Behavior choice models applied to the modeling of transport routes choice: a brief introduction

Modelos de Comportamiento de elección aplicados a la modelación de elección de rutas de transporte: una breve introducción

William Albeiro Álvarez V *a*, Gloria Patricia Jaramillo A. *b* & Iván Reinaldo Sarmiento O. c

*a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. waalvarezv@unal.edu.co*

b Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [gpjaramillo@unal.edu.co](mailto:gpjaramillo@unal.edu.co)

c.Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. isarmiento@unal.edu.co

Received:.

**Abstract**

This paper presents an approach to the literature on the use of behavioral theories applied to modeling in the choice of routes. In this context, the most important theories used in the literature, such as the expected utility theory (EUT), random utility theory (RUT), prospect theory (PT), limited rationality and the regret theory (RT), are defined in an extensive way. advantages, disadvantages and some of the works that focus on the use of real data are listed.

*Keywords*: Utility theory, Prospect theory, Regret theory, real data.

**Resumen**

Este trabajo presenta un acercamiento de la literatura sobre el uso de las teorías de comportamiento aplicadas a la modelación en elección de rutas. En este contexto se definen de forma extensiva las teorías más importantes utilizadas en la literatura como lo son la teoría de utilidad aleatoria (EUT), la teoría prospectiva (PT), la racionalidad limitada y la teoría de arrepentimiento (RT), se identifican ciertas ventajas, desventajas y se enumeran algunos de los trabajos que se enfocan en el uso de datos reales.

*Palabras clave*: Utilidad Aleatoria, Teoría Prospectiva, Teoría de arrepentimiento, datos reales.

1 Introducción

A nivel mundial, la mayoría de las grandes ciudades sufren de altos niveles de congestión, no solo por la creciente demanda de su parque automotor sino también por el uso no efectivo de su escasa infraestructura vial; los conductores tienen libertad de elegir sus rutas para transportarse de un lugar a otro y no siempre esta elección es eficiente, debido en gran medida a su desconocimiento de las condiciones del sistema vial, de las elecciones de otros conductores y de su incapacidad analítica de elegir la ruta óptima. En las últimas décadas, con el acelerado desarrollo de las tecnologías de la información, los sistemas de información de tráfico han jugado un papel importante al disminuir ese desconocimiento, aunque dicha información es muy dinámica, no es perfecta y esta imprecisión afecta también el comportamiento ante ella y por ende la toma de decisiones de los conductores.

Liang & Wakahara, 2014, proponen que existen tres niveles de soluciones a la congestión del tráfico urbano: la reducción de la demanda de tráfico, cambiar el tráfico a otro medio de transporte, y la distribución espacial del tráfico para maximizar el uso de la capacidad de la red de tráfico, que se considera una solución más viable, eficaz y económica para los problemas de congestión urbana. El modelamiento para la predicción de este comportamiento permitiría a las autoridades entender el sistema y hacer una mejor planificación y diseño del sistema vial y de políticas que mejoren la eficiencia de su uso.

Ortúzar & Willumsen, (2011) afirman que “Los problemas asociados al transporte son ahora más globales y serios que nunca, tanto en los países industrializados como en los que están en proceso de desarrollo. El crecimiento económico ha generado una demanda tal que sobrepasa las capacidades de la mayoría de los sistemas de transporte”. La demanda de servicios de transporte se cataloga como altamente cualitativa y diferenciada, debido a que existe una amplia gama de demandas específicas que se pueden diferenciar por ejemplo por hora del día, día de la semana, motivo del viaje, condiciones climáticas, velocidad, disponibilidad de medio de transporte, etc. La demanda de transporte es una demanda derivada, es decir, no es un fin en sí misma. La gente viaja para satisfacer ciertas necesidades en sus destinos p.e trabajo, salud, entretenimiento, entre otros.

Los modelos matemáticos para la descripción y/o pronóstico de la demanda son vitales para una adecuada planificación. En general los modelos propuestos en la literatura consideran que el usuario de un sistema de transporte maximiza una medida de satisfacción al elegir una ruta u otra para realizar su viaje. Diferentes autores han propuesto diferentes ecuaciones que representan esa satisfacción. Sus propuestas se diferencian especialmente por la inclusión de estocasticidad o no en algunos de los términos de la ecuación además de su estructura matemática. Los modelos econométricos de elección discreta son una buena herramienta para describir y pronosticar la elección de los usuarios en razón a que estos modelos se encuentran bien soportados por la teoría microeconómica, poseen facilidades para trabajar en la especificación y su implementación computacional es accequible, por tal motivo han sido los modelos preferidos en la planificación del transporte. Estos modelos consideran que la satisfacción del usuario se representa como una utilidad que se compone de un término determinístico que depende de las propiedades de la opción y una componente de error aleatorio que depende de los errores o de la percepción incompleta del analista; por lo tanto estos modelos requieren ser complementados con variables de tipo psicológicas que alcancen a explicar de una forma apropiada la conducta de elección del usuario y que además tengan en cuenta su racionalidad, para que sean mucho más realistas y así estimar con mayor precisión los fenómenos que ocurren en la realidad. El comportamiento de las personas no es fácil de deducir e inferir, debido a que su elección se encuentra afectada por sus creencias y experiencias adquiridas (Jorge Eliecer Córdoba, 2010); es por esto que la forma como un individuo percibe su entorno puede explicar parte de la componente aleatoria de la función de utilidad en los modelos de transporte a través de atributos específicos individuales observados e inobservados. Li and Hensher (2011) afirman que “dadas las ventajas de las teorías no UT (teorías de comportamiento humano) en la comprensión de las actitudes hacia el riesgo y la elección, se recomienda que estas teorías sean incorporadas en los estudios de comportamiento del viajero como un complemento a los modelos existentes”.

Según Wee (Wee, 2010), las teorías de comportamiento pueden también utilizarse para modelar y entender comportamientos en la conducción, en particular, el comportamiento de la percepción – riesgo y la toma de riesgos en situaciones de incertidumbre, no sólo en condiciones "normales", sino también en entornos complejos como los relacionados con condiciones de congestión, situaciones propensas a los accidentes y en situaciones extremas, también puede aplicarse a las externalidades negativas debidas al transporte, como los impactos que generan lo niveles de ruido, la seguridad vial y para la evaluación de proyectos de infraestructura, todas ellas pueden ser interpretadas de manera explícita (y valoradas) basadas en las premisas de las teorías de comportamiento. (Stern & Richardson, 2005) afirman que “la investigación del comportamiento en el transporte está dirigido a mejorar nuestra comprensión de tanto los viajes y el comportamiento de los individuos que integran el sistema. Una mejor comprensión del comportamiento de asignación y viaje mejorará la previsión de la demanda y la evaluación de las políticas de transporte emergentes, y una mejor comprensión del comportamiento de los conductores mejorará nuestros medios para aumentar la seguridad vial”

Este paper es un acercamiento a observar cuales modelos de comportamiento se han utilizado en la modelación de elección de rutas. A continuación se describen cada uno de esos modelos generales de decisión, cómo han sido usados en la modelación de elección de rutas, cuáles son sus principales ventajas y desventajas, y por último se referencian algunos trabajos en los cuales se utilizan estos modelos junto con datos reales.

# 2 Modelos de Comportamiento aplicados a la modelación de elección de rutas

Desde mediados del siglo XX se ha propuesto la teoría de valor esperado como el modelo básico en la construcción de modelos de elección racional y de elección discreta, pero en la década de los 70 algunos investigadores revelaron muchas de sus debilidades y desde allí se han propuesto modelos alternativos que intentan solventarlas y se han realizado avances, adaptaciones y transformaciones que arrojan resultados más o menos cercanos a lo observado en la realidad.

2.1 Teoría de utilidad esperada

En el siglo XVII, Pascal y Fermat asumieron que los individuos evaluarían una alternativa monetaria sobre la base de sus valores esperados, de modo que una lotería que ofrece los posibles beneficios con probabilidades respectivas produciría tanta satisfacción a un pago seguro igual a su valor esperado . Este enfoque podría ser justificado apelando a la ley de los grandes números, que establece que si un juego se repite indefinidamente y de forma independiente en el largo plazo, la ganancia media necesariamente converge a su valor esperado. Sin embargo, en una situación de una sola elección que no puede ser reproducido o promediado, los individuos pueden también basar sus decisiones en algo más que los valores esperados de las perspectivas. Este punto fue dramáticamente ilustrado por Nicolás Bernoulli en 1728 y ahora se conoce como la Paradoja de San Petersburgo (Machina, 1987).

Argumentando que una ganancia de $ 1000 no es necesariamente valorada diez veces más que una ganancia de $ 100, Cramer y Bernoulli formulan la hipótesis de que los individuos poseen una función de utilidad de la riqueza , y que valorarían una lotería sobre la base de su utilidad esperada

En lugar de su valor esperado

Dos siglos después, este enfoque fue axiomatizado formalmente tanto por Frank Ramsey (Foundations of Mathematics and Other Logical Essays ,1931), como por John von Neumann y Oskar Morgenstern (Theory of Games and Economic Behavior, 1953) y por Leonard Savage (Foundations of Statistics, 1954). La sencillez y atractiva intuición de los axiomas, la elegancia de su representación de las actitudes de riesgo en términos de propiedades de la función de utilidad, y el enorme número de resultados teóricos que produjeron, llevaron al modelo de utilidad esperada (EUM por sus siglas en inglés) a convertirse en la teoría dominante, y, de hecho, en el modelo casi exclusivo de la toma de decisiones bajo riesgo en la economía, la investigación de operaciones, la filosofía y la teoría de decisiones. Sin embargo, estos avances teóricos fueron acompañados por un cierto grado de escepticismo que fue aumentando, debido a la evidencia empírica que sugieria que los individuos violaban sistemáticamente las predicciones del modelo de utilidad esperada. La clase más grande y sistemática de estas violaciones se refería al supuesto clave de comportamiento, el denominado axioma de independencia. Esto derivó en una creciente tensión en el campo de la teoría de la decisión, con los defensores del enfoque de la utilidad esperada que apoyaban la "racionalidad" de este axioma y la potencia teórica del modelo, y otros que enfatizaban la importancia de la evidencia empírica y el desarrollo de modelos alternativos al de utilidad esperada (Machina, 1987).

Von Neumann y Morgenstern proporcionaron una base teórica sólida para el uso de EUT como una guía para la toma de decisiones bajo riesgo. Teniendo en cuenta que una posibilidad es una consecuencia asociada a una probabilidad de ocurrencia, ellos manifestaron que las preferencias obedecían ciertos axiomas intuitivamente atractivos (Von Neumann & Morgenstern, 1947; Weber & Camerer, 1987):

(i) Completitud: para todas las perspectivas x, y: o bien

;

(ii) Transitividad: para todas las perspectivas x,y,z:

(iii) Continuidad:

para todas las perspectivas x,y,z:

si , existe una probabilidad p entre 0 y 1 que

sea igualmente preferible a solo y

(iv) Independencia: para todas las perspectivas x,y,z:

si entonces

.

Los axiomas (i) y (ii) juntos implican la existencia de preferencias entre cualquier par de perspectivas y la transitividad de esta preferencia. El Axioma (iii) implica que las perspectivas de preferencia intermedia son indiferentes a una combinación específica entre un par de perspectivas mejores o peores. Los axiomas de orden y continuidad juntos implican que las preferencias sobre las perspectivas son susceptibles de ser representados por una función de valor que representa las preferencias. El axioma (iv) afirma que la preferencia entre dos perspectivas es independiente de sus componentes comunes y son, por tanto, percibidos como si pudieran ser removidos (Weber & Camerer, 1987). Basados en estos cuatro axiomas, la EUT propone que los individuos son maximizadores de utilidad, es decir, que tienen como objetivo maximizar la utilidad de sus elecciones. Las funciones de utilidad podrían entonces proporcionar un medio de juicio de valor modelado desde un punto de vista cuantitativo a un tomador de decisiones. El enfoque científico para el juicio de valor ha sido discutido con rigor en el área de la economía. Los individuos consiguen una sensación de satisfacción psicológica por el consumo de bienes económicos, mediante la recepción de servicio y así sucesivamente. El modelo de utilidad esperada es útil como un modelo normativo, es decir, para encontrar una decisión que debe tomarse. Sin embargo, diversas paradojas (Allais y Hagen, 1979; Ellsberg, 1961) se han reportado para el modelo de utilidad esperada (Sebora & Cornwall, 1995).

Históricamente se han catalogado tres categorías de modelos de comportamiento de elección en conformidad con la teoría de utilidad, los cuales dependen de la elección a realizar (Van de Kaa, 2008), a saber:

1. La teoría de la utilidad neoclásica (Neo-classical Utility Theory), la cual describe un proceso determinista de selección y se supone que las preferencias de los consumidores son estables en el tiempo.
2. La teoría de la utilidad esperada subjetiva (Subjective Expected Utility Theory), desarrollada por Bernoulli en 1738, donde la utilidad de cada posible resultado debe ser multiplicada por la probabilidad de ocurrencia. Aunque la teoría de probabilidad esperada posee componentes probabilísticos, sigue siendo un proceso de elección estrictamente determinista. Savage en 1954, amplió la teoría de la utilidad esperada en lo que se conoce ahora como teoría general de decisiones bajo incertidumbre.
3. La teoría de la Maximización de la Utilidad Aleatoria (Random Utility Maximization Theory); en la cual la probabilidad de que una alternativa sea elegida por un individuo es una función de la utilidad derivada de varios de sus atributos, incluyendo aquellos no observados. Esta utilidad es igual a la suma de una parte determinista, a partir de una evaluación compensatoria de los atributos conocidos de la alternativa, y una parte estocástica que captura la incertidumbre experimentada por el analista sobre los atributos no conocidos. Sin embargo, la regla de decisión que los individuos se suponen que siguen, también es determinística.

El paradigma dominante en la economía neoclásica que cubre varias teorías sobre el comportamiento de los consumidores es que el comportamiento de los individuos es “racional” donde se busca la maximización de las utilidades bajo ciertas restricciones presupuestarias. La teoría de la utilidad esperada sugiere que las opciones son coherentes y consistentes y están formuladas pensado en los resultados (ganancias o pérdidas) de acciones (alternativas) por sus probabilidades (supone que los pagos son independientes de las probabilidades), implica entonces:

(i) La coherencia de las preferencias de las alternativas; (ii) la linealidad en la asignación de pesos de decisión a las alternativas; y (iii) el juicio en referencia a una posición de activo fijo. Con base en estos supuestos, la teoría de la utilidad esperada predice que la mejor alternativa siempre será elegida (Kahneman & Tversky, 1979; Sebora & Cornwall, 1995).

La teoría de la UE afirma que, si los tomadores de decisiones se comportan racionalmente y presentan los tres criterios arriba mencionados, entonces se comportarán como si maximizaran el valor esperado de su utilidad dada por:

Donde denota las alternativas cada una con probabilidad de ocurrencia y es una variable aleatoria que es el resultado de las alternativas . Las probabilidades no necesariamente deben ser objetivas, sino que pueden reflejar juicios de valor para el elector.

2.1.1 Modelo de elección discreta

Los modelos de elección discreta basados en utilidades aleatorias extienden los modelos de utilidad esperados y proporcionan una interpretación econométrica de la toma de decisiones. Los modelos de utilidad aleatoria (RUMs) se basan en la premisa de que tomador de decisiones posee un conocimiento incompleto de las alternativas y por tanto tiende a discriminarlas. Es por esto que, a diferencia de la teoría de la maximización de la utilidad, la función de utilidad en el modelo de elección discreta se divide en dos componentes: i) una componente determinista que es la parte observada por el analista, y ii) un componente estocástico, que es la parte de la utilidad desconocida para el analista. La ecuación de utilidad aleatoria está dada por:

es el componente determinístico llamado también como la utilidad representativa o sistemática, la cual está en función de los atributos , en donde

representa el valor del atributo k de la alternativa i para el individuo n. Se supone que los parámetros son constantes para todos los individuos y pueden variar entre alternativas y además estos parámetros se obtienen a través de un proceso de estimación, el más utilizado es el método de máxima verosimilitud, donde las observaciones de las elecciones hechas por una muestra de individuos son consistentes con el modelo. (J.E. Córdoba & Jaramillo, 2012),

es el error o la componente de la utilidad desconocida la cual explica las preferencias de cada individuo, así como los errores de medición y los errores de observación del analista, el término se trata como un error aleatorio de media cero

La utilidad que le reporta al individuo n la alternativa i es , completamente conocida por el tomador de decisiones, de esta forma, el individuo n escogerá la alternativa i si y solo si

Luego la probabilidad de que el individuo n escoja la alternativa i será:

La cual es la probabilidad de que cada término aleatorio sea inferior a una cantidad observada , por lo tanto se trata de una función de distribución acumulada.

Donde es la función de densidad y dependiendo de la distribución que cada modelo suponga para el término aleatorio la integral tendrá un valor exacto (Logit o logit jerarquico) o debe ser evaluada por simulación numérica (probit o logit mixto) (Orro Arcay & García Benítez, 2006)

Si se asume que los términos de error son independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d.) con una distribución de Gumbel, la probabilidad se calcula como un modelo Logit (ó Logit Multinomial, MNL) donde la probabilidad de que el individuo n escoja la alternativa i está dada por :

Donde es conocido como el parámetro de escala el cual no es identificable, por lo que habitualmente se fija en 1.

Durante las últimas tres décadas los modelos RUM han sido los caballos de batalla en la modelación de rutas de transporte y se han realizado grandes avances desde el clásico modelo logit multinomial (MNL) de Daganzo y Sheffi de 1977, pasando por los modelos C-logit y Logit Path Size los cuales proporcionan modificaciones simples al MNL. Un gran avance fueron los modelos de valor extremo generalizado GEV los cuales incluyen el modelo Nested Logit, Cross Nested Logit y Paired-Combinatorial Logit (Sikka, 2012).

La otra notable mejora que proporciona una mayor flexibilidad dentro del marco aleatorio de la utilidad se llevó a cabo con la introducción de los modelos Mixed Logit y los modelos de elección híbridos y por ello diversos estudios han utilizado la especificación de los modelos Logit al analizar el comportamiento de elección de ruta a lo largo de los últimos años.

2.2 Modelo basado en Racionalidad Limitada

El modelo de elección racional de decisiones se basó inicialmente en la "racionalidad ilimitada”, concepto donde se asume que un tomador de decisiones, conoce todos sus objetivos, todas las alternativas y sus respectivas probabilidades, además posee una capacidad de cálculo ilimitada y unas preferencias de orden y de consecuencias sobre todos los posibles resultados de sus decisiones. Esta postura fue ampliamente criticada por Helbert Simon (economista, premio nobel 1978), el cual afirmaba que “debido a limitaciones en sus conocimientos y a la capacidad de procesamiento de la información, el ser humano busca niveles de conformidad en vez de maximizar utilidades” (Richman, Staszewski, & Simon, 1995) (a esto lo llamó satisfizar en contraposición a optimizar). La teoría de la racionalidad limitada supone que los seres humanos no tienen por objetivo personal la maximización del beneficio, sino ciertos niveles de conformidad que obedecen a objetivos personales subjetivos (Estrada, 2008; Herbert A . Simon, 1955; Sbicca, 2014).

El concepto de racionalidad limitada de hecho marcó el origen del campo de investigación del comportamiento y toma de decisiones (Decision Behaviour Research) fundada por Edwards (1961), y más tarde, el área de Economía del Comportamiento, donde varias teorías de comportamiento en la toma de decisiones se han desarrollado (Van de Kaa, 2008). Al tratar de racionalidad limitada, Simon definió tres tipos de consideraciones sobre el decisor: i) en cuanto a la complejidad del ambiente de elección, debido a la sobrecarga de información a la que se encuentra expuesto el decisor ii) en cuanto al acceso a la información, donde restricción a la información es una característica importante en el estudio de la modelación de elección, pues la obtención de información en muchas ocasiones tiene costos monetarios o costos en tiempo y esfuerzo del decisor los cuales pueden tener un papel fundamental en la determinación de alternativas de elección y iii) en cuanto a los límites psicológicos del tomador de decisiones, los cuales están relacionados directamente a la habilidad computacional y predictiva del decisor (Sbicca, 2014).

En la perspectiva de Simon, quien toma una decisión, se forma una idea de aquello a lo que aspira. En cuanto lo encuentra termina la búsqueda, es decir, satisface su aspiración y no sigue en la búsqueda de nuevas opciones. La importancia de esta teoría es que permite mostrar cómo se toman de hecho las decisiones a partir de esfuerzos razonables usando información incompleta, buscando la maximización de la utilidad, pero apenas se introducen pequeñas complicaciones en una situación de opción, el alejamiento de la conducta con respecto a las predicciones de la teoría de utilidad subjetiva esperada se hace evidente. La gente no se comporta ni siquiera como si maximizara.

2.3 Eliminación de Aspectos

El modelo de Eliminación por aspectos (EBA) propuesto por Tversky (1972a, 1972b), ofrece una forma heurística simplificadora para tareas complejas, donde se conceptualiza un modelo de elección discreta de toma de decisiones como un proceso de eliminación secuencial en el cual, i) los aspectos comunes del conjunto de elección se eliminan primero, ii) un aspecto (o atributo) se selecciona al azar y todas las alternativas que no poseen el aspecto se eliminan (la probabilidad de seleccionar esta característica se basa en su utilidad para quien toma la decisión), y iii) se realizan los dos primeros pasos hasta que las alternativas residuales tengan las mismas características; en el caso en que solo queda una opción, se selecciona; de lo contrario, todas las opciones restantes tienen las mismas posibilidades de ser seleccionadas. El orden en que se consideran y se eliminan los diversos aspectos es el principal motivador de la toma de decisiones, sin embargo, dado que el ordenamiento de los atributos depende del individuo y esencialmente no puede ser observado, la elección es subjetiva (Batley & Daly, 2006; Sikka, 2012)

2.5 La Teoría Prospectiva (PT)

La teoría prospectiva (PT) fue desarrollada como una teoría descriptiva-conductual, que trata de describir cómo un individuo toma decisiones en la vida real y no en la forma en que lo debería hacer para optimizar sus "objetivos”, sobre la base de los hallazgos de la psicología cognitiva y experimentos de laboratorio. Esta teoría, desarrollada por Kahneman y Tversky (Kahneman & Tversky, 1979), pronto se convirtió en la teoría más influyente en la economía del comportamiento. La contribución inicial presentada por Kahneman y Tversky postuló a la PT como un conjunto de supuestos genéricos, en los que las funciones se caracterizan por propiedades cualitativas como una función de valor convexa-cóncava, y una probabilidad ponderada en forma de S inversa.

Al igual que sus homólogos de la teoría de la utilidad, todas las versiones de la teoría prospectiva suponen que el sujeto sigue un proceso de elección determinista. El punto sobresaliente es que si unas opciones se presentan de diferente manera se generan cambios previsibles en la preferencia y se viola así el axioma de independencia, esta situación conlleva a tres implicaciones: primera, la utilidad esperada de un juego de azar en dos etapas es la misma que la de un juego de una sola etapa con la misma distribución de probabilidad de los resultados finales. Segunda, la utilidad esperada de una lotería es lineal en probabilidades y tercera, la utilidad esperada se ve obligada a ser una combinación de utilidades de los resultados independientes y probabilidades en la prospectiva (Ramos, Daamen, & Hoogendoorn, 2014).

La PT en si descubre el modo de comportamiento que no se tomó en cuenta en la investigación racional de decisiones, y obtiene cuatro conclusiones básicas: (i) la mayoría de las personas muestran aversión al riesgo luego de que se enfrenten con ganancias (efectos fijos); (ii) la mayoría de las personas muestran las preferencias de riesgo (efecto de reflexión); (iii) la mayoría de las personas suele juzgar la ganancia y la pérdida de acuerdo con un punto personal de referencia (dependiente de referencia); (iv) la mayoría de las personas son más sensibles a la pérdida de las ganancias (efecto de pérdida). Estas conclusiones se reflejan en el modo de vida de los individuos que tienden a seguir las reglas anteriores de cara a la toma de decisiones (Zhang & He, 2014).

Así como en la teoría de la utilidad, la teoría prospectiva se centró inicialmente en la elección entre alternativas simples con resultados probabilísticos, más tarde se amplió a las perspectivas de elección bajo incertidumbre (Kahneman & Tversky, 1991) también conocida como teoría prospectiva acumulada (Cumulative Prospect Theory). Esta ampliación ha permitido evaluar las situaciones que implican incertidumbre en la que algunos de los resultados o las probabilidades son desconocidas.

2.5.1 Teoría Prospectiva Acumulada (Cumulative Prospect Theory)

En el trabajo de 1991 Kahneman & Tversky, postulan a la CPT no como una teoría diferente, sino como "una nueva versión de la teoría prospectiva”, que incluye incluso supuestos más restrictivos y simplificadores que pueden ser usados para describir el comportamiento observado en contextos particulares (Z. Li & Hensher, 2011).

La CPT, que emplea valores acumulados en lugar de pesos de decisión separables, es aplicable a las perspectivas inciertas y arriesgadas y permite diferentes funciones de ponderación y de valor para las ganancias y las pérdidas debido a una percepción diferente de las ganancias y pérdidas de los individuos. Siguiendo la notación de (Ramos et al., 2014), distintas funciones están asociadas a resultados positivos y negativos, y , y el valor total de una perspectiva está dada por:

(1)

donde

y

donde y y son, respectivamente, el número de resultados negativos y positivos y además

El valor de la función en CPT está dado por:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

donde es el atributo que será medido contra , el punto de referencia (Reference Point RP), es un parámetro que refleja el grado de aversión a la pérdida y y son parámetros que miden el grado de disminución de la sensibilidad para ganancias y para las perdidas respectivamente.

La función de ponderación está dada por:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |
|  |  |

donde los parámetros y son los responsables de definir la curvatura de la función de ponderación y de captar la distorsión en la percepción de las probabilidades de ganancias y pérdidas. (Kahneman & Tversky, 1991)

En la literatura existen otras series de funciones de probabilidad que han sido propuestas para definir las ponderaciones (Rasouli & Timmermans, 2014) entre las cuales se encuentran:

(Goldstein & Einhord, 1987)

(Prelec, 1998)

(Prelec II )

(Wu & Gonzalez, 1996)

(Luce )

donde es la medida de elevación de la función de ponderaciones y representa el nivel de distorción en el juicio de probabilidad en el proceso de toma de decisiones (grado de la curvatura).

La PT presume que cada persona sigue una estrategia de comportamiento de elección determinista, que se mantiene estable durante un proceso de elección concreta pero que puede diferir de una elección en una secuencia a la siguiente. Diferencias interpersonales en las opciones de conjuntos de elección iguales pueden ser causadas por diferencias en la valoración idiosincrásica (gustos o preferencias) y por diferencias de encuadre (Van de Kaa, 2008). Además el valor marginal de las ganancias y las pérdidas generalmente disminuye con su magnitud (disminución de la sensibilidad) (Kahneman & Tversky, 1979), es decir, la función de valor se considera cóncava para las ganancias y convexa para las pérdidas y se tiende a sobrevalorar las probabilidades pequeñas y a subvalorar las altas probabilidades contribuyendo a la prevalencia de aversión al riesgo (Probabilidades ponderadas no lineales). Es por esto que la curvatura de la función de ponderación explica el patrón de reflexión característico de las actitudes hacia las perspectivas de riesgo (Tversky & Kahneman, 1992).



Figura 1: Tomada de (Kahneman & Tversky, 1984)

Los parámetros de PT son los responsables de las principales diferencias en relación a EUT. Los valores estimados originalmente para situaciones que implican resultados monetarios son , , y (Tversky & Kahneman, 1992)). Sin embargo, si (i) no hay disminuciones en los valores marginales de ganancias y pérdidas con su magnitud *,* (ii) incurrir en pérdidas no agravan la experiencia y (iii) no hay distorsiones en la percepción de las probabilidades , PT se simplificaría a EUT (Ramos et al., 2014). Experimentos de comportamiento, sin embargo, han mostrado que las personas tienden a sobre estimar pequeñas probabilidades y subestimar probabilidades moderadas y altas (Tversky & Kahneman, 1992). La sobre estimación de pequeñas probabilidades implica la búsqueda de riesgo cuando se les ofrece baja probabilidad a cambio de premios de alta recompensa. La subestimación de probabilidades moderadas y altas implica relativa insensibilidad a las diferencias de probabilidad en el centro del rango, es decir, se da una prevalencia de la aversión al riesgo en la elección entre ganancias probables y certeras, y elecciones riesgosas entre las pérdidas probables y seguras. Estas son las principales características de comportamiento capturados por la PT, pero no del todo explicadas por la EUT (Ramos et al., 2014)

2.6. La Teoría de Minimización del arrepentimiento (Regret Minimization Theory)

La teoría del arrepentimiento (Regret Theory RT) fue desarrollado, independientemente, por Bell (1982), Fishburn (1982) y Loomes & Sugden, (1982) como un modelo de elección entre dos alternativas, es decir, la situación considera que los individuos se enfrentan a una elección entre dos alternativas de riesgo, que se caracteriza por una distribución de probabilidad y un resultado (monetario) para cada probabilidad. La idea inicial de definir la RT consistió en incorporar el concepto de arrepentimiento a la Teoría de la Utilidad Esperada (Bell, 1982; Loomes & Sugden, 1982, 1987).

(Tomas Lucas & Sirvent Boix, 1992) afirman que “La idea central de la RT consiste en incorporar en la evaluación a priori de las opciones de alternativas, la futura respuesta psicológica del individuo ante el resultado final: “la pena por lo que pudo haber sido y no fue…” y, en su caso, el regocijo por haber hecho una acertada elección”. Así, las personas elegirán como si maximizaran la esperanza de una utilidad básica modificada por el arrepentimiento o regocijo (Regret/Rejoicing), referida a los resultados posibles por cada pareja de opciones alternativas, en cada estado de la naturaleza (situaciones del entorno).

RT se asienta en la noción de que los individuos basan su estructura de preferencias no sólo en el rendimiento esperado de una alternativa considerada por algún estado de la naturaleza, sino también en el de la otra alternativa. Más específicamente, la hipótesis del individuo es la de anticipar y tener en cuenta la posibilidad de que la alternativa no elegida resulte ser más atractiva que la elegida.

La principal diferencia entre la PT y la EUT es la relajación del axioma de transitividad que abre la posibilidad de ocurrencia de opciones intransitivas, p.e, si hay más de dos alternativas , donde son las alternativas, la preferencia cíclica podría dar lugar a una cadena sin fin de operaciones.

Siguiendo a Loomes & Sugden, 1982 y Chorus, 2012; consideremos un individuo en una situación donde existen un numero finito n de estados de la naturaleza e que pueden ocurrir, p.e retrasos, congestiones, accidentes, condiciones climáticas, etc. Cada estado j tiene una probabilidad de ocurrencia, donde y , estas probabilidades pueden ser interpretadas como probabilidades objetivas conocidas por el individuo o en ausencia de algún conocimiento, en probabilidades subjetivas que representan el grado creencia u ocurrencia de los estados por parte del individuo. Además, consideremos la posibilidad de elección de este individuo entre dos rutas , que son evaluados en términos de sólo sus tiempos de viaje “x”. Los tiempos de viaje en ambas rutas son percibidos como inciertos, en el sentido de que el viajero no los puede evaluar perfectamente en el momento de hacer su elección. Esta incertidumbre se modela suponiendo que los tiempos de viaje siguen alguna distribución que se “supone” sabe el viajero. Más específicamente, el viajero sabe que pueden ocurrir diferentes estados de la naturaleza , cada estado se caracteriza por una probabilidad de ocurrir y diferentes combinaciones de tiempos de viaje para las dos rutas .

Supongamos que el viajero elige la ruta y luego ocurre el estado -ésimo de la naturaleza, luego el individuo experimenta la consecuencia de elegir y sabe que, si hubiese elegido , estaría experimentando . La experiencia psicológica de placer asociada con tener la elección de en estas circunstancias dependerá no solo de la naturaleza de sino también de la naturaleza de . Si hubiese sucedido que es una consecuencia más deseable que , el individuo puede experimentar una sensación de arrepentimiento y puede reflexionar sobre cuánto mejor hubiera sido su posición, si hubiera elegido de manera diferente, y esta reflexión puede reducir el placer que deriva de haber escogido . Por el contrario, si es la consecuencia más deseable, puede experimentar regocijo o el placer adicional asociado con saber que ha tomado la mejor decisión.

Se define la utilidad esperada de la opción elegir evaluada con respecto a como

Frente a la elección entre las rutas , el individuo preferirá , preferirá , o será indiferente entre ellas dependiendo si es mayor, menor o igual a . Además la función de utilidad pueden tomar diferentes formas, dependiendo del nivel de aversión al riesgo que se desee modelar.

En contraste con la EUT, la RT postula además que la diferencia de rendimiento con la ruta elegida codetermina la utilidad de una ruta, es decir, se supone que el viajero anticipa, cuando elige la posibilidad de que la ruta elegida sea más lenta ó más rápida que la no elegida y que el grado de remordimiento o regocijo que experimenta un individuo depende solo de la diferencia entre la utilidad de elección de “lo que es” y la utilidad de elección de “lo que pudo haber sido” (lo que causaría arrepentimiento o regocijo, respectivamente). Este anticipo de arrepentimiento/regocijo permite definir una función de arrepentimiento/regocijo (regret/rejoice) que signa un valor real a cada posible incremento o disminución de la utilidad, dando lugar a una utilidad modificada llamada función MU definida como:

Donde y es estrictamente creciente en su primer argumento y estrictamente decreciente en su segundo y además , es decir ] es una función cóncava decreciente.

Ahora supongamos, como definimos anteriormente que un individuo tiene que elegir entre las rutas y . El individuo tendrá la preferencia débil si y solo si:

Es decir

A la anterior expresión se le conoce como utilidad esperada modificada (UEM) y según lo expresado por la función UEM se puede asumir que el viajero maximizará su utilidad esperada modificada y se ha demostrado que la RT predice una amplia variedad de patrones de comportamiento observados empíricamente que se desvían de EUT (Chorus, 2012).

Cuando dos alternativas funcionan igual de bien, o sea ni arrepentimiento ni regocijo priman una sobre la otra, lo cual es una limitación de la RT. Una forma funcional para evitar la limitación anterior y de la cual se pueden obtener resultados intuitivos es redefiniendo de la forma:

Donde es un parámetro de aversión al arrepentimiento es decir si , el arrepentimiento se vuelve más y más importante que el regocijo y cuando , el arrepentimiento y el regocijo son igualmente importantes y se tendrá que la RT se reduce a EUT (Chorus, 2012; Ramos et al., 2014).

2.6.1 Minimización Aleatoria del Arrepentimiento

Una extensión del modelo es la Minimización Aleatoria del Arrepentimiento (Regret Random Minimization – RRM) en donde se presume que el arrepentimiento es, en parte, no observable por el analista, lo que conduce a la adición de componentes de error aleatorio. El enfoque RRM contribuye a la literatura de la demanda de viajes de varias maneras: (i) capta la intuición de la toma de decisiones en general, y la toma de decisiones del viajero en específico; puede ser más acerca de evitar las emociones negativas (por ejemplo, llegar tarde, la falta de un bus, quedarse atascado en el tráfico) que aproximadamente derivar algún nivel máximo de rentabilidad. (ii) El enfoque RRM incorpora la noción de que las decisiones de un viajero no pueden ser el resultado de un proceso totalmente compensatorio, como está implícito en la mayoría de los modelos RUM (especificación aditiva lineal de la función de utilidad), por ejemplo, asumir que el mal rendimiento en un atributo (p.e, el tiempo de viaje) no es necesariamente compensado por el buen desempeño en otro (p.e, confort). Estas dos contribuciones se pueden extender fácilmente a modelos RRM para el caso de la elección de viaje bajo riesgo, utilizando la noción del arrepentimiento esperado; y por último (iii) un enfoque el cual proporciona una inclusión intuitiva y sencilla de la noción que los viajeros que se sienten incómodos con su situación actual de elección deseen posponer la toma de una decisión de viaje y recurran en primer lugar a la búsqueda de información adicional (Chorus, C. G., Arentze, T. A., & Timmermans, 2008).

# 3. Ventajas y desventajas de las teorías

Las teorías de comportamiento aplicadas a la modelación en transporte han sido debatidas desde diversos aspectos tales como su capacidad de capturar el comportamiento real, el uso de la intuición, los métodos de cálculo, los vacíos en la literatura , sus mecanismos de decisión, entre otros; para una mayor profundidad en los anteriores aspectos consultar (Ramos et al., 2014).

La siguiente tabla resume algunas de las ventajas y desventajas que poseen cada una de las teorías mencionadas anteriormente.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Teoría | Ventajas | Desventajas |
| EUT | Ha sido la teoría predominante en los modelos de transporte,  Bases matemáticas fuertes  Modelos relativamente simples de implementar a partir de información revelada y declarada.  método de cálculo es bastante intuitivo y sencillo | Insensibilidad a la dispersión de las utilidades de los resultados posibles de las alternativas de elección: debido a que se supone que los tomadores de decisiones son neutrales al riesgo (Rasouli & Timmermans, 2014)  El modelo logit , al suponer los parámetros constantes, no admite variaciones aleatorias en las preferencias de los individuos, además el modelo no admite correlación entre las observaciones lo que hace poco adecuada su utilización para datos de panel y encuestas de preferencias declaradas con varias respuestas por individuo, por último, el modelo no admite diferencias en la variabilidad de la evaluación de la utilidad para diversas alternativas  El modelo probit asume que los errores siguen una distribución normal lo que conduce en muchas situaciones a predicciones erróneas.  La EUT no considera que en la toma de decisiones sobre ruta la elección no se hace una sola vez, sino que ha habido un nivel de aprendizaje previo. |
| Prospect Theory | La potencialidad de la teoría para capturar el comportamiento de un individuo de forma real.  En caso de que se establezcan los valores apropiados del punto de referencia, la PT tiene el potencial de superar a los otros modelos. | La gran cantidad de parámetros a tener en cuenta.  El rendimiento de PT depende en gran medida de la elección del punto de referencia el cual puede ser muy bueno ó muy malo dependiendo de los valores establecidos.  Método de cálculo resulta ser bastante complejo para ser entendido rápidamente  La PT no considera el aprendizaje que se ha hecho en la toma de decisiones sobre modo o ruta debido a que la elección no se hace solo una vez.  Identificación de los puntos de referencia  Limitado solo a la toma de decisiones bajo riesgo. |
| Eliminación de Aspectos | El modelo puede justificar sus elecciones y posee un gran poder explicativo basado en heurística simple; Los individuos llegan a una solución "aproximada" sin ningún esfuerzo computacional complejo | No se puede asegurar una buena elección cuando las alternativas elegidas son superiores a las alternativas eliminadas lo que se convierte en una elección subjetiva y además depende de la elección de cada individuo.  Poca evidencia experimental y empírica de su aplicabilidad en modelos de elección de ruta. |
| Regret Theory | Es un modelo que destaca por su simplicidad y apela en gran medida a la intuición, posee una formulación relativamente simple en comparación con la EUT, la RT, tiene sólo un parámetro adicional (un parámetro de aversión al arrepentimiento), que es mucho más parsimonioso que, por ejemplo, los cuatro parámetros que intervienen en PT.  Método de cálculo es bastante intuitivo y sencillo  Funciona muy bien como un modelo descriptivo de elección arriesgada  Posee una formulación relativamente simple  El punto de referencia de RT se identifica fácilmente en términos de rendimiento de las alternativas no percibidas (Avineri, 2006), caso contrario en los estudios de elección de itinerarios basados en PT que implican la selección de un punto de referencia arbitrario. | El mal desempeño de la RT puede deberse al hecho de que se beneficia del equilibrio entre atributos contrastantes, como por ejemplo el costo y el tiempo de viaje. Debido a la ausencia de este tipo de compensaciones, el valor agregado de la RT puede no ser totalmente capturado.  Las aplicaciones de la RT a un gran número de alternativas debido a que la RT se refiere principalmente a la comparación por pares de los atributos de las alternativas. Si las compensaciones entre los atributos de las alternativas no representan adecuadamente las características y el arrepentimiento asociado a cada alternativa puede ser muy similar, lo que posiblemente conduzca a probabilidades muy similares de elegir una u otra alternativa (Ramos et al., 2014) |

Podría entonces decirse que no existe un modelo perfecto disponible para explicar la forma en que los conductores toman decisiones de elección; todos ellos se caracterizan por tener ciertas fortalezas y debilidades, pero esta discusión sigue siendo un tema en desarrollo y si además adicionamos la recolección y validación de datos reales en los modelos propuestos, se aumenta significativamente el desafío de la modelación (Tawfik, Rakha, & Miller, 2010a, 2010b),

**4. Los modelos de comportamiento vs información en tiempo real**

Con el desarrollo de la infraestructura de vigilancia del tráfico y tecnologías de la comunicación se han creado sistemas de guía de ruta dinámicas en función de las condiciones del tráfico en tiempo real. Los sistemas de información de navegación avanzados están diseñados para ayudar a los viajeros en la toma de mejores opciones de viaje, proporcionando información sobre las alternativas de viaje disponibles, tráfico en tiempo real, sugerencias sobre rutas alternativas que eviten vías en congestión, disponibilidad de estacionamiento, cámaras de fotomultas, entre otros. Sin información, las opciones de los viajeros se basan principalmente en la información experimental y en el conocimiento adquirido de experiencias previas. Cuando los conductores están viajando en un entorno desconocido, sienten la necesidad de utilizar el servicio de información de navegación para adquirir información sobre las condiciones no sólo de tráfico en tiempo real y sugerencias sobre rutas alternativas que eviten la congestión, sino también posiblemente sobre la tarificación vial, la disponibilidad de estacionamiento, e incluso las instalaciones de entretenimiento. En este contexto de viaje, Ben-Elia et al., 2013 definen dos tipos de incertidumbre en tiempo de viaje en el entorno de elección: el primero depende del rendimiento de la red y se relaciona con la variabilidad real del tiempo de viaje, mientras que el segundo se refiere a la capacidad del sistema de información para estimar correctamente las condiciones de tráfico, una tarea que se vuelve más compleja a medida que aumentan los niveles de congestión, en particular la congestión no recurrente la cual es más difícil de predecir.

Los sistemas de navegación permiten a los viajeros, además de su experiencia, basar sus decisiones en la información descriptiva, prescriptiva e incluso retroalimentarla. La información descriptiva por lo general consiste en la información sobre las condiciones imperantes del camino, tales como los tiempos de viaje actuales o las predicciones, esta puede ser suministrada bien antes del viaje o en ruta, p.e, a través de una señal de mensajes viales o dispositivos personales. La información prescriptiva por lo general sugiere a los viajeros la "mejor" alternativa, por ejemplo, la ruta con el menor tiempo de viaje y la respuesta de los viajeros se define generalmente en la aceptación de las sugerencias que da el sistema. La información de retroalimentación suele ser a posteriori respecto a los registros históricos de los tiempos de viaje en las rutas elegidas y no elegidas (Ben-Elia et al., 2013). Aunque la eficiencia de la guía de ruta está estrechamente relacionada con la calidad de los datos de tráfico en tiempo real, estudios de simulación han confirmado el potencial de los sistemas de navegación en la reducción de tiempo de viaje promedio y la gravedad de la congestión, incluso con la información de tráfico imperfecta (Liang & Wakahara, 2014) y además de la sensibilidad de respuesta de los conductores a la información, especialmente en el caso de aceptar las sugerencias de rutas, depende de su percepción de la exactitud de la información proporcionada. La precisión puede ser definida como la capacidad del sistema de información para reducir la discrepancia entre los tiempos de viaje estimados y los reales experimentados por el viajero (Ben-Elia et al., 2013).

A continuación, se ilustran algunos de los papers que implementan acercamientos entre las teorías de comportamiento descritas anteriormente con información en tiempo real:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Trabajos | Teoría | Alcance |
| (Katsikopoulos, Duse-anthony, Fisher, & Susan, 2002) | PT | Obtienen una imagen del comportamiento de riesgo de los conductores mediante el empleo de experimentos conductuales y teniendo en cuenta los casos en que el desvío en la ruta, induce a pérdidas y ganancias en el tiempo de viaje promedio. Además, realizaron un ejercicio de simulación de conducción donde los participantes recibieron información descriptiva sobre los rangos de tiempo de viaje de dos vías disponibles bajo diferentes escenarios de tráfico, encontrando que, si los tiempos de viaje en la ruta alternativa son en promedio más cortos que las de la línea de referencia, los participantes demuestran la aversión al riesgo en su comportamiento elección de ruta. Por el contrario, en caso de pérdidas, se observa el comportamiento de elección de rutas búsqueda de riesgo cuando la ruta alternativa es más arriesgado con respecto a la referencia |
| (H. Li, Guensler, & Ogle, 2005) | EUT | Establecieron un modelo logit binario elección de los viajeros diarios entre una única ruta de viaje y múltiples rutas sobre la base de la evidencia de las diferentes valoraciones de los conductores de una serie de características de ruta y viaje, así como las características sociodemográficas de los viajeros donde examinan las opciones de rutas diarias de 182 conductores, con el uso de datos desglosados basados de GPS recopilados durante un período de 10 días. |
| (Avineri & Prashker, 2006) | PT | Confirman que los viajeros tienden a exhibir aversión al riesgo cuando se enfrentan a la información en el tiempo de viaje. En una serie de elecciones repetidas, compararon el efecto de proporcionan los encuestados, a priori, con información estática pre-viaje que describe los tiempos de viaje promedio esperado, además de recibir información de retroalimentación sobre la alternativa elegida. Demostraron que los encuestados que fueron informados presentan más aversión al riesgo y prefieren una ruta más confiable en comparación con el grupo control que sólo podía aprender a través de la experiencia adquirida. |
| (de Palma, Lindsey, & Picard, 2007) | EUT | Analizaron las decisiones de los conductores, la conveniencia de adquirir información y qué ruta tomar en una red simple de carreteras congestionadas. Para ello consideraron cuatro regímenes de información: Sin información, información gratuita, información disponible por una tarifa, y la información privada que está disponible gratis a un solo individuo. Sobre la base de su hipótesis demostraron que la información privada individual es más valiosa, mientras que los beneficios de la información libre y con acceso pagando se pueden clasificar de forma general y puede llegar a disminuir la utilidad esperada de los conductores con suficiente aversión al riesgo. |
| (Connors & Sumalee, 2009) | CPT | Proponen un modelo CPT de elección de ruta en una red en la que los tiempos de viaje son variables aleatorias. Bajo este escenario, los viajeros eligen su ruta sin saber el tiempo de viaje que experimentarían en cualquiera de las diferentes alternativas de rutas disponibles, además, investigaron el equilibrio de la red para diferentes parámetros teóricos de la prospectiva. Sobre la base de los valores asumidos de los parámetros, encontrando que un cambio en los valores de punto de referencia tiene una influencia significativa en el equilibrio conseguido en la red. |
| (Gao, Frejinger, & Ben-akiva, 2011) | EUT | desarrollan un modelo de elección de ruta que tiene en cuenta explícitamente el costo cognitivo en la búsqueda de información en tiempo real para reducir la incertidumbre de los tiempos de viaje. Los datos que utilizan para correr el modelo son datos simulados y lo validan a través de modelos de elección discreta. |
| (de Moraes Ramos, Daamen, & Hoogendoorn, 2011) | EUT, PT, RT | utilizaron un simulador de viaje para investigar las preferencias en la elección de ruta. Los encuestados hacen elecciones consecutivas entre tres rutas simulando un contexto real y ademas el suministro de información varió en función de tres condiciones: (i) ningún suministro de información, (ii) la provisión de tiempo de viaje en cuestión de minutos, y (iii) la provisión de longitud de la congestión en kilómetros. Con estos datos, compararon el rendimiento de la teoría de la utilidad esperada, la teoría prospectiva y la teoría de arrepentimiento. Concluyen que las capacidades de predicción de estas teorías en competencia varían según el tipo de información proporcionada. La teoría de la utilidad esperada y la teoría del arrepentimiento predicen ligeramente mejor que la teoría prospectiva acumulativa si no se proporciona ninguna información. Por el contrario, si se proporciona información, la teoría prospectiva acumulada supera claramente a las otras teorías. |
| (Xu, Lou, Yin, & Zhou, 2011) | PT | desarrollaron un modelo de equilibrio de usuario basado en la prospección de redes estocásticas. El modelo incorpora la determinación de puntos de referencia en relación a la suposición de que el punto de referencia para una persona es el tiempo que él o ella ha presupuestado para asegurar su probabilidad deseada de puntualidad. Los resultados muestran que los individuos ajustan sus puntos de referencia rápidamente en respuesta a los cambios en su elección. En el contexto de opciones de ruta, un viajero selecciona una ruta de acuerdo con un punto de referencia. El resultado de su viaje puede inducir un cambio en el punto de referencia, que puede conducir a un ajuste adicional en su elección de ruta, y así sucesivamente. |
| (Xu, Zhou, & Xu, 2011) | CPT | concluyen que CPT, junto con valores de parámetros razonables, es generalizable a la modelización elección de ruta. Además, en comparación con el individuo promedio, los viajeros tienen un mayor grado de aversión al riesgo cuando se enfrentan a la perspectiva de ganancias, un mayor grado de búsqueda de riesgo cuando se enfrentan a la perspectiva de pérdidas, y en menor grado de sensibilidad relativa de las pérdidas de ganancias. Además, afirman que la forma parametrizada del CPT, que se generalizan a los comportamientos de elección de rutas, se pueden utilizar para mejorar los modelos de equilibrio de red estocástica existentes y sustituir las reglas de decisión en otros estudios de comportamiento de elección de ruta. |
| (Chorus, 2012) | RT | En este artículo se muestra cómo la teoría del arrepentimiento se puede aplicar para modelar el comportamiento de elección de rutas bajo riesgo y sus equilibrios resultantes. Numéricamente se demuestra en una simple red de dos opciones de elección cómo la interacción entre la aversión al riesgo y la aversión al arrepentimiento determina el equilibrio del tráfico. |
| (D. Li, Miwa, & Morikawa, 2013) | EUT | Presenta un método para modelar el aprendizaje en ruta y los cambios de elección en cada nodo de decisión. Propone un modelo basado en redes bayesianas para describir la actualización de la ruta y del conocimiento de conductor sobre el estado de trafico usando datos de GPS y tráfico en tiempo real. |
| (Jou & Chen, 2013) | EUT | Investiga el comportamiento de elección de ruta de los conductores mediante la aplicación de un simulador CPT que incluye información en tiempo real (el tiempo de viaje previsto y su probabilidad) a dos autopistas alternativas. El encuestado conocía las distribuciones de tiempo de viaje para dos rutas, la configuración era como si provinieran de un dispositivo de información de tráfico en tiempo real. |
| (Nagendra S. Dhakar & Sivaramakrishnan Srinivasan, 2014) | EUT | Se construyen tres modelos que consideran tamaños de conjuntos de elección de cinco, 10 y 15 alternativas. Los resultados de la estimación indicaron efectos estadísticamente significativos e intuitivamente razonables de tiempo de viaje de flujo libre, giros a la izquierda, giros a la derecha, intersecciones y circulación en el atractivo de diferentes alternativas de ruta. Además, se encontró que la sensibilidad a estos factores varía según las características del viaje (propósito, hora del día y día de la semana) y del viajero (sexo, edad y duración de la estadía en el hogar actual). En este análisis, se usaron datos de GPS para 1,913 viajes |
| (Zhang & He, 2014) | PT | establecen un modelo de elección de ruta dinámica basada en la teoría de la prospectiva, el cual permite al viajero ajustar la ruta de acuerdo con la situación de la ruta en cualquier momento. El proceso de toma de decisiones refleja que la influencia del punto de referencia de viaje en el resultado de decisiones cambia con respecto a la situación en la ruta. Los viajeros tienden a cambiar de ruta mientras se da un ambiente de congestión y, a veces eligen la ruta arriesgada debido a la urgencia del tiempo lo cual es consistente con los hábitos de pensamiento humanos y a la situación real. El método propuesto es más cercano al comportamiento real de viaje y refleja el estado del tráfico real. |
| (Vacca & Meloni, 2015) | EUT | abordan el análisis del comportamiento de elección de ruta con EUT en ausencia de estímulos externos. Analizan los datos de GPS para viajes de hogar a trabajo en la mañana en el área metropolitana de Cagliari, con el objetivo de identificar cuál es la ruta, viaje y si las características socioeconómicas de los individuos determinan la elección de múltiples rutas para el mismo viaje OD. |
| (Yu & Zhou, 2016) | EUT y PT | El documento propone un método para analizar la actitud de elección de ruta en condiciones de incertidumbre donde se combina MEU y PT en un escenario bajo riesgo. Con el fin de calibrar el modelo un modelo logit multinomial (MNL) se mezcló con un modelo logit multinomial mixto (MMNL) y se compararon entre sí. |

Para información adicional consultar (Ciscal-Terry, Dell’Amico, Hadjidimitriou, & Iori, 2016; Dhakar, 2012; Nagendra S. Dhakar & Sivaramakrishnan Srinivasan, 2014; Ramaekers, Reumers, Wets, & Cools, 2013)

Otros trabajos también importantes desde la perspectiva de información en tiempo real enfocado al área de asignación en los cuales no se tiene en cuenta teorías de comportamiento pero que aportan al estado de arte en la modelación de elección de rutas en tiempo real son los siguientes:

Jan & Horowitz, 2000 fueron los pioneros usando rastreo y datos con GPS, en el cual exploraron el uso de datos de elección de rutas como una herramienta para estudiar los patrones de ruta de los viajeros donde revelan información importante sobre el comportamiento del viaje que era imposible discernir con métodos de encuesta convencionales, como entrevistas, cuestionarios o simuladores de conducción.

(Jakimavi & Burinskien, 2010) llevan a cabo una aplicación web creada para el cálculo óptimo de rutas, la cual ayuda al usuario a encontrar y elegir la ruta optima en función de los criterios de optimalidad elegidos por el usuario en el cual se ha empleado el método de Dijkstra ponderado. El algoritmo de Dijkstra se ha aplicado para realizar cálculos para encontrar la ruta de conducción óptima y utilizan un modelo de EUT para optimizar la ruta. El desarrollo de un sistema de gestión automática del tráfico en la ciudad de Vilnius permitió el aumento de la velocidad media del tráfico durante el flujo de tráfico máximo un 6%.

(Ben-Elia, Erev, & Shiftan, 2008) realizaron experimentos de simulación para explorar las influencias de la información, el aprendizaje, y el hábito de elecciones entre dos rutas. En (Ben-Elia et al., 2013) llevaron a cabo un experimento de elección de ruta para investigar el impacto de la exactitud de la información de tráfico en la elección de ruta. Los resultados sugirieron que la disminución de la precisión cambió opciones debido al riesgo principalmente para la ruta confiable, aumentando la probabilidad de elección de la alternativa inútil. Además encontraron que la sensibilidad de los participantes a la información no depende de la ruta específica; tanto el tiempo estimado de viaje y el tiempo real de viaje son variables significativas, encontrando que el coeficiente del tiempo de viaje estimado es mayor que la de los tiempos de viaje reales lo cual sugiere que la información descriptiva proporcionada por el sistema de información tiene un efecto mayor que la información de retroalimentación. Concluyen que la información prescriptiva sobre la ruta sugerida por el sistema es significativa, positiva y tiene un fuerte efecto en las demás variables. Por lo tanto, la probabilidad de elegir una ruta aumenta sustancialmente cuando esa ruta también es sugerida por el sistema de información de elección de ruta.

(Jiang, Ji, Du, & Deng, 2014) presentan un método analítico de elección de ruta que incorpora teoría prospectiva acumulada y la teoría de juegos evolutivo para analizar cómo los conductores ajustan sus comportamientos de elección de ruta bajo la influencia de la información del tráfico y cual es el impacto de la información en la elección de ruta.

Por último, un interesante acercamiento al análisis de datos en tiempo real de GPS lo podemos encontrar en (Marković, Sekuła, Laan, Andrienko, & Andrienko, 2017), donde emplean herramientas de visualizacíon y Machine Learning para analizar una gran cantidad de trazas de GPS, adicionalmente realizan una detallada revisión bibliográfica donde se han utilizado analisis de trayectorias en sistemas de transporte

4. Conclusiones y Futuras investigaciones.

En el campo de la economía se han observado las ventajas respecto a cada una de las teorías y sus alcances, pero en el campo de la modelación en transporte, solo desde hace poco tiempo las teorías de comportamiento se han venido implementando, generando consigo una gran variedad de resultados y nuevas áreas de investigación. Desde la década de los setenta se han propuesto modelos matemáticos de simulación y optimización que tratan de describir el comportamiento de elección de los agentes sobre un sistema vial, pero cabe anotar que no existe un modelo perfecto que se encuentre disponible para explicar la forma en como los conductores toman decisiones, todos estos modelos poseen tanto fortalezas como debilidades y cabe anotar que la recolección y validación de datos en tiempo real aumenta aún más el desafío de crear sistemas y modelos que puedan aportar a la toma de mejores decisiones de viaje.

Modelar el comportamiento de los conductores es área muy importante pero bastante compleja y a pesar que existen marcadas diferencias conceptuales en relación a la utilización entre teorías basadas en la utilidad y las no basadas en utilidad, muchos investigadores concuerdan en que las características cognitivas de los conductores que se incorporan a estos los modelos de elección hacen que cada vez se mejoren y se amplíe el nivel de entendimiento en el área.

Por otra parte, se ha demostrado las ventajas de los sistemas de navegación en la optimización y elección de rutas en tiempo real, pero no se ha profundizado en la investigación sobre que posibles aspectos cognitivos influyen en el elector, además como su nivel de aversión al riesgo incide en la elección de las sugerencias realizadas por los sistemas, asimismo en la percepción de la fiabilidad y temporalidad con la cual se actualizan los sistemas de información de tráfico y en la vulnerabilidad de los sistemas viales y su relación con la eleccion de los agentes.

Muchos de los modelos de decisiones implementados en elección de ruta no tienen en cuenta que existen procesos de aprendizaje, lo cual influye directamente en el proceso de elección final.

El levantamiento de información en tiempo real para la elección de rutas de los conductores es un desafío para los investigadores y pocas metodologías se han implementado para ello, lo que constituye un campo investigación en constante evolución.

Se debe profundizar en analizar la evolución de los sistemas de aprendizaje, posiblemente hacia la elección de rutas con variables objetivas con mínimos de tiempo, distancia,etc, asi como aspectos subjetivos como comodidad, tranquilidad, paisajismo, entre otros; pero además se requieren más conocimientos en la elección en condiciones de eventos tipo cisnes negros.

# References

Avineri, E. (2006). The Effect of Reference Point on Stochastic Network Equilibrium. *Transportation Science*, *40*(4), 409–420. https://doi.org/10.1287/trsc.l060.0158

Avineri, E., & Prashker, J. N. (2006). The impact of travel time information on travelers ’ learning under uncertainty. *Transportation*, *33*, 393–408. https://doi.org/10.1007/s11116-005-5710-y

Batley, R., & Daly, A. (2006). On the equivalence between elimination-by-aspects and generalised extreme value models of choice behaviour. *Journal of Mathematical Psychology*, *50*(5), 456–467. https://doi.org/10.1016/j.jmp.2006.05.003

Bell, D. E. (1982). Regret in Decision Making under Uncertainty. *Operations Research*. https://doi.org/10.1287/opre.30.5.961

Ben-Elia, E., Di Pace, R., Bifulco, G. N., & Shiftan, Y. (2013). The impact of travel information ’ s accuracy on route-choice. *TRANSPORTATION RESEARCH PART C*, *26*, 146–159. https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.07.001

Ben-Elia, E., Erev, I., & Shiftan, Y. (2008). The combined effect of information and experience on drivers’ route-choice behavior. *Transportation*, *35*(2), 165–177. https://doi.org/10.1007/s11116-007-9143-7

Chorus, C. G., Arentze, T. A., & Timmermans, H. J. P. (2008). A comparison of regret-minimization and utility maximization in the context of tavel mode-choices. In *87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA.*

Chorus, C. G. (2012). Regret theory-based route choices and traffic equilibria. *Transportmetrica*, *8*(July 2015), 291–305. https://doi.org/10.1080/18128602.2010.498391

Ciscal-Terry, W., Dell’Amico, M., Hadjidimitriou, N. S., & Iori, M. (2016). An analysis of drivers route choice behaviour using GPS data and optimal alternatives. *Journal of Transport Geography*, *51*, 119–129. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.12.003

Connors, R. D., & Sumalee, A. (2009). A network equilibrium model with travellers’ perception of stochastic travel times. *Transportation Research Part B: Methodological*, *43*(6), 614–624. https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.12.002

Córdoba, J. E. (2010). *Modelo de Eleccion Discreta Integrando Variables Latentes y Racionalidad Limitada.* Universidad Nacional de Colombia.

Córdoba, J. E., & Jaramillo, G. P. (2012). Inclusion of the Latent Personality Variable in Multinomial Logit Models Using the 16pf Psychometric Test. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *54*, 169–178. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.736

de Moraes Ramos, G., Daamen, W., & Hoogendoorn, S. (2011). Expected utility theory, prospect theory, and regret theory compared for prediction of route choice behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,* *2230*, 19–28.

de Palma, A., Lindsey, R., & Picard, N. (2007). *Congestion, risk aversion and the value of information*. *Paper provided by THEMA (THéorie Economique, Modélisation et Applications), Université de Cergy-Pontoise in its* (Vol. 20). https://doi.org/10.1080/00220480009596456

Dhakar, N. (2012). Route Choice Modeling Using Gps Data, 161.

Estrada, F. (2008). Economía y racionalidad de las organizaciones. Los aportes de Herbert A. Simon. *Revista de Estudios Sociales*, (31), 84–103.

Gao, S., Frejinger, E., & Ben-akiva, M. (2011). Cognitive cost in route choice with real-time information : An exploratory analysis. *Transportation Research Part A*, *45*(9), 916–926. https://doi.org/10.1016/j.tra.2011.04.008

Herbert A . Simon. (1955). A Behavioral Model of Rational Choice. *The Quarterly Journal of Economics*, *69*(1), 99–118.

Jakimavi, M., & Burinskien, M. (2010). ROUTE PLANNING METHODOLOGY OF AN ADVANCED TRAVELLER INFORMATION SYSTEM IN VILNIUS CITY. *Transport*, *25*(2), 171–177. https://doi.org/10.3846/transport.2010.21

Jan, O., & Horowitz, A. J. (2000). Using GPS Data to Understand Variations in Path Choice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1725*, 37–44.

Jiang, X., Ji, Y., Du, M., & Deng, W. (2014). A Study of Driver ’ s Route Choice Behavior Based on Evolutionary Game Theory. *Computational Intelligence and Neuroscience*. https://doi.org/10.1155/2014/124716

Jou, R. C., & Chen, K. H. (2013). An application of cumulative prospect theory to freeway drivers’ route choice behaviours. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *49*(1), 123–131. https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.011

Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, *47*(2), 263–292.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1984). Choices , Values , and Frames. *American Psychologist*, *39*(4), 341–350.

Kahneman, D., & Tversky, A. (1991). Loss aversion in riskless choice: a reference-dependent model. *The Quarterly Journal of Economics*, (106).

Katsikopoulos, K. V, Duse-anthony, Y., Fisher, D. L., & Susan, A. (2002). Risk Attitude Reversals in Drivers ’ Route Choice when Range of Travel Time Information is Provided. *Human Factors*, *44*(3).

Li, D., Miwa, T., & Morikawa, T. (2013). Dynamic Route Choice Behavior Analysis Considering En-route Learning and Choices. *Transportation Research Record*, *5*(6024), 1–19. https://doi.org/10.3141/2383-01

Li, H., Guensler, R., & Ogle, J. (2005). Analysis of Morning Commute Route Choice Patterns Using Global Positioning System-Based Vehicle Activity Data. *Transportation Research Record*, *1926*(1), 162–170. https://doi.org/10.3141/1926-19

Li, Z., & Hensher, D. (2011). Prospect Theoretic Contributions in Understanding Traveller Behaviour: A Review and Some Comments. *Transport Reviews*, *31*(1), 97–115. https://doi.org/10.1080/01441647.2010.498589

Liang, Z., & Wakahara, Y. (2014). Real-time urban traffic amount prediction models for dynamic route guidance systems. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, *85*, 1–13.

Loomes, G., & Sugden, R. (1982). Regret Theory: An Alternative Theory of Rational Choice under Uncertainty. *Economic Journal*, *92*(368), 805–824. Retrieved from http://teaching.ust.hk/~bee/papers/misc/Regret Theory An Alternative Theory of Rational Choice Under Uncertainty.pdf

Loomes, G., & Sugden, R. (1987). Some implications of a more general form of regret theory. *Journal of Economic Theory*.

Machina, M. J. (1987). Decision-Making in the Presence of Risk. *Science, New Series,* *236*(4801), 537–543.

Marković, N., Sekuła, P., Laan, Z. Vander, Andrienko, G., & Andrienko, N. (2017). Applications of Trajectory Data in Transportation: Literature Review and Maryland Case Study. Retrieved from http://arxiv.org/abs/1708.07193

Nagendra S. Dhakar, & Sivaramakrishnan Srinivasan. (2014). Route Choice Modelling using GPS based travel Surveys. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2413*, 65–73. https://doi.org/10.3141/2413-07

Orro Arcay, A., & García Benítez, F. (2006). *Modelos de elección discreta en transportes con coeficientes aleatorios*. Universidad de A CORUÑA.

Ramaekers, K., Reumers, S., Wets, G., & Cools, M. (2013). Modelling Route Choice Decisions of Car Travellers Using Combined GPS and Diary Data. *Networks and Spatial Economics*, *13*(3), 351–372. https://doi.org/10.1007/s11067-013-9184-8

Ramos, G. M., Daamen, W., & Hoogendoorn, S. (2014). A State-of-the-Art Review : Developments in Utility Theory , Prospect Theory and Regret Theory to Investigate Travellers ’ Behaviour in Situations Involving Travel Time Uncertainty. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal*, *34*, 46–67. https://doi.org/10.1080/01441647.2013.856356

Rasouli, S., & Timmermans, H. (2014). Applications of theories and models of choice and decision-making under conditions of uncertainty in travel behavior research. *Travel Behaviour and Society*, *1*(3), 79–90. https://doi.org/10.1016/j.tbs.2013.12.001

Richman, H. B., Staszewski, J. J., & Simon, H. a. (1995). Simulation of expert memory using EPAM IV. *Psychological Review*, *102*(2), 305–330. https://doi.org/10.1037/0033-295X.102.2.305

Sbicca, A. (2014). Heurísticas no Estudo das Decisões Econômicas : contribuições de Herbert Simon, Daniel Kahneman e Amos Tversky. *Estudos Econômicos (São Paulo)*, *44*(3), 579–603. https://doi.org/10.1590/S0101-41612014000300006

Sebora, T., & Cornwall, J. R. (1995). Expected Utility Theory Vs . Prospect Theory : For Strategic Decision Makers Implications. *Journal of Managerial Issues*, *7*(1), 41–61. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/40604049

Sikka, N. (2012). *Understanding travelers ’ route choice behavior under uncertainty*. *Thesis*. University of Iowa.

Stern, E., & Richardson, H. W. (2005). Behavioural modelling of road users: current research and future needs. *Transport Reviews*, *25*(2), 159–180. https://doi.org/10.1080/0144164042000313638

Tawfik, A. M., Rakha, H. A., & Miller, S. (2010a). Driver Route Choice Behavior: Experiences, Perceptions, and Choices. In *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, University of California, San Diego, CA, USA June 21-24, 2010* (pp. 1–6).

Tawfik, A. M., Rakha, H. A., & Miller, S. D. (2010b). An Experimental Exploration of Route Choice: Identifying Drivers Choices and Choice Patterns, and Capturing Network Evolution. In *2010 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation System, Madeira Island, Portugal, September 19-22, 2010* (pp. 1005–1012).

Tomas Lucas, J., & Sirvent Boix, R. (1992). Una Versión de la Teoría del Arrepentimiento: Aplicación a la Demanda de Seguro. *Investigaciones Económicas*, *XVI*(1), 43’62.

Tversky, A. (1972a). Choice by elimination. *Journal of Mathematical Psychology*, *9*(4), 341–367. https://doi.org/10.1016/0022-2496(72)90011-9

Tversky, A. (1972b). Elimination by aspects: A theory of choice. *Psychological Review*, *79*(4), 281–299. https://doi.org/10.1037/h0032955

Tversky, A., & Kahneman, D. (1992). Advances in Prospect Theory : Cumulative Representation of Uncertainty. *Journal of Risk and Uncertainty*, *323*, 297–323.

Vacca, A., & Meloni, I. (2015). Understanding route switch behavior : an analysis using GPS based data. *Transportation Research Procedia*, *5*, 56–65. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.01.018

Van de Kaa, E. J. (2008). *Extended Prospect Theory. Findings on Choice Behaviour from Economics and the Behavioural Sciences and their Relevance for Travel Behaviour*. Delf University of Tecnology.

Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behavior*. Pricenton, New York: Princeton University Press.

Weber, M., & Camerer, C. (1987). Recent developments in modeling preferences under risk. *Spektrum*, *9*, 129–151.

Wee, B. Van. (2010). Prospect Theory and Travel Behaviour: a Personal Reflection Based on a Seminar. *EJTIR*, *10*(10(4)), 385–394.

Wu, G., & Gonzalez, R. (1996). Curvature of the Probability Weighting Function. *Source: Management Science*, *42*(12), 1676–1690. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/2634546

Xu, H., Lou, Y., Yin, Y., & Zhou, J. (2011). A prospect-based user equilibrium model with endogenous reference points and its application in congestion pricing. *Transportation Research Part B: Methodological*, *45*(2), 311–328. https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.09.003

Xu, H., Zhou, J., & Xu, W. (2011). A decision-making rule for modeling travelers’ route choice behavior based on cumulative prospect theory. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.05.009

Yu, Y., & Zhou, X.-Z. (2016). Route Choice Behavior Analysis with Unexpected Delay Information. *Procedia Engineering*, *137*, 252–258. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.257

Zhang, W., & He, R. (2014). Dynamic Route Choice Based on Prospect Theory. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *138*(0), 159–167. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.07.191