y el pabellón que acaba de rechazar.
- El usuario es seleccionado para salir del parque (pudiendo encontrarse en cualquier nodo o arco) y debe elegir una ruta hacia una puerta para salir del recinto expositivo.

Con formato: Numeración y viñetas

Con formato: Numeración y viñetas

En los casos 1,2 y 3 el visitante seleccionará el edificio o pabellón a visitar maximizando un funcional que considera la atracción de cada elemento y el tiempo de viaje esperado para alcanzar ese destino.

$$\max_{e_j \in P} \{Atrac^*(e_j, t) / e^{\beta L_{sub}(r(i, e_j, t))}\} \quad (11)$$

Donde

$$Atrac^*(e_j, t) = \begin{cases} 0 & \text{Si } j \notin N_{Visit}(i); j \neq \text{Last destination} \\ Atrac(e_j, t) & \text{Other } j \end{cases}$$

$r(i, e_j, t)$ representa la ruta r hacia el destino e_j para el individuo i -ésimo, y

$$L_{sub}(r(i, e_j, t)) = \sum_{a \in r} T(a, t) \quad (12)$$

Es la longitud subjetiva (expresada en unidades de tiempo) de la ruta obtenida como la suma de los tiempos de viaje a través de los arcos que componen la ruta.

El máximo valor anterior se corresponderá con la máxima atracción para cierto elemento e_j en el instante t y el valor de *longitud subjetiva* que representa el esfuerzo medido en unidades de tiempo que el usuario estima que tardará en recorrer la mejor ruta $r(i, e_j, t)$ que le llevará hasta el elemento e_j .

β es un parámetro de ajuste, menor que 1, que disminuye el efecto del factor tiempo como determinante en la elección del camino. Su valor determinará el valor del "tiempo medio de viaje", pudiéndose por tanto ajustar para que resulten valores razonables de dicho tiempo medio de viaje

2.2.5. Cálculo de Rutas

Para realizar el cálculo de las rutas candidatas se ha usado inicialmente una implementación eficiente del algoritmo de Dijkstra, 1959 - con orden de complejidad $O(n^2)$ -, usando como peso en de los arcos el tiempo de recorrido de los mismos, y

utilizando como base del algoritmo una estructura de datos tipo montículo, lo que permite disminuir el orden de complejidad a $O(n \cdot \log n + a)$.

Es importante destacar que las rutas evaluadas y asociadas como rutas hacia el destino serán óptimas en cuanto al tiempo sólo en el instante en que se evalúan y asignan a los individuos. Sin embargo, una vez le es asignada una ruta, cada visitante la sigue hasta llegar a su destino, alcanzando el elemento final de ruta cierto tiempo después de que le fuera asignada. Durante el viaje es posible que la ruta que está siguiendo ya no sea la óptima para ese mismo camino. Esto se debe a la variación de la ocupación de los tramos a lo largo del tiempo, debido a los distintos flujos de usuarios que lo atraviesan hacia los distintos destinos, lo que provoca a su vez una variación en la velocidad de desplazamiento y como consecuencia que el tiempo que el usuario tarda en recorrer el tramo actual sea mayor que el calculado en el momento en que le fue asignada la ruta.

Como consecuencia de que la asignación de una ruta en t para cada individuo se mantiene durante el tiempo que tarda en recorrerla, en algunos casos (coincidiendo con horas en que sólo un conjunto de edificios resultan de interés, ej. hora del almuerzo) se ha observado que pueden producirse colapsos en determinados arcos. Esto se podría evitar realizando un cálculo de rutas desde todos y hacia todos los nodos del grafo en cada Δt . Dado el coste computacional que esto supone, se ha optado en este caso por una solución aproximada consistente en la obtención más de una ruta desde cada origen, a cada destino. De esta forma los usuarios utilizan una única ruta hacia cada destino, pero esta ruta se seleccionaría según una distribución de probabilidad de entre el conjunto de las mejores rutas disponibles para ese destino.

Para implementar esta estrategia, y siguiendo siguiendo el paradigma de comportamiento egoísta y máxima información sobre el estado del sistema, se ha utilizado un algoritmo de cálculo de múltiples caminos, K-shortest path method, entre cada par de nodos (siendo K un entero positivo). Existen distintos algoritmos para efectuar dicho cálculo, como describen Yen, 1971, Eppstein 1994, y Queirós 1999 y En el ejemplo expuesto se ha optado por una versión generalizada del Algoritmo Dijkstra con etiquetas únicas descrita por Queirós en 1998.

Una vez obtenidas las K mejores rutas, es necesario establecer también la probabilidad de selección de las mismas para un determinado usuario. Con este propósito se han considerado las probabilidades de elección dadas por la siguiente expresión:

$$P^s(i, e_j, t) = \frac{\left(\sum_{r=1}^K L_sub(r(i, e_j, t)) \right) - L_sub(s(i, e_j, t))}{(K-1) \cdot \left(\sum_{r=1}^K L_sub(r(i, e_j, t)) \right)} \quad s = 1..K \quad (14)$$

Dónde P^s representa la probabilidad de elección de la ruta s por parte del individuo i -ésimo. Esta distribución de probabilidad asegurará que las mejores rutas tienen asociadas una probabilidad mayor haciendo que sean preferidas por los usuarios. Usar un conjunto de rutas permite distribuir mejor el tráfico de visitantes asociados a los flujos entre los elementos visitables con mayor atracción y capacidad, y evita que todos los visitantes que seleccionen su destino en un mismo instante seleccionen exactamente la misma ruta.

3. APLICACIÓN DEL MODELO A LA EXPOSICIÓN INTERNACIONAL “Zaragoza 2008”

El modelo anteriormente expuesto se aplica a modo de ejemplo al análisis del recinto de la Exposición Internacional de Zaragoza 2008, simulando un día tipo, con la afluencia de casi 100.000 individuos a lo largo de 17 horas.

3.1. Aspectos estáticos:

La siguiente tabla recoge las principales características del escenario sobre el que se aplica el modelo..

Tabla 2a. Datos de la red del recinto.

Nodos	Arcos	Edificios y pabellones	Puertas
959	1154	126	3

Tabla 2b. Datos de interés del recinto.

Superficies totales (m ²)	Superficies edificadas (m ²)
Recinto 250 000	Bajo cubierta 85.000
Parque 1 200 000	Pabellones (2 plantas) 65 000
	Área pabellones 180 000
	Frente fluvial 60 000
	Pabellón Aragón 6000
	Acuario 6 000
	Pabellón España 6.000
	Palacio de Congresos 15.000
	Pabellón puente 8000
	Torre del Agua 7.000

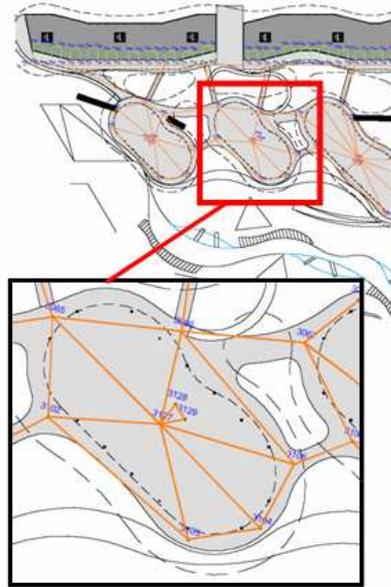


Figura 4. Tercera planta del escenario y ampliación de detalle de la red.

La figura 4 muestra detalles del diseño de la red utilizada para recoger el movimiento de los peatones sobre el escenario. De forma concreta se observa la tercera planta del recinto y una ampliación del modelo de red para una de las terrazas. El recinto de la exposición ha sido diseñado en tres plantas. La figura 5 representa la evolución temporal del número de visitantes a la exposición para el día de diseño. Estos datos se han obtenido a partir de la Oficina del Comisario de la exposición y se consideran representativos de lo que se será la afluencia de público en el 80% de los días.

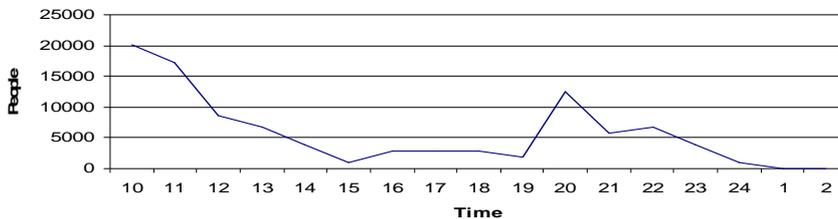


Figura 5. Evolución de la entrada de visitantes.

3.2. Parámetros principales:

Tabla 3. Principales parámetros de la simulación.

Visitantes durante un día	Tiempo de simulación	Hora inicial.	Hora final.	Δt (min)	Número de rutas en algoritmo k-paths
96000	17	10:00 AM	2:00 AM	5	3

3.3. Resultados obtenidos para el escenario propuesto:

La siguiente tabla muestra, a modo de ejemplo, los resultados más importantes para algunos de los principales pabellones de la exposición. Se detalla el número de visitantes, el número máximo de personas en el interior, el instante en el que se alcanza el máximo número de visitas así como el instante en el que se alcanza la máxima cola de espera y el tamaño de la misma.

Tabla 4. Resultados de edificios y pabellones

Pabellón	Número Visitas	Número máximo de visitas	Instante de máximo num.. de visitas	Cola maxima en entrada	Instante de cola máxima
Square 1	7866	325	11:18:00	219	16:06:00
Restaurant.1	7367	375	13:30:00	451	22:09:00
Restaurant.2	9100	375	12:12:00	451	14:03:00
Acuarium	6738	539	18:00:00	0	0:00:00
Acuarium restaurant	963	120	14:06:00	145	22:06:00
Spain	10666	1350	17:51:00	196	18:03:00
Spain restaurant	565	75	14:09:00	62	22:03:00
Aragón spanish land	15484	975	10:42:00	598	12:48:00
Conference Palace	21518	1150	10:33:00	701	10:39:00
Bridge Pavilion	21951	1000	10:42:00	701	11:21:00
France 1	12041	300	10:27:00	252	10:57:00
France restaurant	669	120	14:06:00	145	22:03:00
Germany 1	13950	350	10:39:00	339	11:00:00
Belgium	13533	350	10:54:00	254	10:57:00
Denmark	10389	275	11:06:00	155	12:24:00
Greece	14004	350	11:21:00	254	12:03:00
UK 1	13255	350	11:51:00	339	12:39:00
Canada1	12439	400	11:51:00	437	17:51:00
Russia	10507	350	15:09:00	243	17:21:00
China	9097	275	12:45:00	213	17:15:00
USA	9478	350	15:18:00	241	17:21:00
Czech Republic	9524	350	15:39:00	254	17:33:00
Turkey	9174	350	16:06:00	254	17:33:00
México1	8924	400	16:27:00	250	17:15:00
Japan 1	11768	400	12:18:00	389	18:00:00
Korea	10940	275	10:33:00	213	10:36:00
Morocco 1	14336	350	10:12:00	339	10:15:00
Africa	13182	425	11:33:00	241	13:24:00
Egipt	10727	290	10:51:00	161	12:48:00
Venezuela	8882	300	14:24:00	181	14:18:00
Cuba	8195	300	15:18:00	181	17:03:00
Morocco 2	13312	350	10:15:00	254	10:21:00
Portugal	7576	200	11:06:00	110	11:24:00
Italy	7088	200	11:51:00	111	12:06:00
Italy restaurant	784	120	14:03:00	145	14:03:00

3.3.1. Resultados medios de interés:

La siguiente tabla muestra algunos resultados medios de interés que han servido para validar el modelo en comparación con resultados obtenidos en otras citas internacionales de estas características.

Tabla 5. Principales resultados

Longitud máxima de recorrido (m)	12352
Longitud media de recorrido (m)	4388
Longitud mínima de recorrido (m)	680
Tiempo máximo de permanencia (min)	924
Tiempo medio de permanencia (min)	510
Tiempo mínimo de permanencia (min)	57
Nº mínimo de pabellones visitados	21
Nº medio de pabellones visitados	10,57
Nº mínimo de pabellones visitados	1

3.3.2. Evolución de las salidas a generar en el parque frente a salidas generadas realmente:

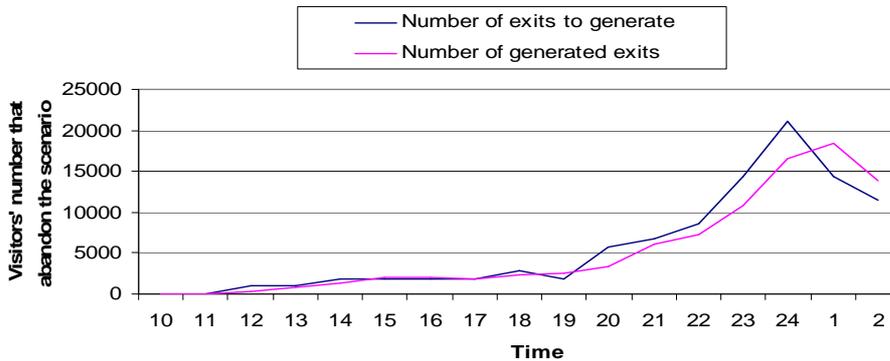


Figura 5. Evolución de salidas del escenario (Salidas a generar y salidas generadas).

Un efecto interesante observado en los datos obtenidos de la simulación es que la curva que representa las salidas reales del parque, esto es, el número de visitantes que abandonan el recinto en cada instante, presenta cierto retraso respecto a la curva de salidas especificadas como datos de salida. Este efecto es lógico, ya que los usuarios necesitan cierto tiempo para llegar a la puerta que les ha sido asignada para salir del recinto. Esto provoca además que la curva de salidas reales atenúe los cambios de la curva de datos de salida, como se observa en la gráfica, debido a la aleatoriedad en la asignación de puertas de salida.

3.3.3. Evolución general del número de visitantes:

La figura 6 representa la evolución temporal de las visitas durante una jornada completa. Se muestra el número total de visitantes, el valor acumulado de las salidas del escenario, la evolución del número de personas en el interior de pabellones, la evolución temporal del número de visitantes en cola y el número de peatones en movimiento en función del tiempo. Resulta especialmente interesante comprobar como en torno a las 14:00 horas se inicia una importante bajada en el número de peatones en movimiento coincidiendo con la hora tradicional de almuerzo en España. Esa disminución se mantiene aproximadamente hasta las 17:00, momento en el cual los visitantes reanudan su actividad. También resulta interesante observar como el número de visitantes en el

interior de pabellones permanece casi constante en ese período de tiempo, constatando el hecho de que numeroso público aprovecha estos momentos para continuar con las visitas a edificios.

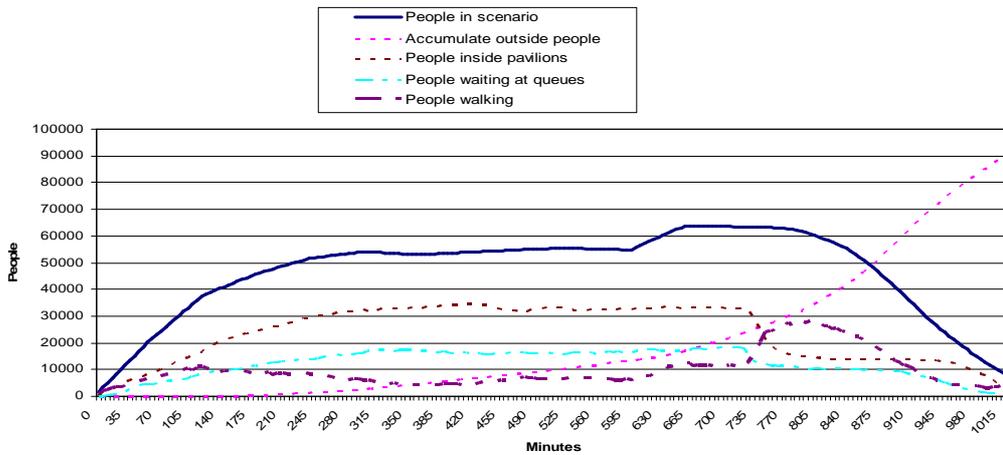


Figura 6. Variación Evolución temporal de las visitas, colas, visitantes en edificios y en arcos.

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un tipo de nuevo modelo para el análisis del comportamiento de flujos peatonales en grandes eventos expositivos (Exposiciones internacionales y grandes eventos). El modelo propuesto combina el uso de modelos de la planificación de transporte y simulación microscópica en tiempo discreto.

De manera concreta, el modelo propuesto (Dynamic Distribution and Assignment Simulation – DDAS- Model) basado en técnicas de simulación en tiempo discreto y en asignación dinámica de rutas, incorpora las etapas de distribución y asignación de forma entrelazada y dinámica a lo largo de un horizonte específico de tiempo.

El modelo ha sido aplicado por la Organización de la exposición internacional de Zaragoza 2008 con el propósito de simular un día de diseño, con una afluencia de casi 100,000 personas a lo largo de 17 horas. El análisis de los resultados de este modelo ha permitido estudiar el nivel del servicio en la red y en los pabellones y reconsiderar algunas especificaciones de diseño del recinto.

El modelo puede ser aplicado en contextos no peatonales, como base para el estudio de los fenómenos gobernados por la atracción de vehículos hacia zonas específicas, como la afluencia a parkings en áreas centrales de ciudades.

Referencias

Behnam, Jahanbakh and Bharat G. Patel (1977), *A Method for Estimating Pedestrian Volume in a Central Business District, Pedestrian Controls, Bicycle Facilities, Driver Research, and System Safety*, Transportation Research Record 629, Washington, DC.
 Davis, Scott E., L. Ellis King and H. Douglas Robertson (1991). *Predicting Pedestrian Crosswalk Volumes*, Transportation Research Record 1168, Washington, DC.

Dijkstra, E (1959). *A note on two problems in connection with graphs*. Numerical mathematics (1), pp. 269-271

Eppstein, D (1994). *Finding the K shortest paths*. Proc. 35th Symp. Foundations of Computer Science, IEEE, pp.154-165.

Ercolano, James M., Jeffrey S. Olson, Douglas M. Spring (1997), *Sketch-Plan Method for Estimating Pedestrian Traffic for Central Business Districts and Suburban Growth Corridors*, Transportation Research Record 1578, Washington, DC.

Fruin J. J. (1971). *Designing for Pedestrian: a level of service concept*. Highway Research Record, 335, 1-15.

Fruin J. J. (1971). *Pedestrian Planning and Design*. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, Inc..

Hass, R.C.G. and J.F. Morrall (1967). *Circulation Through a Tunnel Network*. Traffic Quarterly, April 67..

ITE. (1994) "*Manual of Transportation Engineering Studies*", Prentice Hall, New Jersey, Institute For Transportation Engineers, 1994.

Kagan, L.S., W.G. Scott, and U.P. Avin (1978). *A Pedestrian Planning Procedures Manual*. Prepared for the Federal Highway Administration, Report Nos. FHWA-RD-79-45, FHWA-RD-79-46, and FHWA-RD-79-47 (3 volumes).

Matlick, Julie Mercer (1996). *If We Build it, Will They Come? #69 Forecasting Pedestrian Use and Flows, Forecasting the Future*, Bicycle Federation of America -- Pedestrian Federation of America, Pro Bike/Pro Walk '96, pp. 315-319.

May, A. D. (1990) "*Traffic Flow Fundamentals*". New Jersey. Prentice Hall.

Ness, M.P., J.F. Morrall, and B.G. Hutchinson (1969). *An Analysis of Central Business District Pedestrian Circulation Patterns*. Highway Research Record 283.

Ortúzar J. D., Willumsen L. G. (1994) "*Modelling Transport*", John Wiley & Sons Inc. 2nd edition, May 1994.

Pushkarev, Boris and Jeffrey M. Zupan (1971). *Pedestrian Travel Demand*. Highway Research Record 355.

Queirós, E. and Margarida, M.(1998). *The K shortest path problem*. International Journal of Foundations of Computer Science, June.

Queirós, E., Margarida, M. and Esteves J. L. (1999),. "*Labeling Algorithms for Ranking Shortest Paths*". University of Coimbra. Internal Report.

Queirós, E., Margarida, M. and Esteves.(1999),. J. L. "*Deviation algorithms for ranking shortest paths*". International Journal of Foundations of Computer Science. 10(3),.

Teknomo K (2006). *Application of microscopic pedestrian simulation model*. Transportation Research Part F. Vol 9. 15-27.

Transportation Research Board, National Research Council (2000). "*HCM, Highway Capacity Manual*", Chapter 18, pp. 1-6. Washington D. C.

TRB (1985). "*Highway capacity manual, Special Report 204*", Transportation Research Board, Washington, DC.

Wardrop, J. G. (1952) *Some theoretical aspects of road traffic research*, Proceedings, Institution of Civil Engineers, PART II, Vol.1, pp. 325-378.

Yen, J.Y.(1971) *Finding the k shortest loopless paths in a network*, Management Science, 17:712- 716..