

Valor de la información del tiempo de viaje por carretera

Francesc Soriguera Martí

Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos. CENIT-Centro de Innovación del Transporte, España

Víctor Jodar Plaza

Ing. Caminos, Canales y Puertos. Cátedra ABERTIS – UPC, España

RESUMEN

De un tiempo a esta parte, un objetivo común de muchos gestores de tráfico alrededor de todo el mundo es proporcionar información en tiempo real del tiempo de viaje previsto en las infraestructuras que gestionan. A estos efectos se han invertido muchos recursos en la monitorización intensiva que se requiere para obtener este tipo de información, por ejemplo en las redes metropolitanas de autopistas. Las tecnologías utilizadas y las precisiones conseguidas pueden ser múltiples y variadas, aunque todas ellas afectadas por la incertidumbre intrínseca al objetivo perseguido: una previsión a corto término.

Estos esfuerzos responden al hecho que el tiempo de viaje previsto es la información de tráfico que más valora el usuario. No obstante, se desconoce como cuantificar el valor de esta información y como varía en función de la precisión proporcionada. Este conocimiento permitiría realizar análisis coste – beneficio que ayudarían a la toma de decisiones en relación a la tecnología a utilizar, la precisión necesaria, la selección de ámbitos rentables, o en analizar la disponibilidad al pago por esta información.

El presente artículo pretende rellenar este vacío. Se propone una metodología que cuantifica el valor de la información del tiempo de viaje. Este valor será mayor cuanto mayor sea la reducción de la incertidumbre que provoca y cuanto mayor sea el coste de esta incertidumbre. Por lo tanto el valor de la información dependerá del usuario y su conocimiento previo de la infraestructura, de la fiabilidad de la propia infraestructura, del motivo del viaje, del momento en el que recibe la información, de las posibles alternativas de actuación disponibles y de la precisión de la información recibida.

Se presenta un modelo probabilístico, basado en la teoría de la utilidad aleatoria, que partiendo de estas variables proporciona el valor de la información para un usuario concreto en una determinada infraestructura. Agregando estos valores para una determinada composición de conductores se puede obtener el valor global del sistema. En el artículo se presenta un ejemplo de aplicación de la metodología para el acceso norte por autopista a la ciudad de Barcelona.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los cambios más substanciales que han experimentado las autopistas en la última década ha sido la instalación generalizada de dispositivos de señalización dinámica. Aunque su soporte tecnológico y de comunicaciones no puede considerarse novedoso (las primeras implementaciones prácticas de paneles de información variable se remontan a los años 80 en los EEUU, (VMSI, 2012)), no ha sido hasta tiempos recientes que la madurez de la tecnología y su viabilidad económica junto a las necesidades de la sociedad han conducido a su instalación generalizada en múltiples formatos.

La mayoría de los sistemas instalados actualmente responden al objetivo de proporcionar información. La capacidad dinámica de esta información permite superar el esquema tradicional de la información de tráfico, consistente en una información estática, basada en la recurrencia (situación media experimentada en el pasado), difundida mediante avisos previos al viaje (i.e. pre-trip information) ya fuere mediante boletines informativos en radio, televisión y prensa escrita o mediante puntos informativos en la misma autopista. En general, se trataba de una información cualitativa y aproximada (e.g. congestión leve/moderada/intensa en un grupo más o menos específico de carreteras y en determinados períodos del día, para un conjunto de días concretos) que no permitía la toma de decisiones a nivel operativo (e.g. ¿cuánto antes tengo que salir? ¿Qué ruta tomo?). Navegadores, radio-rds, paneles de mensaje variable (PMV), aplicaciones de telefonía móvil, en definitiva la información dinámica, permite informar del estado actual del tráfico, lo que posibilita la información específica durante el viaje (i.e. on-trip information) además de la información previa. A nadie se le escapa que independientemente de lo tecnológicamente avanzada que sea la herramienta de difusión, para que la información resulte realmente útil tiene que difundirse en tiempo real, debe ser cuantitativa y en expresada en una variable fácilmente interpretable. Se reconoce que la información en términos de tiempo de viaje cumple magníficamente con estos requisitos (Palen, 1997).

Esto implica que un sistema ATIS en autopista requiera de una monitorización en tiempo real del tiempo de viaje de la que alimentarse. Este es el eslabón más débil del sistema. Los sistemas de monitorización tradicionales (e.g. detectores de espira) no se adaptan a este tipo de información (Soriguera y Robusté, 2011), lo que supone que para conseguir un nivel de precisión en la información aceptable se requiera de inversiones adicionales en monitorización, aunque pueden existir excepciones, como en el caso de las autopistas con un sistema de peaje cerrado (Soriguera et al. 2010). Adicionalmente, se debe tener en cuenta que por muy adecuada e intensiva que sea la monitorización, nunca se obtendrá una información totalmente precisa. Esto se debe a que la información deseada por el conductor es el tiempo esperado para su viaje. Esta información la desea antes de finalizar el viaje, y por lo tanto la medición precisa en tiempo real no es suficiente y se requiere una previsión a corto plazo, con su incertidumbre intrínseca (Soriguera y Robusté, 2010).

Se puede concluir que los sistemas de información del tiempo de viaje en tiempo real, son sistemas cuya precisión está relacionada con la densidad y el tipo de monitorización (con una relación directa con el coste de monitorización, generalmente elevado) y siempre afectados por una imprecisión de base. Es en este contexto que aparece la pregunta clave que debería formularse ante cualquier implantación ¿Es rentable la inversión en este sistema de información? La respuesta fundada a esa pregunta debe partir de una valoración cuantitativa de costes y beneficios, siendo el valor de la información de tiempo de viaje una de las incógnitas a resolver.

El presente artículo da respuesta a esta incógnita. Se presenta un modelo que permite cuantificar el valor de la información del tiempo de viaje en función de un conjunto de variables medibles y unos parámetros de comportamiento. Este modelo, confrontado a un modelo de costes del sistema permitiría establecer en qué condiciones el sistema es rentable, para que configuración de autopistas y cuál es el nivel de precisión óptimo. Este nivel de riqueza difícilmente puede obtenerse mediante la aproximación tradicional al problema, ajustando estadísticamente un modelo de comportamiento a los resultados de unas encuestas sobre preferencias (e.g. Harder et al. 2005).

La aproximación propuesta consiste en considerar el valor de la información igual a la reducción de costes del viaje que produce su conocimiento (Polak, 1987). El tiempo de viaje y sus distintas percepciones, son la principal componente de estos costes. El resto de costes no resultan relevantes para el presente análisis por lo que tiempo y coste se utilizan como sinónimos. Habitualmente se considera que el coste de un viaje tiene un mínimo (correspondiente a condiciones de circulación libres) y se incrementa con el nivel de congestión (incremento del tiempo de viaje). La congestión aparece cuando la demanda es superior a la oferta (o capacidad) disponible en una red de transporte. El tiempo de viaje crece de manera polinomial a medida que aumenta la relación demanda/capacidad. El hecho que ambas, demanda y capacidad, sean variables aleatorias conlleva que no solo los tiempos de viaje crezcan con el nivel de congestión, sino también la varianza de estos tiempos. El hecho que un pequeño incidente en un cuello de botella congestionado produzca un enorme incremento en los tiempos de viaje, cuando el mismo incidente no implicaría prácticamente consecuencias en una autopista poco demandada, ejemplifica esta relación directa entre tiempo de viaje medio y varianza de los tiempos de viaje. La varianza del tiempo de viaje implica unos costes adicionales de la congestión: la incertidumbre. Estos costes, referidos habitualmente como costes de falta de fiabilidad y menospreciados hasta hace poco, se ha demostrado que son importantes (Bates et al. 2001; Asensio y Matas, 2001).

Los costes de la falta de fiabilidad del tiempo de viaje son consecuencia de la incertidumbre existente y que resulta en una incapacidad de cumplir un horario preestablecido. Esto se traduce en una llegada temprana (antes de lo necesario) o una llegada tardía. Ambas suponen una extensión del tiempo de viaje, ya sea una espera en destino o un retardo adicional, con el

agravante de llegar tarde a citas y/o pérdida de conexiones en el último caso (efecto bola de nieve de las llegadas tardías). Para evitar esto último, los conductores dejan un tiempo de margen para el viaje, con lo que incrementa la probabilidad de llegar temprano. Incluso en el escenario poco probable de una llegada puntual, el estrés que supone la incertidumbre en la elección de la hora de salida y ruta, y si se va a cumplir o no el horario, ya implica un coste al conductor. Los costes de la falta de fiabilidad parecen claros.

No se debe confundir la variabilidad del tiempo de viaje con su falta de fiabilidad. La variabilidad es condición necesaria pero no suficiente para que exista falta de fiabilidad. Notar que el tiempo de viaje podría variar a lo largo del día (i.e. existe variabilidad) en tanto que la varianza del tiempo de viaje para un instante dado fuera muy pequeña. Este podría ser el caso de una autopista con una gestión activa de la demanda y la capacidad, y con un sistema de respuesta rápida ante incidentes. En este caso, los tiempos de viaje, aunque variables, serían muy previsibles, muy fiables y con poca incertidumbre para el conductor con experiencia en el trayecto. Esto supondría unos costes por falta de fiabilidad bajos. Se puede intuir que en esta situación el valor que podría aportar un sistema de información (cuya misión principal es la reducción de la incertidumbre, inexistente en este caso hipotético) sería igualmente bajo, al igual que lo sería para aquellas infraestructuras en las que el tiempo de viaje tiene muy poca variabilidad (y por lo tanto mucha fiabilidad). Notar aquí que el nivel de información previa influye en el nivel de incertidumbre. Esto conlleva que una determinada información pueda resultar valiosa para un conductor esporádico y al mismo tiempo irrelevante para un conductor habitual. Volviendo a la relación entre variabilidad y fiabilidad, se debe considerar que actualmente la gestión activa de la congestión es muy limitada lo que conlleva que la variabilidad de los tiempos de viaje esté directamente relacionada con su falta de fiabilidad, aunque conceptualmente respondan a fenómenos muy distintos. Esta relación implica que aquellas estrategias cuyo objetivo es la reducción de la congestión, también mejoran la fiabilidad de la infraestructura.

La información del tiempo de viaje (entendida como una previsión cuantitativa a corto plazo) es una medida específica para reducir los costes de la falta de fiabilidad. Estos costes resultan de la incertidumbre, definida como la diferencia entre lo que el conductor espera tardar y lo que realmente tarda. Por lo tanto estos costes son función de lo que espera el conductor que se fundamenta en su conocimiento previo al viaje. La información modifica este conocimiento previo, reduciendo su incertidumbre (considerando que la información cumple con unos mínimos de precisión) lo que puede permitir la modificación de las decisiones relativas al viaje (hora de salida, ruta, modo) y consecuentemente reducir los costes del viaje. En resumen, el valor de la información del tiempo de viaje para un conductor responderá a la reducción de los costes por falta de fiabilidad que esta le proporcione. Esto es la diferencia entre los costes originales y los experimentados cuando se dispone de la información. Esta diferencia depende de varios factores que se pueden clasificar en tres grupos dependiendo de si se originan en la infraestructura, en el sistema de información o en el conductor (Tabla 1).

	Factor	Efecto
Infra- estructura	Varianza de los tiempos de viaje	Coste original de la falta de fiabilidad
	Existencia de rutas/modos alternativos	Posibilidad de reducir el tiempo de viaje debido a un cambio espacial
Conductor	Experiencia en el corredor	Coste original de la falta de fiabilidad
	Capacidad de modificar la hora de salida	Posibilidad de reducir el tiempo de viaje debido a un cambio temporal
	Valor del tiempo	Costes del viaje
Sistema información	Disponibilidad información pre-trip (on-trip se supone por defecto)	Posibilidad de reducir el tiempo de viaje debido a un cambio temporal
	Precisión de la información	Coste de la falta de fiabilidad con información

Tabla 1 – Resumen de los factores que afectan al valor de la información del tiempo de viaje.

El presente artículo presenta un modelo para obtener el valor de la información del tiempo de viaje en autopista como función de los parámetros y variables indicados en la Tabla 1. Esquemáticamente, el modelo se divide en dos partes. La primera parte es un modelo de elección simultánea del tiempo de salida y ruta. Se ha demostrado que estas son las decisiones sobre las que el conductor actúa como resultado de recibir información (Khattak et al. 1996; Mahmassani y Liu, 1999). El modelo de elección propuesto puede considerarse basado en la maximización de la utilidad esperada, al igual que la mayoría de trabajos que consideran la incertidumbre en el tiempo de viaje como una variable explicativa de la elección (Bates et al., 2001; Ettema y Timmermans, 2006; Noland y Polak, 2002; Noland y Small, 1995; Polak, 1987). No obstante el modelo propuesto difiere conceptualmente en como el conductor toma la decisión. La aproximación tradicional en la teoría de la utilidad aleatoria supone que el individuo escoge la alternativa que implica un menor coste esperado, que resulta de una “compleja” optimización donde los distintos costes del tiempo (tiempo de viaje, tiempo de llegada temprana, penalizaciones por llegada tardía, etc.) son conocidos y ponderados por el individuo. Este procedimiento ha sido criticado por la falta de realismo en como los individuos toman decisiones (Avinieri y Prashker, 2003; Bonsall, 2003). En el modelo propuesto se considera que el conductor toma sus decisiones en función de la probabilidad que él acepta para la llegada tardía. Esta es una variable más simple, que no resulta de ninguna optimización y que se puede considerar que el conductor valora en la toma de sus decisiones. Lógicamente esta probabilidad está relacionada con los distintos costes del tiempo y la relación responde a la optimización descrita anteriormente. No obstante estos no tienen por qué ser valorados por el usuario en el momento de la toma de decisiones. Esta modelización permite un modelo de elección muy simple que facilita la incorporación de la elección del tiempo de salida y de ruta en un solo paso, cosa que no se había propuesto en la literatura referenciada.

La segunda parte del modelo corresponde a un modelo de costes. Este modelo simplemente traduce a costes los resultados de las decisiones en el tiempo de salida y ruta. Este modelo se puede ver como una evolución del propuesto originariamente por Small (1982), incluyendo por ejemplo la valoración de la reducción del estrés o la capacidad de reprogramación de actividades ante un retraso informado.

Las Secciones 2 y 3 que siguen están dedicadas a los modelos de elección y costes respectivamente. Posteriormente en la Sección 4 se presenta una aplicación concreta de la metodología con datos procedentes de la autopista AP-7 entre Barcelona y la frontera Francesa, que permite obtener un orden de magnitud del valor de la información en determinados supuestos. Finalmente, la Sección 5 se dedica a discutir las hipótesis realizadas en la construcción del modelo y a presentar las conclusiones obtenidas.

2. MODELO DE ELECCIÓN DEL TIEMPO DE SALIDA Y RUTA

Se asume que un conductor ante la necesidad de realizar un viaje debe tomar solamente dos decisiones: escoger un instante de salida y escoger una ruta entre las alternativas disponibles. La posibilidad del cambio de modo no se contempla en el presente artículo, y se puede ver como una posible extensión de investigación futura. Se asume igualmente que la diferencia entre las utilidades proporcionadas por todas las posibles decisiones del conductor depende únicamente de posibles diferencias entre los tiempos de viaje. El conductor tomará la decisión que maximice su utilidad, o equivalentemente que minimice su tiempo asignado al viaje, “ t_a ”.

Se asume que todo conductor dispone de una información previa que le permite dar soporte a estas decisiones. Esta información previa es representada por una distribución de tiempos de viaje percibidos, “ $\tilde{f}_D(d)$ ”, que proporciona al conductor un tiempo esperado de viaje “ $\tilde{d} = E[\tilde{f}_D(d)]$ ”. Esta hipótesis no supone ninguna pérdida de generalidad, en tanto que “ $\tilde{f}_D(d)$ ” no tiene porqué asemejarse a “ $f_D(d)$ ”, la distribución de tiempos de viaje reales en la autopista. En este sentido se considera que el mínimo conocimiento previo que puede tener un conductor es el conocimiento del tiempo de viaje libre, “ t_f ”, al poderlo obtener directamente a partir de la distancia, por defecto conocida. En este caso de mínima información previa (tipificado en el artículo como conductores esporádicos), la distribución de tiempos de viaje construida mentalmente por el conductor parte del conocimiento de “ t_f ” y se completa mediante la experiencia vital previa del conductor en este tipo de vías. Por el contrario, un conductor habitual en el tramo de análisis dispondrá de un conocimiento previo muy próximo a la realidad “ $\tilde{f}_D(d) \approx f_D(d)$ ”. Se considera adecuado definir estas distribuciones del tiempo de viaje en función del retardo normalizado “ d ”, donde:

$$d = \frac{t - t_f}{t_f} = \frac{t}{t_f} - 1 \quad (1)$$

Este cambio de variable permite definir las distribuciones en una variable adimensional “ d ” e independientes de la ruta de análisis, caracterizada por “ t_f ”. Implícitamente se asume un coeficiente de variación constante de los retardos normalizados entre las distintas rutas, que se traduce en un incremento de la desviación típica de la distribución en tiempos que es proporcional al “ t_f ” de la ruta en cuestión. El incremento de la varianza de los tiempos de viaje con la longitud del trayecto es un hecho contrastado.

Suponiendo que todo conductor conoce su “ $\tilde{f}_D^{(j)}(d)$ ” para las distintas rutas posibles “ j ” la elección del instante de salida “ d_a ” (equivalente adimensional de “ t_a ”) es un caso típico de toma de decisiones bajo incertidumbre. En el presente modelo, se define “ P_d ” como la probabilidad aceptada de llegar tarde. Esta probabilidad se puede visualizar como el número de viajes respecto al total que se considera aceptable llegar más tarde de una hora límite. Por ejemplo, un conductor puede aceptar llegar tarde al trabajo uno de cada diez días, que correspondería a “ $P_d = 0,1$ ”. Dadas estas definiciones “ $d_a(P_d)$ ” se obtiene como:

$$d_a = \min_j [d_a^{(j)}] = \min_j [\tilde{F}_D^{(j)-1}(1 - P_d)] \quad (2)$$

Donde “ $\tilde{F}_D^{(j)-1}$ ” corresponde a la función de probabilidad acumulada inversa correspondiente a la distribución “ $\tilde{f}_D^{(j)}(d)$ ” (ver Figura 1). El argumento “ j^* ” que minimiza la Ecuación 2 corresponde a la ruta escogida.

Notar que la regla de decisión formulada en la Ecuación 2 supone una generalización de los criterios tradicionales de elección bajo incertidumbre (DeNeufville, 1990). Por ejemplo el criterio del mínimo valor esperado correspondería a “ $P_d = 0,5$ ”, el criterio minimax “ $P_d = 0$ ” y el criterio minimin “ $P_d = 1$ ”. Igualmente el modelo reproduciría los resultados obtenidos si se utilizara una elección basada en la maximización de la utilidad aleatoria siempre y cuando se cumpla cierta relación entre los costes que definen la función de utilidad y “ P_d ”. Esta relación se presenta en la próxima sección. No obstante este modelo no asume que el conductor conoce de forma precisa su función de utilidad, ni supone que basa su elección en una compleja optimización. Solo supone que tiene una “ P_d ” objetivo.

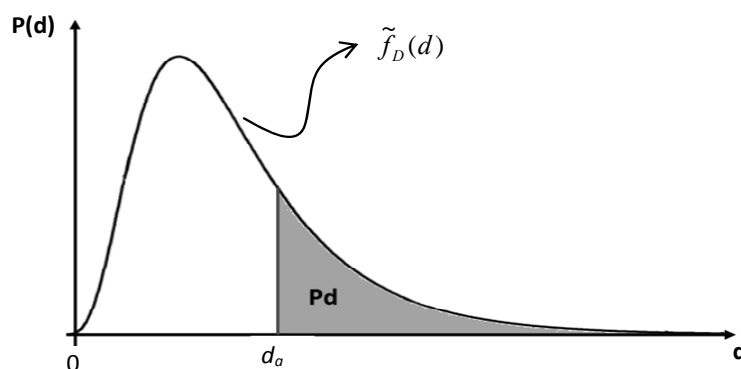


Fig. 1 – Selección del instante de salida “ d_a ” como función de “ P_d ” sin información

Es interesante destacar que el modelo permite caracterizar las dos grandes tipologías de viaje existentes, que tradicionalmente han requerido de distintos modelos. Por un lado, aquellos viajes para los que existe una hora límite de llegada y para los que tiene cierta importancia llegar a tiempo. En la literatura se designan como “morning commute”. Para estos viajes, el conductor asigna cierto colchón de tiempo adicional para contrarrestar la incertidumbre. Estarán caracterizados por valores “ $P_d < 0,5$ ”. Por el contrario, existen viajes para los que no existe hora límite y simplemente se quiere demorar el mínimo. Estos son los viajes tipo “evening commute” y se caracterizaran por valores de “ $P_d > 0,5$ ”. En este último caso, la interpretación de “ P_d ” no corresponde tanto a la probabilidad aceptada de llegar tarde como a la aversión al riesgo en la toma de decisiones (más próximo a 0,5 implica decisiones más conservadoras).

Resumiendo, la Ecuación 2 indica como la elección del instante de salida y ruta escogida depende de “ $\tilde{f}_D^{(j)}(d)$ ” que es función de las alternativas disponibles y del conocimiento previo de la varianza de los tiempos de viaje en estas rutas (que en mayor o menor medida está influenciado por la varianza realmente existente en estas rutas) y de “ P_d ” variable que engloba una tipología de viaje y una estructura de costes del tiempo para el individuo.

2.1 Errores de percepción y otros efectos

El modelo de elección presentado en el anterior apartado asume conocidas las distribuciones del tiempo de viaje que caracterizan el comportamiento previo del conductor, “ $\tilde{f}_D^{(j)}(d)$ ”. Para la aplicación del modelo es necesario definir estas distribuciones en función de variables medibles o conocidas. En cualquier aplicación del modelo, se suponen medibles “ $t_f^{(j)}$ ” y “ $f_D^{(j)}(d)$ ”. A su vez se supone conocida la distribución media que caracteriza el conocimiento previo de un conductor esporádico en el corredor, “ $g_D^{(j)}(d)$ ”, ya que esta distribución no depende de la aplicación concreta sino que puede considerarse una variable “universal” para un determinado tipo de vías. La utilización directa de estas distribuciones en la función de elección supondría una misma decisión para todos los conductores que afrontan las mismas alternativas con el mismo conocimiento previo. En este caso no se tendría en cuenta que distintos conductores pueden percibir de forma distinta estas distribuciones o que pueden existir decisiones irracionales en las que un conductor decide no minimizar su tiempo asignado al viaje “ d_a ”. Para tener en cuenta estos factores, se incorpora un error de percepción “ ε_i ” en la modelización del conocimiento previo. Esto se consigue simplemente añadiendo el error de percepción en la estimación del tiempo de viaje libre, incorporándolo de este modo en las distribuciones del retardo normalizado. Esto se puede formular como (se omiten los superíndices “ j ”):

$$\tilde{t}_f = t_f + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$\tilde{d} = \frac{t - \tilde{t}_f}{t_f} = d + \frac{\varepsilon_t}{t_f} \quad (4)$$

$$\tilde{f}_D(d) = \begin{cases} f_D(\tilde{d}) & \text{conductor habitual sin informaci3n} \\ g_D(\tilde{d}) & \text{conductor esporádico sin informaci3n} \end{cases} \quad (5)$$

El procedimiento descrito para modelar el error de percepci3n proporciona resultados an3logos a la formulaci3n tradicional de los modelos de elecci3n discreta con utilidades aleatorias (Train, 2003). Por ejemplo, asumiendo que los errores “ ε_t ” se distribuyen seg3n una distribuci3n normal centrada en 0 y de varianza “ σ_t^2 ”, se obtendrían probabilidades de elecci3n tipo Probit.

2.2 Efectos de un sistema ATIS

La existencia de un sistema de informaci3n del tiempo de viaje modifica el conocimiento del conductor sobre los tiempos de viaje posibles de manera que, generalmente y si el sistema tiene suficiente precisi3n, se reduce la incertidumbre. En otras palabras, un sistema ATIS modifica la distribuci3n de los tiempos de viaje percibidos, “ $\tilde{f}_D(d)$ ” (se omiten los superíndices “ j ”; obviamente estas modificaciones son de aplicaci3n en las rutas con informaci3n). Entonces, para el caso con informaci3n:

$$\tilde{f}_D(d) = f_D(d | d_i) \quad \text{conductor con informaci3n} \quad (6)$$

Donde “ $f_D(d | d_i)$ ” es la distribuci3n de los retardos normalizados “ d ” dado un retardo informado “ d_i ”. Las características de esta distribuci3n dependerán de la bondad del sistema de informaci3n. Por simplicidad se asume que los sistemas de informaci3n proporcionan informaci3n no sesgada (una propiedad deseable para todo sistema de informaci3n, aunque no todos lo cumplen como se demuestra en Soriguera y Robusté, 2011). Esta hip3tesis podría considerarse que se cumple por defecto en el caso de conductores habituales, ya que estos son capaces de corregir el sesgo sistemático a partir de su experiencia. Este fenómeno se considera en Ettema y Timmermans (2006) incluyendo un “error” de percepci3n en la informaci3n. Se asume igualmente que los errores de precisi3n del sistema se distribuyen seg3n una distribuci3n normal. Estas hip3tesis se traducen en “ $f_D(d | d_i) \approx N(d_i, \sigma_i^2)$ ” siendo la desviaci3n típica de esta distribuci3n “ σ_i ” la variable que caracteriza la precisi3n del sistema. Se considera que la difusi3n de la informaci3n permite al conductor conocer “ $f_D(d | d_i)$ ”. Esto se consigue difundiendo no solamente el tiempo de viaje esperado “ d_i ”, sino un intervalo de confianza que da idea de la precisi3n de la informaci3n, por ejemplo del 95%: $[d_i - 2\sigma_i, d_i + 2\sigma_i]$. Esto no es extraño en muchos de los sistemas de informaci3n existentes.

En definitiva, la información modifica el conocimiento previo, “ $\tilde{f}_D(d)$ ”, que consecuentemente modifica el tiempo esperado del viaje. Para el caso con información “ $\tilde{d} = E[\tilde{f}_D(d)] = d_i$ ”. Este nuevo conocimiento previo influye en la toma de decisiones (véase como influye en la Ecuación 2) y resulta en una modificación del tiempo asignado al viaje “ t_a ”, con lo que el conductor puede adaptar su instante de salida en función de este nuevo valor (ver Figura 2). No obstante, existen viajes para los cuales el instante de salida es fijo (e.g. viajes tipo “evening commute”) o tipologías de información que no permiten modificar el instante de salida (e.g. información on-trip). En estas situaciones, la elección de ruta continua realizándose en función del nuevo “ t_a ” con información, pero el instante de salida no es modificable. Estos condicionantes restaran valor a la información.

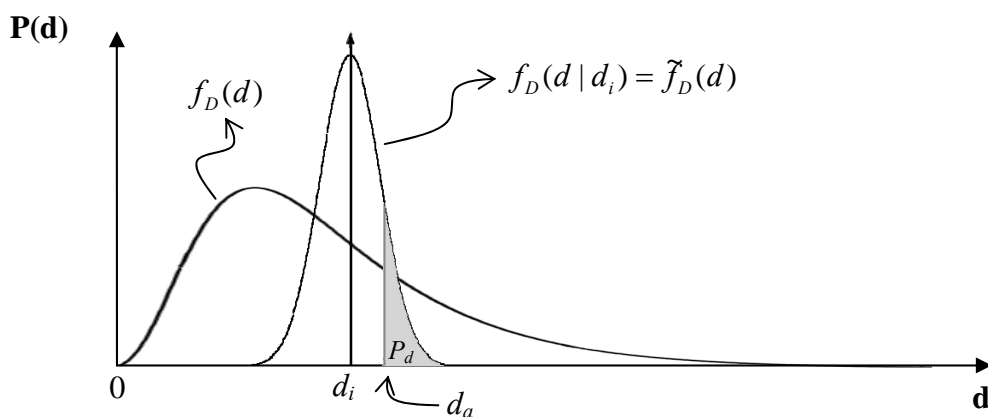


Fig. 2 – Selección del instante de salida “ d_a ” como función de “ P_d ” con información

3. MODELO DE COSTES DEL TIEMPO DE VIAJE

Conocido el tiempo asignado al viaje, “ t_a ”, se requiere un modelo de costes que permita cuantificar los costes del viaje. Solo se consideran los costes referentes al tiempo de viaje (debidos a un tiempo de viaje efectivo y a una falta de fiabilidad). No se consideran otros costes, aunque estos podrían incorporarse fácilmente sin modificar sustancialmente el modelo. El coste del viaje, “ C ”, se calcula como:

$$C = \beta(t) \cdot t + e \cdot \beta(t) \cdot t_e(t, P_d) + (L - 1) \cdot \beta(t) \cdot t_L(t, P_d, \tilde{t}) + \gamma_L \cdot \delta_L(t, P_d, \tilde{t}) + \gamma_u(P_d) \cdot \delta_u(t, P_d, \tilde{t}) \quad (7)$$

Donde: t es el tiempo real de viaje.

t_e es el tiempo “perdido” en destino por una llegada temprana.

t_L es la parte del tiempo de viaje que implica una llegada tardía no esperada. Notar que, en caso que exista, “ t_L ” está también contabilizado dentro de “ \tilde{t} ”, por lo que se debe prestar atención en no contabilizarlo doblemente.

δ_L es una variable dicotómica que toma el valor de 1 para llegadas tardías no esperadas y de 0 en caso contrario.

$$\delta_u = \begin{cases} 1 - \frac{t_e}{t_a - \tilde{t}} & \text{si } t_a > \tilde{t} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (8)$$

$\beta(t)$ corresponde al valor del tiempo de viaje estándar [€h]. En un caso general no tiene porque ser constante y puede ser función de “ t ”.

e, L son los pesos que se aplican al valor del tiempo de viaje estándar para valorar, respectivamente, los costes distintos de los tiempos perdidos en destino y de los tiempos de retraso no esperados respecto a la hora límite.

γ_L es la penalización fija por llegada tardía [€].

$\gamma_u(P_d)$ es la penalización máxima por estrés [€].

Notar como en el primer término de la Ecuación 7 se podrían incorporar todos aquellos costes adicionales que se pueden expresar en función del tiempo real de circulación (e.g. emisiones, consumo de combustible, etc.).

En relación al segundo y tercer término de la Ecuación 7, “ e ” será generalmente un parámetro <1 (el tiempo perdido en destino no penaliza tanto como el tiempo de viaje, ya que permite cierto aprovechamiento para otras tareas) y “ L ” será un parámetro >1 (los retardos no esperados implican un coste adicional). Las llegadas tardías esperadas no incurrir en este coste adicional, ya que el conductor podría haber adaptado la salida para evitarlo. Si no lo ha hecho es porque no implica un coste adicional. Para aquellos viajes sin posibilidad de modificar el instante de salida (i.e. “evening commute” o información on-trip) la llegada tardía se puede compensar con una capacidad de reprogramación de actividades en caso de que sea esperada. Esta discusión también se aplica al tercer término de la ecuación, que incorpora una penalización fija por llegada tardía inesperada.

El último término de la Ecuación 7 incorpora el coste del estrés. Este coste se modeliza como un valor máximo “ $\gamma_u(P_d)$ ” que es función de “ P_d ”. A menor “ P_d ”, mayor importancia en evitar la llegada tardía y mayor estrés a medida que se aproxima la hora límite. Se asume una relación cuadrática de “ $\gamma_u(P_d)$ ” en relación a “ P_d ”:

$$\gamma_u(P_d) = U \cdot (1 - P_d)^2 \quad (9)$$

Donde “ U ” es el valor máximo posible a calibrar. “ $\gamma_u(P_d)$ ” es ponderado por un peso “ δ_u ” que tiene en cuenta que solo existe estrés cuando el tiempo de viaje es mayor al esperado y que este estrés es máximo cuando se acerca la hora límite.

La definición de los parámetros incluidos en la Ecuación 9 no es independiente de “ P_d ”. Se

debe tener en cuenta que “ P_d ” define la elección y esta influye en los valores de “ t_e ”, “ t_L ”, “ δ_L ” y “ δ_u ” que a su vez influyen en el coste “ C ”. Entonces, para que el modelo sea consistente con la teoría de la elección basada en la maximización de la utilidad esperada la relación entre “ e ”, “ L ”, “ U ” y “ γ_L ” no puede ser arbitraria y tiene que estar en consonancia con el valor de “ P_d ” considerado. Menores “ P_d ” implican citas de mayor importancia y deben corresponder a mayores valores de “ L ”, “ U ” y “ γ_L ” en relación a “ e ”.

Finalmente, el valor de la información, “ V ”, se obtiene como la diferencia entre el coste del viaje sin información respecto a con información:

$$V(t, Pd, \tilde{r}) = C^{(s)}(t, Pd, \tilde{r}) - C^{(i)}(t, Pd, \tilde{r}) \quad (10)$$

Los superíndices “ s ” y “ i ” hacen referencia al caso sin y con información respectivamente e incorporan la ruta escogida en cada caso. El valor esperado del valor de la información para las posibles realizaciones de “ t ” será:

$$E[V(Pd, \tilde{r})] = \int_0^{\infty} C^{(s)}(t, Pd, \tilde{r}) \cdot f_D^{(s)}\left(\frac{t - t_f^{(s)}}{t_f^{(s)}}\right) \partial t - \int_0^{\infty} C^{(i)}(t, Pd, \tilde{r}) \cdot f_D^{(i)}\left(\frac{t - t_f^{(i)}}{t_f^{(i)}}\right) \partial t \quad (11)$$

3. APLICACIÓN EN EL CORREDOR DE ACCESO NORTE A BARCELONA

El modelo propuesto se aplica a un caso hipotético en el que se quiere cuantificar el valor que aportaría un sistema de información del tiempo de viaje por autopista en el corredor de acceso norte a Barcelona. Este corredor de acceso está formado por dos alternativas por autopista: la autopista AP-7 y la Autopista del Maresme (C-31). Se considera una situación idealizada en la que se difundiría información en un punto que permite la elección entre las alternativas y cuyo tiempo de viaje libre a Barcelona es aproximadamente de 30 minutos para ambas rutas (este punto podría corresponder aproximadamente a la localidad de Argenton). Dada esta configuración, los parámetros utilizados para aplicar el modelo se presentan en la Tabla 2.

Parámetro		Valor	Ref.
$f_D(d)$ (ambas rutas)	Circulación libre	Exponencial neg. mixta; $\tilde{d} = 0,054$ $f_D(d) = \begin{cases} 0,461 & \text{si } d = 0 \\ (10,05 \cdot e^{-10,05 \cdot d}) \cdot (1 - 0,461) & \text{en otro caso} \end{cases}$	[1]
	Congestión	Log-Normal ($\mu = -0,71, \sigma = 0,55$); $\tilde{d} = 0,57$	[1]
$g_D(d)$	Esporádicos	Exponencial negativa; $\tilde{d} = 0,78$; $g_D(d) = 1,282 \cdot e^{-1,282 \cdot d}$	[1]
ε_t	Error percepción cond. habituales	Distribución Normal ($\mu = 0, \sigma = 0,08$)	[2]

ε_i	Error percepción cond. esporádicos	Distribución Normal ($\mu = 0, \sigma = 0,47$)		[1]
$\beta(t)$	Valor estándar del tiempo	$\beta(t) = \begin{cases} 0,054 \cdot B & \text{si } t \leq 5 \text{ min} \\ 0,615 \cdot B & \text{si } 5 \text{ min} < t \leq 15 \text{ min} ; B=14,1 \text{ €h} \\ B & \text{si } t > 15 \text{ min} \end{cases}$		[3,4]
U	Máximo estrés	1,52 €/viaje		[1]
L, e, γ_L	Penalizaciones para llegada temprana/tardía	$P_d = 0,1$	$L = 3,76, e = 0,64, \gamma_L = 16 \text{ €}$	[4,5]
		$P_d = 0,05$	$L = 6,80, e = 0,64, \gamma_L = 80 \text{ €}$	
		$P_d = 0,5 \text{ a } 1$	$L = 1,5, e = 0, \gamma_L = 0 \text{ €}$	

Tabla 2 – Parámetros utilizados en la aplicación del modelo. [1] Jodar (2011), [2] Ben-Elia y Shiftan (2010), [3] AASHTO. (1977), [4] Asensio y Matas (2008), [5] Small (1982).

En la Tabla 4 se presentan los resultados del modelo. Se distinguen distintos escenarios en función de la tipología del viaje, del tipo de información y de las condiciones de tráfico existentes. La Tabla 3 resume las características de cada escenario.

Escenario				Descripción y características
#	Tipo de viaje	Tipo de información	Condiciones de tráfico	
1	Morning commute $P_d = 0,1$	Pre-trip	Congestión recurrente	Viaje por la mañana al trabajo, en hora punta y con condiciones de congestión recurrente en ambas rutas. Existe la posibilidad de modificar el instante de salida.
2		On-trip	Congestión recurrente	Viaje por la mañana al trabajo, en hora punta y con condiciones de congestión recurrente en ambas rutas. El tipo de información no permite cambiar el instante de salida pero si escoger ruta.
3		On-trip	Congestión no recurrente	Viaje por la mañana al trabajo. En condiciones habituales no existe congestión. Un incidente en una de las rutas provoca congestión en ella. El tipo de información no permite cambiar el instante de salida pero si escoger ruta.
4	Evening commute	On-trip	Congestión recurrente	Vuelta a casa después del trabajo en hora punta de la tarde con congestión recurrente. La hora de salida es fija.
5	$P_d = 0,5$	On-trip	Libres	Vuelta a casa después del trabajo en condiciones libres. La hora de salida es fija.

6		On-trip	Congestión no recurrente	Vuelta a casa después del trabajo. En condiciones habituales no existe congestión. Un incidente en una de las rutas provoca congestión en ella. La hora de salida es fija, y se puede escoger ruta.
7	Conductor esporádico por placer $P_d = 0,5$	Pre-trip	Libres	Conductor esporádico que realiza un viaje por placer, escogiendo un período de condiciones libres. Puede adaptar su instante de salida.
8	Conductor esporádico por trabajo $P_d = 0,05$	Pre-trip	Congestión recurrente	Conductor esporádico en una ruta que realiza un viaje donde la llegada a tiempo es muy importante. El viaje es en hora punta y puede adaptar su instante de salida.

Tabla 3 – Resumen de los escenarios considerados y sus características. Nota: Los parámetros “ P_d ” indicados están relacionados con los parámetros “ L ”, “ γ_L ” y “ e ”, según se indica en la Tabla 2.

Escenario	Valor [€viaje], $\frac{\sigma_i}{d_i} = 15\%$ ”			$\frac{\partial V}{\partial(\sigma_i/d_i)}$
	Cambio ruta	Falta fiabilidad	Total	[€/ %]
1	0,21	1,20	1,41	0,06
2	0,25	0,72	0,97	0,05
3	2,28	1,85	4,13	0,04
4	0,05	0,05	0,10	0,01
5	0,01	0,00	0,01	0,00
6	2,14	0,31	2,45	0,01
7	0,06	0,00	0,06	0,00
8	0,23	4,15	4,38	0,14

Tabla 4 – Valor de la información en los escenarios considerados. Nota: El valor del cambio de ruta corresponde a la reducción efectiva del tiempo de circulación que se obtiene como resultado de la información (primer término de la Ecuación 7). En caso de que no existiera la posibilidad de cambio de ruta, este coste se debería descontar del valor total de la información.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha presentado un modelo que para cuantificar el valor de la información del tiempo de viaje por autopista. El modelo permite establecer claramente dos categorías de escenarios (ver Tabla 4): aquellos para los cuales el valor de la información es significativo y por lo tanto puede existir una disponibilidad al pago por ella y aquellos para los que no. Los escenarios para los que la información tiene valor se resumen en:

- Viajes para los que es importante llegar a la hora deseada y se realizan en hora punta. El valor de la información es aproximadamente de 1,5 €/viaje (información pre-trip) y 1 €/viaje (información on-trip).
- Viajes que se producen en condiciones no recurrentes. El valor de la información es aproximadamente de 4 €/viaje (existe hora límite de llegada) y 2,5 €/viaje (no existe hora límite de llegada). La elección de ruta es la decisión valiosa en este caso.
- Viajes de máxima importancia para conductores esporádicos en el corredor, con un valor aproximado de 4,5 €/viaje.

Por otro lado, se concluye que el valor de la información es poco sensible a la precisión del sistema instalado. Esto implica que el hecho diferencial es que la información exista, y no tanto la precisión de la misma, siempre que se cumplan unos mínimos. Errores del 30% pueden ser aceptables, y estos se consiguen sin grandes inversiones en monitorización.

Los órdenes de magnitud obtenidos en la aplicación particular del modelo, pueden considerarse generalizables para viajes del orden de 30 minutos en autopistas metropolitanas estándar. Se debería estimar la fracción de la IMD correspondiente a estos tipos de viajes para obtener el valor medio del sistema de información, cosa que permitiría evaluar su rentabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la concesionaria ABERTIS, en especial a Joan Altarriba la colaboración y provisión de datos para la realización de este trabajo. Se agradece igualmente los comentarios y sugerencias propuestas por Sebastián Raveau, Pontificia Universidad Católica de Chile. El presente trabajo ha estado parcialmente financiado por la Fundación ABERTIS y por el Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España (TRA 2008-06470/MODAL, TRA2009-14270/MITRA).

REFERENCIAS

- AASHTO. (1977). *A Manual on User Benefit Analysis of Highway and Bus Transit Improvements*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ASENSIO, J. y A. MATAS. (2008). Commuters' valuation of travel time variability. *Transportation Research Part E* 44 (6), 1074-1085.
- AVINERI, E. y J.N. PRASHKER. (2003). Sensitivity to uncertainty: the need for a paradigm shift. *Actas del 82nd Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington.
- BATES, J., J. POLAK, P. JONES y A. COOK. (2001). The valuation of reliability for personal travel. *Transportation Research E* 37, 191–229.
- BEN-ELIA, E. y Y. SHIFTAN. (2010). Which road do I take? A learning-based model of route-choice behavior with real-time information. *Transportation Research A* 44, 249–264.
- BONSALL, P. (2003). Traveller behaviour: decision making in an unpredictable world. *Journal of Intelligent Transportation Systems* 8, 45–60.

- DENEUFVILLE, R. (1990) *Applied Systems Analysis: Engineering Planning and Technology Management*. McGraw-Hill.
- ETTEMA, D. y H. TIMMERMANS. (2006). Costs of travel time uncertainty and benefits of travel time information: Conceptual model and numerical examples. *Transportation Research C* 14, 35-350.
- HARDER, K. A., J. R. BLOOMFIELD, D. M. LEVINSON y L. ZHANG. (2005) *Route preferences and the value of travel-time information for motorists driving real-world routes*. University of Minnesota Department of Civil Engineering
- JODAR, V. (2011) *Valor de la información del tiempo de viaje por carretera*. Tesina final de carrera dirigida por F. Soriguera. Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC.
- KHATTAK, A., A. POLYDOROPOULOU y M. BEN-AKIVA. (1996). Modeling revealed and stated pretrip travel response to advanced traveler information systems. *Transportation Research Record* 1537, 46–54.
- MAHMASSANI, H.S. y Y.H. LIU. (1999). Dynamics of commuting decision behaviour under advanced traveler information systems. *Transportation Research C* 7, 91–107.
- NOLAND, R.B. y J.W. POLAK. (2002). Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues. *Transport Reviews* 22, 39–54.
- NOLAND, R.B. y K.A. SMALL. (1995). Travel-time uncertainty, departure time choice, and the cost of morning commutes. *Transportation Research Record* 1493, 50–158.
- PALEN, J. (1997). The need for surveillance in intelligent transportation systems. *Intellimotion* 6 (1), 1-3.
- POLAK, J. (1987). *Travel time variability and departure time choice*. Discussion Paper No. 15, Transport Studies Group, Polytechnic of Central London.
- SMALL, K.A. (1982). The scheduling of consumer activities: work trips. *The American Economic Review* 72, 467–479.
- SORIGUERA, F. y F. ROBUSTÉ. (2010). Highway travel time accurate measurement and short-term prediction using multiple data sources. *Transportmetrica*, 7 (1), 85-109.
- SORIGUERA, F., D. ROSAS y F. ROBUSTÉ. (2010). Travel time measurement in closed toll highways. *Transportation Research B*, 44 (10), 1242–1267.
- SORIGUERA, F. y F. ROBUSTÉ. (2011). Requiem for freeway travel time estimation methods based on blind speed interpolations between point measurements. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12 (1), 291-297.
- TRAIN, K. (2003). *Discrete choice methods with simulation*. Cambridge University Press.
- VMSI, (2012). *History of signage*. Variable Message Signs International. Victoria, Australia. Disponible en línea: www.vmsi.com.au (acceso Abril 2012).