

Tecnología Móvil Aplicada al Transporte Colectivo

Caso de Estudio: Servicio de Viajes Compartidos

Miguel Machado

Tesis de Maestría en Computación

Centro de Posgrados y Actualización Profesional
Instituto de Computación - Facultad de Ingeniería
Universidad de la República.
Montevideo, Uruguay.
2016



Orientador de Tesis
Dr. Antonio Mauttone

Resumen

Generalmente la flota de vehículos motorizados más numerosa de cualquier ciudad es la conformada por el conjunto de autos particulares que transitan en ella. Operando promedialmente con una utilización efectiva menor al 30% en términos de capacidad, su naturaleza la lleva a ser principal causa de congestión de tráfico y demanda por infraestructura vial. Además, es la principal contribuyente en contaminación por emisión de partículas dentro del sector de transporte urbano.

Si bien hay múltiples y diversas medidas que pueden llevarse a cabo para aliviar esta situación, la mayoría de los países de la región presenta dificultades para acompasar el aumento del parque automotor. Esta situación se da principalmente en ciudades donde los medios de transporte masivo no representan alternativas con comodidad comparables a la de disponer de un vehículo propio, lo que genera que la infraestructura vial disponible se torne insuficiente.

En este trabajo se estudian los Sistemas de Transporte Inteligente que dan soporte a mejorar las condiciones de transporte, entre ellos el de pasajeros. A partir de dicho estudio, se fundamenta la propuesta de una aplicación de tecnología móvil, es decir para teléfonos inteligentes o tabletas, enfocada a sistemas de transporte colectivo de pasajeros. Se propone un servicio montado sobre dispositivos móviles para sugerir viajes compartidos, estos son, trayectos comunes en las rutas de dos o más personas, que provee funcionalidades de búsqueda y asignación de viajes compartidos en vehículos particulares. El servicio se dice dinámico ya que se ofrece sugerencias en tiempo real para viajes eventuales o casuales además de los viajes agendados. De este modo, conductores y pasajeros (ambos denominados participantes) pueden beneficiarse de compartir el vehículo. Las búsquedas de viajes se realizan utilizando algoritmos basados en ruteo geográfico y distribución de costos operativos guiados por heurísticas, con motivo de realizar asignaciones que incentiven esta práctica entre sus participantes.

Se realiza un análisis de servicios de viajes compartidos (*ridesharing*) existentes y de los problemas que enfrentan y buscan resolver, insumo que se tiene en cuenta para el diseño e implementación de un prototipo funcional del servicio propuesto. Posteriormente se realiza una evaluación de dicho servicio, simulando la utilización del prototipo bajo diferentes condiciones. De esta evaluación se concluye que sin necesidad de infraestructura vial adicional ni personal operativo, los conductores podrían disminuir sus costos operativos en más de la mitad de su magnitud, y los pasajeros podrían desplazarse a tarifas y tiempos acordes, en comparación con medios masivos, privados o públicos.

El trabajo aquí planteado busca presentar y proponer una alternativa para métodos de transporte de personas, que sea escalable y sustentable, facilitando un uso más eficiente de recursos ya disponibles, pero con alta capacidad ociosa. Esto permite generar ahorros que pueden ser utilizados en beneficio de sus participantes directos, así como contribuir al bienestar de toda la sociedad mediante la reducción de congestión de tráfico, polución y demanda de infraestructura vial.

Palabras Clave: Transporte Compartido, Tecnología Móvil, Sistemas de Transporte Inteligente, Transporte Sustentable, Servicios Móviles de Transporte, Viajes Compartidos, Uso Compartido de Automóvil, Transporte a Demanda.

Contenidos

1.	Introducción	6
2.	Marco Conceptual - Sistemas de Transporte Inteligente	10
2.1	Intelligent Transportation Systems (ITS).....	11
2.1.1	Aplicaciones.....	13
2.2	Categorización de Sistemas de Transporte Inteligente	17
2.2.1	Etapas de Transporte.....	18
2.2.2	Advanced Transportation Management Systems (ATMS).....	19
2.2.3	Transportation Pricing Systems	20
2.2.4	Advanced Traveler Information Systems (ATIS).....	21
2.2.5	Advanced Public Transportation Systems (APTS).....	21
2.3	Motivación	22
2.3.1	Evolución en Tecnología Móvil.....	22
2.3.2	Infraestructura	23
2.3.3	Mantenibilidad	23
2.3.4	Áreas de Acción.....	23
2.4	Tecnología.....	25
2.4.1	Dispositivos Móviles	26
2.4.2	Tecnologías de Posicionamiento Geográfico.....	27
3.	Sistemas para Viajes Compartidos – <i>Ridesharing</i>	32
3.1	Contexto	33
3.1.1	Definiciones Básicas.....	33
3.1.2	Principales Características	35
3.1.3	Estructura Geográfica	36
3.2	Objetivos	39
3.3	Operativa y Funcionalidades.....	41
3.4	Restricciones	42
3.4.1	Limitantes de Asignación	42
3.4.2	Consideraciones de Costo	43
3.4.3	Beneficio Global y Local	45

3.5	Comparativa entre Sistemas de Transporte de Pasajeros	45
3.6	Agencias de Asignación (Matching Agencies).....	47
3.6.1	Clasificación	48
3.6.2	Funciones de Negocio.....	49
3.7	Literatura Relevante	53
4.	Implementación de Servicio de Ridesharing	56
4.1	Problema a Resolver.....	56
4.1.1	Motivación	57
4.1.2	Relevancia en el Contexto Local	57
4.1.3	Motivación a la Aplicación de Ridesharing y Carpooling.....	65
4.2	Modelo de la Realidad.....	66
4.2.1	Dominio	66
4.2.2	Matching	68
4.2.3	Cobro.....	72
4.2.4	Despliegue de la Aplicación	73
4.3	Desarrollo de Solución.....	74
4.3.1	Requerimientos	74
4.3.2	Implementación.....	81
5.	Evaluación y Análisis	90
5.1	Casos de Estudio	90
5.1.1	Demostración de Asignación de Viajes	91
5.1.2	Casos de Distribución de Costos.....	99
5.2	Análisis de los Casos y Resultados	105
6.	Conclusiones y Trabajo Futuro.....	112
6.1	Conclusiones	112
6.2	Trabajos Futuros.....	113
6.2.1	Ridesharing Integrado para Múltiples Pasajeros.....	113
6.2.2	Optimización Global de Asignaciones.....	113
6.2.3	Incorporación del Factor Social	114
7.	Referencias.....	116

1. Introducción

Este trabajo trata sobre la aplicación de tecnología móvil para el transporte colectivo de pasajeros en vehículos particulares. Las tecnologías de la información y la comunicación han tenido un importante impacto en el transporte, y particularmente en el de personas (Ellabib et.al, 2002). Los nuevos servicios y sistemas de información han revolucionado la manera en que la gente utiliza el transporte. Entre las tecnologías más valoradas por los usuarios se encuentran los dispositivos móviles, que han probado ser extremadamente versátiles en sus aplicaciones. Sus funcionalidades han encontrado utilidad en muchos tipos distintos de transporte público y colectivo, aunque quizás actualmente sus aplicaciones más conocidas estén centradas en la provisión de información y geolocalización. Otras aplicaciones, se basan en dicha información para generar nuevas modalidades de transporte, incluso sugiriendo decisiones, como es el caso de la propuesta de este trabajo. Por otro lado, los sistemas de transporte colectivo de pasajeros enfrentan el problema inherente a la creciente demanda urbana, la congestión, es decir, a la condición del flujo vehicular que se ve saturado debido al exceso de demanda de las vías, produciendo incrementos en los tiempos de viaje. Estos sistemas enfrentan el problema de tener que transportar una masa creciente de pasajeros prácticamente por los mismos medios y vías, siendo la flota de vehículos particulares (autos) la principal causa de dicha congestión (NU. CEPAL., 2001). En este trabajo se plantea una alternativa para un uso más eficiente de estos vehículos promoviendo el transporte colectivo entre pasajeros y conductores con viajes comunes, quienes podrán compartir vehículos procurando por un lado aumentar la utilización efectiva de la flota y por otro, motivar la disminución de la cantidad de vehículos necesaria en el sistema para transportar la misma cantidad de personas.

En los siguientes capítulos se expondrán las principales categorías y características de los denominados Sistemas de Transporte Inteligente (*Intelligent Transportation Systems – ITS*), con especial énfasis en el transporte de pasajeros, los cuales se basan en el uso de tecnología, tanto hardware como software, para cumplir sus objetivos y mejorar su eficiencia, usualmente cuantificada en tiempo, capacidad y costo. Dentro de los objetivos, se presentan los principales problemas y soluciones que enfrentan y ofrecen respectivamente los sistemas, con especial énfasis en los de transporte colectivo, lo cual motiva el foco principal y propuesta práctica de éste trabajo. Se hará especial hincapié en el transporte urbano de pasajeros, tanto para alternativas públicas y privadas, considerando principalmente los aspectos de escalabilidad y eficiencia en materia de costos operativos, capacidad de transporte, tiempos de traslado, comodidad del pasajero y emisión de gases.

Si bien los ITS usualmente se asocian a grandes inversiones de infraestructura, el uso de tecnología a nivel de usuarios ha impulsado el desarrollo de sistemas y soluciones por parte de otras entidades además de estados o grandes empresas. La creciente demanda de los pasajeros por contar con información veraz e inmediata de manera de mejorar su experiencia de viaje, ya sea por ejemplo minimizando tiempos o costos, ha visto en muchos casos respuesta en los

propios usuarios, quienes dentro de sus capacidades desarrollan sistemas colaborativos, impulsando la mejora del transporte a veces de manera impredecible (Agatz et al., 2009). Este tipo de actividades son cada vez más comunes en la medida que tanto usuarios como operadores de transporte, incluyendo a las empresas y entidades que gestionan estos servicios, invierten y adoptan nuevas tecnologías. Dentro de esas iniciativas, han surgido los sistemas de viajes compartidos, los cuales se basan en que pasajeros y conductores de vehículos particulares puedan compartir el vehículo para trasladarse al mismo destino. Si bien existen múltiples modalidades y alternativas a lo largo del mundo que promueven dicha práctica, la reciente y creciente adopción de tecnología y conectividad de dispositivos móviles entre los usuarios del transporte, ha ampliado las posibilidades de mejora e innovación de estos sistemas.

En este marco, este trabajo propone la creación de un servicio de viajes compartidos basado en la aplicación de tecnología móvil al transporte colectivo de pasajeros. Se busca contribuir a la reducción del problema de congestión y aumentar la eficiencia de transporte de pasajeros, combinando las facilidades de la plataforma móvil para promover viajes compartidos entre pasajeros y conductores de vehículos particulares. Estos vehículos componen usualmente la flota más numerosa de cualquier ciudad, siendo la principal causante de sus problemas de congestión y contaminación por emisión de partículas, ambos factores que contribuyen a disminuir el bienestar social de los habitantes (Rupprecht, 2012). Dichos problemas son considerados como motivación principal de la propuesta de este trabajo, donde se propone mejorar la eficiencia del servicio de transporte, desde el punto de vista de capacidad ociosa, la cual actualmente plantea una pérdida considerable, asumiendo que opera regularmente en menos de un tercio de su capacidad de transportar pasajeros (GAO, 2009).

Los contenidos de este trabajo están distribuidos en 6 capítulos, realizando la presente introducción en el primero. El Capítulo 2 presenta los principales aspectos de los sistemas de transporte inteligente, buscando exponer sus características principales, avance histórico y estado actual en esta materia. Se presentarán los problemas y soluciones existentes dentro de sus áreas principales, su categorización y motivación, los cuales son presentados para el contexto local en las Sección 2.3 y 2.4, incluyendo los aspectos tecnológicos que han permitido e impulsado el desarrollo de estos sistemas. Dado el contexto, en el Capítulo 3 se presentan los sistemas que soportan una de las modalidades para el transporte de pasajeros, concretamente la de viajes compartidos en vehículos particulares. Se detalla la realidad y estado del arte de estos sistemas, motivando la propuesta principal de este trabajo expuesta en el Capítulo 4, esto es, la aplicación de tecnología móvil para la implementación de un servicio de transporte compartido de vehículos particulares. Se presentan las principales características, diseño e implementación del servicio desarrollado, sobre el cual se realizó una evaluación simulada, cuyos resultados y análisis se exponen en el Capítulo 5. En el Capítulo 6 se compartirán las conclusiones de la experiencia y trabajo futuro.

El estudio realizado en este trabajo, fundamenta la implementación de un servicio que apuesta al uso de la tecnología con gran adopción por la población (i. e. tecnología móvil), y

particularmente entre los usuarios del transporte. De su evaluación se concluye que el servicio plantea una propuesta para mejorar la eficiencia en el uso de vehículos particulares, pudiendo cuantificar los beneficios reportados directamente a sus involucrados. Si bien se basa en optimizaciones puntuales y locales, se concluye que la posible adopción masiva plantea beneficios considerables en la optimización de la flota en cuestión, reportando beneficios de mayor impacto en la sociedad (Kocur, et al., 1983). Entre ellos, la reducción de congestión y contaminación, así como la sustentabilidad de sistemas de transporte y optimización de recursos, ambos objetivos de interés de este trabajo y su autor.

2. Marco Conceptual - Sistemas de Transporte Inteligente

El propósito de esta Sección es realizar una presentación de sistemas de transporte de pasajeros que utilizan tecnología, así como también identificar algunas de las pautas sobre las que se basa el desarrollo de los sistemas de transporte inteligente. Se hará una presentación de los conceptos y taxonomía utilizada para su clasificación, para luego cubrir las principales áreas de trabajo que motivan el desarrollo de estos sistemas. Si bien este trabajo se centra en el transporte urbano y colectivo de pasajeros, resulta necesario y relevante comprender la contextualización de los conceptos comunes al área y sistemas.

Los avances tecnológicos y metodológicos han resultado esenciales para la sustentabilidad, eficiencia y competitividad de la movilidad tanto a nivel nacional como regional. A pesar de la rápida adopción, la tecnología de la información y comunicación ha permanecido un tanto alejada de los sistemas de transporte público, principalmente en países en vías de desarrollo donde las inversiones ligadas a este tipo de proyectos se ven atadas a mayores restricciones en cuanto a disponibilidad de recursos. La contribución potencial que tiene la aplicación de sistemas de transporte inteligente es significativa, siendo el transporte masivo o público una de las áreas con mayor necesidad de aplicación en la industria. La particularidad que enfrentan los sistemas de transporte público inteligentes (*Intelligent Public Transportation Systems - IPTS*), es decir, sistemas de transporte inteligente aplicados específicamente al transporte público de pasajeros, es la cantidad de actores involucrados que existen en el proceso de planificación. En ello participan desde administradores, operadores, pasajeros y tripulantes, hasta empresas y entidades reguladoras. Si bien sus objetivos suelen ser variados comprendiendo intereses administrativos, operativos, y económicos, y por ende sus resultados o métricas son evaluadas de distinta manera (ej. tiempo, costo), las decisiones tomadas impactarán en gran parte de la población (pasajeros) directamente y en base diaria. Resulta así, de vital importancia que exista un flujo de comunicación continuo y preciso entre todos los involucrados para poder obtener un servicio satisfactorio, es decir una buena gestión de la flota para ofrecer un buen servicio de transporte a los usuarios. La coordinación efectiva de esta información entre todas las partes resultará en un sistema más rápido, confiable y cómodo para los pasajeros quienes podrán percibir las mejoras sustancialmente.

A pesar de que el área de IPTS es mucho más específica que los ITS en general, aún así resulta vasto de describir el detalle de todas sus aplicaciones. Se hará una recorrida sobre los principales aspectos existentes en el uso de estas tecnologías pero con especial foco en los sistemas de seguimiento e información, así como su impacto en la experiencia de los pasajeros.

Muchos de los casos de estudio aquí presentados representan el estado del arte en sistemas de transporte tanto individuales como colectivos, de personas o productos. Pese a los avances, aún falta mucho trabajo para que estos sistemas sean implementados de manera universal. Por ejemplo, hoy en día muchos sistemas aún carecen de tecnología de localización, lo que los hace

incapaces de proveer información en tiempo real a sus clientes, insumo vital para la correcta gestión de estos sistemas.

En las Secciones 2.3 y 2.4 se presentan los argumentos que motivan la propuesta de este trabajo desde el punto de vista operacional del transporte, su infraestructura y mantenibilidad así como los principales factores tecnológicos sobre los que se fundamenta este trabajo.

2.1 Intelligent Transportation Systems (ITS)

Un sistema de transporte efectivo y eficiente es vital para que los ciudadanos tengan una buena calidad de vida, permitiendo la accesibilidad de lugares, acercando gente y productos entre sí.

La implantación de sistemas de transporte eficiente y sustentable debería de encontrarse como asunto de vital importancia dentro de las prioridades nacionales. De todos modos, las políticas de transporte hoy en día se encuentran en una encrucijada. Considerando la futura escasez de petróleo, las crecientes preocupaciones por el medio ambiente, y la imposibilidad de solucionar problemas de congestión apostando a la escalabilidad de las carreteras o rutas, las decisiones se tornan cada vez más difíciles. Por ejemplo, en la Unión Europea ya existen propuestas (Transport, 2011) que promocionan la independencia del petróleo y buscan la creación de una infraestructura moderna para la provisión de movilidad multimodal¹ asistida por sistemas de gestión e información inteligentes. Un sistema de transporte puede ser considerado inteligente si es capaz de gestionar nuevas situaciones e información como las que conciernen a la seguridad, congestión del tráfico, obstáculos e integración multimodal – mediante la integración de las distintas fuentes de datos para producir información y conocimiento valioso para sus usuarios y operadores.

La potencialidad de los ITS para enmarcar objetivos, acciones y políticas de transporte se basa en la amplia variedad de aplicaciones en los distintos tipos de transporte ya sea de pasajeros o bienes, como muestra la Fig. 1. Esto ocurre a modo de ejemplo, en el transporte terrestre, donde las aplicaciones de ITS incluyen: pago electrónico, gestión dinámica del tráfico (límites de velocidad, estacionamiento, navegación), información en tiempo real, así como otros sistemas de asistencia a los conductores como sistemas de alertas o recomendación. Los ITS también pueden facilitar la integración de múltiples modos de transporte, con el caso más conocido de planeamiento de viajes en distintos sistemas (ej. bus-tren) o servicios de seguimiento para el transporte de bienes. Este tipo de soluciones ya se encuentran aplicadas en varios países o regiones pero de manera fragmentada formando instancias “mono-modales” en dominios geográficamente aislados o incompletos. A pesar de que la industria de ITS es altamente innovadora y competitiva, el uso de los recursos tanto públicos como privados, ya sea en materia de operativa o infraestructura, en su gran mayoría sigue siendo ineficiente (CCIT, 2010).

¹ **Transporte Multimodal** - El transporte multimodal es la articulación entre diferentes modos de transporte, a fin de realizar más rápida y eficazmente las operaciones de trasbordo de personas, materiales y mercancías.

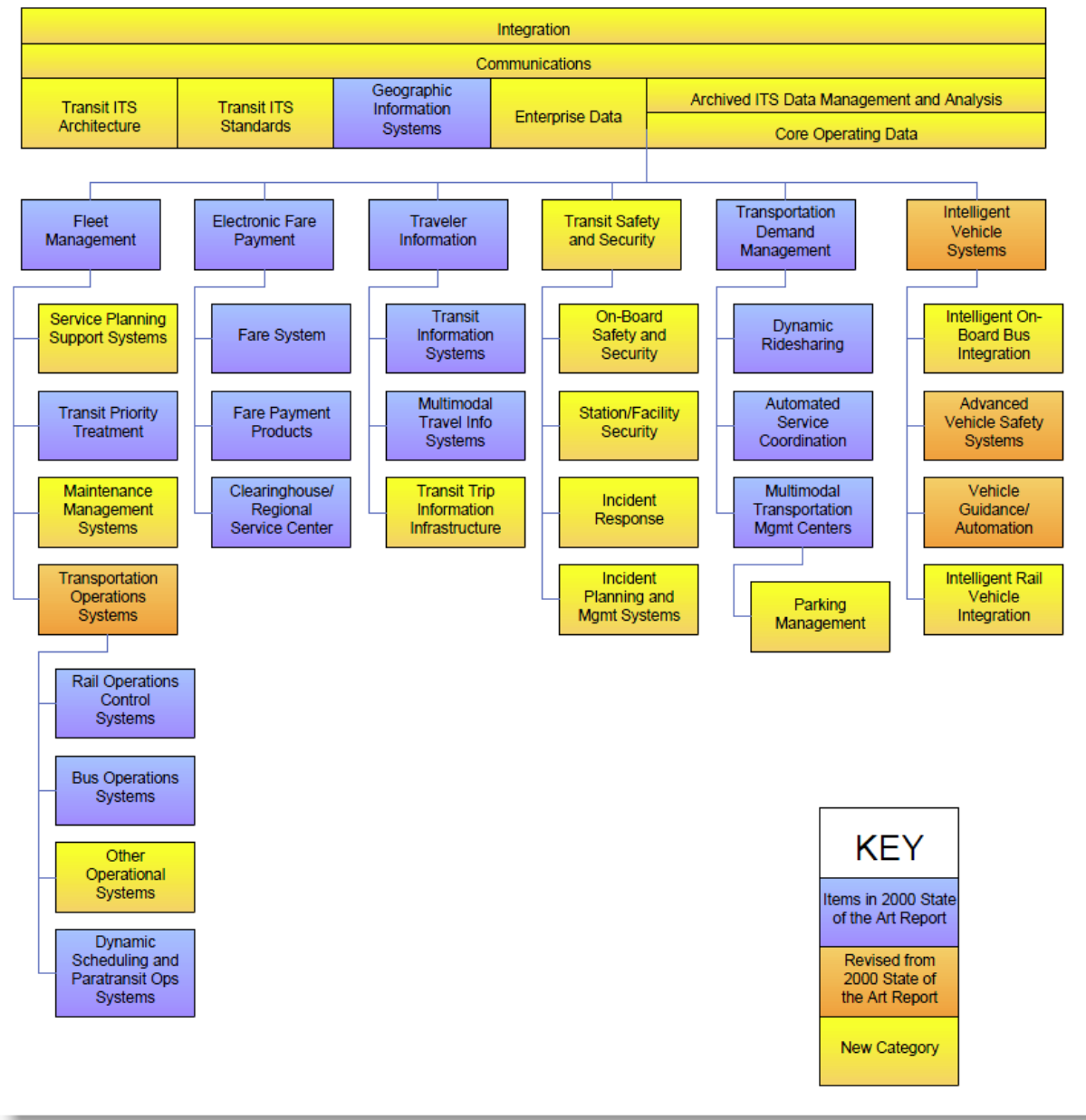


Fig. 1 Tipología de ITS - (Casey, 2006)

Los sistemas de información avanzados en el contexto de ITS como por ejemplo aquellos que proveen seguimiento automático de vehículos y contabilización de pasajeros, permiten a las empresas que gestionan las flotas, implementar estrategias de control dinámicas y proveer a los pasajeros con información. En la Fig. 2 se presentan aplicaciones concretas de cada categoría.

ITS Category	Specific ITS Applications
1. Advanced Traveler Information Systems (ATIS)	Real-time Traffic Information Provision Route Guidance/Navigation Systems Parking Information Roadside Weather Information Systems
2. Advanced Transportation Management Systems (ATMS)	Traffic Operations Centers (TOCs) Adaptive Traffic Signal Control Dynamic Message Signs (or “Variable” Message Signs) Ramp Metering
3. ITS-Enabled Transportation Pricing Systems	Electronic Toll Collection (ETC) Congestion Pricing/Electronic Road Pricing (ERP) Fee-Based Express (HOT) Lanes Vehicle-Miles Traveled (VMT) Usage Fees Variable Parking Fees
4. Advanced Public Transportation Systems (APTS)	Real-time Status Information for Public Transit System (e.g. Bus, Subway, Rail) Automatic Vehicle Location (AVL) Electronic Fare Payment (for example, Smart Cards)
5. Vehicle-to-Infrastructure Integration (VII) and Vehicle-to-Vehicle Integration (V2V)	Cooperative Intersection Collision Avoidance System (CICAS) Intelligent Speed Adaptation (ISA)

Fig. 2 Clasificación de ITS - (Ezell, 2010)

2.1.1 Aplicaciones

La aplicación de ITS en el transporte a nivel nacional implica múltiples beneficios los cuales a modo de simplificación se agrupan en cinco clases que se describen a continuación.

2.1.1.1 Seguridad vial (operadores, pasajeros, entorno)

Los ITS pueden colaborar con aspectos de la seguridad en el transporte. Anualmente en el mundo hay más de 1.2 millones de fatalidades únicamente considerando vías terrestres. En 2008, las estadísticas mostraron que solamente en los Estados Unidos ocurría un accidente de tráfico cada cinco segundos (totalizando más de 6 millones de accidentes), una fatalidad cada 13 minutos, más de 41.000 muertes y 2.6 millones de heridos (U.S. Department of Transportation, 2010). En la Unión Europea se tienen valores similares en cuanto a accidentes y fatalidades con un total de 42.942 muertes en carreteras en 2006 (Penwill-Cook, 2008). Mientras que en Japón se tuvieron 887.000 accidentes de tráfico en 2006, 1.1 millón de heridos y 6.300 fatalidades (MLIT, 2008).

Una amplia gama de aplicaciones basadas en ITS, desde sistemas de alertas de tráfico en tiempo real, sistemas cooperativos de prevención de coaliciones en intersecciones, sistemas de freno asistidos, sistemas de monitoreo de flujo, hasta sistemas de notificación de coaliciones, tienen principal foco en la seguridad. Por ejemplo, un estudio sobre la aplicación del monitoreo de flujo en rampas de acceso a las autopistas (*ramp metering*) en Minneapolis, Minnesota, demostró que su aplicación reducía la cantidad de choques en las vías entre un 15% a 50% (FHA, 2003). La propuesta estadounidense del sistema *IntelliDrive* podría potencialmente reducir un 82% de los

choques producidos por personas con algún tipo de discapacidad o deficiencia auditiva, visual o motriz (RITA, 2009).

De hecho, los sistemas de transporte están llevando a un replanteamiento fundamental en lo que concierne a la seguridad en ese campo. En los últimos 50 años la mayoría de desarrollos en seguridad de transporte, como la obligatoriedad del uso del cinturón y la instalación de *airbag* en los años '80, fueron diseñados para proteger a los pasajeros ante los choques. Pero como plantea Peter Appel (ex administrador para el Dpto. de Investigación de Transporte e Innovación Tecnológica de Estados Unidos), “*Todas esas tecnologías asumían que iba a haber un choque. De todos modos, mucho del trabajo a realizarse en los siguientes 50 años será de intentar de evitar los choques y es ahí donde sistemas que permitan anticiparlos, tendrán un impacto dramático*” (ITSRT, 2009).

2.1.1.2 Operativa de la red de transporte

Los ITS mejoran el desempeño de las redes de transporte maximizando la capacidad de la infraestructura existente y reduciendo la necesidad de ampliarla. Maximizar la capacidad es crucial ya que en la mayoría de los países, el incremento en kilometraje recorrido por los vehículos excede dramáticamente el incremento en la capacidad de las vías, incluso en muchos el espacio disponible para construir es reducido o nulo. Por ejemplo entre 1980 y 2006 en los Estados Unidos, el total de kilometraje recorrido por automóviles incrementó un 97% pero en el mismo período el total de carriles de autopista creció solamente un 4,4%, lo que implica que más del doble del tráfico estaba viajando esencialmente sobre vías de la misma capacidad (NTSTIFC, 2007).

Un conjunto de aplicaciones ITS contribuyen a mejorar el desempeño operacional de las redes de transporte. Por ejemplo, la optimización de los sistemas de señalización (ej. semáforos) puede mejorar el flujo de tráfico significativamente, reduciendo las paradas innecesarias hasta un 40%, disminuyendo el consumo de combustible en un 10% y emisiones en un 22%, además de un ahorro de 25% en el tiempo de viaje (Staley & Moore, 2013). La utilización de sistemas de tráfico en tiempo real podría mejorar la eficiencia de la señalización (ej. semáforos) en un 10%, ahorrando más de 3,96 millones de litros de combustible al día (en Estados Unidos) y reduciendo la emisión diaria de dióxido de carbono en unas 9.600 toneladas (Halsey, 2010). *Ramp metering* puede incrementar el *throughput* (cantidad de autos que pasan por la carretera) desde un 8% a un 22% e incrementar la velocidad en las carreteras de un 8% a un 60% (Staley & Moore, 2013).

En el Reino Unido hasta un 30% de la congestión en autopistas ocurre por peajes, la implantación de sistemas de cobro electrónico puede ayudarla a reducirla significativamente. La evaluación del impacto de ITS, incluyendo *ramp metering*, gestión de incidentes, coordinación de señalización, y gestión de acceso arterial, según un estudio de la GAO (*Government Accountability Office, UK*) en 2005, encontró que los ITS implantados habían reducido los retrasos en 85 áreas urbanas en un 9% (336 millones de horas), implicando una reducción anual de costos de consumo de combustible y tiempo de \$5,6 billones (USD) (USDOT, 2010).

Ciertamente la reducción de congestión en el tráfico es uno de los principales beneficios de los ITS. Estadísticamente los conductores estadounidenses pasan 5 días al año detenidos en el tráfico, un total de 4,2 billones de horas por año totalizando más de 10 billones de litros de combustible (RITA, 2009). Cuando se consideran los costos en materia de productividad, retraso de carga y seguridad, el Dpto. de Transporte concluye que la congestión en los peajes implica hasta 168 billones de dólares cada año (Staley et. al., 2013). Los costos de congestión se han venido incrementando en un 8% cada año. Lo que extrapolando implicaría que los siguientes 20 años, los costos podrían llegar a unos 890 billones de dólares.

En los países de la Unión Europea se experimentan 7500 kilómetros con embotellamientos cada día, un 10% de la red de carreteras de la Unión Europea se ve afectada con problemas de congestión (Thielman, 2008). De hecho 24% del tiempo de los conductores europeos transcurre con congestión (Castro, et al., 2008), con un costo anual de 1% de PBI de la región. Por otro lado, Australia sufre anualmente USD 12,5 billones en costos ocasionados por congestión urbana. En Japón la congestión de la nación implica unas 3,5 billones de horas hombre, casi USD 109 billones cada año (Penwill-Cook, 2008). La implantación de ITS ha mostrado tener un impacto significativo y directo en la reducción de congestión. En Corea del Sur se relevó que en las ciudades donde se implantaron estos sistemas, en promedio, la velocidad de tráfico de los vehículos incrementó en un 20% y el tiempo de demora disminuyó un 39%.

Los ITS también permiten que las entidades de transporte recopilen datos que les permiten medir y mejorar el desempeño de sus sistemas de transporte. Por ejemplo, la recopilación de datos antes y después de proyectos de ampliación de la infraestructura permite evaluar la efectividad en mejorar la congestión. En Japón por ejemplo, se utiliza este tipo de relevamiento para la creación de mapas tridimensionales como muestra la Fig. 3, que indican la pérdida de tiempo debido a problemas de congestión y tasas de accidentes fatales en secciones de sus autopistas principales. Estos sistemas pueden ser también considerandos como el núcleo para una reforma del transporte basándose en datos certeros.



Fig. 3 Mapa de la pérdida de tiempo ocasionada por congestión de tráfico en Japón (MLIT, 2008).

2.1.1.3 Movilidad y conveniencia

Los sistemas de ITS mejoran la movilidad de los conductores y pasajeros mediante la reducción de congestión y maximización de la eficiencia operacional de los sistemas de transporte. Como se ha descrito anteriormente, se provee a los conductores y usuarios de transporte masivo (ej.

ómnibus) con información en tiempo real que ayuda y mejora la selección de ruta y capacidades de navegación. De hecho, estas mejoras quizás son las más conocidas dentro del área, como aplicaciones telemáticas basadas en uso de satélites para facilitar la navegación dentro de los vehículos.

2.1.1.4 Medio ambiente

Los sistemas de transporte inteligente se posicionan para colaborar con los beneficios ambientales en material de reducción de congestión, proveyendo flujos de tráfico fluidos, haciendo uso eficiente de la infraestructura y buscando reducir la ampliación innecesaria de esta. El transporte es la mayor causal de emisiones de gas de efecto invernadero. Por ejemplo, en Inglaterra, el sector de transporte contribuye con un cuarto de la emisión nacional de CO₂, 93% proveniente del transporte por carretera (UKPOST, 2009) y en general el transporte conlleva al 25% de las emisiones de gas invernadero.

La congestión del tráfico causa una emisión excesiva de CO₂. Vehículos viajando a unos 60km/h emiten 40% menos de carbón que vehículos viajando a 20km/h, y vehículos viajando a 40km/h emiten 20% menos que los últimos (MLIT, 2008). Un estudio reveló que la computarización de operaciones de 40 señales de tráfico en el norte del estado de Virginia, en la comunidad de *Tysons Corner* precisamente, decrementa las emisiones anuales de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y oxígeno volátil en 135000 kilos, siendo una mejora del consumo de combustible en 9% (GAO, 2009). Para 2010 Japón apostó a reducir sus emisiones de CO₂ en 31 millones de toneladas por debajo de sus niveles en 2001, con 9 millones de toneladas provenientes del uso de vehículos de consumo más eficiente, 11 millones de toneladas provenientes de la mejora del flujo de tráfico y los restantes 11 millones de toneladas gracias al uso eficiente de los vehículos, siendo estos últimos beneficios directos de la inversión del país en ITS - Kenzo Hiroki, Director for Infrastructure and Exploration, Cabinet Office, Japan, (UNESCAP, 2009).

Eco-drive es una aplicación (<http://www.ecodrive.org>) ITS que busca optimizar el comportamiento de los conductores en virtud de los beneficios ambientales. Los vehículos equipados con esta tecnología, proveen a los conductores de información sobre cómo operar su vehículo de manera que el consumo de combustible sea el más eficiente posible en distintas situaciones. Algunas versiones más sofisticadas dan instrucciones visuales u orales de la presión con la que se debe pisar el acelerador. Incluso en países como Japón, Alemania y Estados Unidos, muchos entusiastas suben sus registros a sitios en internet donde compite para ver quién es el conductor más eficiente.

Si bien los sistemas de transporte inteligentes buscan contribuir a disminuir la congestión y mejorar el flujo de tráfico minimizando la contaminación, estos prueban tener un impacto considerable en el medio ambiente. Ver Apéndice A, donde se presentan los principales gases compuestos de la emisión de gases relacionados a medios de transporte y su efecto en el medio ambiente.

2.1.1.5 Productividad, Economía y Trabajo

Los sistemas de transporte inteligentes impulsan la productividad, expanden la economía e incrementan el empleo (Ezell, 2010). Mediante la mejora de desempeño en el sistema de transporte de un país mediante la seguridad y precisión de transporte de personas y productos a sus destinos en tiempo y forma, y de manera eficiente, se mejora la productividad tanto de los trabajadores y empresas implicando una mejora de la competitividad a nivel nacional. Muchas empresas y estados ya se encuentran utilizando distintos tipos de ITS efectivamente para reducir sus costos, implicando en países como Estados Unidos un impacto anual en la economía de \$200 billones de dólares.

Los ITS también ayudan a mitigar un gasto de \$230 billones de dólares anuales en la economía estadounidense (equivalente al 2,3% del PBI) en materia de accidentes de tráfico y lesiones o vidas. En el Reino Unido también existen estudios que estiman que los efectos de la congestión se ven reflejados en los precios del transporte de carga (Commission, 2011). Un conjunto de países entre ellos: Corea del Sur, Alemania y Japón, ven a los ITS como un sector industrial clave, capaz de generar crecimiento económico en materia de exportación y empleo (Kim, 2003). Por otro lado, el Departamento de Transporte de los Estados Unidos ha estimado que el campo de ITS podría generar hasta 600.000 nuevos empleos en los siguientes 20 años (Belcher, 2009).

En definitiva, las naciones que lideran la implantación de ITS son más que posibles líderes internacionales para la creación de trabajos de esta industria para impulsar el impacto en las exportaciones y sacar ventaja en la competitividad.

2.2 Categorización de Sistemas de Transporte Inteligente

Los sistemas de transporte inteligente han ido incrementando notablemente su complejidad con la incorporación de múltiples modos, servicios, información, tecnologías de comunicación y estrategias operativas. En esta Sección se describen las principales categorías por las cuales se clasifican la mayoría de estos sistemas. La Fig. 4 muestra ilustraciones de distintas aplicaciones de sistemas de transporte inteligente incluyendo otros medios (ej. aéreo) a modo de referencia, además del transporte terrestre de pasajeros sobre el cual se enfocará el trabajo.

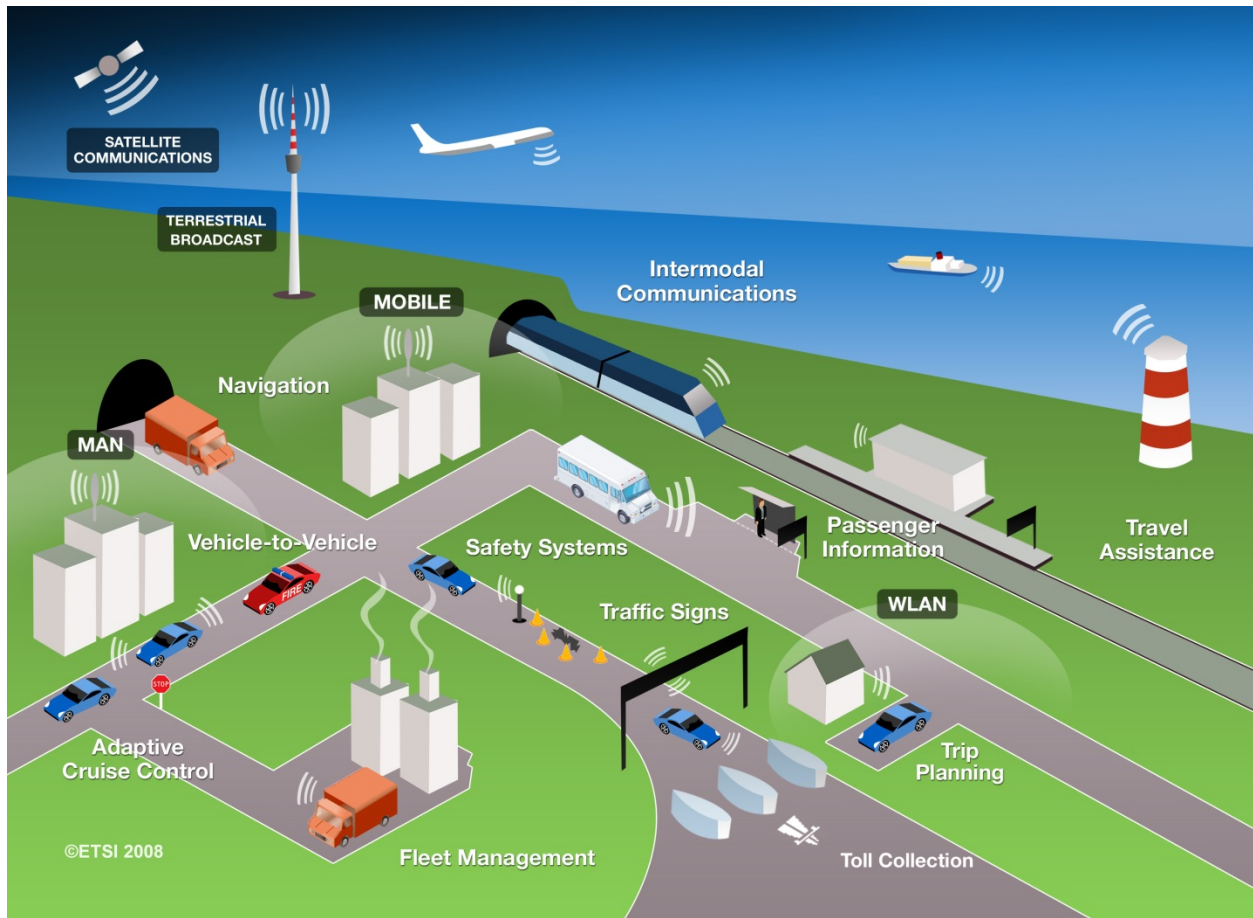


Fig. 4 Sistemas de Información en el Transporte (ETSI, 2008)

2.2.1 Etapas de Transporte

Desde el punto de vista de los pasajeros se puede decir que uno de los factores más influyentes en la calidad del sistema de transporte inteligente se basa en la correcta diseminación de información. El objetivo de este será que los pasajeros puedan hacer uso del sistema de manera práctica, pudiendo recibir información actualizada y certera en cualquiera de las etapas de su viaje. Desde la perspectiva de pasajeros todo viaje puede ser particionado en tres etapas: *pre-trip*, *en-route*, *in-vehicle*. A continuación se presenta una breve descripción de las mismas.

2.2.1.1 Pre-Trip

Esta etapa comprende toda la información recibida por un pasajero previo a embarcarse en su viaje. Anteriormente esta etapa ha sido confundida con la búsqueda o consulta particularmente del arribo del vehículo, luego se la asoció a la consulta periódica de un servicio que indique los detalles de su estado actual. Actualmente, la información es continuamente actualizada para reflejar el estado y condiciones actuales de los servicios de transporte pudiendo ser desplegada en una cantidad considerable de dispositivos y formas. Esta etapa juega un rol fundamental en el proceso ya que influye directamente en la toma de decisiones del pasajero. Muchos pasajeros planean viajes puerta a puerta (*door-to-door*) utilizando más de un servicio de transporte, por lo

que si la información utilizada en esta etapa no es precisa, los pasajeros requerirán revisar su itinerario constantemente (Casey, 2006).

2.2.1.2 In-Route

Una vez que el pasajero parte hacia su destino, resulta de gran importancia poder mantenerlo informado con el estado actual del tránsito, principalmente por los problemas que enfrentan los vehículos para respetar y cumplir con sus horarios. El flujo constante de información actualizada y certera permite reducir la ansiedad de los pasajeros para subirse a un vehículo determinado o cambiar por uno nuevo. Asimismo permite que pasajeros que desafortunadamente no hayan podido subirse al vehículo deseado puedan ubicarse y direccionarse mejor. La información provista en esta etapa podría incluir tiempos de arribo y partida estimados así como demoras en los servicios, resultando de vital importancia que la misma sea actualizada frecuentemente para que realmente tenga valor para el pasajero.

En esta etapa es donde resulta más difícil poder conectar el sistema con el pasajero. Si bien las tecnologías emergentes como la móvil, han facilitado la comunicación de información, aún se está lejos de poder prescindir de la cartelería existente en las propias vías, ya sean carteles, pantallas o sonido (*Dynamic and Variable Message Signs – DMS, VMS*), particularmente en casos donde los pasajeros no disponen de conectividad.

2.2.1.3 In-Vehicle

Esta etapa refiere al período en que el pasajero se encuentra en tránsito en el vehículo. Durante este período resulta de vital importancia ayudar a los pasajeros a reafirmar que se encuentran en el vehículo correcto y ayudarlos a planear sus transferencias. Dependiendo del tipo de tránsito o contexto, la conectividad a redes inalámbricas puede ser limitada por lo que en muchos casos resultan de utilidad los dispositivos de notificación en el propio vehículo como los sistemas de anuncios LED.

2.2.2 Advanced Transportation Management Systems (ATMS)

Los sistemas de gestión avanzada del transporte (ATMS) incluyen aplicaciones ITS que se focalizan en dispositivos de control de tráfico como control de señales o mensajes variables que buscan proveer a los conductores con información en tiempo real de problemas o estado de las vías. Los centros de operación de tráfico o centro de gestión del tráfico de ciudades, departamentos o estados en el mundo, utilizan tecnología para la conexión de sensores, cámaras, señales, cartelería y otros dispositivos que juntos buscan proveer una vista integrada del flujo de transporte y detección y anticipación de accidentes.

Los sistemas de señalización adaptativos refieren a sistemas inteligentes y posiblemente auto-gestionados dinámicamente para mejorar el *timing*² de la señalización. En muchos países los sistemas de señalización de tráfico todavía utilizan planes estáticos de *timing* basados en datos

² *Timing* – Término utilizado para referir al momento en que algo ocurre o está planeado que ocurra, también puede referir al lapso de tiempo en que algo transcurre.

obtenidos décadas atrás (Castro, et al., 2008). De hecho, en 2007 se estimaba que entre un 5% y 10% de la congestión causada en rutas de Estados Unidos (lo que implica 295 millones de vehículos por hora) es atribuido al mal *timing* de las señales (NTOC, 2007). Darle al sistema de señalización la habilidad de detectar la presencia de vehículos en espera, o la posibilidad de comunicar esa información, podría permitir mejoras en tiempos de detención innecesarios, favoreciendo el flujo y así reduciendo la congestión. Otros sistemas de gestión avanzada del transporte que probaron tener un beneficio significativo son los conocidos como *ramp metering*³, que ayudan a reducir la congestión gestionando el proceso de entrada a las autopistas.

2.2.3 Transportation Pricing Systems

Los sistemas de transporte inteligente cumplen un rol fundamental en el financiamiento de los sistemas de transporte. Una de las modalidades más comunes es el sistema de peaje electrónico (*Electronic Toll Collection* - ETC), en donde los conductores pagan los peajes automáticamente mediante un sistema de reconocimiento de placas situados en puestos determinados. En los países como Australia o Japón se han unificado los sistemas de identificación de los vehículos de manera de utilizar un único dispositivo para viajar a través de múltiples operadores de distintas compañías. Este problema de estandarización de la identificación de los vehículos es uno de los principales problemas en la Unión Europea debido a sus distancias y heterogeneidad sobre los que se encuentra trabajando el comité de estandarización.

Cada vez más ciudades a lo largo del mundo, como por ejemplo Singapur, Estocolmo, Londres y Oslo, implementan sistemas de cobro para controlar la congestión cobrando por la entrada a centros urbanos durante horas picos por ejemplo. Este tipo de políticas no solo ayudan a reducir la congestión sino que también colaboran con la generación de recursos para financiar inversiones. Considerando que aproximadamente la mitad de la población del mundo vive en áreas urbanas, algunos economistas creen que la congestión y emisiones urbanas son virtualmente imposibles de reducir sin algún tipo de control por cobro.

Otra modalidad que ha resultado efectiva y motivacional para la reducción de la congestión son los denominados carriles de alta ocupación o *High Occupancy Toll Lanes (HOT lanes)*, los cuales son reservados para ómnibus u otros vehículos de alta densidad. En algunos casos estos pueden opcionalmente ponerse a disposición de vehículos particulares, mediante el cobro de algún peaje con el objetivo de mantener un flujo de tráfico disponible y rápido en todo momento.

Existen otras iniciativas o alternativas evaluadas por algunos países que se basan en el cobro por distancia recorrida de manera de realizar una repartición dependiente del uso, a estos sistemas de cobro se les denomina VMT (*Vehicle Miles Traveled Fee Systems*). La idea es que el cobro por distancia recorrida sea la base de los impuestos cobrados por el consumo de combustible y uso

³ *Ramp Metering* – Refiere a la utilización de señales de tráfico para gestionar el flujo principalmente en los empalmes de autopistas o rutas principales donde la entrada durante periodos de alto tráfico puede ocasionar congestión.

de infraestructura. En Holanda existe el programa “*Kilometerprijs*” (precio por kilómetro) que intenta establecer este tipo de tarifado tanto para vehículos de pasajeros como de carga. El objetivo del programa es reemplazar los costos de impuestos fijos por tenencia de vehículos por otros basados en las distancias recorridas, diferenciadas por tiempo, lugar y características del entorno. La iniciativa plantea implantarse en el 2016 para sistemas de pasajeros y utilizar tecnología satelital integrada con sistemas a bordo de los vehículos de manera de realizar seguimiento de los recorridos.

2.2.4 Advanced Traveler Information Systems (ATIS)

Los sistemas avanzados de información al viajero son quizás los más reconocibles por los usuarios dentro de las aplicaciones de ITS. Estos proveen información a los conductores en tiempo real ya sea de su viaje o tráfico, como por ejemplo: direcciones, congestión, accidentes, condiciones climáticas, etc. Los sistemas más efectivos son capaces de informar al conductor en tiempo real con información precisa basada en su posición con márgenes de errores mínimos y activamente como por ejemplo recalculando rutas óptimas e instrucciones de navegación. Estos sistemas se basan en tres facetas fundamentales que son: la recopilación de datos, su procesamiento y disseminación (tanto personal como masiva). En cada una existen un conjunto de tecnologías y plataformas distintas tanto en los sectores públicos y privados que han ido evolucionando considerablemente a lo largo del tiempo permitiendo la baja de costos y acceso masivo por parte de los ciudadanos, los sistemas de posicionamiento global (*Global Positioning Systems - GPS*) son un excelente ejemplo de esto.

Otro ejemplo de sistemas de este tipo que no se basan en rutas principalmente puede ser encontrado en ciudades como Singapur o San Francisco para colaborar con la gestión de estacionamiento. En muchos lugares de la ciudad se instalan dispositivos que indican a los conductores la cantidad o disponibilidad para estacionar de manera de evitar la circulación innecesaria. Estos sistemas se basan en estudios que han demostrado que hasta un 30% del tráfico en zonas de alta densidad en ciudades se debe a conductores buscando estacionamiento.

2.2.5 Advanced Public Transportation Systems (APTS)

Los sistemas de transporte público avanzados incluyen aplicaciones como las de posicionamiento automático de los vehículos que permite a cualquier vehículo ya sean autos, trenes u ómnibus, reporta su posición actual haciendo posible gestionar operaciones de tráfico con una vista en tiempo real. Los APTS ayudan en general a transformar al transporte público en una opción más atractiva y eficiente dándoles a los usuarios información precisa del tiempo de salida y arribo de los ómnibus o trenes. En esta categoría también se incluyen los sistemas de pago automatizado, donde mediante tarjetas inteligentes se realizan los débitos correspondientes. Este tipo de funcionalidades de informar el siguiente ómnibus o tren arribando con un tiempo estimado, han sido adoptadas considerablemente en todo el mundo.

2.3 Motivación

Existen un conjunto de factores que han sido identificados como conductores o claves en la evolución de la tecnología aplicada en transporte. No solamente para la creación de ITS sino que también muchas industrias y áreas circundantes, parcial o directamente asociadas a la temática, encuentran objetivos comunes que impulsan sus esfuerzos. Quizás el ejemplo más fácil de asimilar es la necesidad de mejora en la industria automotriz en la creación de vehículos más amigables con el medio ambiente. En esta Sección se presentan los factores más relevantes para fundamentar la propuesta práctica de este trabajo.

2.3.1 Evolución en Tecnología Móvil

La proliferación de nuevos dispositivos y tecnologías móviles permiten a los distintos actores del sistema de transporte, acceder a información en tiempo real, lo que en gran parte impulsa la demanda de los ITS incluyendo especialmente a los sistemas vinculados al transporte público (*Intelligent Public Transportation Systems*). La utilización de celulares inteligentes *SmartPhone*⁴ que básicamente combinan la telecomunicación con las capacidades de una computadora, ha crecido considerablemente en los últimos años como muestra la Fig. 5, permitiendo que los usuarios accedan a mayor cantidad de información de manera más rápida y robusta, convirtiendo a celulares o tabletas con acceso a redes 3G⁵-4G en el medio de diseminación predilecto para los pasajeros. Esto ataca una de las mayores dificultades que enfrentan los sistemas de transporte de pasajeros resultando complejo notificar a sus usuarios sobre cambios en el servicio cuando se encuentran en etapas previas o incluso en ruta de sus viajes. Justamente los sistemas de seguimiento o monitoreo de transporte fueron unos de los más beneficiados por el crecimiento de este tipo de dispositivos (FTA, 2002).

4 *SmartPhone* - Un **teléfono inteligente** (*smartphone* en inglés) es un teléfono móvil construido sobre una plataforma informática móvil, con una mayor capacidad de almacenar datos y realizar actividades semejantes a una minicomputadora y conectividad que un teléfono móvil convencional. El término «inteligente» hace referencia a la capacidad de usarse como una computadora de bolsillo, llegando incluso a reemplazar a un ordenador personal en algunos casos.

5 3G/4G es la abreviación de tercera y cuarta generación de transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil mediante UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) o servicio universal de telecomunicaciones móviles).

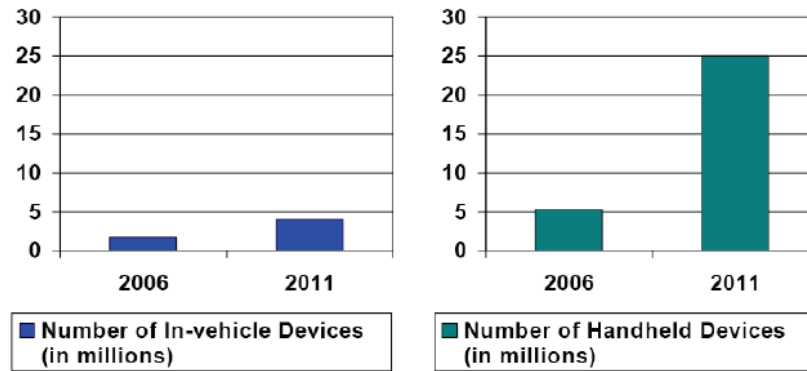


Fig. 5 Incremento de Dispositivos Inalámbricos – *International Consumer Electronic, 2011*

2.3.2 Infraestructura

Si bien los sistemas de transporte inteligente existen hace ya algún tiempo, la adopción de estos por la agencias o empresas ha sido lenta. La inversión en infraestructura relacionada a vías, flota o personal han tenido mayor peso que el foco de buscar implementar ITS con los recursos existentes. Los últimos avances tecnológicos en material de posibilidades de seguimiento han hecho más visible los beneficios de la inversión en esta área donde muchas empresas o estados han comenzado a apostar de manera de lidiar con las limitaciones naturales de escalar los recursos de infraestructura.

2.3.3 Mantenibilidad

La década pasada ha mostrado el surgimiento de nuevos ideales en materia de transporte. Se esperan cambios paradigmáticos en la forma de diseño y planeamiento del transporte. La sustentabilidad del transporte es un tema que comenzará a resonar aún más en los siguientes años y en donde los IPTS podrán quedar bien posicionados por su aporte buscando resolver el problema esencial de esta realidad: mover mayor cantidad de gente con la misma o menor cantidad de recursos (vehículos, personal, combustible). Esta visión o preocupación ya ha comenzado a aparecer en titulares de revistas como *GPS for Today*⁶: “*The only way we are going to get away from energy inefficient modes of transportation is by providing superior alternatives*”, que indica que la única manera de escaparse de medios de transporte ineficiente energéticamente es proveyendo alternativas mejores, lo que considerando el contexto refiere a convertir el transporte masivo o público en una mejor opción que manejar un vehículo personal.

2.3.4 Áreas de Acción

Las principales áreas y factores de interés (Rupprecht, 2012) para las múltiples entidades involucradas en la implementación de ITS involucran distintos aspectos que varían desde optimización de recursos hasta objetivos con fines de inclusión, accesibilidad o sociales. De

⁶ *GPS for Today* – Revista dedicada a la publicación y distribución de novedades y noticias relacionadas a la aplicación de esta tecnología - <http://www.gpsfortoday.com/>

todos modos, de la mayoría de los planes o propuestas que giran en torno a brindar soluciones, se identifican un conjunto de acciones que buscan organizar los distintos factores y actividades principales a tener en cuenta para su planeamiento y creación. La Fig. 6 muestra una propuesta para el ciclo de planeamiento de sistemas de movilidad urbana sustentable.



Fig. 6 Ciclo de planeamiento para sistemas de movilidad urbana sustentable - Sustainable Urban Mobility Plans (Ruppert, 2012).

2.3.4.1 Uso óptimo de infraestructura

Muchas de las aplicaciones de transporte inteligente se basan en el conocimiento certero de las rutas y tráfico, como por ejemplo el direccionamiento de estas, límites de velocidad, etc. En el pasado esta información era provista por las autoridades, pero hoy en día las fuentes comerciales han ido incrementando su importancia. La información relevante debería de ser validada y encontrarse disponible para todos los participantes de modo de poder proveer un soporte más seguro y eficiente de la gestión del tráfico. Esto concierne no solo al mapeo digital o la provisión

de información del tráfico o viajes en tiempo real, sino que el uso óptimo de estos datos facilita el planeamiento de viajes multimodales.

2.3.4.2 Continuidad del tráfico y servicios de gestión de transporte

La necesidad de gestionar los volúmenes crecientes de tráfico, particularmente en corredores y conos urbanos, sosteniendo una política ambiental de sustentabilidad y eficiencia energética, requiere soluciones innovadoras en materia de transporte y gestión. Los sistemas de gestión permiten la optimización del uso tanto en transporte de larga y corta distancia como de pasajeros o carga.

2.3.4.3 Seguridad vial

Las aplicaciones de ITS con foco en la seguridad han probado su efectividad, pero el impacto del beneficio a la sociedad depende de un aplicación lo más amplia posible. Al mismo tiempo, esta área requiere medidas de atención en otros aspectos como diseños seguros de vehículos e infraestructura. El principal desafío en esta área es quizás que la seguridad sea incrementada en su máxima potencia sin comprometer la eficiencia de todo el sistema en sí.

2.3.4.4 Seguridad de la información

La manipulación de datos, particularmente personales y financieros en las aplicaciones de ITS plantean un conjunto importante de desafíos especialmente en los últimos tiempos comenzándose a legislar los derechos de los ciudadanos sobre sus datos digitales. Tanto la integridad y confidencialidad deben estar aseguradas para todos los actores involucrados, siendo una de las principales barreras que deben vencer los ITS para su correcta adopción.

2.3.4.5 Integración multimodal

La correcta adecuación e integración de aplicaciones de ITS con un diseño de sistema abierto, puede colaborar considerablemente con la eficiencia y usabilidad, reducir los costos y habilitar una integración del tipo “plug and play” para otras aplicaciones. La promoción de una arquitectura abierta fomenta la interoperabilidad e interconexión entre distintas plataformas e infraestructura, promoviendo sistemas cooperativos para el intercambio de comunicación.

2.4 Tecnología

La creciente evolución de la tecnología móvil junto con el abaratamiento de sus dispositivos, ha permitido mayor inclusión en su uso, siendo cada vez más requerido y variado su uso por la población. Poseer dispositivos con capacidades computacionales y conexión remota aplica idealmente en el contexto del transporte donde las limitantes de portabilidad y comunicación históricamente habían representado una limitante. En esta Sección se presenta brevemente uno de los aspectos principales sobre los que se basa este trabajo el cual fundamente su propuesta en una tecnología emergente y de uso masivo como son los dispositivos o teléfonos móviles.

2.4.1 Dispositivos Móviles

Las tecnologías móviles tienen mucho tiempo entre nosotros simplificando nuestras actividades cotidianas, facilitando nuestros trabajos, estudios o vida normal con sus innumerables aplicaciones disponibles que se han ido incrementando con el tiempo.

Actualmente, las tecnologías móviles han cubierto la mayoría de las áreas de servicio de comunicaciones y entretenimiento, enfocando sus aplicaciones a generar un mercado específico para estas, a los miles de usuarios que día a día adoptan el uso de servicios, tal como lo es, telefonía móvil, envío de mensajes de texto y multimedia; y en los últimos años la actualización de la información de las redes sociales.

Accesibilidad

La Fig. 7 muestra una de las tantas gráficas que reflejan el crecimiento de la accesibilidad de los dispositivos móviles en la sociedad. La popularización de esta tecnología ha permitido ampliar la accesibilidad y uso de los sistemas de información por parte de la ciudadanía, particularmente para los sistemas de transporte donde la portabilidad de estos dispositivos resulta sumamente útil.

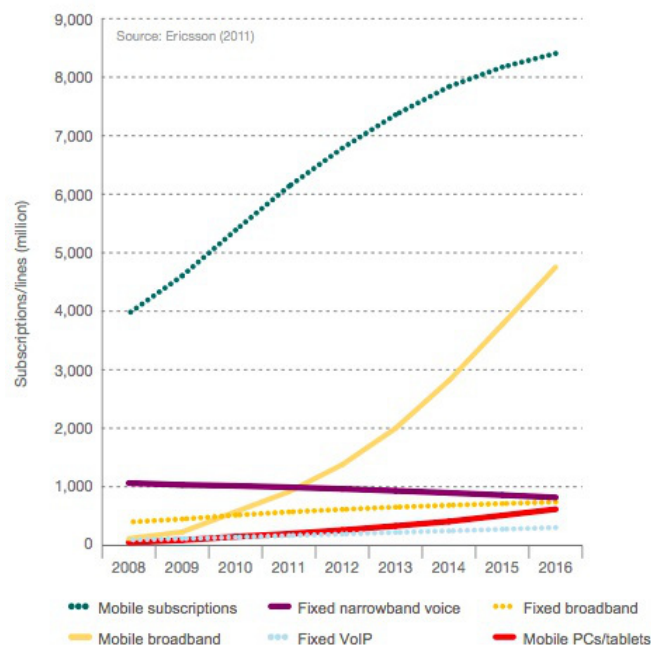


Fig. 7 Predicción de Suscripciones a Servicios móviles (GIGAOM, 2011)

Interfaz e Interacción

Las interfaces de los dispositivos móviles han ido mejorando y simplificándose a medida que estas evolucionan. La posibilidad de contar con dispositivos que responden al tacto ha reducido la brecha entre el uso y la capacitación para operarlo. La Fig. 8 muestra algunos ejemplos de interfaces de aplicaciones móviles relacionadas al transporte donde usualmente se incluyen vistas gráficas de mapas para facilitar el posicionamiento de orígenes y destinos.

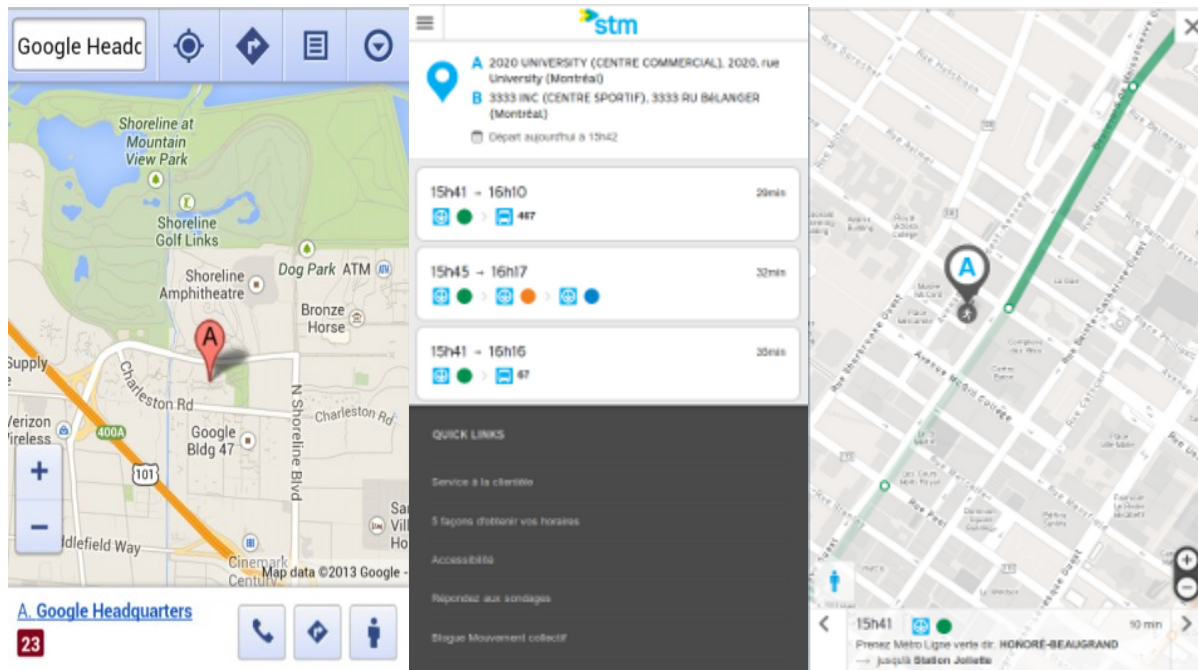


Fig. 8 Ejemplo de Interfaz Mobile de Google Maps y STM

Servicios de Posicionamiento en Dispositivos Móviles

La incorporación de sistemas de posicionamiento global en dispositivos móviles es una de las cualidades más comunes en los últimos tiempos. En general el costo de incorporación o uso de estos es despreciable en estos dispositivos, lo que permite la geolocalización mediante la recepción de señales de satélite como se verá en más detalle en la siguiente sección.

2.4.2 Tecnologías de Posicionamiento Geográfico

Los sistemas de localización automática de vehículos (*Automatic Vehicle Location - AVL*) son quienes se encargan de informar a quien corresponda, usualmente una central, sobre el posicionamiento actual de un vehículo. Esta información podrá ser utilizada para el seguimiento de posición o como insumo de algoritmos más complejos, como por ejemplo la estimación de arribos y partidas u optimización de recorridos.

2.4.2.1 Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)

El GPS es uno de los mecanismos más recientes y populares dentro de los sistemas AVL, principalmente preferido por las empresas de transporte. Esta tecnología se basa en la constelación de satélites existente alrededor del planeta, a quienes se emiten señales permitiendo calcular la posición “exacta” en cualquier momento. Su precisión ha mostrado ser notable en los últimos tiempos, principalmente cuando existe una amplia cobertura de satélites que permiten cruzar información de posicionamiento y así determinarla con mayor precisión. Actualmente si

un dispositivo se encuentra en el rango de cobertura de al menos tres satélites de GPS, la precisión puede llegar a márgenes de error de un metro lo cual resulta más que suficiente para sistemas de transporte.

El hecho que existan proveedores públicos de calidad, como emisores de señal GPS, implica que el único costo para las agencias es el de adquirir dispositivos GPS y el equipamiento necesario para recopilar la información. Por otro lado, esta tecnología sufre ciertas limitantes, como por ejemplo la dificultad de posicionar cuando existen edificaciones de gran tamaño, túneles o incluso un denso follaje, todos estos dificultan la posibilidad de detección de la señal del satélite impidiendo obtener el posicionamiento correcto. Para contrarrestar esto, se puede utilizar el GPS junto con algún otro sistema AVL ((CCIT, 2010)CCIT, 2010).

2.4.2.2 *Signpost & Odometers*

Este sistema de localización se basa en la contabilización de *odómetros*⁷ para estimar la localización del tránsito de vehículos. Cada vehículo en el sistema es equipado con un dispositivo capaz de transmitir la lectura actual del odómetro a una central. Utilizando esta lectura y considerando la ruta determinada para un vehículo puede estimarse su posición y retroalimentarse de sucesivas lecturas. Las emisiones de radio generadas por los vehículos pueden ser recibidas por puntos de chequeo (*signpost*) distribuidos dentro del área sobre las cuales se encuentran las rutas, lo que permite sincronizar la posición de los vehículos, ya que los odómetros tienden a sobrestimar las distancias recorridas. El objetivo de los sistemas de *signpost* es identificar el puesto más cercano a un dispositivo, lo cual puede ser inferido mediante la potencia de la señal recibida entre los distintos puestos. Las variaciones de espacio y tiempo causadas por el entorno hacen que este mecanismo tenga que enfrentar desafíos de certeza en comparación con el ideal de un espacio de libre propagación. Para mitigar esto se han desarrollado técnicas de análisis y estimación, que junto con la actualización constante de la posición, permiten la auto corrección de las estimaciones que han probado tener una relevancia fundamental en la confiabilidad de las posiciones estimadas.

La gran desventaja de estos sistemas dentro de los AVL es la frecuencia en la que la información es actualizada, donde típicamente se manejan rangos entre 30 segundos y 5 minutos, siendo de vital importancia que sea lo menor posible. Otra consideración de estos sistemas es la necesidad de inversión en infraestructura y mantenimiento tanto de transmisores como puestos, principalmente cuando se desean agregar nuevas rutas.

2.4.2.3 *Radio Navigation & Location*

La navegación por radio dentro de los sistemas AVL tiende a ser utilizada en combinación con otros sistemas ya que existen muchas fuentes de interferencia asociadas. Estos sistemas se basan en el uso de radio triangulación para el posicionamiento de vehículos con la consideración de

⁷ **Odómetro** - (del griego ὁδός *hodós* "camino" y μέτρον *métron* "medida") es un instrumento de medición que calcula la distancia total o parcial recorrida por un cuerpo (generalmente por un vehículo) en la unidad de longitud en la cual ha sido configurado (metros, millas).

que las propias radio transmisiones, fenómenos atmosféricos e incluso sobre carga en campos eléctricos pueden afectar la precisión. La principal ventaja es que es una tecnología probada y no limitada a una ruta.

2.4.2.4 *Dead-Reckoning*

Los sistemas de *Dead-Reckoning* (puesta a punto) son de los más antiguos y primitivos dentro de los AVL. Estos sistemas determinan la posición del vehículo en base a un odómetro y un compás. Estos trabajan mediante el cálculo de la distancia recorrida desde una posición conocida (usualmente una parada dentro de una ruta) y la dirección en la cual se viajó. Aunque estos sistemas son relativamente baratos, sufren importantes problemas de precisión ante superficies irregulares como montañas por lo que son utilizados más como complemento de otro sistema AVL en lugar de autónomo (*standalone*).

2.4.2.5 *Dedicated-Short Range Communications (DSRC)*

Esta tecnología consta de la utilización de redes inalámbricas de corto y mediano rango usualmente operando entre los 5.8 o 5.9 GHz específicamente diseñadas para el uso en transporte, siendo un subconjunto de sistemas de identificación por radio frecuencia RFID⁸. Los DSRC pueden ser habilitados como redes bidireccionales entre los vehículos y equipamiento disponible en la rutas (RSE - *road-side equipment*) del estilo *signpost*. Este tipo de tecnología fue clave en el desarrollo de muchos ITS incluyendo sistemas de integración vehículo-infraestructura, cobro electrónico, temporización y señalización del tráfico, control de congestión, entre otros. Actualmente los sistemas de DSRC en Europa, Japón y Estados Unidos, principales precursores, no son compatibles debido al uso de distintos canales aunque existen iniciativas para intentar promover la interoperabilidad e integración tecnologías de uso privado (propietario). La Fig. 9 ilustra varios ejemplos de estas tecnologías aplicadas a sistemas de tráfico en tiempo real.

⁸ RFID – (*Radio Frequency Identification*) La identificación por radiofrecuencia, es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remotos que usa dispositivos del tipo etiquetas, tarjetas, transpondedores, etc. El propósito fundamental de esta tecnología es transmitir la identidad de un objeto mediante ondas de radio.

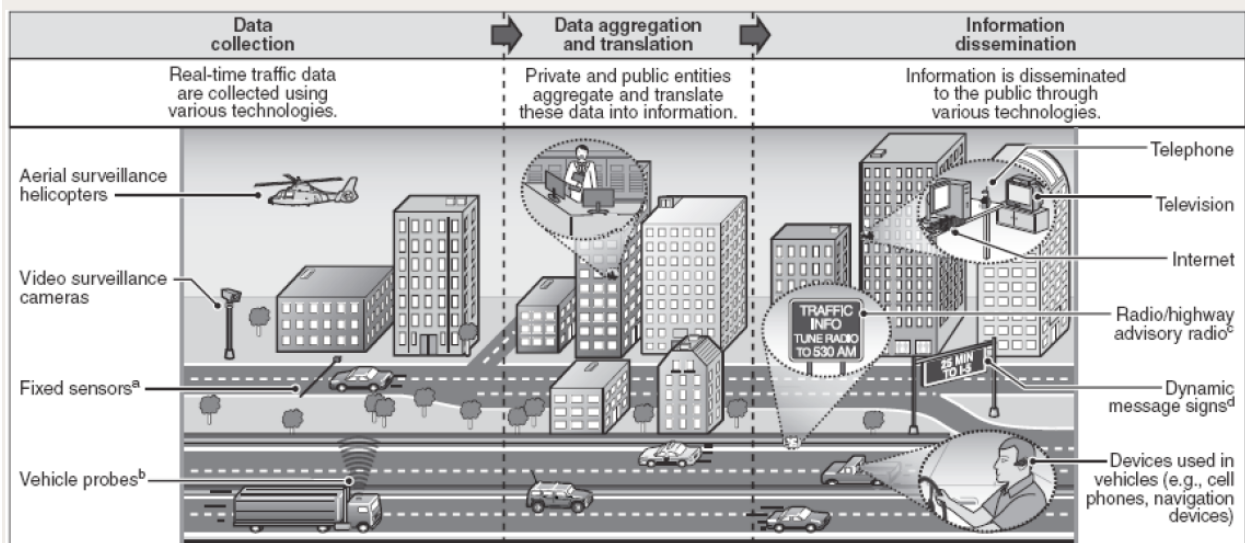


Fig. 9 Ejemplo de Tecnologías Asociadas a Sistemas de Tráfico en Tiempo Real (GAO, 2009)

Es claro que la utilización de tecnologías motivadas por los avances en hardware, software y comunicaciones han impulsado considerablemente al transporte y particularmente al de pasajeros, permitiendo rediseñar nuestras redes de transporte y modalidades, no solo para el transporte público sino también para privados o particulares, como el caso de estudio que se presenta en el Capítulo 3.

3. Sistemas para Viajes Compartidos – *Ridesharing*

En este Capítulo se presentarán los sistemas de viajes compartidos (*ridesharing*), sus objetivos y modalidades de operación, así como los distintos actores que intervienen en este tipo de sistemas. Los conceptos aquí expuestos enmarcan a la propuesta práctica de este trabajo donde se propone la implementación de un servicio de este tipo.

La práctica de compartir vehículos privados (*carpooling*) entre personas con viajes comunes (*ridesharing*) han existido desde la mismísima creación del vehículo. La idea resulta natural partiendo de la base que un vehículo privado es un recurso de alto costo operado por una persona, que posee la capacidad de transportar más pasajeros con costos marginales muy bajos por pasajero adicional. Su práctica y estudios formales tuvieron su auge en los años setenta ante la crisis de petróleo (Merrill, 2007), donde el suministro de crudo se vio afectado impactando directamente los costos de combustible y la práctica era promovida por el estado quien incluso desplegaba cartelería a modo de incentivo como muestra la Fig. 10.



Fig. 10 – Señal de incentivo para compartir vehículos en el norte de Vancouver, Washington (1974)

A grandes rasgos, esta práctica reporta beneficios directos a sus participantes así como al transporte en general. Si bien existen distintas maneras de cuantificar los beneficios de esta actividad, se podría generalizar en la repartición de costos de un viaje entre sus participantes, lo que implica para cada uno de ellos poder transportarse por menos costo. Tanto conductor como pasajeros se ven beneficiados por el uso más eficiente de la capacidad de transporte de un vehículo particular que realiza un viaje común. Desde la perspectiva del conductor (asumiendo es el propietario), reduce los costos de uso del vehículo, ya que sus pasajeros pueden aportar al menos el mismo valor que les costaría transportarse por otro medio semejante. Las alternativas comparables suelen ser o bien otro vehículo particular, o algún medio de transporte masivo, que si bien suele ofrecer tarifas menores, implica otro tipo de condiciones en materia de disponibilidad temporal, espacial del servicio y comodidad del pasajero.

A su vez, pero desde una perspectiva general del sistema de transporte, existen dos aportes fundamentales: la reducción del flujo y reducción en la demanda de infraestructura promovida mediante un uso más eficiente de los recursos disponibles. Esto es basado en el efecto que genera esta práctica, reduciendo la cantidad de vehículos particulares en las vías y por ende el tráfico, la congestión y demanda de infraestructura para ordenarlo.

De todos modos, cabe mencionar que aunque los sistemas de *ridesharing* pueden proveer un conjunto considerable de ventajas y beneficios a una comunidad, como ser la reducción de costos de transporte, congestión y consecuentemente menos contaminación, existen importantes desafíos que inhiben el uso de esta práctica de manera masiva. De hecho aún con la evolución de la tecnología permitiendo la comunicación en tiempo real para facilitar su adopción, el incremento de su uso no se ha visto afecto de la manera esperada. Con motivo de comprender ésta realidad, en esta Sección se presenta un relevamiento y taxonomía buscando entender los aspectos principales del *ridesharing* y sistemas existentes. Se presentará el contexto, los problemas y soluciones propuestas que buscan colaborar con la proliferación de esta actividad, con el objetivo de desarrollar herramientas o mecanismos más efectivos que promuevan su masificación.

3.1 Contexto

3.1.1 Definiciones Básicas

Usualmente se define un viaje como un recorrido realizado desde una posición geográfica a otra (Dailey, 1999). *Ridesharing* es la unión de uno o más participantes (conductores o pasajeros) que comparten un vehículo y coordinan sus itinerarios (i. e. hora y lugar de encuentro, salida o llegada). Los participantes tienen preocupación por varios factores, entre ellos: el costo del viaje, la compensación que pueda recibir por compartir un viaje, comodidad durante el viaje, reputación de los conductores o pasajeros, etc. Hoy en día existen muchos proveedores diferentes del servicio de búsqueda de viajes, que intentan asistir con la actividad de coordinación, considerando múltiples características que se describirán en la Sección 3.1.2. Se puede decir que el *ridesharing* ha existido desde mucho tiempo bajo una modalidad informal, ya sea entre familiares, amigos, colegas o vecinos. O hasta quizás sin necesariamente tener una relación personal como se hace en la modalidad de *hitchhiking*⁹ (“hacer dedo”). De todos modos, este tipo de actividades de *ridesharing* no escalan masivamente debido a la baja confianza entre personas desconocidas, que no llega al mínimo necesario que se requiere para realizar el acuerdo. El aspecto de seguridad es quizás uno de los mayores desafíos que enfrenta esta modalidad y si bien existen grandes avances en materia de intercambio de información y conocimiento de los perfiles de los participantes su análisis escapa a este trabajo. El *ridesharing* organizado es operado por agencias que proveen servicio de coordinación (*matching*) de viajes compartidos a los

⁹ *Hitchhiking*- También conocido como *thumbing* o “hacer dedo” es conocido como un medio de transporte en la que pasajeros, usualmente desconocidos, piden a conductores que los lleven haciéndoles señas con el dedo pulgar al costado de la ruta.

participantes, incluso sin necesidad de información histórica. Debido a esto, esta modalidad tiene un gran potencial de poder convertirse en un servicio escalable. El pre-arreglo provisto por proveedores del servicio de coordinación, es la principal característica que lo diferencia entre parar un taxi o “hacer dedo”, que son pensados para ocurrir directamente en la calle o ruta.

Para la coordinación de viajes, los pedidos son enviados a los proveedores del servicio, quienes coordinarán la oferta y la demanda. Esos proveedores pueden ser clasificados en dos tipos:

- **Agencias de Coordinación** (*Matching Agencies*) – con foco en la facilitación de servicios de coordinación de viajes entre conductores de vehículos individuales y posibles pasajeros.
- **Operadores del Servicio** (*Service Operators*) – con foco en las operaciones del ridesharing usando sus propios vehículos y conductores.

Algunos ejemplos representativos de operadores de servicios (*service operators*) son las camionetas (*vanpooling*) o servicios de *shuttle* a aeropuertos. Típicamente los operadores de servicio reciben pedidos de los pasajeros únicamente y asignan vehículos para cubrirlos. Este proceso de asignación es denominado *one-sided matching* en Economía, y *centralized transportation management* en las Ciencias de Gestión e Investigación Operativa (FTA, 2002). Una característica notable es que la mayoría de las decisiones son realizadas por los operadores y los participantes se limitan a decidir si lo toman o lo dejan. En general, las posiciones de abordaje (*pick-up*) y descarga (*drop-off*) son definidas por los pasajeros pero no los rangos de tiempo en que deben realizarse. Más aun, las áreas geográficas de servicios pueden estar restringidas por tiempos y requieren gestión avanzada por parte de los operadores.

Alternativamente, las *matching agencies* tienen foco en la facilitación de servicios de búsqueda de congruencia de viajes entre conductores y pasajeros individualmente, ya que estas no proveen vehículos ni conductores. En este caso son los participantes conductores quienes proveen sus cupos de asientos desocupados para posibles pasajeros. Ambos, conductores y pasajeros, envían sus ofertas y demandas para que la búsqueda y coordinación de viajes se lleve a cabo. A este se le llama *two-sided matching*, que implica distintos intereses y externalidades para los involucrados. Por ejemplo, el valor que tiene la agencia para el conductor será proporcional a la cantidad de pedidos que esta pueda asignarle, mientras que para el pasajero dependerá de qué tan eficiente sea el viaje que se le asigne o qué tanto demore. Como resultado, la naturaleza de estas agencias da lugar al conocido problema de huevo y la gallina - *chicken-and-egg problema* (Caillaud, 2003). Concretamente, para atraer conductores proveedores de vehículos, una agencia debe asegurarse de tener un gran número de pedidos, pero estos ofrecerán sus vehículos si esperan que ciertamente muchos pasajeros hagan solicitudes. Por ello, el problema central que enfrentan las agencias es el diseño de técnicas de mercado que tornen este mecanismo lo suficientemente atractivo para ambas partes. Además, los conductores ofrecen sus vehículos para repartir costos de viaje sin estar necesariamente ajustados proporcionalmente, por eso es

importante que la asignación de los viajes sea de la manera más efectiva posible para ambas partes.

3.1.2 Principales Características

A continuación se describen las principales características del modelo conocido como viajes compartidos de forma dinámica (*dynamic ridesharing*) para un sistema que busca facilitar la correspondencia entre conductores y pasajeros. El término también conocido como *realtime sharing*, *ad-hoc ridesharing* o *instant ridesharing* se basa en la capacidad de realizar la asignación en un rango de horas o incluso minutos de la hora de partida del viaje.

- **Dinámico** – Debe poder establecerse con poca anticipación, los rangos podrán variar entre horas y minutos antes del tiempo de partida. El creciente uso de la telefonía móvil permite a la personas obtener y solicitar viajes desde prácticamente cualquier lugar y hora. Esto convierte a la comunicación por telefonía en una aspecto clave para cubrir este requisito.
- **Independiente** – Siguiendo el esquema *matching agency*, los conductores que proveen los viajes son entidades independientes y privadas. Esto es diferente a la modalidad tradicional del *service operator* donde los vehículos son provistos por una organización.
- **Costo Distribuido** – Los costos son redistribuidos entre los participantes de manera de beneficiar e incentivar su participación. La variable de costo incluye al menos el costo del combustible pero puede incluirse también costos de uso, estacionamiento, peajes, etc.
- **Recurrencia de Viajes** – El *dynamic ridesharing* se caracteriza por su foco en viajes únicos y no recurrentes, lo que lo distingue del *carpooling* o *vanpooling*, donde ambos usualmente terminan en un compromiso a más largo plazo entre dos o más personas, como por ejemplo los viajes al trabajo. En esos casos la asignación se realiza una única vez y luego los participantes ya quedan coordinados para los siguientes viajes. La modalidad de compartir un único viaje tiene más flexibilidad en el sentido que no debe mantenerse en el tiempo y hace que la búsqueda de asignaciones sea mucho mas compleja.
- **Pre Arreglo** – El pre arreglo implica que los participantes acuerdan compartir el viaje típicamente sin estar en la posición de abordaje. Esto difiere del denominado *ridesharing* casual (Kelley, 2007) en donde los pasajeros y conductores establecen un lugar de encuentro similar a hacer dedo o parar un taxi al costado de la calle. En el *ridesharing* casual los conductores y pasajeros hacen cola en lugares establecidos para hacer uso de las líneas del tipo HOV (*High Occupancy Vehicle*) para ahorrar tiempo o peajes. La mayor limitante de esta última modalidad es la imposibilidad de establecer servicios puerta a puerta.

- **Asignación Automatizada** – Se busca minimizar el esfuerzo por parte de los participantes, particularmente automatizando la asignación. Es decir que los sistemas deben buscar las correspondencias “óptimas” y comunicarlas a los participantes de modo que eventualmente puedan optar por diferentes criterios. Por otro lado, no considerando la automatización, existe la modalidad conocida como cartelera (*posting board*) en donde los pasajeros y conductores publican sus viajes deseados o planeados para que los interesados se contacten.

3.1.3 Estructura Geográfica

El *ridesharing* implementado por las agencias u operadores de servicio ataca distintos problemas. Las diferencias son resaltadas también por las características geográficas de la ruta en cuestión. Como se mencionó anteriormente, cada operador de servicio provee funcionalidades para la especificación de las posiciones de *pick-up* y *drop-off* de los pasajeros. De este modo los operadores de servicios reciben los pedidos de pasajeros y asignan los pedidos a sus vehículos resolviendo un problema de ruteo de vehículos. En contraposición, las *matching agencies* asignan los pedidos bidireccionalmente, donde pasajeros y conductores envían sus pedidos y ofertas de viajes para realizar la asignación en términos que ambos accedan. De este modo, el problema fundamental de estas agencias es: qué tan eficientes son realizando dicha asignación buscando optimizar los factores de interés de ambas partes. En la práctica, las agencias de asignación proveen oportunidades basadas en diferentes criterios que usualmente son caracterizados por la estructura geográfica que forma dicha asignación. En la literatura (Morency, 2007) usualmente se clasifican los viajes compartidos por su estructura geográfica definida por los participantes. En esta Sección se presenta un modelo extendido (Furuhata et al., 2013) de esta clasificación de modo de especificar cómo estas diferencias estructurales influyen la asignación de manera genérica.

Cada individuo tiene una demanda de viaje definida por su origen y destino. A su vez, cada conductor recoge un pasajero de una posición de *pick-up* y lo deja en una posición de *drop-off*. Se denomina ruta original del conductor a la ruta que este realizaría si no llevara a ningún pasajero, de lo contrario, se denomina ruta compartida o de *ridesharing*. Cabe aclarar que la posición de origen de un pasajero no tiene por qué necesariamente ser la misma que la posición de *pick-up*, análogamente para el destino y *drop-off*. A continuación se clasifican estas diferencias utilizando la siguiente notación:

- Sea a un conductor y b un pasajero.
- Cada conductor y pasajero, tiene un origen o y destino d .
- Sea u la posición de *pick-up* y v la posición de *drop-off*.
- Sea $R(a)$ la ruta original del conductor a .

- Sea $R(a,B)$ la ruta de *ridesharing* compuesta por el conductor a y el conjunto de pasajeros B .

Existen distintos patrones de *ridesharing*, distinguiendo entre el caso de un único pasajero y múltiples pasajeros (Fig. 11). Considerando que el caso de múltiples pasajeros puede interpretarse como repeticiones de casos de un único pasajero, los patrones presentados se basan en un único pasajero.

	Single Passenger	Multiple Passengers																																
Pattern 1 (Identical Ridesharing)	$o_a = o_b = u_b$ $d_a = d_b = v_b$ 	$o_a = o_b = o_{b'}$ $d_a = d_b = d_{b'}$ 																																
Pattern 2 (Inclusive Ridesharing)	$o_b, d_b \in R(a)$ 	$o_b, d_b, o_{b'}, d_{b'} \in R(a)$ 																																
Pattern 3 (Partial Ridesharing)	$u_b, v_b \in R(a)$ $\neg(o_a = u_b \ \& \ d_a = v_b)$ 	$u_b, v_b, u_{b'}, v_{b'} \in R(a)$ $\neg(o_a = u_b \ \& \ d_a = v_b)$ $\neg(o_a = u_{b'} \ \& \ d_a = v_{b'})$ 																																
Pattern 4 (Detour Ridesharing)	$\neg(u_b \in R(a) \ \& \ v_b \in R(a))$ 	(1) $\neg(u_b \in R(a) \ \& \ v_b \in R(a))$ $\neg(u_{b'} \in R(a) \ \& \ v_{b'} \in R(a))$ $u_b, v_b, u_{b'}, v_{b'} \in R(a, B)$ (2) $u_b, v_b \in R(a)$ $\neg(u_{b'} \in R(a) \ \& \ v_{b'} \in R(a))$ $u_b, v_b, u_{b'}, v_{b'} \in R(a, B)$																																
Legend	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Origin o</th> <th>Destination d</th> <th>Pick-up u</th> <th>Drop-off v</th> <th>RS Path</th> <th>Joint RS Path</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Driver a</td> <td>○</td> <td>●</td> <td></td> <td></td> <td>→</td> <td>⇒</td> </tr> <tr> <td>Passenger b</td> <td>○</td> <td>●</td> <td>△</td> <td>▽</td> <td>- - - →</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Passenger b'</td> <td>○</td> <td>●</td> <td>△</td> <td>▽</td> <td>- - - →</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							Origin o	Destination d	Pick-up u	Drop-off v	RS Path	Joint RS Path	Driver a	○	●			→	⇒	Passenger b	○	●	△	▽	- - - →		Passenger b'	○	●	△	▽	- - - →	
	Origin o	Destination d	Pick-up u	Drop-off v	RS Path	Joint RS Path																												
Driver a	○	●			→	⇒																												
Passenger b	○	●	△	▽	- - - →																													
Passenger b'	○	●	△	▽	- - - →																													

Fig. 11 Clasificación de estructuras de ridesharing desde su vista geográfica - (Furuhata, et al., 2013)

Identical Rideshare

En este patrón tanto el origen como el destino del conductor y el pasajero son idénticos, i. e. $o_a = o_b = u_b$ y $d_a = d_b = v_b$. En este caso todos los viajes son colectivos.

Inclusive Rideshare

En este caso tanto el origen o_b como el destino d_b del pasajero b están incluidos en la ruta original $R(a)$ del conductor a , i. e. $o_b, d_b \in R(a)$. Todos los viajes son cumplidos por un único conductor, pero un pasajero no tiene necesariamente el mismo origen o destino que el conductor.

Partial Rideshare

Aquí se considera que la ubicación de *pick-up* u_b y *drop-off* v_b de un pasajero b , están en la trayectoria de la ruta original $R(a)$ del conductor a , pero con la diferencia que o bien el origen o el destino del pasajero no está en la trayectoria definida por la ruta del conductor. Es decir: $u_b, v_b \in R(a)$ y $\neg (o_b = u_b \text{ y } d_b = v_b)$. En este caso el viaje compartido es un trayecto parcial en el viaje del pasajero b .

Detour Rideshare

En este caso se consideran que tanto la ubicación de *pick-up* u_b como la de *drop-off* v_b del pasajero b no está en la ruta original $R(a)$ del conductor a . De este modo, el conductor requiere hacer un desvío para levantar al pasajero b lo que genera una nueva ruta $R(a,b)$ para poder compartir el viaje.

El esquema tradicional de las *matching agencies* no distingue completamente estos cuatro patrones. En la práctica las asignaciones son realizadas considerando una cercanía determinada al área o posición, más que ubicaciones exactas. Actualmente en el estado práctico de las agencias de *matching*, el reconocimiento de estas diferencias es lo que permite discriminar el tipo de *ridesharing* que se está solicitando y determinar si soporta una asignación instantánea, particularmente considerando aspectos de costos, tiempos y geografía. Cabe mencionar que entre estos patrones, el denominado *detour rideshare* muestra dificultades evidentes a la hora de tomar decisiones instantáneas debido a los costos adicionales del viaje y tiempo que el conductor debe disponer.

3.2 Objetivos

El objetivo principal con que se promocionan estos servicios, es el de ahorrar costos de transporte compartiendo el vehículo. Un proveedor de *ridesharing*, ya sea público o privado debe ayudar a los involucrados a realizar la compleja tarea de asignación ideal dentro de las posibles, que busque optimizar los intereses de ambas partes, particularmente de manera automatizada y con tiempos de respuesta razonables, preferentemente “inmediatos”.

Cuando se trata de un sistema privado, usualmente con fines de lucro, el valor que el proveedor agrega a sus usuarios es el de intentar reducir los costos totales de todos los participantes en la mayor medida posible. De este modo, el proveedor puede recibir o cobrar un porcentaje basado en el ahorro que su servicio otorga a sus usuarios. Es así que usualmente este tipo de modelos de negocio, cobran una comisión por viaje compartido exitosamente, ya sea una tasa fija o proporcional al costo del viaje. Se podría decir que el objetivo del proveedor está alineado con el de sus usuarios.

En parte, el esquema anterior también aplica cuando se trata de un proveedor público o uno con objetivos sociales o comunitarios, como la reducción de la congestión o de la contaminación. Los objetivos del proveedor y de los usuarios están alineados porque tanto el costo total de viaje para el pasajero como los costos de infraestructura están relacionados con el sistema de transporte en general. Lo que esto quiere reflejar es que se asume que un usuario que tiene un vehículo a su disposición, terminará usándolo si no consigue un conductor que lo lleve a su conveniencia. Este razonamiento suena muy lógico cuando la posesión de vehículos por persona es alta, como por ejemplo en regiones de Estados Unidos donde 9 de cada 10 adultos poseen un vehículo (Nielsen, 2007); por lo que la optimización en el uso de la infraestructura impacta directamente como un beneficio social.

Considerando los objetivos previamente mencionados a grandes rasgos, se puede decir que los proveedores deberán considerar los siguientes objetivos concretos para realizar las asignaciones, además del fin de lucro si lo hubiese.

- **Minimizar el kilometraje**

El kilometraje a nivel del sistema representa la suma de todos los kilómetros de la ruta recorrida por todos los usuarios a sus destinos, ya sea en un viaje compartido (*ride-share*) o quienes viajen solos. Este objetivo es importante desde el punto de vista de la sociedad ya que ayuda a reducir notablemente la congestión y polución. A su vez, también es compatible con buscar minimizar los costos totales de transporte, que es uno de los objetivos más importantes tanto para los conductores como pasajeros de un *ride-share*.

- **Minimizar el tiempo de viaje**

El tiempo de viaje para el sistema es la suma de la duración de todos los viajes desde su origen a destino. Obviamente que el ahorro y minimización de tiempo para los involucrados es tan clave como el costo monetario. Pero a nivel social, la medida del tiempo resulta importante para la reducción de emisiones ya que estas no solo están relacionadas con el kilometraje de la ruta recorrida por un vehículo sino con la velocidad a la que lo realiza.

- **Maximizar la cantidad de participantes**

Este objetivo en sí implica maximizar la cantidad de conductores y pasajeros satisfechos con el servicio. Este objetivo se torna clave principalmente para proveedores privados donde sus ingresos posiblemente dependen de la cantidad de usuarios que usen su servicio. A su vez la tasa de efectividad, definida como la cantidad de participantes que comparten viajes sobre el total, se torna en un indicador de desempeño para los usuarios de estos servicios. A mayor tasa, la posibilidad de incrementar el número tanto de conductores como pasajeros aumenta, y si ocurre, se cuenta con un espacio de asignación más amplio y diverso que debería ayudar a mejorar las asignaciones.

3.3 Operativa y Funcionalidades

Con motivo de simplificar el entendimiento del proceso de planeamiento en sistemas de ridesharing, se describe a continuación el proceso genérico propuesto por el común de las aplicaciones existentes que ofrecen este servicio (ej. Carmacarpool, Carticipate).

Mediante una aplicación informática (idealmente móvil), los usuarios pueden ofrecer un viaje como conductores o solicitarlos como pasajeros. Para facilitar la especificación del viaje la aplicación permite a los usuarios guardar y predefinir ubicaciones como su casa, trabajo o lugar de estudio. Mediante el uso del GPS, los usuarios pueden también ubicar su posición de origen o ruta. Una vez realizada la búsqueda de posibles pasajeros para un conductor, o viceversa, la aplicación notifica a ambos sobre la propuesta para que sea aceptada y el conductor pase a buscar al pasajero en el lugar y hora acordados. En particular estas aplicaciones suelen intercambiar información personal para que conductor y pasajero puedan identificarse o eventualmente coordinar en detalle el encuentro. Algunas aplicaciones incluyen sistemas de navegación para guiar o reportar la posición de los individuos y hasta pueden incluir sistemas de pago o tarificación automáticos, basándose por ejemplo en la distancia o tiempo compartido.

Cada agencia que brinda este servicio tiene distinto foco de negocio. La Fig. 12 presenta una categorización por agrupación de funcionalidades ofrecidas cuyas descripciones son enumeradas a continuación.

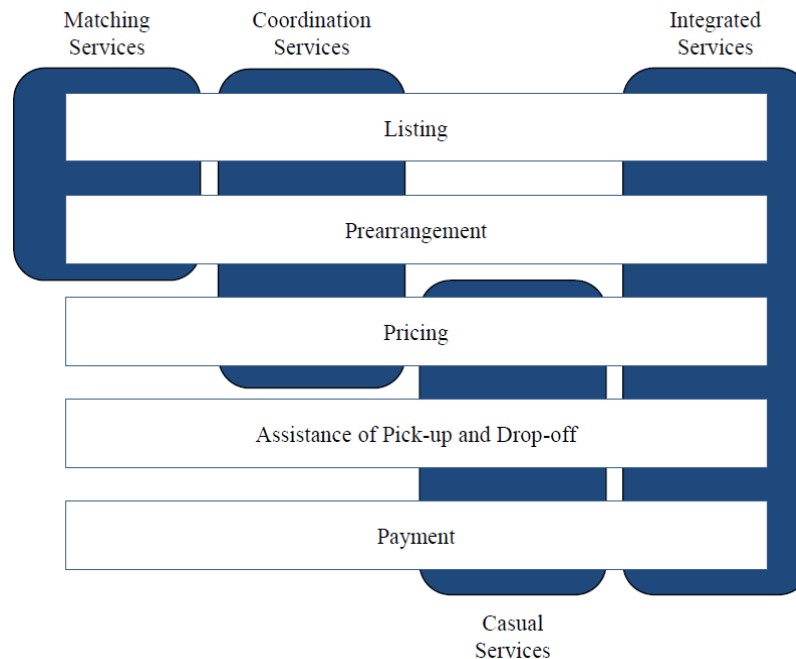


Fig. 12 Funcionalidades por Tipo de Servicio (Furuhata, et al., 2013)

- Servicios de Asignación (*Matching Services*): involucran principalmente el listado y funciones de pre-arreglo y no necesariamente funciones de tarificado.

- Servicios de Coordinación (*Coordination Services*): involucran el listado, pre-arreglo y funciones de tarifado para promover un comportamiento coordinado entre los participantes.
- Servicios Casuales (*Casual Services*): no involucran el pre-arreglo, sino que predeterminan rutas, lugares, horas de encuentro y precios, basando el ridesharing en el procesamiento de la demanda de una cola de pasajeros atendida por conductores.
- Servicios Integrados (*Integrated Services*): involucran la integración de las funcionalidades de las categorías anteriores de manera de poder gestionar el servicio de ridesharing dinámica y completamente.

3.4 Restricciones

Para realizar la asignación en un sistema de *ridesharing*, existe un conjunto de restricciones básicas de factibilidad que deben ser evaluadas y son presentadas en esta sección.

3.4.1 Limitantes de Asignación

Las restricciones de tiempo en los viajes probablemente sean las de mayor importancia de consideración, ya que tienden a ser más restrictivas que la disponibilidad de un asiento en este contexto.

Tanto los conductores como los pasajeros deben proveer la información correspondiente a sus preferencias de agenda. Muchas de las aplicaciones disponibles actualmente brindan la posibilidad a los participantes de especificar el tiempo de salida deseado. Esta modalidad simplifica el proceso para los participantes, pero al mismo tiempo provee información limitada con respecto a las preferencias y flexibilidad. Para ello algunos enfoques plantean el uso de ventanas de tiempo (Fig. 13 - *time window for matching*) para poder capturar dicha información. Por ejemplo, un participante podría especificar el tiempo de partida más temprano y más tardío que admite, definiendo así un rango de flexibilidad en tiempo para buscar una asignación.

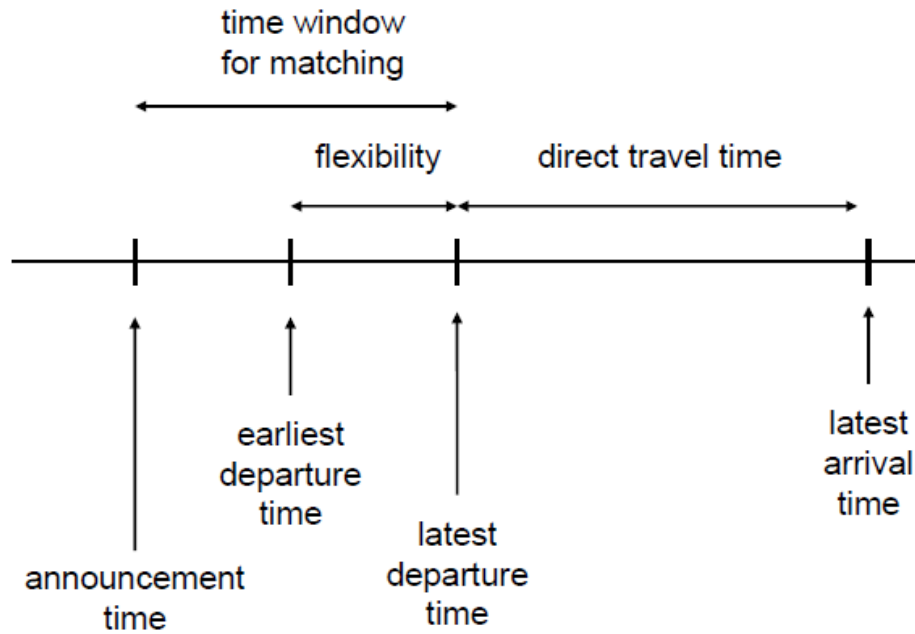


Fig. 13 Modelo de ventana de tiempo (*time window*) – (Agatz et al., 2009)

Este tipo de consideraciones permiten al sistema otorgar cierta flexibilidad en sus asignaciones aunque este margen de tiempo también dependerá de otros factores como la congestión durante el tiempo especificado, o el camino por el cual vaya el vehículo para levantar al pasajero, que pueden hacer que aún con un rango de flexibilidad la asignación no sea factible.

Además del tiempo, existen otros factores críticos con respecto a la factibilidad que son considerados a la hora de determinar una asignación que los participantes estén dispuestos a aceptar. Por ejemplo, participantes femeninas pueden no sentirse seguras compartiendo el vehículo con un desconocido (Levin, et al., 1977), o compartir el vehículo con un fumador puede ser inaceptable para algunos. La realidad es que un usuario puede sentirse cómodo compartiendo el viaje solamente con determinado grupo de personas, donde las preferencias por estos grupos pueden estar definidas por seguridad personal o consideraciones sociales a la hora de compartir un viaje. Desde luego que a mayor cantidad de restricciones que un participante tenga, menor será el número de posibilidades de encontrar asignación exitosa (Dailey, 1999).

En último lugar, pero no menos importante siguiendo uno de los objetivos principales para los participantes, es relevante el ahorro de costos de viaje; desde luego que este aspecto dependerá del modelo planteado y los costos definidos, lo que motiva la siguiente sección.

3.4.2 Consideraciones de Costo

Las personas eligen ser participantes de un sistema de *ridesharing* principalmente por el ahorro potencial en costos de viaje a los cuales pueden acceder, ya sea combustible, peajes, tiempo, desgaste del vehículo, etc (Kocur, y otros, 1983). De este modo, se asume que las asignaciones serán establecidas si y solo si, reportan una reducción de costos para cada participante

individualmente. Aunque los mayores ahorros puedan venir de conductores cediendo la propiedad del vehículo, tercerizando los costos de seguro o propiedad ya sea mediante alquiler o préstamo, difícilmente se pueda reducir la cantidad de vehículos privados, al menos en un futuro cercano. La predicción indica que los individuos no cederán al derecho de tener su vehículo propio, haciendo que los costos de propiedad de éstos sean relativamente fijos y por ende, no impacta proporcionalmente los costos para viajes compartidos. Debido a lo anterior, es que usualmente en estos servicios se tiende a enfocar en los costos variables de los viajes que son proporcionales al consumo del vehículo como el kilometraje recorrido o tiempo incurrido.

Cuando los costos de viaje son aproximadamente proporcionales a la distancia recorrida, la reducción del costo tiende a ser posible solamente cuando la porción del viaje compartido es menor que la suma de las distancias de viajes separados. Esto considerando al viaje compartido como el viaje necesario para mover cada participante desde su origen a destino. Por ejemplo, en caso que un conductor comparta un viaje con un único pasajero, esto implicaría incluir el viaje desde la dirección de origen del conductor, a la posición de *pick-up* del pasajero, luego el viaje al *drop-off* del pasajero, y finalmente al destino del conductor.

Si el costo del viaje compartido es menor que la suma de los viajes individuales de cada uno de sus participantes, será posible dar lugar a un ahorro en costos para todos los participantes. Un conductor podrá reducir el costo de su viaje recibiendo compensación mayor al costo marginal requerido para transportar a los pasajeros, es decir, el costo marginal requerido por los desvíos necesarios para transportar a los pasajeros. Para que el *ride-share* sea beneficioso para el pasajero, la compensación que paga al conductor debe ser menor que el costo de conducir él mismo en su propio vehículo si lo tuviese, o reportarle beneficios adicionales en comparación al medio alternativo (ej. tiempo, comodidad). Es cierto que el umbral de ahorro por la participación o no puede diferir dependiendo de la persona. Algunos participantes pueden entender conveniente compartir un viaje únicamente si representa una reducción del costo en determinado porcentaje, mientras que otros quizás entiendan como conveniente no tener que realizar el esfuerzo de conducción, o colaborar con la reducción de la congestión o polución incluso asumiendo un incremento en el costo económico.

Cabe considerar que en algunos países, ciudades o jurisdicciones puede estar prohibido el pago por este tipo de servicios. Incluso debido a la implementación del *ridesharing* se han solicitado y efectuado modificaciones que permitan dar un marco legal a este tipo de práctica, ej. <http://save.pickuppal.com>.

Existen múltiples maneras de dividir el costo de un viaje entre los participantes (Nguyen, 2013). Una de las más comunes o naturales, es la de repartir proporcionalmente basándose en la distancia de los viajes compartidos por cada uno de los participantes (incluyendo conductor y pasajeros). A modo de ejemplo, suponiendo que hay un único pasajero y conductor compartiendo un viaje, el participante i pagaría:

$$\blacksquare [c_i / (c_i + c_j)] \cdot c_{ij}$$

Donde c_i es el costo para el participante i de viajar desde su origen a destino, y c_{ij} es el costo del viaje compartido para los participantes i y j .

3.4.3 Beneficio Global y Local

Es importante observar que la solución óptima a nivel del sistema global, no necesariamente implica reducir los costos de los participantes individualmente. Utilizando la Fig. 14 como referencia, se consideran dos conductores $d1$ y $d2$, y dos pasajeros $r1$ y $r2$ y las ubicaciones y distancias especificadas. Se asume que cada conductor solo puede llevar a un pasajero. Cuando se minimiza el kilometraje de las asignaciones globalmente, la solución óptima tiene un valor de 20km asignando $d1$ a $r1$ y $d2$ a $r2$. Para ese caso, si los costos son asignados proporcionalmente, cada conductor y pasajero pagan el costo de 5km, i. e. (6/12) de la distancia del viaje conjunto de 10km. Por otro lado, el conductor $d1$ y el pasajero $r2$ podrían reducir el costo de su viaje compartiendo el viaje entre ellos ya que la unión en ese caso sería de 9km pasando a pagar 4,5km. En este caso el conductor $d2$ y el pasajero $r1$ no compartirían el viaje ya que implicaría una distancia de 17km. En terminología de teoría cooperativa de juegos (Adam, 2007), la solución global del sistema no es estable ya que el conjunto de decisiones para obtener óptimos locales no conduce al óptimo global. En este trabajo se hará foco en la modalidad ad-hoc (considerando pares de viajes) de matching de viajes, dejando por fuera del alcance este tipo de optimización global la cual se vuelve notoriamente compleja para la modalidad de asignación de viajes en tiempo real (*real-time ridesharing*).

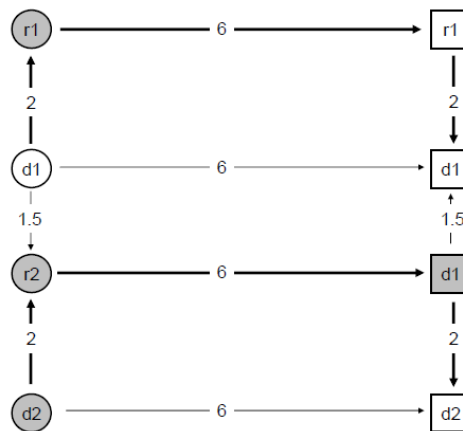


Fig. 14 Conductores $d1$ y $d2$ (blanco), y pasajeros $r1$ y $r2$ (gris) viajando desde su origen (círculo) a destino (cuadrado). (Agatz et. al., 2009)

3.5 Comparativa entre Sistemas de Transporte de Pasajeros

Esta Sección pretende dar una vista de una comparación sistemática (Agatz et. al., 2009) de esta modalidad con otros sistemas de transporte de pasajeros. En las columnas de la Tabla 1 se

presentan los sistemas acorde a su operativa y el detalle para cada una de las dimensiones principales presentadas por fila.

	Transporte Planeado	Transporte a Demanda	RideSharing Dinámico
Oferta			
Producto	Transporte punto a punto	Puerta a puerta	Puerta a puerta
Capacidad	Flota de compañía	Flota de compañía	Individuos con vehículos privados
Ruta	Planeada y fija	A demanda	A demanda / Planeada
Calidad	Establecida legalmente	Establecida legalmente	Preferencia Individual
Dinámica	Flota agendada/disponible	Flota agendada/disponible	Disponibilidad de conductores
Demanda			
Ingresos	Boleto/Ticket	Tasa / Taxi	Costo compartido / Compensación a conductor
Agenda	No requiere	Desde semanas hasta minutos de antelación	Desde semanas/horas hasta minutos de antelación
Calidad	Exceso en el tiempo de viaje	Exceso en el costo de viaje	Leve exceso en tiempo de viaje, ahorro en costo.
Dinámica	A espera de pasajeros	A espera de pedidos	A espera de pedidos

Tabla 1 Comparativo de Ridesharing Dinámico con Otros Sistemas de Transporte

El *ridesharing* dinámico está basado en transporte de pasajeros a demanda al igual que otros sistemas a demanda como los taxis. Los aspectos claves en el planeamiento de transporte a demanda es la asignación de los conductores (vehículos) para atender los pedidos y las rutas que implican. Este tipo de problemas de planeamiento son variantes particulares o casos especiales de un problema usualmente tratado en la Investigación Operativa y conocido como “*Pick-up and Delivery Problem*” (Savelsbergh & Sol, 1995). Estos problemas involucran la construcción de rutas de los vehículos y tiempos para satisfacer la demanda de transporte estrictamente entre su origen y destino, considerando la existencia de una flota de vehículos con una capacidad determinada, usualmente distribuidos en uno o más depósitos. Para los taxis (*dial-a-ride*¹⁰) las

10 Dial-a-Ride – Refiere a servicios de transporte de pasajeros cuya demanda es solicitada por el pasajero a demanda mediante el envío de un pedido a la organización que dispone de una flota para realizar el traslado. Estos pedidos son históricamente realizados por teléfono e implican el traslado del vehículo hacia la posición de pickup

consideraciones que hace el pasajero en cuanto a la conveniencia deben ser tenidas en cuenta. La calidad del servicio brindado al pasajero puede ser medida, por ejemplo, en términos de tiempo de espera y costo, o incluso comodidades del vehículo que lo realiza, convirtiéndose en factores de la función objetivo para esa realidad, sumada a la restricción de no compartir un taxi o vehículo para múltiples pasajeros.

El *ridesharing* dinámico difiere de la manera convencional de los sistemas de transporte colectivo, principalmente por la oferta de conductores o vehículos disponibles, donde en vez de ser empleados de una empresa, los conductores son entidades privadas comportándose individualmente a conveniencia. Esto dificulta la capacidad de predicción y certeza de la oferta ya que no hay ningún tipo de obligación, por lo que las preferencias de los conductores tienen que ser tenidas en cuenta a la hora de asignar viajes. Entre estas preferencias y a modo de ejemplo, puede haber valores máximos de desviación de la ruta original de un conductor para levantar a un pasajero, cantidad de pasajeros simultáneos o cantidad de paradas para llevarlos.

En el transporte a demanda, la antelación con la que se obtienen los pedidos resulta crucial a la hora de gestionarlos. En el caso de los sistemas de taxis, los pedidos usualmente llegan con poca anticipación y las rutas de los vehículos son actualizadas cada vez que llega un nuevo pedido. En el contexto de *ridesharing*, el cual en varios aspectos se asemeja mucho al sistema de taxi urbano, se agrega la complejidad de disponibilidad de conductores para atender los pedidos. Una diferencia entre estos sistemas es que usualmente las flotas de taxis operan con salidas desde uno o más depósitos de origen y destino, mientras que en el *ridesharing* estos tienden a ser posiciones únicas. Esto implica que en los sistemas de *ridesharing*, las decisiones de ruteo de los vehículos tengan que ser modeladas y evaluadas como desviaciones de los conductores de su ruta original. Por otro lado, en sistemas de transporte planeado, la secuencia de paradas y tiempos es fija, y típicamente no ofrece transporte puerta a puerta. Particularmente los sistemas de transporte público de este tipo implican un conjunto de problemas de optimización de alta complejidad que involucran distintas etapas del proceso de planeamiento como ser: el plan de ruta (Borndorfer et al., 2008), horarios (*time-table*) (Kroon et al., 2009), tarifas y asignación de tripulación (Grotschel et al., 2003). Mediante la resolución de estos problemas se busca ofrecer un mecanismo de transporte eficiente de bajo costo para el usuario, que de algún modo compense las virtudes de utilizar su vehículo propio o compartir uno privado.

3.6 Agencias de Asignación (Matching Agencies)

En esta Sección se presenta un relevamiento de las prácticas actuales en la industria de las agencias de asignación (i. e. *Matching Agencies*). Se realiza una clasificación de las agencias de acuerdo a sus características principales en seis clases, de acuerdo a sus criterios de búsqueda y

del pasajero para realizar el viaje solicitado. Los taxis y servicios de traslado para personas con discapacidades son un ejemplo de esta modalidad.

segmentos objetivos. Luego se hará hincapié en cómo las agencias implementan sus procesos de negocio y funcionalidades.

3.6.1 Clasificación

Se presentan las características de treinta y tres de las mayores agencias de asignación del mundo (Dessouky, y otros, 2013) de acuerdo a la siguiente taxonomía: criterio de búsqueda principal y segmento objetivo.

Criterio de Búsqueda

- **Ruta y tiempo:** Un pedido y una oferta son asignados por ruta y tiempo. Las entradas necesarias son los orígenes y destinos así como una función de ruteo.
- **Par OD y tiempo:** Un pedido y una oferta son asignados de acuerdo a su par Origen-Destino (OD¹¹) y tiempo. Ciudades, regiones o departamentos son utilizadas como ubicaciones.
- **Palabras clave:** La oferta y demanda son asignadas mediante una búsqueda por palabras claves como nombre de las ciudades.
- **Par OD y FIFO:** Un pedido y una oferta no son pre-asignados, sino que los conductores y pasajeros son asignados en puntos de encuentro particulares siguiendo una política FIFO¹².

Segmentos Objetivos

A continuación se listan los principales segmentos objetivos:

- **A Demanda:** Servicio casual y puntual, implicando usualmente un viaje de corta distancia requiriendo respuesta en tiempo real.
- **Conmutado:** Ridesharing con una agenda regular implicando relaciones a largo plazo. Los participantes usualmente proveen su vehículo en turnos.
- **Larga Distancia:** Ridesharing para viajes de larga distancia, interdepartamentales, entre ciudades o incluso países. Implica una agenda con antelación y menores restricciones en lugares y tiempos de pick-up y drop-off.

11 OD- (Origen-Destino). Refiere a las coordenadas o posiciones de origen y destino de un viaje.

12 FIFO - **Primero en entrar, primero en salir** (En inglés *First in, first out*), es un concepto utilizado en estructuras de datos, contabilidad de costos y teoría de colas. Guarda analogía con las personas que esperan en una cola y van siendo atendidas en el orden en que llegaron, es decir, que *la primera persona que entra es la primera persona que sale*. También se le denomina «primero en llegar, primero en ser atendido» (del inglés *first come, first served* o FCFS).

Además de los anteriores, existen otros tipos de viajes. Por ejemplo los viajes por evento, (*Event Trips*) en donde los participantes deciden compartir un viaje para asistir a un evento puntual y ocasional. En el relevamiento presentado se optó por considerar este tipo de viajes como de modalidad de larga distancia.

De acuerdo a las dos taxonomías definidas se pueden clasificar las agencias de asignación en seis tipos distintos.

1. **Dynamic Real-time Ridesharing:** provee un mecanismo automatizado con tiempos de respuesta mínimos para realizar la asignación incluyendo ruteo, agenda y precio, entre conductores y pasajeros.
2. **Carpooling:** servicio a los participantes para compartir y alternar vehículos privados, usualmente rutinarios (ej. Viaje al trabajo).
3. **Long Distance Ride Match:** servicio para compartir viajes de largas distancias.
4. **Bulletin-board:** servicio (informativo) que provee oportunidades de ridesharing basada en carteleros de noticias.
5. **Carpooling Ocasional:** una variante del carpooling pero para viajes ocasionales.
6. **Carpooling Flexible:** servicio que provee oportunidades de ridesharing sin un pre-arreglo sino coordinado en el lugar. El ridesharing es asignado siguiendo una política FIFO en puntos de encuentro determinados. Un ejemplo de estos son puntos de encuentro para las líneas HOV (ver Sección 3.1.2).

3.6.2 Funciones de Negocio

A comienzo de los noventas se identificaron (Beroldo, 1991) cinco componentes fundamentales para el éxito de estos servicios de ridesharing: gestión de la base de datos de los viajes, un sistema de asignación, un mecanismo de disseminación de la información, un sistema de actualización y validación, y un sistema de evaluación. Desde la vista del usuario, se pueden identificar las siguientes cinco funciones de negocio fundamentales para estas agencias: listado, pre-arreglo, precio, asistencia para pick-up y drop-off y pago.

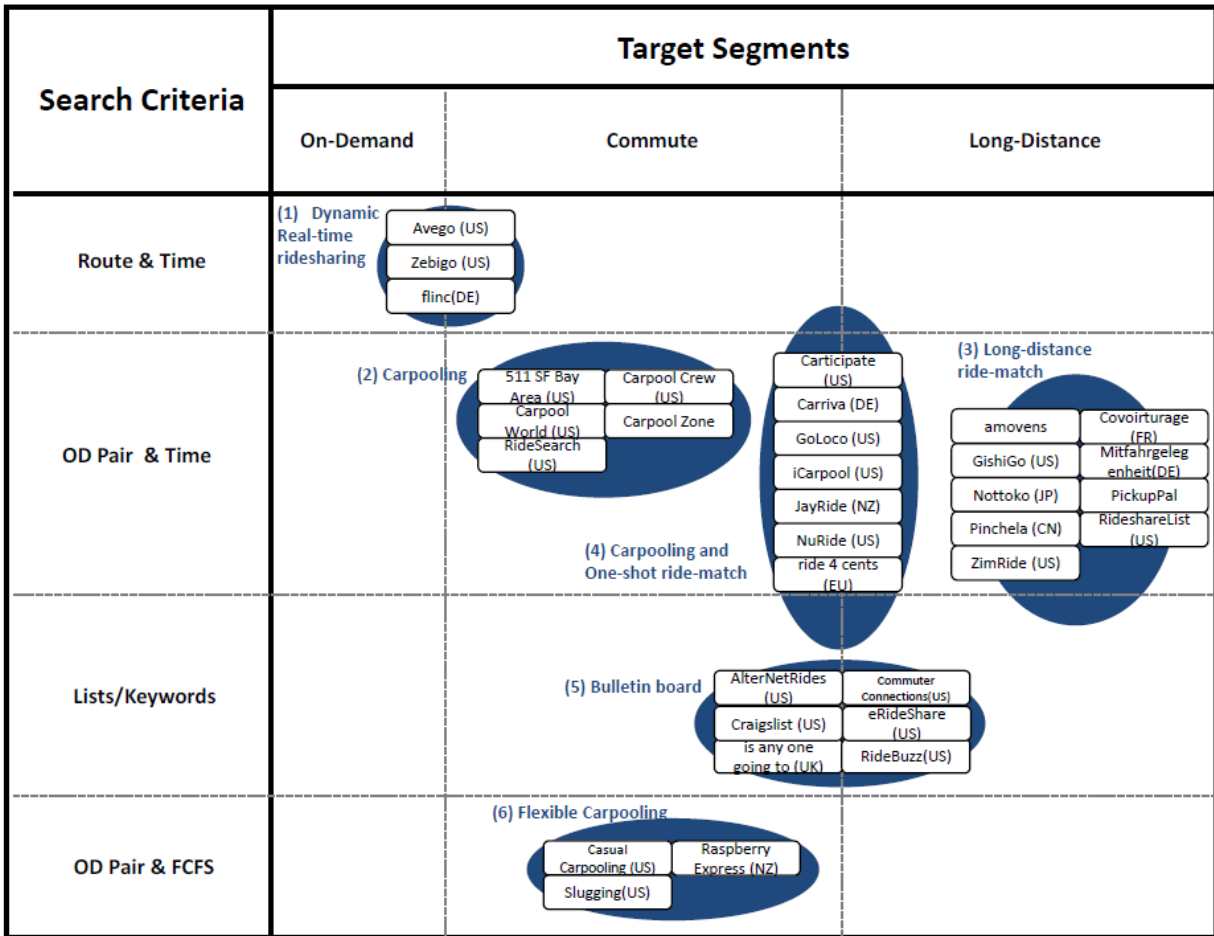


Fig. 15 Clasificación de *Matching Agencies* (Dessouky, y otros, 2013)

3.6.2.1 Listado

La posibilidad de desplegar la información tanto de ofertas como demanda es quizás la función fundamental de este tipo de agencias. Con respecto a la información geográfica podrán existir distintos niveles desde posiciones georeferenciadas, direcciones, intersecciones, barrios o regiones. Usualmente las agencias del tipo *real-time* utilizarán niveles de mayor granularidad dejando los de menor para los servicios del tipo *long-distance*. Del mismo modo ocurre con la especificidad del tiempo, esto se debe principalmente a facilitar la tarea tanto de ingreso como de búsqueda de pedidos, donde la holgura para la congruencia de tiempos puede predefinirse dependiendo del tipo de servicio. Para el momento de listado, se puede realizar lo que se denomina *active-matching*, que refiere a la posibilidad de búsqueda de posibles candidatos dinámicamente basado en los datos de entrada y mientras se lista. Por el contrario, una búsqueda pasiva (*passive-matching*) no realiza ningún tipo de búsqueda algorítmica sino que se basa simplemente en filtrar y utilizar palabras clave.

3.6.2.2 *Pre-arreglo*

El pre-arreglo es el servicio central de muchas agencias. Estadísticamente, si los conductores o pasajeros no tienen una buena experiencia en los primeros tres intentos de asignación de una agencia, no volverán a utilizarla. Estos problemas de asignación pueden darse tanto por la falta de oportunidades, como por el ofrecimiento de muchas oportunidades asociadas incorrectamente, resultando contraproducentes debido a la percepción de ineffectividad del servicio. Esta funcionalidad consiste principalmente de dos etapas: buscar potenciales participantes, tanto pasajeros como conductores, y realizar las negociaciones para que se concrete el acuerdo. Entre los aspectos geográficos considerados para realizar la asignación existen básicamente tres criterios: por ruta, por par OD, y por palabras claves o lista. Una asociación por ruta requiere la especificación de la misma en detalle como dato de entrada, mientras que por par OD pueden existir dos tipos de niveles por granularidad: por dirección o región que se requieren como datos de entrada. Finalmente por palabras claves se hace una búsqueda a través de listas de ofertas o pedidos.

Considerando las asignaciones por tiempo, muchas de las agencias suelen consultar al usuario su tiempo preferido luego de haber realizado una búsqueda por asignación geográfica, de manera de aumentar la factibilidad de una asignación real. Otras agencias piden este dato como entrada inicial utilizando distintos niveles de granularidad para su especificación, esto en algunos casos permite realizar asignaciones incluso con vehículos en movimiento.

Obviamente que para el pre-arreglo podrán agregarse otros criterios de búsqueda basados en preferencias de los usuarios además de los que se entienden como básicos, es decir el geográfico y temporal.

3.6.2.3 *Precio*

La funcionalidad de precio o tarifado permite especificar el monto de dinero a ser transferido entre los participantes, donde entra en juego la repartición de costos de combustible, peajes, tiempo, etc. En la industria existen básicamente tres tipos de reglas de tarifado utilizadas:

- **Precio por catálogo:** Los conductores y pasajeros especifican su precio para ser desplegado en el listado. Usualmente el dueño del listado es quien fija los precios en esta modalidad para ser aceptados o no por los participantes.
- **Precio por reglas:** El precio es determinado por una fórmula de cálculo definida por la agencia. Típicamente se intenta establecer una tasa por distancia y tiempos basada en el viaje compartido.
- **Precio negociado:** La agencia se abstiene del proceso dejando a los participantes negociarlo directamente.

Algunas agencias permiten elegir opcionalmente el método utilizado para considerar preferencias o situaciones particulares. La complejidad aumenta más aún cuando se trata de múltiples

pasajeros simultáneamente y principalmente cuando se trata de *detour ridesharing* debido al problema de cómo realizar la repartición de los desvíos de manera proporcional.

Alternativamente, algunas de las agencias suplantan el sistema de pago con dinero incentivando a sus participantes mediante algún esquema de premios por uso. Por ejemplo, cada vez que un conductor provee un viaje exitosamente, este es recompensado con algún sistema de créditos (no necesariamente dinero) que podrá canjearse luego por beneficios que ha acordado la agencia, ej. estacionamiento, cupones de combustible, entradas al cine, etc. En este caso dependerá fuertemente de los beneficios que pueda negociar la agencia para realmente incentivar el uso del servicio que provee.

3.6.2.4 Asistencia al usuario

La asistencia al usuario refiere a una funcionalidad propia del viaje, más que del proceso de planeamiento como las anteriores. Con respecto a la asistencia hay básicamente dos categorías: los que proveen seguimiento en tiempo real, ya sea información de tiempo o posición; y los que no, dejándolo a criterio o responsabilidad de los participantes mediante el intercambio de información de contacto correspondiente.

3.6.2.5 Pago

Con respecto a las modalidades de pago pueden existir muchas variantes, desde la más básica como es el pago en efectivo, hasta sistemas de pagos automatizados por crédito. La modalidad a implementar dependerá también del sistema de cobro de tarifas que establezca la agencia, si es que lo tiene, o cómo desea implementarlo. Usualmente se puede categorizar el sistema de pago de las agencias en dos grandes grupos:

- **Pago directo:** el pasajero le paga directamente al conductor.
- **Pago por medio de terceros:** el pago de un pasajero a un conductor es realizado utilizando un servicio intermediario (ej. www.paypal.com).

Mientras que la utilización de servicios intermediarios permite realizar los cobros ante la no aparición del pasajero (i. e. *no-show*), evitar el uso de dinero en mano, temas de cambio, y gestionar mejor el cobro (opcional) de tarifas de la agencia, usualmente implican el cobro de comisiones adicionales. A esto se suma el requerimiento operativo para los participantes de tener que registrarse en alguno de estos servicios antes de poder utilizar el sistema de ridesharing.

A modo de resumen podríamos decir que las funcionalidades principales que se pretenden en general, se centran en brindar la información deseada de la manera más acertada posible considerando el tipo de viaje que se desea realizar. Adicionalmente se busca generar una distribución y mecanismo de pago del servicio (cuando se comparten costos) de modo que resulte beneficioso para todos los participantes.

3.7 Literatura Relevante

En el trabajo de (Amey et.al., 2011) se identifica que las oportunidades de innovación se han visto potenciadas por el fuerte avance de las tecnologías móviles. En particular han facilitado el *ridesharing* en tiempo real, es decir viajes ocasionales compartidos entre desconocidos con poca anticipación. Los autores plantean muchos de los desafíos expuestos en este trabajo para concluir con un conjunto de recomendaciones que pretende guiar hacia la comprensión del comportamiento de los participantes de servicios de *ridesharing* dinámico. Entre estas plantean focalizar la provisión de servicios de *ridesharing* a grandes concentraciones de trabajadores de manera de obtener beneficios de ese contexto. A su vez se sugiere la integración multimodal mencionando como ejemplo las líneas de *carpooling* existentes en San Francisco.

Otros trabajos relevantes (Savelsbergh et.al., 2015) plantean un estudio sobre el *ridesharing* dinámico como alternativa al transporte a nivel masivo, curiosamente mencionándola como “reciente” por el foco principal derivado de las aplicaciones Uber y Lyft que se basan en la gestión de una flota que provea el servicio. Si bien dicha modalidad no es la contemplada en este trabajo, se complementa con la afirmación que el éxito de estos servicios dependerá de su capacidad de atraer grandes volúmenes de usuarios para garantizar la disponibilidad y demanda del servicio.

El trabajo de (Agatz et.al., 2012) es quizás donde los conceptos y propuestas se alinean con los factores de motivación expuestos en este trabajo. Se expone la realidad del *dynamic ridesharing* haciendo hincapié en los beneficios que trae a la sociedad, tanto económicos como ambientales. Se realiza una descripción de los desafíos y necesidades tecnológicas para poder soportar dicho servicio así como modelos de Investigación Operativa existentes en la literatura con el objetivo de motivar la investigación y desarrollo en esta área de transporte.

El problema de determinación de viajes comunes entre pasajeros requiere de estrategias o algoritmos que indiquen la congruencia de los viajes considerando los puntos de origen y destino de los participantes e idealmente las rutas deseadas. El trabajo de (Nourinejad, 2015) plantea un modelo basado en sistemas multiagentes donde análogamente a este trabajo se estudia la factibilidad de la asignación entre viajes admitiendo holguras predefinidas. Además, se presenta y plantea un modelo para el *carsharing*. Así se le denomina la práctica de compartir un vehículo ajeno el cual es utilizado por múltiples participantes secuencialmente. Existen servicios de este tipo como ZipCar o Car2Go que vienen operando y expandiéndose en distintos estados de los Estados Unidos. El autor plantea un modelo expandido para considerar un esquema de asignación de múltiples pasajeros y conductores en tiempo real como lo exige este tipo de servicios. De manera análoga a este trabajo, se presenta un análisis de la efectividad del modelo en materia de costos considerando tiempos y distancias, buscando establecer cotas mínimas que justifican la eficiencia de estos servicios colaborativos.

Uno de los aspectos principales a ser considerados en los sistemas de *ridesharing* y referente a costo, es la determinación de las tarifas o costos compartidos por los participantes, lo cual se

expone detalladamente en el trabajo de (Furuhata et. al., 2015). En este se presenta un conjunto de experimentos basados en distintos métodos de distribución de costos, cubriendo las modalidades típicas y alternativas con especial foco en lo que los autores definen como propiedades deseables para el cálculo de la distribución de costos en estos servicios. Entre ellas se destacan algunas consideradas implícitamente en la propuesta de este trabajo como lo son: Balance Presupuestal (Budget Balance), Equidad en Línea (*Online Fairness*) y Racionalidad Individual (*Individual Rationality*), que buscan establecer un costo racional para cada uno de los participantes. El trabajo plantea una modalidad de cálculo de distribución de costos novedosa, denominada *Proportional Online Cost Sharing* (POCS), donde se busca proveer a los pasajeros con una cota superior del posible costo del viaje, con la ventaja de ser calculado inmediatamente luego de hacer la solicitud y sin importar solicitudes adicionales, permitiéndole a estos poder aceptar o declinar la propuesta de viaje compartido. Los autores presentan cómo POCS satisface las propiedades consideradas en teoría y experimentación computacional.

Uno de los modelos más completos dentro de la literatura para la resolución del problema de asignación en tiempo real (*Real-Time Rideshare Matching Problem*) sobre el cual se basa el ridesharing dinámico es el presentado por (Ghoseiri et. al., 2011). En el trabajo se comparten muchos de los aspectos presentados como motivación de esta tesis, en donde se brinda detalle estadísticos sobre las cifras de congestión, contaminación y costos generados por el transporte de pasajeros, con especial énfasis en el uso de automóviles particulares. La formulación del modelo no solo comprende los aspectos principales a considerar en la asignación de viajes como lo son las rutas y tiempos, sino que considera un conjunto de preferencias definidas por los participantes. Entre ellas se admite un esquema de prioridad para la asignación con respecto a variables de género, edad, preferencia en viajes con mascotas y fumadores de manera de intentar satisfacer las demandas de los participantes. Si bien el modelo considera muchos aspectos relevantes sobre las preferencias de los participantes en materia de asignación de viajes no se presenta una propuesta en materia de distribución de costos por lo que podría complementarse con alguna de alternativas planteadas por otros autores (Furuhata et. al., 2015). El modelo formulado en el trabajo busca principalmente establecer la factibilidad de asignación de los viajes con un conjunto más amplio de variables, que el propuesto en este trabajo, actuando como restricciones impuestas por los participantes para la asignación de viajes compartidos.

Los servicios de viajes compartidos han sido y continúan siendo foco de estudio de las agencias de transporte en el mundo, los beneficios directos e indirectos que podrían reportar son reflejados una y otra vez a lo largo de distintos trabajos y estudios. Siendo más significativas sus cifras en países como los Estados Unidos, donde la masa de vehículos particulares es quizás una de las más altas per cápita. Esto ha llevado a la existencia de distintas variantes y prácticas basadas en la modalidad del ridesharing reafirmando de una u otra manera los beneficios de éstos servicios. Tanto en materia, de tiempo, costos, desgaste, reducción de congestión o contaminación ambiental, e independientemente de viajes compartidos entre particulares o flotas privadas que proveen los vehículos son cada vez más los intereses por la motivación de dicha práctica (RITA, 2010).

4. Implementación de Servicio de Ridesharing

En este Capítulo se detalla la propuesta práctica de este trabajo, componiéndose de la implementación y evaluación de un servicio de ridesharing para dispositivos móviles. En dicho servicio se consideran los aspectos relevados en la literatura adecuados al contexto regional y combinándose con propuestas propias del autor en materia de asignación de viajes y distribución de costos, las cuales buscarán ser evaluadas mediante la implementación de un prototipo. El foco principal del servicio aquí planteado es resolver el problema de asignación de viajes entre participantes, no solo resolviendo la compatibilidad de viajes sino planteando una distribución de costos acorde a generar un incentivo suficiente que promueva la concreción del viaje compartido.

La Sección 4.1 plantea el problema a resolver justificando la motivación y relevancia en el contexto local. En la Sección 4.2 se define el modelo planteado y el alcance de la realidad considerada, para finalizar con la Sección 4.3 cubriendo las especificaciones técnicas del desarrollo del servicio y aplicación móvil desarrollada.

4.1 Problema a Resolver

La problemática planteada a resolver consta de la implementación de un sistema que provee múltiples servicios de asignación (*matching*), incluyendo los que se entienden a criterio del autor, más pertinentes para la realidad local, y de mayor probabilidad de adopción por parte de los participantes debido a la novedad de la propuesta y continuidad del servicio. Estos son:

- **Servicio de dynamic ridesharing** considerando viajes únicos y recurrentes para pasajero y conductor, incluyendo todas las modalidades hasta detour ridesharing.
- **Cálculo de pago sugerido** en base a proporción de distancia compartida y desvíos necesarios.

La modalidad de viaje único implica la consideración de asignaciones que lleven al pasajero desde su origen a destino en un único viaje. Se entiende que la modalidad de trasbordos no es la más ajustada a las distancias y tiempos en el contexto local. También se contempla que el servicio deberá ser de fácil uso y entendimiento por parte de los participantes, principalmente en la etapa inicial para facilitar su adopción y uso. Pese a que los trasbordos amplían las posibilidades de asignación entre oferta y demanda, podrían tornar el servicio confuso para su uso, por ejemplo haciendo trasbordar al pasajero más de una vez para poder realizar una asignación. Evidentemente esto podría ser controlado o ponderado de algún modo en el sistema, pero simplemente se entiende que la complejidad que agrega no justifica el beneficio que genera, principalmente en el contexto local y teniendo en cuenta el perfil de participantes.

4.1.1 Motivación

Tal como se presentó en el Capítulo 3, existen múltiples razones que motivan la creación de un sistema de este tipo. Entre ellos, como objetivos principales de este trabajo se plantean los beneficios comunitarios o sociales de alto impacto como son la disminución del tráfico e impacto ambiental de vehículos particulares. A su vez, existen numerosos antecedentes de adopción exitosa de estos servicios por los usuarios, cumpliendo en gran parte de todas las metas principales planteadas. A su vez, la aplicación y uso de tecnología de punta como representa la plataforma móvil en su modalidad de “aplicaciones inteligentes”, representa un incentivo adicional hacia la búsqueda de un servicio de alta disponibilidad, escalabilidad y facilidad para poder llegar a todos los tipos y segmentos de usuarios de dicha plataforma, quienes a su vez en su inmensa mayoría requieren de servicios de transporte.

4.1.2 Relevancia en el Contexto Local

A continuación se presentan los principales factores de motivación para el contexto local sobre el cual se busca implementar la propuesta.

4.1.2.1 Mercado Celular

Pese a que el costo de uso de telefonía móvil (al igual que la fija) en Uruguay no es de las más económicas a nivel regional (UIT, 2013) la demanda y uso de telefonía móvil ha ido incrementándose considerablemente. A diferencia de la telefonía fija, en la móvil sí creció en el 2013 un 11,6% el uso para hacer llamadas a una duración total de 5.886 millones de minutos. El 88% tuvo como destino redes móviles, un 11% la red fija y un 1% el exterior, de acuerdo a los datos de (URSEC, 2013). La banda ancha móvil a través de teléfonos inteligentes y tabletas se ha convertido en el segmento del mercado mundial de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) que crece más rápido, según el informe de la UIT. Las nuevas cifras muestran "una boyante demanda mundial de productos y servicios de TIC, una disminución constante de los precios de los servicios celulares y de banda ancha, y un crecimiento sin precedente de la 3G". Las conexiones de banda ancha móvil por redes 3G y 3G+ crecen un 40% de media anual, lo que equivale a 2.100 millones de abonos de banda ancha móvil y una tasa de penetración mundial de casi 30%. La Fig. 16 muestra la evolución anual de la cantidad total de números de servicios celulares, recientemente superando ampliamente la población nacional.

Número de servicios celulares, según año.	
Año	Servicios
2000	410.787
2001	519.991
2002	513.528
2003	497.530
2004	599.768
2005	1.154.922
2006	2.330.011
2007	3.004.323
2008	3.507.816
2009	4.111.560
2010	4.437.158
2011	4.757.425
2012	4.995.459

Fuente 1: Administración Nacional de Telecomunicaciones (ANTEL) - Abiatar SA, años 2000 - 2004
Fuente 2: Unidad Reguladora de Servicios de Comunicaciones (URSEC), año 2005 en adelante.

Fig. 16 Número de Servicios Celulares (INE, 2013)

4.1.2.2 Situación del tránsito montevideano

Muchos piensan que una ciudad como Montevideo es tranquila con respecto al tráfico, pero es ciertamente intenso en las horas pico y días laborales. Es un tráfico tan intenso en proporción como se puede encontrar en otras capitales más grandes. Ciertamente entre la congestión y las prácticas de manejo, fruto de la propia idiosincrasia quizás, existen momentos en el que ir en ómnibus o auto puede ser algo muy tedioso. El crecimiento del parque automotor a nivel nacional, resultó explosivo en el último lustro. Actualmente, entre automóviles y camionetas se han superado las 649000 unidades, a los cuales hay que adicionarle alrededor de 8600 ómnibus y microbuses, y 844000 motos y ciclomotores. Aún con el alto precio de los vehículos cuya carga impositiva comienza en 50% para vehículos regionales, el parque automotor parece no detener su crecimiento (INE, 2013). La Fig. 17 muestra los totales del parque automotor entre los años 2010 y 2011.

Parque automotor del país según tipo de vehículo utilizado.		
	2010	2011
Total	1.471.875	1.604.464
Autos y camionetas	612.368	649.502
Camiones y tractores	64.640	67.982
Remolques y semi-remolques	34.057	27.891
Ómnibus y minibuses	8.218	8.639
Taxis y remises	6.177	6.281
Motos y ciclomotores	746.415	844.169

Fuente: Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) - Dirección Nacional de Transporte, con datos de las Intendencias.
Nota: No se cuenta con la información de todas las Intendencias. El valor indicado se calculó tomando la última información disponible. Por ello el valor indicado no se corresponde exactamente con el parque vehicular total registrado en Intendencias.

Fig. 17 Parque automotor del país (INE, 2013)

La mayor concentración de esos vehículos se da en la ciudad de Montevideo, lo que arroja un total de por lo menos 374000 unidades, entre ellos más de 198000 autos, que es la principal categoría de interés, circulando en una ciudad que tiene alrededor de 40 kilómetros cuadrados de pavimento. La Fig. 18.1 y 18.2 reflejan los valores totales del parque automotor agrupados por departamento y categoría.

Parque vehicular; por tipo de vehículo según Departamento (en vehículos)
2011

Departamento	Autos y Camionetas		Vehículos de Carga				Omnibus, Micro y Miniomnibus		Taxis y Remises		Motos Y Motocicletas
	N	G	Camiones	Tractores	Remolques	Semi-Remolques	N	G	N	G	
Artigas (c)	6916	3600	970(a)		859(a)		0	97	12	54	23821
Canelones	63024	29354	8880	599	1250	817	50	1278	62	201	159724
Cerro Largo	4391	6804	1276	140	105	182	19	77	88	110	42424
Colonia	45491	19802	4822	67	1254	768	16	311	97	83	66281
Durazno (c)	11136	5980	1150	109	1371	201	4	96	36	52	22318
Flores	7810	4024	1316	749	519	686	0	87	19	12	12615
Florida (c)	9346	4673	1308	282	1456	363	0	72	0	72	23499
Lavalleja	9351	4752	1627(a)		1838(a)		0	129	18	62	23580
Maldonado	51252	23975	3862	262	465	178	30	519	83	105	97647
Montevideo	162528	35529	24622	497	7378	1390	160	4307	662	2658	147138
Paysandu (c)	18320	7141	2729	282	538	340	2	160	2	147	40593
Río Negro (c)	6968	3268	1168	96	143	190	2	91	21	78	13720
Rivera (c)	4042	3114	783(a)		952(a)		0	136	7	145	7183
Rocha (c)	10007	5270	1144	41	783		2	138	13	107	18275
Salto	17498	6608	1478	126	374	134	6	296	136	15	53854
San José (c)	18112	11563	2209	110	810	230	0	367	0	39	22733
Soriano (c)	9608	5231	1596	111	1615	27	6	105	24	23	33907
Tacuarembó (c)	2950	1916	383	83	521	94	3	73	23	38	18502
Treinta y Tres (c)	6064	2084	3105(a)		60(a)		...	...	977(a)		16355

(*) - Los datos totalizados no corresponden al mismo período para todas las fuentes.

(a) - La fuente no discrimina entre las categorías indicadas.

(b) - Incluye trailers para autos y camionetas.

(c) - No se cuenta con inf. actualizada.

Parque vehicular total (*)	1604464
Automoviles y Camionetas (*)	649502
Vehículos de Carga (*)	95837
Ómnibus, micro y mini-ómnibus (*)	8639
Taxis y Remises (*)	6281
Motos y ciclomotores (*)	844169

Nota: N - Gasolina
G - Gasóleo

Fig. 18.1 Parque Vehicular - Anuario Estadístico del Transporte (INE, 2013)

Pasajeros movilizados en servicios nacionales; por tipo de servicio según año (en millones de pasajeros)
2007 - 2011

Año	Total	Corta, media y larga distancia	Suburbano
2007	78,6	20,6	58,1
2008	85,6	22,2	63,3
2009	89,3	22,5	66,7
2010	89,9	24,1	65,8
2011	89,2	23,4	65,8

Nota: Línea de Corta Distancia: aquella con distancia origen-destino entre 60 y 120 km.
Línea de Media Distancia: aquella con distancia origen-destino entre 120 y 240 km.
Línea de Larga Distancia: aquella con distancia origen-destino mayor a 240 km.
Línea Suburbana: aquella con origen en Montevideo y distancia origen-destino no mayor a 60 km.

Fig. 18.2 Pasajeros Movilizados Anuario Estadístico del Transporte (INE, 2013)

A continuación se transcribe parte de una nota de prensa que describe el estado y presenta estadísticas sobre el transporte montevideano (Subrayado, 2014).

Mientras que algunos opinan que “estamos en una ciudad en crecimiento y el congestionamiento es algo normal” otros sostienen que “el colapso ya está establecido” y exponen como ejemplo algunos cruces en horas pico.

Entre las soluciones planteadas por las autoridades como el Director de Movilidad de la Intendencia Municipal de Montevideo (IMM) están los cruces a desnivel, la generación de carriles reversibles en vías principales el ensanche de algunas avenidas. *“Una de las medidas que ya se están implementando es el fomento al transporte colectivo como alternativa a la utilización del automóvil privado”* afirma el Director de Movilidad de la IMM. Además indica que *“Las autoridades concuerdan con esta iniciativa, pero todos señalan que aún se debe trabajar para que sea realmente exitosa. La Intendencia de Montevideo busca además desalentar el uso de la motocicleta, que ha crecido en forma sustancial, siendo sus conductores las principales víctimas de siniestros.”*

Montevideo es la ciudad con más semáforos por automóvil en toda Latinoamérica (RUCS, 2013). Hay más de 650 cruces con semáforos que en muchas avenidas no están coordinados, aunque el director de movilidad de la IMM asegura que se está trabajando en eso.

Normas de reciente aplicación en Montevideo procuran reducir los problemas en el tránsito que padecen a diario quienes circulan por la ciudad. Embotellamientos periódicos en determinadas zonas y horas, semáforos no sincronizados, calles flechadas, problemas de ordenamiento del transporte público e incluso el comportamiento de peatones (ej. cruces no permitidos) generan un gran deterioro de la fluidez del tránsito de las calles metropolitanas.

A esto se suma el crecimiento del parque automotor nacional a una tasa anual de 50.000 autos nuevos y casi 100.000 motos importadas, buena parte de los cuales se concentran en Montevideo. En tanto, las vías de tránsito siguen siendo las mismas que en el siglo pasado sin que obra significativas se hayan hecho en las dos últimas décadas para aliviar los crecientes problemas de circulación. La Fig. 19 muestra la venta de Vehículos en el período de 2007 a 2011.

Venta de vehículos automotores 0 km; por tipo de vehículo según año (en vehículos)

Nota: Carga comprende camiones y tractores.
Pasajeros comprende ómnibus y micro-ómnibus.
Automóviles y Camionetas incluye las ventas de mini-ómnibus.

Año	Total	Automóviles y Camionetas	Cargas y Pasajeros		
			Total	Cargas	Pasajeros
2007	20791	19072	1719	1152	167
2008	28870	25946	2924	2415	509
2009	28358	25977	2381	2062	319
2010	45687	42672	3015	2764	251
2011	54996	51383	3613	3220	393

Fig. 19 Venta de Vehículos - Fuente INE 2013

Actualmente, tampoco el transporte público ostenta condiciones para convertirse en una alternativa para los automovilistas. Pese a una mejora reciente fruto de históricas quejas, existen problemas sobre la impuntualidad de los servicios y su incomodidad (A.N.D.C.U, 2014). Faltan también trabajos de magnitud que mejoren el estado de las vías de tránsito o que las despejen en beneficio de quienes las recorren en las horas pico del día.

Todo esto ocurre en una ciudad en donde según estudios comparativos históricamente se paga una patente automotor superior a la de París, Nueva York, Madrid o Roma (Psetizki, 2010). Se trata de urbes proporcionalmente más densas que Montevideo, en materia de parque automotor y personas, en donde el tránsito es más ágil y ordenado obteniendo indicadores de fluidez y eficiencia mejores.

En suma, el acelerado aumento del parque automotor, incluida la proliferación de motos, complica cada vez más la circulación en una ciudad como Montevideo. Quien quiera diseñar en el futuro auténticas soluciones a la crisis en el tránsito deberá imaginar medidas no sólo a través de la aplicación de normas y la realización de obras viales, sino también mediante cambios en los actuales medios de transporte.

Estos podrían ser un transporte público con atributos referentes a costos, tiempos y comodidad, que induzca automovilistas a minimizar el uso de su vehículo o desear compartirlo. También el uso de vehículos alternativos ej. bicicleta, y quizás una racionalización en la forma de circular por las vías principales convirtiéndolas en unidireccionales en horas de mayor concurrencia.

Asimismo, mediante la privatización del sistema de estacionamiento de la Ciudad Vieja y el Centro (zonas de mayor densidad) se intentó ordenar la circulación en esas zonas.

A ello debe agregársele la prohibición de la circulación de ómnibus interdepartamentales por determinadas zonas y arterias, y los horarios para carga y descarga en Ciudad Vieja y el Centro.

Sin embargo a pesar de estas medidas, autoridades municipales declaran ante la opinión pública, que: *"Los flechamientos son la solución más barata pero tienen corta vida. Los semáforos no solucionan los problemas de tránsito, y los ensanchamientos ya no se pueden realizar más. Llegamos al límite de lo que puede dar nuestra ciudad, estamos corriendo el inmenso riesgo de no tener alternativas. La capital se está tornando intransitable; al centro financiero ya no se*

puede acceder en automóvil, el centro comercial está absolutamente saturado y las vías de salida están repletas para todos lados. El fenómeno nos desbordó y no había previsiones ni planificación para enfrentarlo. Ya hicimos todos los flechamientos que podíamos hacer y también todos los ensanches posibles, tendremos que aprender a convivir con la situación".

La tendencia cultural actual implica que importantes contingentes poblacionales se están desplazando hacia la periferia de la ciudad o directamente instalando en las denominadas "ciudades dormitorio" (de las cuales el paradigma es "Ciudad de la Costa". La inmensa mayoría de esas personas trabaja en Montevideo, lo cual implica muy importantes desplazamientos.

4.1.2.3 Contaminación

La concentración de monóxido de carbono producida por el parque automotor capitalino, supera a la cifra de 21 partes por millón (PPM), pero aún menor a los (35PPM) que permite como límite la Agencia de Protección Ambiental en los Estados Unidos de América. La percepción del gas contaminante ha movido a diversas organizaciones ecologistas a protestar reiteradamente por el incremento del fenómeno en una ciudad como Montevideo. Las Figs. 20.1, 20.2 y 20.3 muestran la evolución del consumo de combustibles y contaminación del aire de Montevideo.

Consumo de Combustibles

Consumo de combustibles; por tipo de combustible según año (en metros cúbicos)
2007 - 2011

Año	Combustibles de Automotores		Combustible de Ferrocarriles	Combustibles de Aviación	Combustibles de Buques
	Gasóleos	Gasolinas			
2007	997,165	334,614	5,087	86,659	431,107
2008	1,497,598	382,495	5,087	86,659	325,471
2009	...	...	...	...	...
2010	1,043,013	501,396	3,916	97,244	525,062
2011	1,361,869	583,382	3,478	118,201	403,173

Fig. 20.1 Consumo de Combustible por Sector y Año (INE, 2013)

Consumo de Combustibles
Consumo de combustibles en
estaciones de servicio;
por año y tipo de producto
según Departamento
(en metros cúbicos)
2010 – 2011

Departamento	2011			2010		
	Total	Gasóleos	Gasolinas	Total	Gasóleos	Gasolinas
TOTAL	1.438.371	866.719	571.652	1.351.402	851.690	499.713
Artigas	23.680	15.993	7.687	22.933	15.997	6.936
Canelones	181.736	100.191	81.545	167.853	97.940	69.914
Cerro Largo	37.560	24.950	12.610	37.201	25.907	11.294
Colonia	81.202	54.806	26.396	73.929	51.569	22.360
Durazno	33.012	24.525	8.487	29.152	21.880	7.273
Flores	20.410	15.140	5.270	18.918	14.270	4.648
Florida	36.479	26.015	10.464	34.081	25.091	8.990
Lavalleja	39.260	29.160	10.100	37.047	28.257	8.790
Maldonado	102.289	43.280	59.009	94.394	42.647	51.746
Montevideo	455.117	237.412	217.705	435.799	241.823	193.976
Paysandu	60.277	39.555	20.722	59.620	41.470	18.150
Río Negro	54.049	43.375	10.674	48.925	40.895	8.029
Rivera	31.993	21.025	10.968	30.641	20.399	10.243
Rocha	44.505	26.364	18.141	39.779	24.101	15.678
Salto	42.413	22.979	19.434	37.441	21.165	16.276
San José	62.335	44.792	17.543	58.670	43.886	14.784
Soriano	57.436	44.891	12.545	53.932	42.695	11.237
Tacuarembó	47.559	32.923	14.636	45.871	33.210	12.661
Treinta y Tres	27.059	19.343	7.716	25.216	18.488	6.728

Fig. 20.2 Consumo de Combustibles (INE, 2013)

Contaminación del aire. Montevideo								
	Material particulado				Gases			
	Humo Negro (HN) polvo en suspensión (1)		Partículas totales en suspensión (PTS) (2)		Material particulado menor a 10 UM (PM10) (3)		Dióxido de azufre (SO ₂) (Acidez) (4)	
	Promedio (ug/m ³)	Número de muestras	Promedio (ug/m ³)	Número de muestras	Promedio (ug/m ³)	Número de muestras	Promedio (ug/m ³)	Número de muestras (3)
2006	18	179	45	159	30	26	15	154
2007	20	106	48	151	..	..	22	106
2008	20	107	51	148	39	134	60	107
2009	22	216	62	147	39	132	28	112
2010	19	214	67	102	30	172	28	56
2011	19	218	85	77	40	287	69	58
2012	16	158	64	30	32	140	15	155

Fuente: Intendencia de Montevideo (IM). Servicio de Evaluación de la Calidad y Control Ambiental, Departamento de Desarrollo Ambiental.
 (1): Partículas emitidas fundamentalmente por el uso de combustible fósil - (promedio de estaciones Ciudad Vieja y Portones de Carrasco). A partir de 2010 se incluyen también las estaciones La Teja y Prado. Corresponde únicamente a la Red Manual.
 (2): Equivale a la fracción de partículas menor a 100 micras (um) 24 horas de exposición. (La medición se realiza en las estaciones de La Teja, Curva de Maroñas y Colón. En el año 2011 solo se consideran las estaciones de La Teja y Colón y en el año 2012 solo Colón).
 (3): Equivale al número total de muestreos en el año (son muestreos de 24 horas de exposición promedio estación. En 2012 corresponde Ciudad Vieja, Tres Cruces, Curva de Maroñas. Corresponde únicamente a la Red Manual.
 (4): Determinado en tren de monitoreo (Son muestreos de 24 horas de exposición promedio de estación Ciudad Vieja). En el año 2012 se incorporó el promedio de SO₂ de las estaciones Ciudad Vieja, Tres Cruces, Curva de Maroñas y Portones de Carrasco.

Fig. 20.3 Contaminación del Aire (INE, 2013)

4.1.2.4 Accidentes de Tránsito

Montevideo posee uno de los mayores índices de muertes en accidentes de tránsito a nivel regional. Los datos oficiales revelan que cuatro personas mueren por semana víctimas de los problemas ya sin solución que genera el tránsito montevideano. Más de 200 personas mueren anualmente en las calles de Montevideo, cifra significativa si se considera su tamaño. Este promedio se ha mantenido en el último lustro, y tiende a aumentar (INE, 2013).

4.1.2.5 Tasa y Frecuencia de Ocupación de Automóviles

Los automóviles particulares tienen una tasa de ocupación de 1,5 a 1,7 personas por vehículo (INE, 2013). Los taxímetros, 1.2. Esto demuestra que los autos en general, son sub-utilizados y por consiguiente, resultan sobre utilizadas las vías públicas. Los ómnibus del transporte colectivo, transitan con una frecuencia promedio entre unidades, de 20 minutos. La velocidad promedio de los ómnibus es de 16 km/hora, con lo cual los tiempos de transporte en los que realizan sus recorridos, son significativamente más lentos que los de la velocidad de circulación promedio, es decir 30km/h basándose en la velocidad de circulación metropolitana admitida.

A título de ejemplo, y a modo comparativo en materia de tiempos, un recorrido en ómnibus de 10 km dura 40 minutos. Si ese dato lo comparamos con el tiempo promedio de un recorrido en metro, para la misma distancia se demora 20 minutos, es decir la mitad del tiempo, sin complicaciones de tránsito y virtualmente sin polución o despreciable en comparación.

Particularmente, la situación del transporte público y masivo de Montevideo llegó a atraer una empresa austriaca (*Doppelmayr*) para la construcción de un sistema de transporte elevado de pasajeros (AMECO, 2013). La empresa responsable de la construcción del ambicioso teleférico de La Paz, propuso un sistema al estilo del que ya funciona en Río de Janeiro para solucionar los crecientes problemas de tránsito de Montevideo de un modo barato y eficiente. El técnico resaltó que cada vez son más las ciudades de todo el mundo, particularmente en América Latina, que recurren a los funiculares para pasajeros con el fin de mejorar el tránsito, ya que son "sistemas concebidos para sacar los autos privados de las calles". Antes el costo de operar autobuses era de miles de dólares y ahora son cientos de miles de dólares. Según el representante regional de la empresa, los teleféricos han pasado de las decenas de millones de dólares a un par de millones.

4.1.3 Motivación a la Aplicación de Ridesharing y Carpooling

La aplicación de soluciones del tipo ridesharing y carpooling provee una modalidad de uso más eficiente de los vehículos aumentando la ocupación de estos, en un ideal de 4 pasajeros por vehículo. Si se considera la modalidad de carpooling, esto permite en el mejor de los casos, la omisión de uso de tres vehículos (conductores convertidos en pasajeros) para realizar cuatro viajes independientes que pueden ser realizados con los costos de un único vehículo con incrementos de costos operativos mínimos para cubrir los anexados. Es decir, un vehículo operado por un conductor puede cubrir los viajes de otros 3 con costos adicionales (referentes al despacho de los pasajeros) procurando que ese incremento sea menor al 30% del costo si uno de esos pasajeros realizara el viaje independientemente. En la modalidad de ridesharing, y

considerando como alternativa del pasajero, a otro medio como en ómnibus, la mejora trataría de hacer uso de un recurso ocioso (asiento libre en un vehículo) representando una mejor opción en materia de comodidad, tiempo o costo.

Existe otra visión, la global, que considera a la actividad de transportar personas de la mejor manera posible, incluyendo a todos los actores, es decir, flotas públicas, privadas, operadores, pasajeros e infraestructura como un único sistema. En este caso, la aplicación del ridesharing podría ser considerada como una optimización (local de la flota al menos), cuya aplicación solo puede dar lugar a la mejora mediante el uso eficiente de recursos actualmente ociosos, y por ende un mejor sistema de transporte de pasajeros. La búsqueda de esta optimización es la motivación fundamental de la propuesta práctica de este trabajo presentada en esta sección.

4.2 Modelo de la Realidad

La realidad se plantea para una agencia de servicios de matching donde se modelan los elementos para proveer los servicios y funcionalidades especificadas en las secciones a continuación. Se hará uso de modelado UML para la definición del dominio y procesos propuestos así como casos de uso para la especificación de requerimientos funcionales. Se presentará la arquitectura y distribución del servicio propuesto.

4.2.1 Dominio

4.2.1.1 Participantes

Los participantes son usuarios finales, es decir pasajeros y conductores que actuarán como consumidores del servicio de matching. Cada participante podrá tener diferentes roles (pasajero o conductor), dependiendo del servicio que busque en el momento particular.

De los participantes podría ser de interés conocer la mayor cantidad de datos personales como el sexo, edad, etc., de manera de poder ser utilizados como filtros de búsqueda e intercambio con el resto de los participantes. En esta propuesta se considerarán como datos adicionales al perfil de un participante que escapan al alcance de estudio del mecanismo de asignación planteado.

4.2.1.2 Viajes

Los viajes se clasifican en dos tipos, los ofertados por los conductores y los demandados por los pasajeros. En principio estos son especificados mediante un par origen-destino de manera de simplificar la tarea a los participantes. Las rutas para el recorrido original del conductor y las posibles asignaciones de viajes compartidos, son calculadas en base a un criterio que incluye al menos la minimización de la distancia total recorrida. Otros criterios, como ser la minimización de tiempo, pueden ser tenidos en cuenta y dependen de la implementación específica (ver Sección 4.3.2).

Cabe recordar que los servicios de matching buscan considerar el detour ridesharing para la asignación de viajes, cubriendo coincidencias totales o parciales como se vio en el Capítulo 3. La

congruencia de un viaje ofertado con uno demandado establecerá una posible asignación, ya sea por coincidencia total, parcial o mediante desvíos para que los pares de origen y destino de ambos participantes coincidan dentro de un rango de aceptación establecido.

Se contemplan dos tipos de servicio en materia de viajes. Uno será bajo modalidad dinámica, esto es con necesidad de asignación en tiempo real. Y también se contemplarán viajes planificados bajo modalidad recurrente, es decir con fecha y hora determinada recurrentemente, cuya asignación podrá diferirse.

4.2.1.3 Modelo de Dominio

La Fig. 21 presenta un modelo de domino en UML¹³ simplificado de manera de conceptualizar las entidades y relaciones principales para cubrir la realidad planteada. En el mismo se destacan las clases principales:

- Role – Representa el rol del usuario.
- Usuario – Modela al usuario del sistema.
- Participante – Define el tipo de rol para un viaje particular.
- Ride – Define un viaje el cual puede categorizarse como viaje ofrecido (*RideOffer*) o viaje solicitado (*RideRequest*).
- Location – Utilizada para los trayectos que componen al viaje geográficamente
- Notification y RideMatchNotification – Utilizadas para soportar el mecanismo de notificación entre los participantes para dar cuenta de las solicitudes y confirmaciones de los viajes compartidos.

¹³ UML - Lenguaje Unificado de Modelado (por sus siglas en inglés, Unified Modeling Language) es el lenguaje de modelado de sistemas de software más conocido y utilizado en la actualidad; está respaldado por el OMG (Object Management Group).

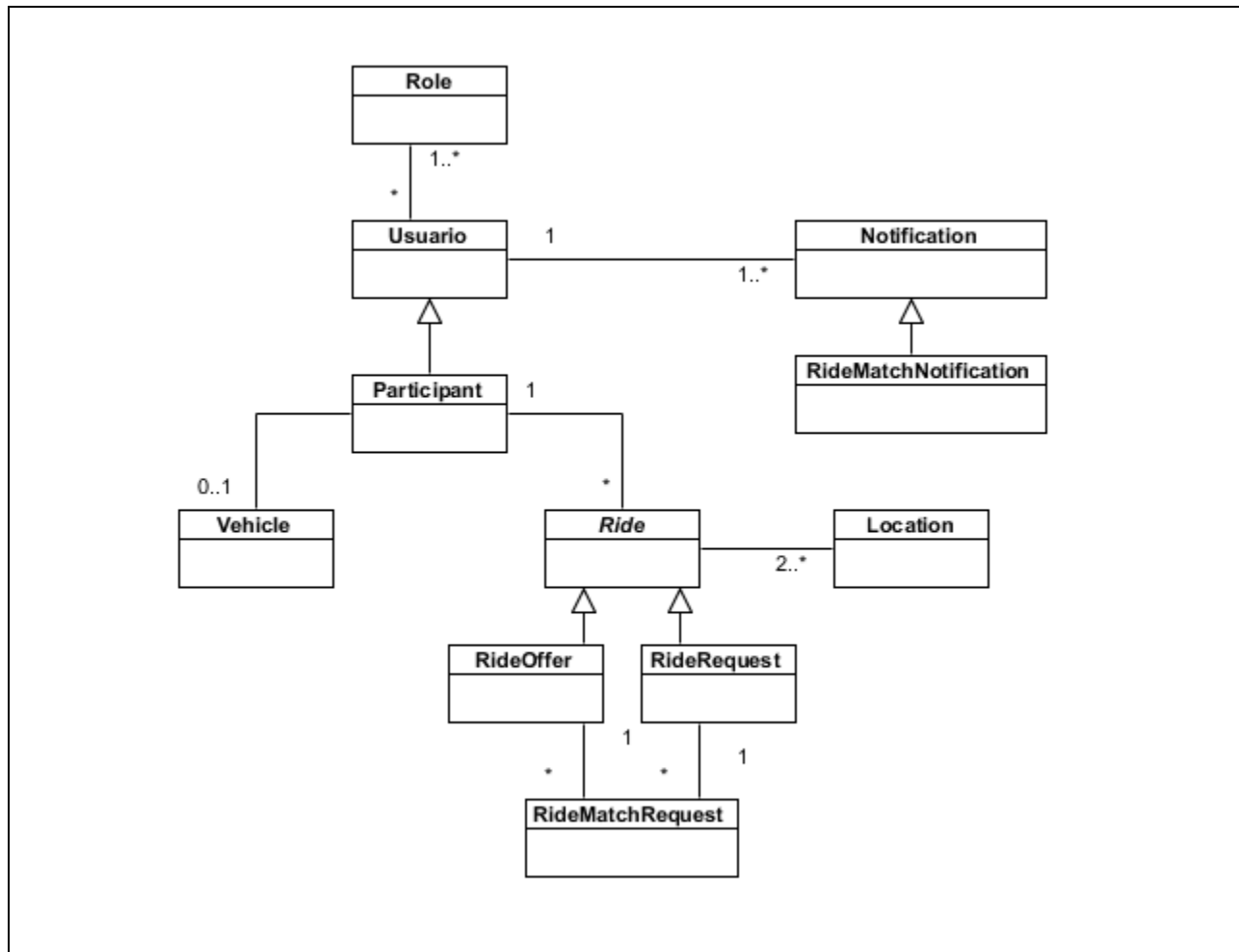


Fig. 21 Modelo de Dominio

4.2.2 Matching

El *matching* de viajes se determinará utilizando distintas técnicas y márgenes de holgura tanto por ruta como en las posiciones de origen y destino.

Considerando la vista geográfica, los viajes en los servicios planteados pueden ser considerados indistinguibles. Es decir, el algoritmo de comparación de congruencia de un viaje ofrecido con uno de demanda se asume indiferente para el tipo de servicio que se esté considerando. Sí podrán aplicarse distintos parámetros o márgenes de holgura para ajustar los criterios de asignación de viajes. Opcionalmente podrán evaluarse distintas estrategias para el ofrecimiento de viajes congruentes, como por ejemplo en carpooling considerar como función objetivo la mayor cantidad de asignaciones posibles en un rango de tiempo en vez de asignaciones puntuales a demanda o dependientes del perfil de los participantes. A continuación se describen los distintos criterios planteados como parte de este trabajo.

4.2.2.1 *OD Matching*

Este algoritmo definido siguiendo las siglas de *Origin & Destination Matching*, consta de buscar viajes que coincidan tanto en origen como destino, aceptando un radio de distancia parametrizable de holgura con respecto a las coordenadas geográficas de origen y destino de los viajes. Esta estrategia pretende cubrir principalmente el caso de *identical ridesharing* entendiéndolo como óptimo en beneficio de partes, ya que se maximiza la cantidad de distancia recorrida compartida, objetivo principal del servicio. Ahora bien, es claro que en el sentido más estricto y contemplando holgura, las probabilidades de coincidencia en este caso son claramente menores a otras técnicas que evalúan todo el trayecto del viaje y no solamente sus puntos de origen y destino, por lo que se desea que la aplicación de este algoritmo sea prioritaria pero no única para definir la congruencia de viajes.

En un sentido estricto o incluso contemplando holgura, esta técnica representada en la Fig. 22 se ve limitada a la dependencia de la distancia de los viajes que se estén considerando. La efectividad de una holgura fija (ej. definida en km) dependerá del tipo de viaje que se esté realizando. Es claro que los resultados de valores fijos considerados aceptables para viajes urbanos que impliquen corta distancia (ej. [1..5km]), no serán los mismos para viajes suburbanos o interdepartamentales donde las distancia son mayores, y holguras urbanas provocarían el descarte innecesario de posibles asignaciones. Visto lo anterior, se busca independizar la aplicación del algoritmo de la distancia de los viajes involucrados, realizando un cálculo dinámico y proporcional del radio de holgura aceptado para determinar la congruencia de orígenes y destinos entre pasajeros y conductores, definiendo la función *holgura* para la congruencia de una posición geográfica de la siguiente manera:

Sea *geopos* una posición geográfica (origen o destino) de un viaje ofrecido v donde:

- $v.origen$ ubicación de origen del viaje georeferenciada
- $v.destino$ ubicación de destino del viaje georeferenciada
- $v.distancia$ es la distancia en kilómetros de la ruta considerada óptima¹⁴ entre origen y destino (obtenida por servicios geográficos en tiempo real).

Se define la función de holgura (*holguraPos*) con respecto a una posición geográfica como:

$$holguraPos(geopos) = v.distancia * radio_holgura_porcentual,$$

con $radio_holgura_porcentual$ en $(0..1)$ predefinido.

Por lo que la función predicado que define la congruencia (*matchingOD*) entre un viaje ofrecido v_p y uno solicitado v_s , queda definida como:

¹⁴ Ruta óptima – Se consideran los factores: distancia y tiempo de una ruta vehicular desde el origen al destino del viaje. Dicha ruta se basa en velocidad promedio, volúmenes de flujo y tráfico estadístico de las calles utilizadas.

$$\text{matchingOD}(v_p, v_s) = \text{distanciaGeo}(v_p.\text{origen}, v_s.\text{origen}) \leq \text{holguraPos}(v_p.\text{origen}) \text{ AND} \\ \text{distanciaGeo}(v_p.\text{destino}, v_s.\text{destino}) \leq \text{holguraPos}(v_p.\text{destino})$$

Donde $\text{distanciaGeo}(a,b)$ es la distancia geodésica en kilómetros (km) entre las posiciones a y b .

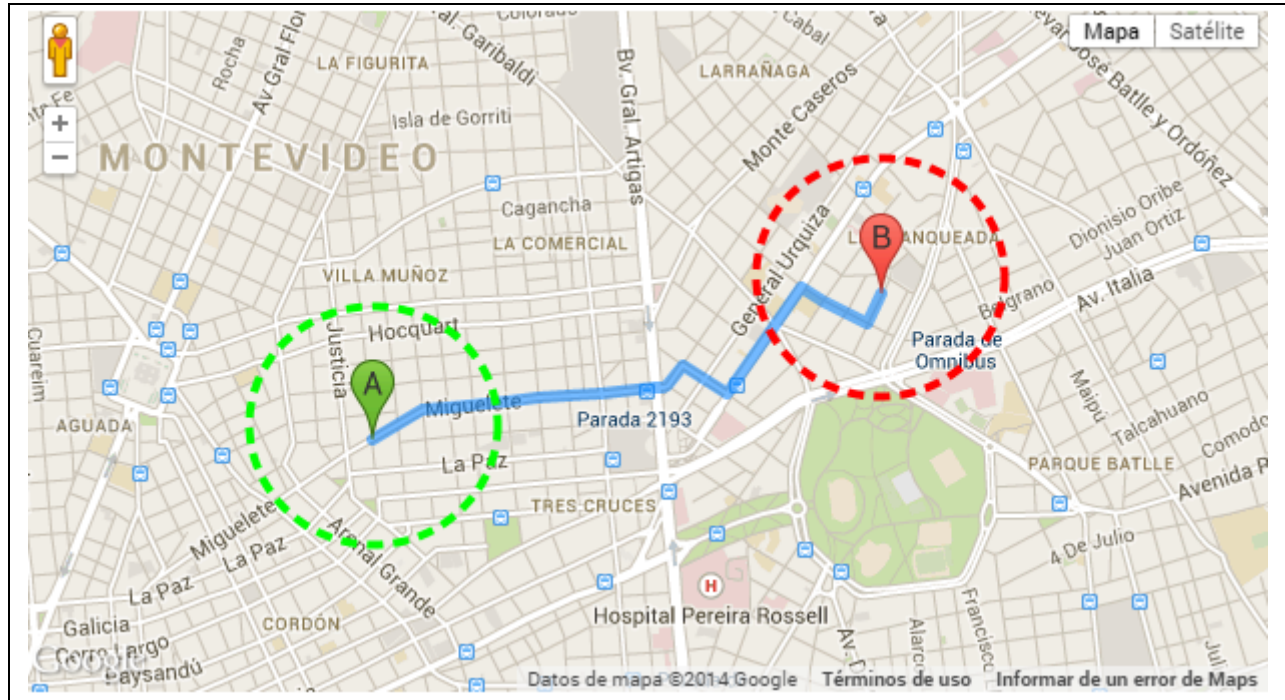


Fig. 22 Representación de los radios de holgura considerados en Origin Destination Matching.

4.2.2.2 Distance Buffer Matching

Esta técnica debe su nombre a la utilización de una zona de aceptación para determinar la congruencia de dos viajes. El término se desprende del estándar de bases de datos geográficas (www.opengeospatial.org) donde se define como “buffer” de una geometría: a la región delimitada por todos los puntos que distan a una distancia distance_buffer dada de la geometría indicada.

En este contexto, la geometría utilizada para modelar la ruta de los viajes corresponde a una polilínea la cual utiliza una secuencia de coordenadas geográficas para definirla. Un conductor que desee ofrecer un viaje será capaz de definirlo geográficamente. De este modo, se utiliza la función geográfica de $\text{buffer } st_buffer(\text{geometry}, \text{radius})$ para delimitar un polígono que enmarque la zona de aceptación a la que podrán distar el origen y destino de un viaje solicitado, es decir, para ser considerado congruente. La frontera del buffer quedará determinada por todos los puntos que disten a distancia radius de la ruta.

Al igual que en la estrategia anterior, de manera que el algoritmo aplique para todo tipo de viajes (urbano, suburbano y larga distancia), es de interés que esta distancia sea porcentual con respecto a la distancia del viaje, de manera de considerar una holgura aceptable en todos los casos. Esta

holgura, representada por polígonos verdes en la Fig. 23, puede ser interpretada como el desvío máximo aceptado por un conductor para realizar un pick-up y/o drop-off de un pasajero. Es importante que este desvío sea proporcional a la distancia y ruta definida de manera que no ocasione costos y retrasos significativos en la ruta original. La técnica de cálculo del buffer de aceptación busca el equilibrio entre el costo de desvío al que debe incurrir un conductor y una distancia sensata que aumente las posibilidades de congruencia con viajes solicitados por pasajeros.

Se define $radius_v$ para un viaje v como:

$$radius_v = v.distance * distancia_buffer_porcentual, \text{ con} \\ distancia_buffer_porcentual \text{ en } (0..1] \text{ predefinido.}$$

Sea $containsGeom(geom1, geom2)$ función de predicado que indica la inclusión de la geometría $geom2$ en $geom1$.

En este caso la función de predicado para indicar la congruencia de viajes se define como:

$$matchingDB(v_p, v_s) = containsGeom(st_buffer(v_p, radius_{v_p}), v_s.origen) \text{ AND} \\ containsGeom(st_buffer(v_p, radius_{v_p}), v_s.destino)$$

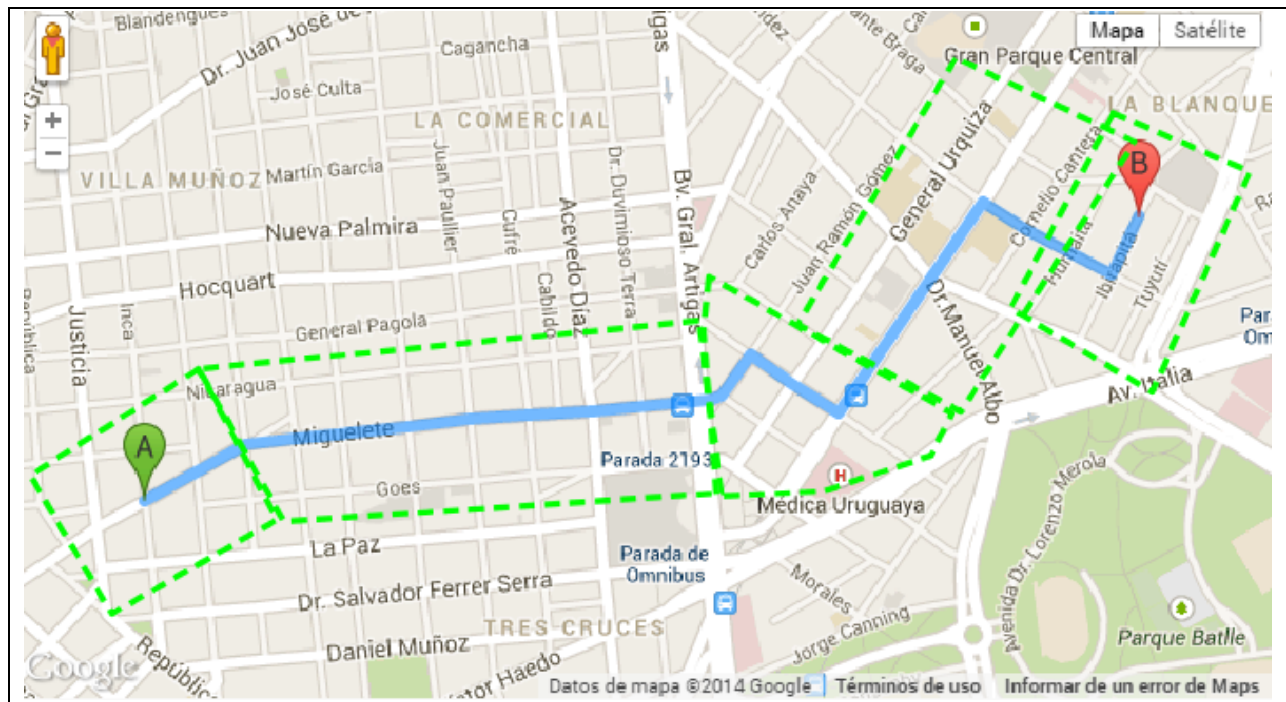


Fig. 23 Representación gráfica de la región de holgura (buffer) considerado en Distance Buffer Matching.

4.2.3 Cobro

Asumiendo que el servicio a implementar es sin fines de lucro, se buscará la compensación de los costos de manera equilibrada y omitiendo comisiones a los participantes, procurando ofrecer un servicio atractivo para todas las partes. Del planteo anterior y considerando los actores y costos del viaje, los costos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Costo exclusivo de pasajero:** Representa el costo exclusivo del pasajero en concretar un viaje. En este modelo se considera pick-up y drop-off del pasajero en las posiciones fijas y predefinidas por éste, descartando o ignorando los costos de arribo a la posición de pick-up, y/o siguientes al drop-off para arribar a su destino final.
- **Costo exclusivo de conductor:** Representa el costo exclusivo del conductor en concretar un viaje. Se considera todo el trayecto en que el conductor sigue su ruta original, realizando el viaje como si no estuviera compartido, por lo que asume el costo total.
- **Costo compartido:** Representa el costo compartido durante un viaje por los participantes. En este caso se considera kilometraje compartido y desgaste del vehículo incurrido por ese recorrido. La repartición de este costo se supone opera en beneficio de ambas partes, maximizar este valor es uno de los objetivos del servicio.
- **Costo adicional (overhead) de conductor:** Representa el costo exclusivo en el que debe incurrir un conductor para realizar el pick-up y drop-off de un pasajero. En este se incluirán por ejemplo, el kilometraje recorrido del desvío con respecto a su ruta original para levantar (pick-up) al pasajero.

Se propone una fórmula para la repartición de los costos compartidos y adicionales que distribuye los costos incurridos por los desvío para compartir el viaje y los kilómetros de viaje compartidos propiamente dichos.

El monto calculado es notificado a los participantes bajo modalidad de “costo sugerido máximo” dando libertad al uso y acuerdo entre partes que pudieran entender conveniente ajustarlo por motivos particulares o no contemplados en esta solución.

Para el cálculo del costo se consideran:

- $kmCompartidos(v_p, v_s)$ – Cantidad de kilómetros compartidos en el viaje compuesto por (v_p, v_s)
- $kmDesvío(v_p, v_s)$ – Cantidad de kilómetros adicionales para el conductor en el viaje compuesto por (v_p, v_s)
- $costoDesgasteKm$ – Costo de desgaste promedio de un vehículo por kilómetro recorrido.

- *costoCombustibleKm* – Costo promedio del combustible de un vehículo por kilómetro recorrido.
- *costoOperativoKm(km)* – Costo operativo total del vehículo para la cantidad *km* de kilómetros

$$\text{costoOperativoKm}(km) = km * \text{costoDesgasteKm} * \text{costoCombustibleKm}$$

- *costoKmCompartido(v_p, v_s)* - Costo total del kilometraje compartido por los viajes *v_p*, *v_s*

$$\text{costoKmCompartido}(v_p, v_s) = \text{costoOperativoKm} * \text{kmCompartidos}(v_p, v_s)$$

- *costoDesvioPonderado* - Cuantificación en costo considerando distancia y tiempo del desvío de la ruta original para realizar el pick-up y drop-off.

$$\text{costoDesvioPonderado}(v_p, v_s) = \text{costoTiempo} * \text{tiempoDesvio}(v_p, v_s) +$$

$$\text{kmDesvio}(v_p, v_s) * \text{costoOperativoKm}$$

siendo *costoTiempo* una ponderación de costo por unidad de tiempo.

Sea *rep_OverHead_i* en [0..1] el factor de repartición del costo adicional (overhead) que implica para el participante *i* (conductor o pasajero) compartir el viaje *v_s*, y análogamente *rep_Shared_i* en [0..1] el factor de repartición de costos compartidos. Considerando que todos los costos deben ser cubiertos en su totalidad entre ambos participantes se cumple:

- $\text{rep_OverHead}_{conductor} = 1 - \text{rep_OverHead}_{pasajero}$
- $\text{rep_Shared}_{conductor} = 1 - \text{rep_Shared}_{pasajero}$

Se define a continuación como parte de la solución propuesta, la función de costo compartido por los viajes *v_p* y *v_s* para el participante *i* como:

$$\text{sharedRideCost}_i(v_p, v_s) = \text{rep_Shared}_i * \text{costoKmCompartido}(v_p, v_s) * + \\ \text{rep_OverHead}_i * \text{costoDesvioPonderado}(v_p, v_s)$$

4.2.4 Despliegue de la Aplicación

La aplicación se basa en una arquitectura cliente-servidor. Se define el uso de dispositivos móviles (*smartphone*) para el despliegue de la aplicación cliente. Mediante ésta se realizará la autenticación de participantes, acceso a la información e ingreso de solicitudes u ofertas de viajes por parte de estos, buscando aprovechar las ventajas propias de la plataforma móvil como se plantean en la Sección 2.4.1. De todos modos, el diseño no limitará al uso de otras interfaces

para el acceso a las funcionalidades ofrecidas por el servidor bajo modalidad API¹⁵, previendo facilidad para su integración mediante la implementación de interfaces a servicios web (*web services*¹⁶). Las solicitudes recibidas serán evaluadas por el servicio de *matching* centralmente, para luego realizar las eventuales notificaciones de asignaciones candidatas o búsqueda inmediata dependiendo del servicio que se desee.

4.3 Desarrollo de Solución

4.3.1 Requerimientos

En esta Sección se detallan los principales requerimientos considerados para el desarrollo de la solución. El alcance y funcionalidades han sido seleccionadas y restringidas considerando esfuerzo, tiempos y mantenibilidad para eventuales extensiones futuras de manera de poder concluir el proyecto con la implementación de un prototipo 100% funcional y operativo que permita realizar una prueba de concepto en un caso real y significativo.

4.3.1.1 Alcance

El alcance de la solución incluye el desarrollo de un sistema para la especificación de pedidos y ofertas de viajes bajo modalidad de *ridesharing* y *carpooling*. El sistema incluye la implementación de un servicio de asignación (*matching*) entre los usuarios participantes que interactuarán con el sistema mediante una aplicación cliente desde dispositivos móviles (*smartphones*). Dicho sistema brindará las funcionalidades de registro, solicitud, provisión y gestión de estados de los viajes y coordinación de manera de proveer un servicio de *matching* que facilite y fomente *ridesharing* y *carpooling*.

4.3.1.2 Requerimientos Funcionales

En esta Sección se describen los principales casos de uso que deberán ser provistos por el servicio y su interacción con los principales actores definiendo a:

- *Requester*: Pasajero que solicita un viaje
- *Provider*: Conductor que ofrece un viaje
- *Carpool*: Servicio de *matching*

El conjunto de casos de uso aquí presentados cubren el ciclo de publicación y asignación de viajes entre los participantes así como funcionalidades propias de gestión de usuarios y notificaciones a estos.

15 API - La interfaz de programación de aplicaciones, abreviada como API (del inglés: Application Programming Interface), es el conjunto de subrutinas, funciones y procedimientos (o métodos, en la programación orientada a objetos) que ofrece cierta biblioteca para ser utilizado por otro software como una capa de abstracción.

16 Web Services - Un servicio web es una tecnología que utiliza un conjunto de protocolos y estándares que sirven para intercambiar datos entre aplicaciones. Distintas aplicaciones de software desarrolladas en lenguajes de programación diferentes, y ejecutadas sobre cualquier plataforma, pueden utilizar los servicios web para intercambiar datos en redes como Internet. <http://www.w3schools.com/webservices>

4.3.1.2.1 Diagrama de Casos de Uso

El Diagrama de Casos de uso de la Fig. 24 muestra los principales requerimientos funcionales del sistema delimitando la frontera del sistema a desarrollar e interacción con los actores.

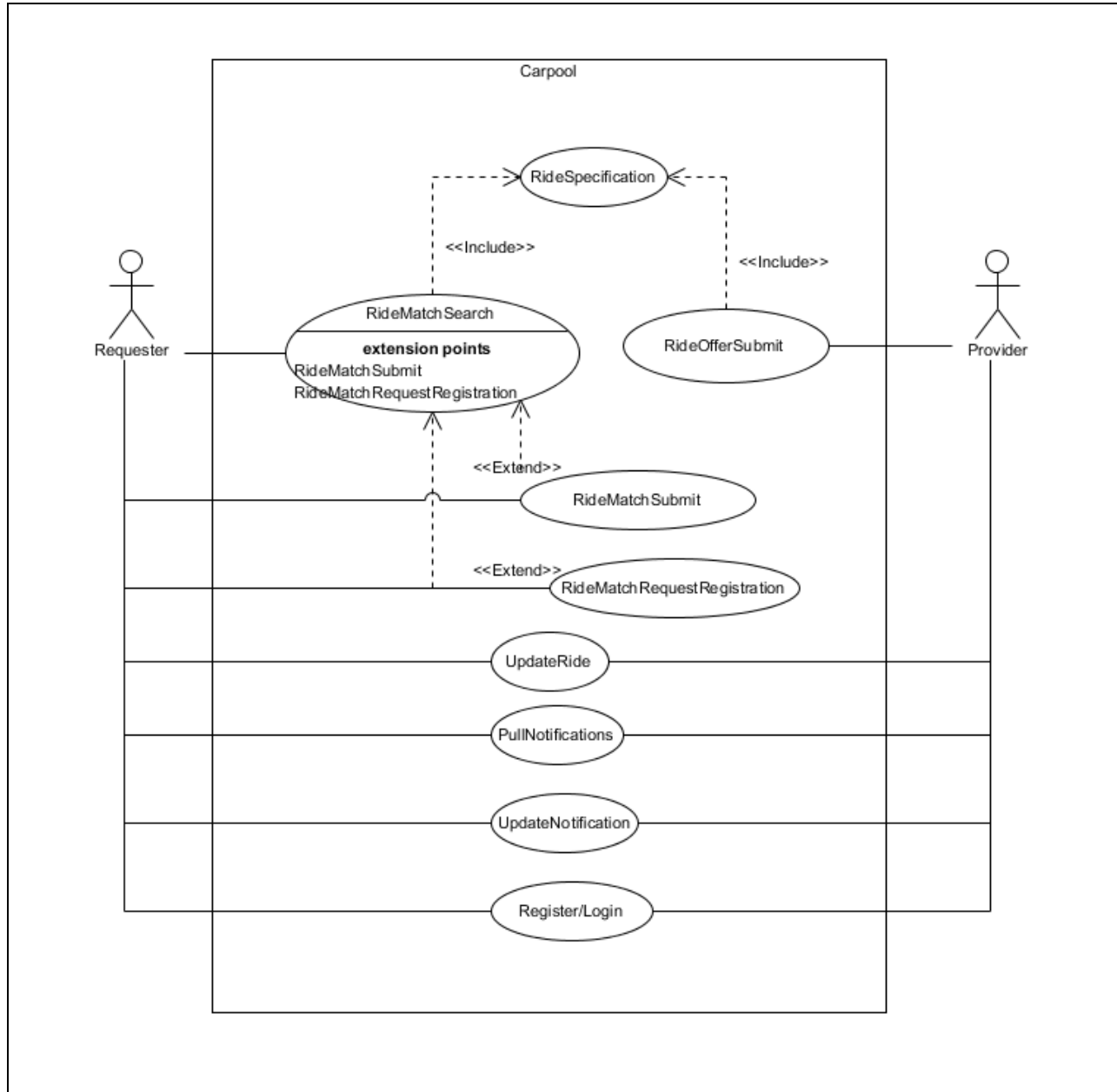


Fig. 24 Diagrama de Casos de Uso.

4.3.1.2.2 Descripción de Casos de Uso

En esta Sección se describen los casos de uso planteados definiendo el comportamiento esperado para cada uno de ellos, especificando así los requerimientos funcionales principales.

Nombre	Registro de Usuario
Descripción	<p>Los usuarios podrán registrarse al sistema ingresando sus datos personales, se utilizará como nombre de usuario una dirección de correo ingresada. Se ingresan los datos personales básicos y requeridos se incluyen: correo, nombre completo, fecha de nacimiento, sexo, teléfono.</p> <p>En caso de querer participar con rol de conductor, el usuario podrá especificar los detalles de su vehículo incluyendo, marca, modelo y comentarios.</p> <p>Opcionalmente el usuario podrá subir una imagen de perfil y en caso de querer ofrecer viajes podrá especificar los datos de su vehículo.</p>
Pre-condición	No existe un usuario en el sistema con el mismo correo que el utilizado para el registro.
Pos-condición	Se da de alta un nuevo usuario con los datos ingresados realizando las validaciones de unicidad de correo y notificaciones correspondientes.

Nombre	Ingreso de Usuario
Descripción	<p>Un usuario deberá ser capaz de ingresar al sistema mediante la especificación de su usuario (correo) y contraseña. Una vez ingresado, podrá visualizar funcionalidades y registros personales.</p> <p>Opcionalmente en caso de recibir errores de autenticación podrá realizar la solicitud de nueva contraseña.</p>
Pre-condición	El usuario que desea ingresar ya está registrado en el sistema.
Pos-condición	El usuario ingresa al sistema generando una sesión única por dispositivo utilizado.

Nombre	Especificación de Viaje
Descripción	<p>El usuario deberá ser capaz de especificar los detalles del viaje ya sea para búsqueda o provisión. Para ello se requiere definir: origen, destino, ruta (si corresponde), fecha y hora. Opcionalmente podrá cambiar las opciones por defecto para la cantidad de asiento o preferencias particulares (ej. comentarios).</p>
Pre-condición	Existe una sesión de usuario válida.
Pos-condición	N/A

Nombre	Búsqueda de Viajes
Descripción	<p>Luego de la especificación del viaje, el usuario podrá ejecutar la búsqueda de viajes provistos (registrados) que sean candidatos para compartir el vehículo siguiendo los criterios de congruencia definidos por el servicio, ej. proximidad origen, destino, fecha, etc.</p> <p>Una vez realizada la búsqueda el sistema retornará una lista de todos los viajes coincidentes para que el usuario pueda analizar la oferta en detalle.</p>
Pre-condición	Se realizó la especificación del viaje deseado por el usuario.
Pos-condición	N/A

Nombre	Registro de Ofrecimiento de Viaje
Descripción	<p>Luego de realizada la especificación del viaje deseado, el usuario podrá registrarlo en el sistema quedando disponible para la búsqueda de posibles pasajeros.</p> <p>Una vez enviados los datos del viaje y registrado en el sistema, se notificará al usuario sobre el éxito de la operación.</p>
Pre-condición	El usuario realizó la especificación del viaje deseado.
Pos-condición	Se registra el viaje especificado quedando con estado disponible para la recepción de solicitudes.

Nombre	Solicitud de Viaje
Descripción	Luego de realizada la búsqueda el usuario podrá enviar una solicitud para el viaje deseado. El sistema procesará la solicitud enviando las notificaciones correspondientes.
Pre-condición	El usuario ha seleccionado un viaje provisto (registrado).
Pos-condición	Se genera una solicitud de viaje entre el usuario solicitante y el usuario que ofrece el viaje. Se realiza el envío de notificaciones correspondientes (solicitud enviada, solicitud recibida).

Nombre	Actualización de Solicitud de Viaje
Descripción	El usuario podrá visualizar un listado de sus solicitudes o publicaciones de viajes ofrecidos para consultar los detalles o realizar modificaciones (ej. cancelar).
Pre-condición	Existe una sesión de usuario válida. El usuario tiene al menos un viaje solicitado o registrado sobre el cuál puede realizar acciones.
Pos-condición	En caso que desee cambiar el estado de la solicitud, la solicitud cambiará de estado de acuerdo a la acción realizada y el sistema enviará las notificaciones correspondientes.

Nombre	Publicación de Viaje
Descripción	Luego de especificado el viaje el usuario podrá seleccionar la acción de publicarlo. Una vez enviado el sistema procesará el los datos e informará al usuario sobre el éxito de la operación.
Pre-condición	El usuario realizó la especificación del viaje deseado.
Pos-condición	Se registra en el sistema el viaje enviado por el usuario como disponible para realizar asignaciones de pasajeros.

Nombre	Actualización de Viajes
Descripción	El usuario podrá visualizar sus viajes ofrecidos (publicados) mediante un listado y acceder al detalle de este para eventualmente realizar cambios (ej. cancelar). Si el usuario desea cancelar un viaje publicado, el sistema procesa la solicitud y realiza el cambio enviando las notificaciones correspondientes.
Pre-condición	Existe al menos un viaje publicado para el usuario ingresado.
Pos-condición	Si el usuario realizó una actualización del estado del viaje la misma se registra en el sistema enviando las notificaciones correspondientes.

Nombre	Consulta de Notificaciones de Usuario
Descripción	El usuario podrá consultar las notificaciones referentes a las solicitudes y asignaciones de sus viajes. Las notificaciones se discriminarán de acuerdo a su estado de lectura pueden ser: leída o no leída. Al acceder al detalle de una notificación particular, la misma pasará a considerarse como leída y el usuario podrá visualizar los detalles y las acciones sobre notificaciones o viajes pertinentes.
Pre-condición	Existe una sesión de usuario válida.
Pos-condición	Si la notificación no estaba leída pasa a estado leída.

Nombre	Actualización de Notificación de Usuario
Descripción	El usuario será capaz de actualizar el estado de las notificaciones mediante la selección de las acciones que apliquen (ignorar, confirmar, eliminar).
Pre-condición	Existe una notificación pendiente de acción para el usuario ingresado.
Pos-condición	La notificación cambia su estado dependiendo de la acción seleccionada por el usuario.

4.3.1.2.3 Diagrama de Estados de una Solicitud

El diagrama de estado presentado en la Fig. 25 muestra el ciclo de vida de una solicitud y las posibles transiciones entre sus estados.

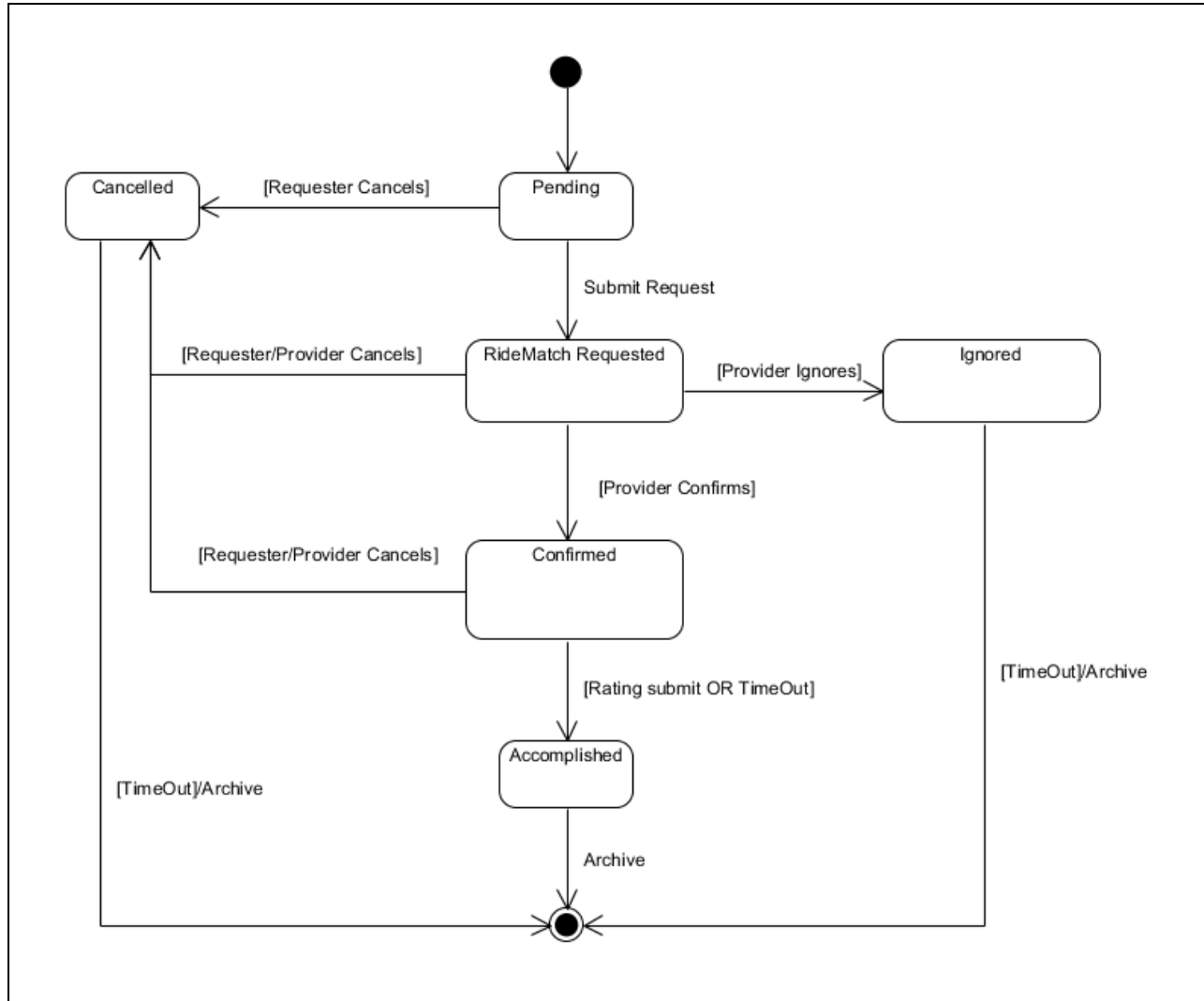


Fig. 25 Diagrama de estados de una solicitud de viaje

4.3.1.3 Requerimientos No Funcionales

4.3.1.3.1 Seguridad

Deben considerarse los siguientes factores:

- Autenticación: Asegurarse que el usuario es realmente quien dice ser.
- Autorización: Comprobar que el usuario tiene permiso para realizar determinada acción.
- Encriptación: Asegurarse que los datos viajen de forma segura, sin que puedan ser interpretados por intermediarios.

4.3.1.3.2 Usabilidad

La usabilidad de la aplicación móvil se convierte en un aspecto crítico ya que se trata de una aplicación concebida para su adopción masiva.

4.3.1.3.3 Desempeño

Debe considerarse que se busca implementar un servicio dinámico capaz de realizar procesamiento y asignaciones en tiempo real.

4.3.1.3.4 Escalabilidad

Se trata de un servicio masivo cuya escalabilidad es un aspecto relevante a considerar. Pese a que escapa al alcance de este proyecto, se prevé un mecanismo de balanceo de carga por región geográfica buscando distribuir la demanda. La previsión es que las solicitudes puedan agruparse en distintos nodos por región de manera que el dominio de búsqueda de viajes coincidentes pueda realizarse por región.

4.3.2 Implementación

En esta Sección se incluyen los aspectos y diseños sobre los cuales se monta el servicio.

4.3.2.1 Diseño

La Fig. 26 muestra el diagrama de secuencia del sistema para el flujo principal de búsqueda y asignación de un viaje. En esta secuencia se parte de la base de la existencia de uno o más viajes congruentes con el buscado y sus posteriores pasos para la notificación al solicitante que hacen al caso de uso principal del servicio.

4.3.2.1.1 Diagrama de Secuencia de Solicitud

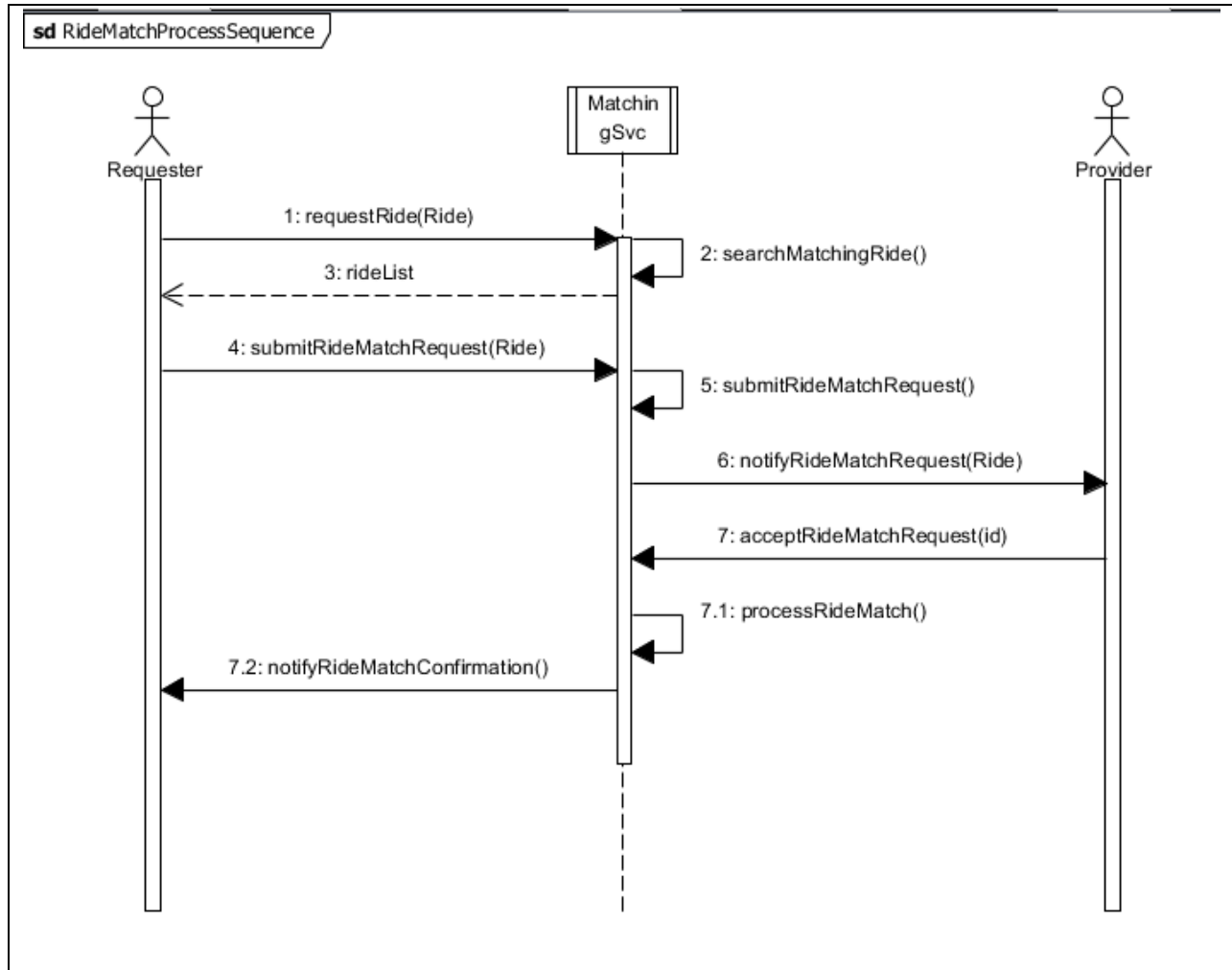


Fig. 26 Diagrama de secuencia de una solicitud de viaje

4.3.2.1.2 *Diagrama de Componentes*

La Fig. 27 muestra el diagrama de componentes en UML del sistema, se detallan sus interfaces y puntos de integración así como la frontera de cada uno de los componentes del sistema. La integración.

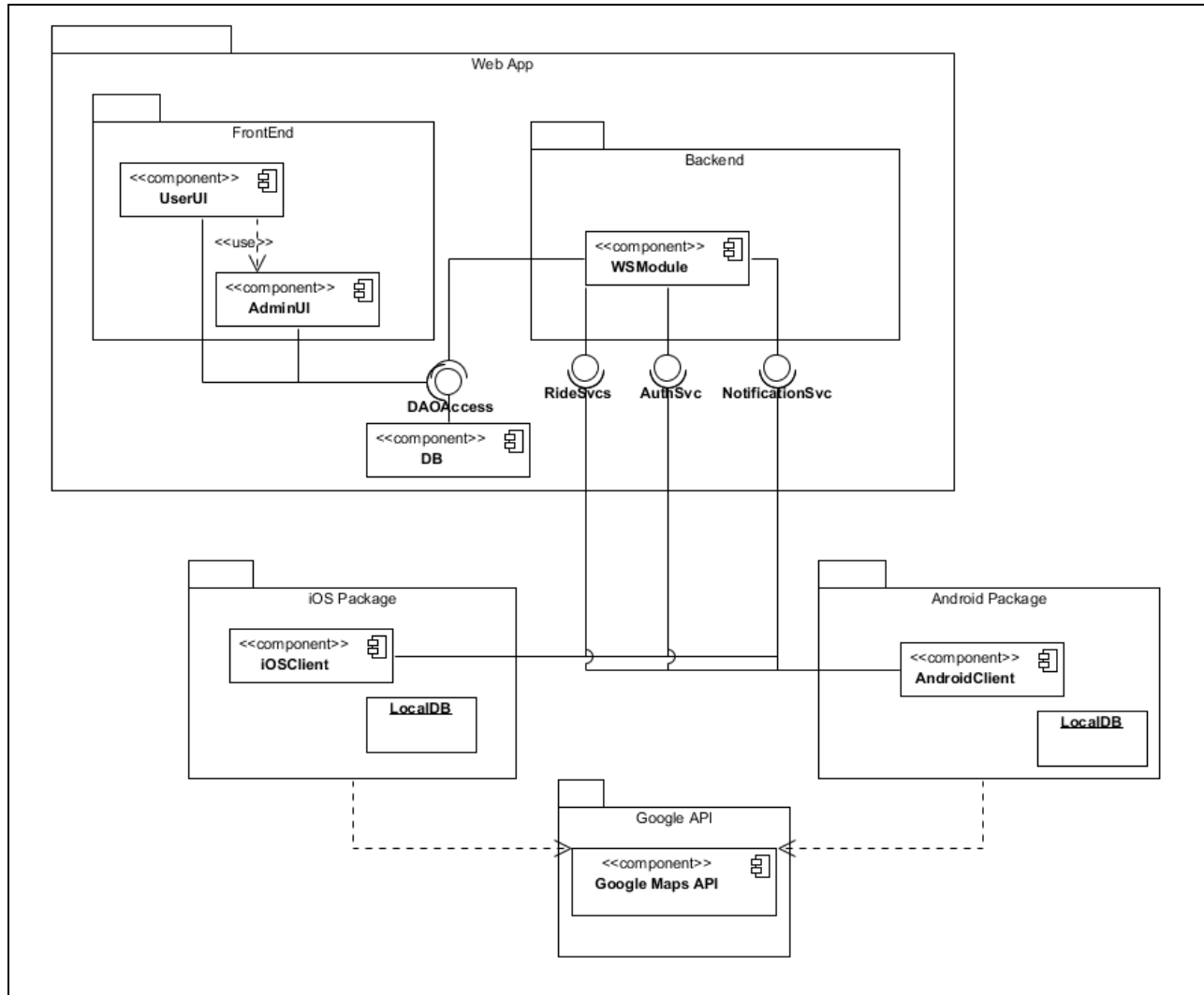


Fig. 27 Diagrama de componentes

4.3.2.1.3 Diagrama de Despliegue

En la Fig. 28 se muestran los principales componentes de la propuesta contemplando una arquitectura cliente servidor que se integran mediante la utilización de servicios web. El componente principal (Web App) es quién provee las funcionalidades del servicio apoyándose en un servidor de base de datos geográfica. Por otro lado se prevé la integración de múltiples clientes además de los presentados en esta caso (iOS, y Android) que podrán hacer uso de la misma interfaz que éstos consumen para la gestión del servicio.

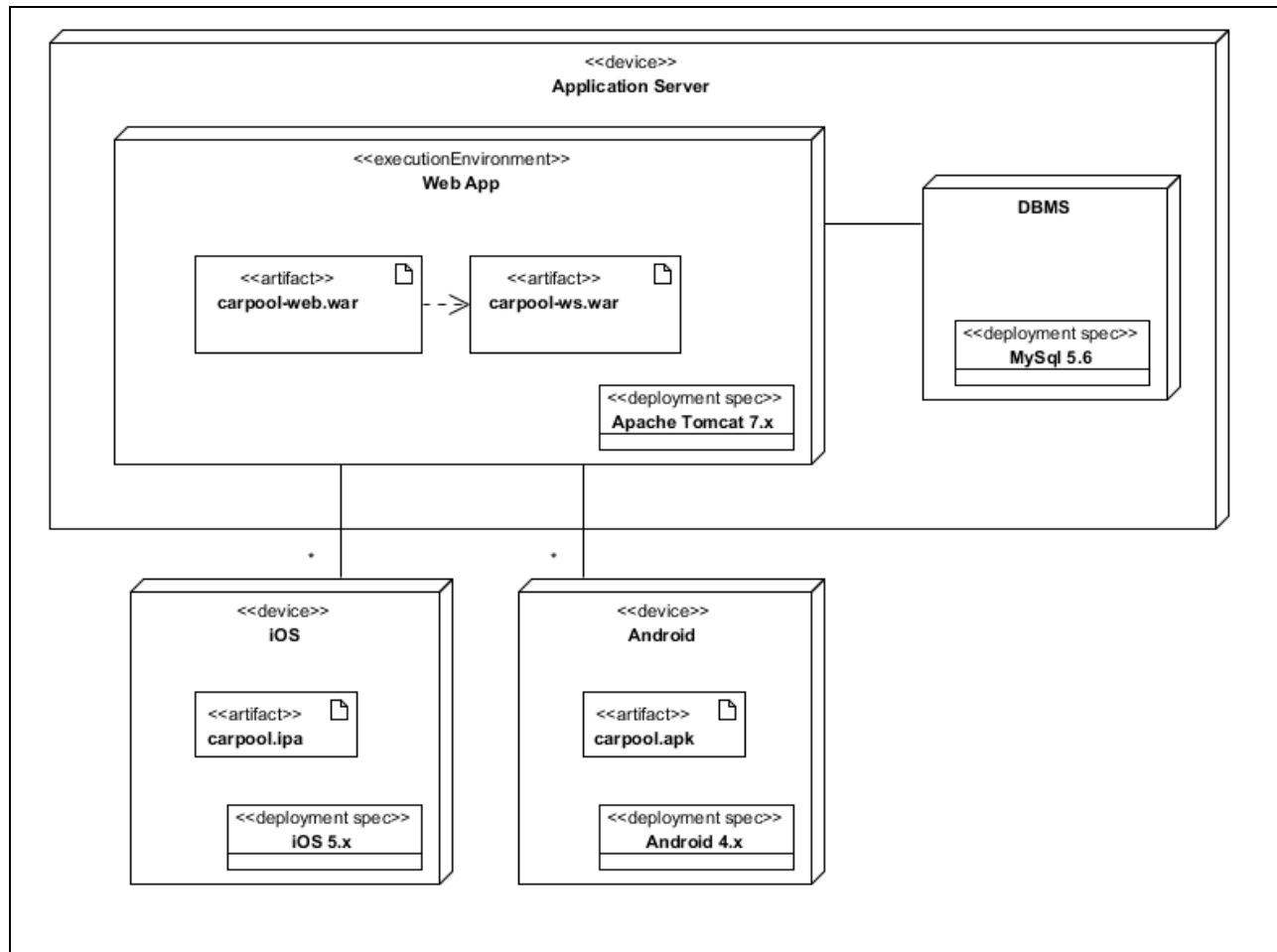


Fig. 28 Diagrama de despliegue

4.3.2.2 Plataformas, Lenguajes y Tecnologías

En esta Sección se presentan las decisiones tecnológicas tomadas para la implementación de los distintos componentes. La Fig. 29 muestra un mapeo de tecnologías utilizadas en los distintos componentes.

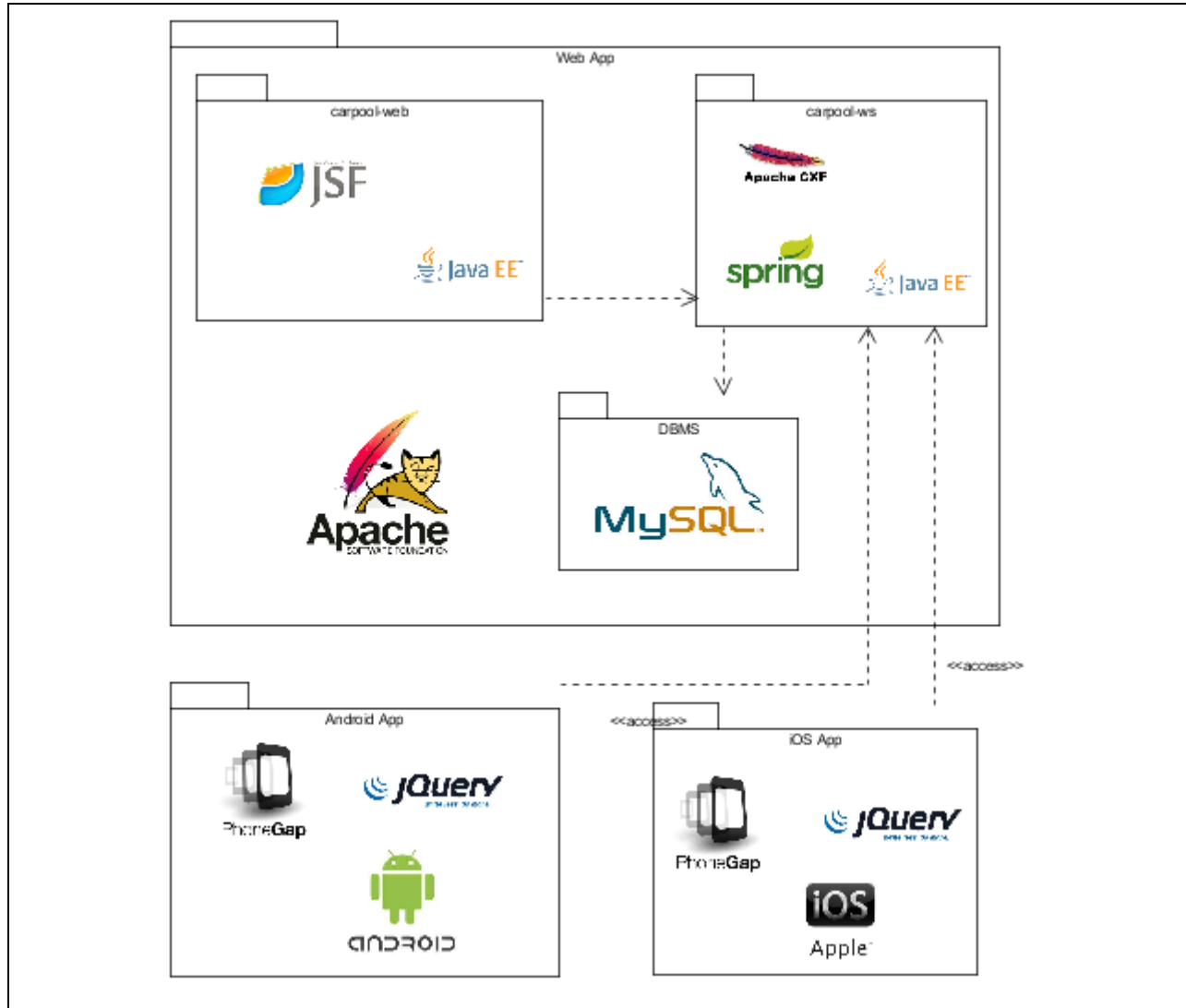


Fig. 29 Diagrama de distribución de las Tecnologías utilizadas

4.3.2.2.1 Application Server

Se utiliza [Apache Tomcat 7.0](#) como servidor de aplicaciones incluyendo la extensión de soporte a servicios web REST¹⁷ mediante [CXF](#) (implementación REST para Apache Tomcat). La plataforma de desarrollo para todo lo que involucra el backend será Java EE utilizando JSF para

¹⁷ Estos servicios se diferencian de una forma importante de los servicios web SOAP con los que hemos trabajado . REST (Representational State Transfer) es un estilo de arquitectura para desarrollar servicios

las interfaces y Spring como bibliotecas para el manejo de objetos y mapeo relacional a la base de datos.

Web App

La aplicación web está formada de dos componentes principales y un auxiliar de gestión:

- carpool-ws: Contiene y expone en modalidad API los Servicios web.
- carpool-web: Interfaz web para la consulta y gestión de viajes con acceso restringido al administrador.

DBMS

Se utiliza [MySQL 5.6 Community Edition](#) como servidor de base de datos. Esta versión es la primera que ofrece soporte a [OpenGIS](#) de manera de explotar todas las funcionalidades de bases de datos geográficas que serán utilizadas para algunas de las técnicas de cálculo de congruencia entre viajes.

Google API

Google APIs es un conjunto de interfaces de programación provista por Google Inc que permite hacer uso de distintos servicios. Para la solución propuesta se hace uso de Google Maps API (<https://developers.google.com/maps/>) para la obtención de rutas óptimas considerando los flujos de tráfico y estimaciones de tiempo en materia de viajes.

4.3.2.2 App Mobile

Dada la distribución actual del mercado de dispositivos móviles presentada en la Fig. 30 y considerando que uno de los factores de éxito en la implantación de este servicio es el uso masivo hará foco en la construcción del prototipo de aplicación móvil sobre la plataforma Android. De todos modos el diseño y herramientas permiten la generación de aplicaciones móviles en las demás plataformas.

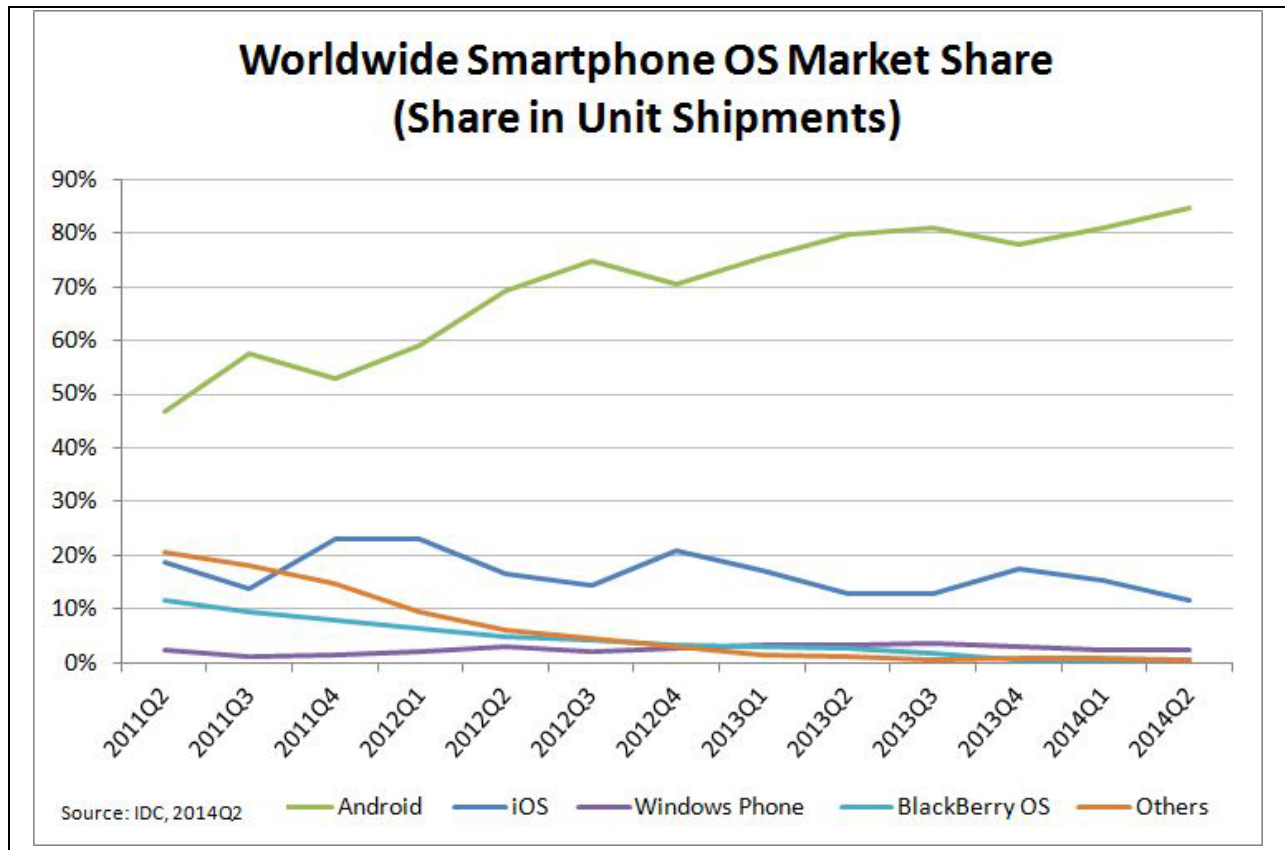


Fig. 30 Distribución de Mercado de Dispositivos Móviles por Sistema Operativo (IDC, 2015)

Android

Se realizará la compilación de una aplicación para la plataforma Android 4.2+ para su distribución en dicha plataforma.

iOS

Se prevé la compilación de una aplicación iOS 5.0+ para su distribución, la evaluación en esta plataforma escapa el alcance del proyecto.

4.3.2.3 Herramientas

Eclipse IDE

Se utiliza Eclipse Kepler como IDE¹⁸ con las correspondientes extensiones/plugins para desarrollo web JSF, Spring y Android Developer Tools.

PhoneGap

¹⁸ IDE - Un ambiente de desarrollo integrado o entorno de desarrollo interactivo, en inglés Integrated Development Environment (IDE), es una aplicación informática que proporciona servicios integrales para facilitarle al desarrollador o programador el desarrollo de software.

PhoneGap es un *framework* para el desarrollo de aplicaciones móviles producido por Nitobi, y comprado posteriormente por Adobe Systems. Principalmente, PhoneGap permite desarrollar aplicaciones para dispositivos móviles utilizando herramientas genéricas tales como JavaScript, HTML5 y CSS3. Las aplicaciones resultantes son híbridas, es decir que no son realmente aplicaciones nativas al dispositivo (ya que la creación de la interfaz se realiza mediante vistas web y no con interfaces gráficas específicas de cada sistema), Tampoco se consideran aplicaciones web ya que son empaquetadas para poder ser desplegadas en el dispositivo móviles haciendo uso de funcionalidades provistas por el sistema nativo.

En la tercera versión de PhoneGap (utilizada en este proyecto) se incorpora el uso de una interfaz de comandos a través de consola, una nueva arquitectura de complementos descentralizados y la posibilidad de utilizar un código web unificado para crear múltiples proyectos.

PhoneGap maneja distintas API que permiten tener acceso a elementos como el acelerómetro, la cámara, los contactos en el dispositivo, la red, el almacenamiento, las notificaciones, etc. Estas API se conectan al sistema operativo usando el código nativo del sistema huésped a través de una Interfaz de funciones foráneas en Javascript.

El factor principal por el cual se optó por el uso de este *framework*, es la posibilidad de reducir los costos de desarrollo y acelerar la construcción del prototipo.

jQuery

jQuery es una biblioteca de JavaScript que permite simplificar la manera de interactuar con los documentos HTML, manipular el árbol DOM¹⁹, manejar eventos, desarrollar animaciones y agregar interacción con la técnica AJAX a páginas web. Se caracteriza por consistir en un único archivo JavaScript que contiene las funcionalidades comunes de DOM, eventos, efectos y AJAX. Una de las características principales, es que permite cambiar el contenido de una página web sin necesidad de recargarla, mediante la manipulación del árbol DOM y peticiones AJAX. Para ello utiliza las funciones `$()` o `jQuery()`.

Principales Características

- Selección de elementos DOM.
- Interactividad y modificaciones del árbol DOM, incluyendo soporte para CSS 1-3 y un plugin básico de XPath.
- Eventos, AJAX
- Manipulación de la hoja de estilos CSS.

¹⁹ DOM - DOM o Document Object Model es un conjunto de utilidades específicamente diseñadas para manipular documentos XML. Por extensión, DOM también se puede utilizar para manipular documentos XHTML y HTML. Técnicamente, DOM es una API de funciones que se pueden utilizar para manipular las páginas XHTML de forma rápida y eficiente.

- Efectos y animaciones personalizadas.
- Soporta extensiones.
- Utilidades varias como obtener información del navegador, operar con objetos y vectores, funciones para rutinas comunes, etc.
- Compatible con los navegadores Mozilla Firefox 2.0+, Internet Explorer 6+, Safari 3+, Opera 10.6+ y Google Chrome 8+.

5. Evaluación y Análisis

En este Capítulo se realiza la evaluación y análisis en un ambiente controlado apoyado por la simulación de la realidad. Se realizará una presentación y evaluación de los aspectos teóricos y prácticos propuestos, fundamentando los resultados obtenidos mediante el análisis de las distintas medidas definidas.

Para la evaluación de la propuesta se plantea un conjunto de casos de estudio que abarcan las distintas modalidades de ridesharing donde se evaluarán los dos aspectos principales, la asignación de *matching* entre viajes ofrecidos y solicitados, y la distribución de costos sugerida. Cabe recordar que para todos los casos se utiliza la modalidad descrita en los requerimientos definidos en la Sección 4.3.1 para el diseño de una solución donde se buscará la asignación de un viaje entre dos participantes: conductor y pasajero. Este caso representa el peor caso de esta modalidad (en términos de potenciales ahorros de costos totales) dado que el sistema permitiría realizar la asignación de más de un pasajero considerando los vehículos actuales. Es de interés evaluar dicho caso particularmente, ya que su extensión a incluir múltiples pasajeros podría escalar con una lógica análoga y así poder obtener mayor eficiencia del recurso vehículo.

Desde el punto de vista de evaluación del software, todas las ejecuciones de los casos son sometidas a validación técnica mediante el cálculo simulado de los valores obtenidos y verificación funcional y visual de los resultados generados.

La metodología de evaluación considerará todos los resultados de asignación y costos obtenidos para todos los casos de *detour* e *identical* ridesharing abarcando todas las categorías de viajes en materia de distancia. Presentados los casos se realizará el análisis de los algoritmos de matching propuestos en la Sección 4.2.2 para el servicio. Luego en base a los resultados de costos obtenidos, se realizará el análisis de la propuesta de repartición de costos planteada en la Sección 4.2.3. Finalmente se evaluarán los aspectos de usabilidad de la aplicación móvil para la coordinación de viajes entre participantes.

5.1 Casos de Estudio

Los casos de estudio presentados se basan en la ciudad de Montevideo y la región, y son catalogados de dos maneras distintas considerando la distancia recorrida y el tipo de viaje compartido. Si bien el servicio cubre las cuatro modalidades definidas en la Sección 4.1.3, a modo de simplificación se presentan los casos extremos: *identical* y *detour*. El primer término de la codificación utilizada se corresponde con las iniciales de las siguientes categorías de distancia: Corta Distancia (CD), Media Distancia (MD), Larga Distancia (LD), Muy Larga Distancia (MLD). Análogamente los tipos de viajes son identificados como: Desvío (*detour ridesharing*), Idéntico (*identical ridesharing*). A su vez se consideran los desvíos necesarios para compartir el viaje considerando los puntos de *pick-up* y *drop-off* del pasajero. Se realizaron pruebas con

distintos valores de desvío, presentando lo que se considera como peor caso aceptable de desvío: es decir hasta un 30% de la distancia recorrida por el conductor. La Tabla 2 presenta las distancias correspondientes a cada uno de los casos.

Código de Caso	Distancia Total(mts)	Distancia Compartida(mts)	Distancia de Desvío (mts)
CD-DE	2.600	2.000	600
CD-ID	3.000	3.000	0
MD-DE	6.500	5.000	1.500
MD-ID	10.000	10.000	0
LD-DE	65.000	50.000	15.000
LD-ID	100.000	100.000	0
MLD-DE	650.000	500.000	150.000
MLD-ID	1.000.000	1000.000	0

Tabla 2. Detalle de Distancias para Casos de Análisis

5.1.1 Demostración de Asignación de Viajes

En esta Sección se realiza la presentación del comportamiento de la asignación de viajes, presentando una vista gráfica (mapa) particularmente para los casos que involucran desvío. Este es el objeto de interés, ya que la asignación sin desvío resulta inmediata y calculable mediante la propia lógica de asignación planteada en la modalidad OD Matching en la Sección 5.1.4.2.1. Por lo que para el relevamiento de la asignación es de interés principal considerar casos en que exista desvío y se deba utilizar la modalidad *Distance Buffer Matching* propuesta en la sección. 5.1.3.2.2. Para los viajes originales de conductores se utilizan los marcadores A y B los cuales indican las posiciones georeferenciadas de origen y destino del viaje. Para viajes compartidos se utilizarán 4 marcadores (A, B, C y D) que refieren respectivamente a: origen del conductor, origen de pasajero (*pick-up*), destino de pasajero (*drop-off*) y destino del conductor. En todos los casos se representa la ruta utilizada para realizar los cálculos mediante segmentos consecutivos azules los cuales trazan el recorrido del conductor acorde al sentido y distribución de las calles. Esta ruta determina la distancia recorrida sobre la cual se basan los cálculos del algoritmo de *Distance Buffer Matching*.

Para cada uno de los casos presentados en las Fig. 29 a la Fig. 40, se toma un ejemplo representativo del conjunto de pruebas utilizado para validar la estrategia. Se incluirá una vista gráfica junto con las coordenadas geográficas de los puntos de interés a modo de referencia. La diferencia de costos para cada uno de estos será presentada en la Sección 5.1.2 particularmente.

5.1.1.1 *CD-DE Corta Distancia con Desvío*

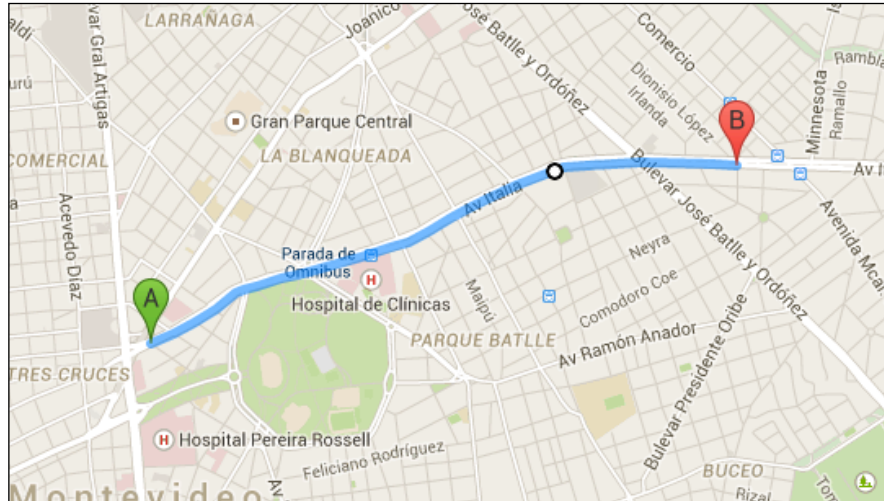


Fig. 31 CD-DE Viaje Original

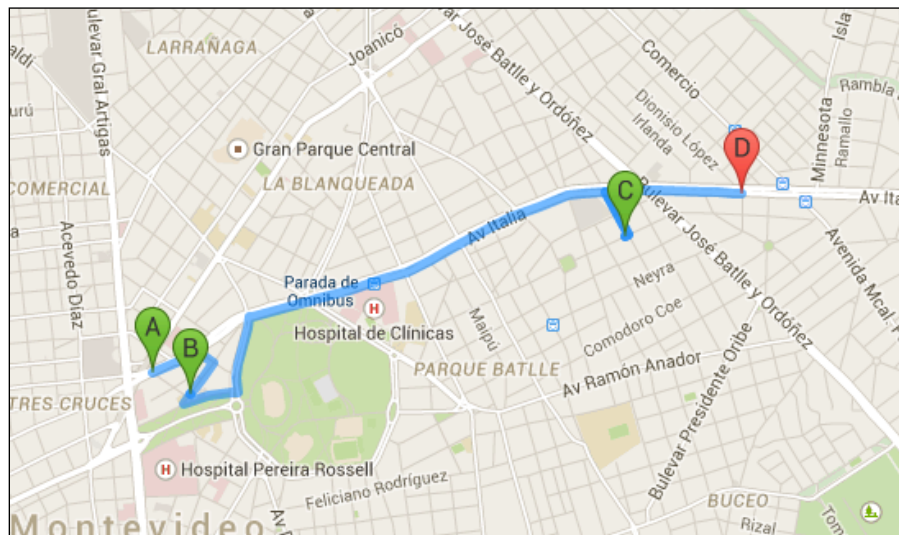


Fig. 32 CD-DE Viaje Compartido

Marcador	Lng	Lat
Origen	-56.161646299	-34.8954147
Pick-up	-56.1636785	-34.8945113
Drop-off	-56.1389011	-34.8886655
Destino	-56.1636785	-34.8945113

5.1.1.2 MD-DE Media Distancia con Desvío

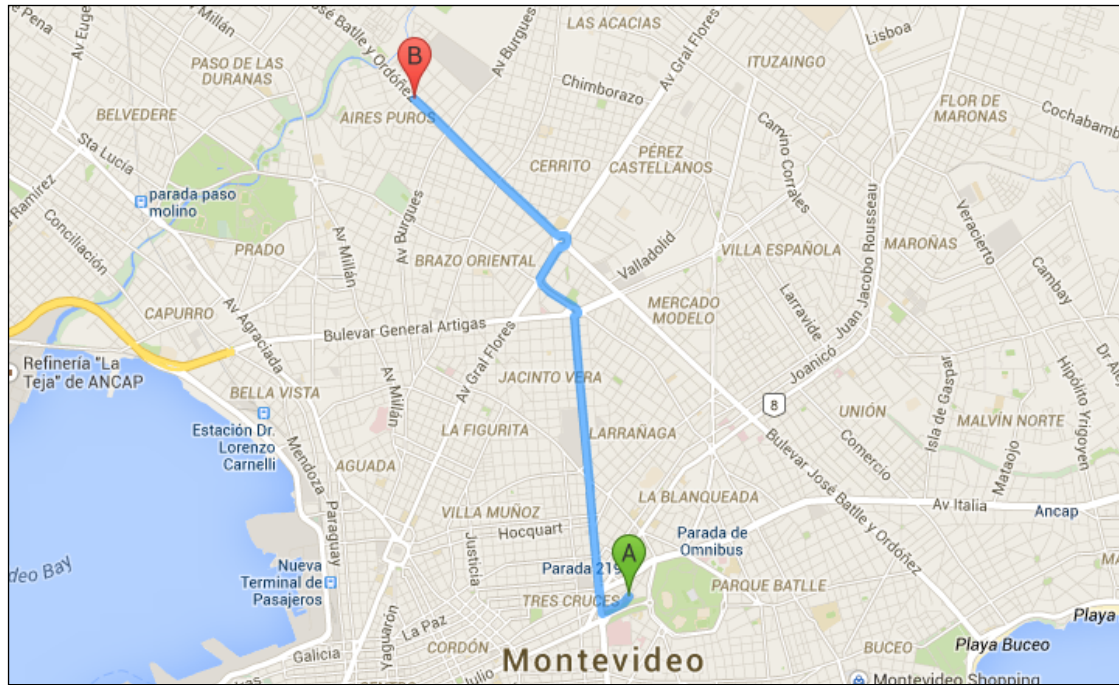


Fig. 33 MD-DE Viaje Original

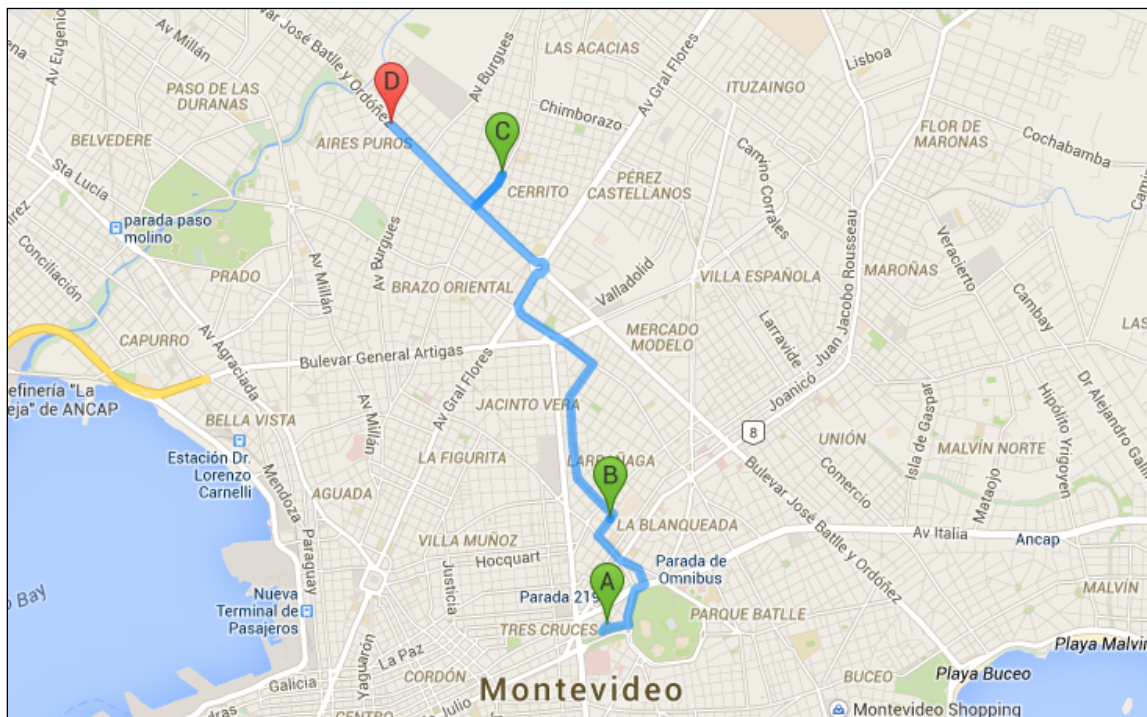


Fig. 34 MD-DE Viaje Compartido

Marcador	Lng	Lat
Origen	-56.1616462999	-34.8954147
Pick-up	-56.1612860000	-34.8857711
Drop-off	-56.1731704000	-34.8548413
Destino	-56.1852026000	-34.8502523

5.1.1.3 *LD-DE Larga Distancia con Desvío*

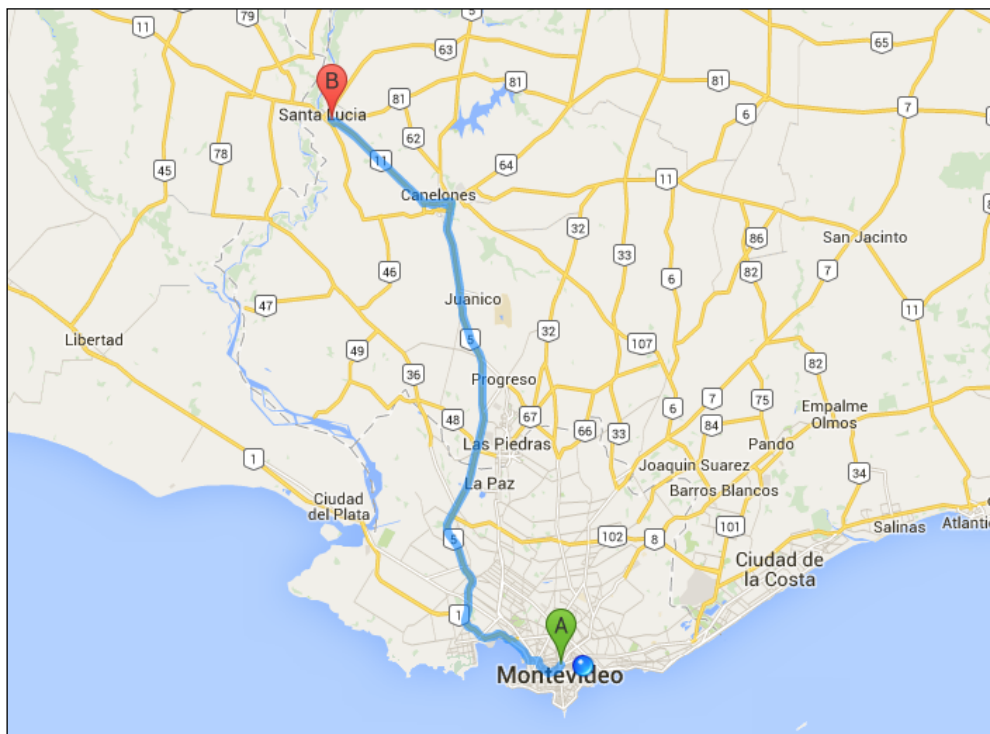


Fig. 35 LD-DE Viaje Original

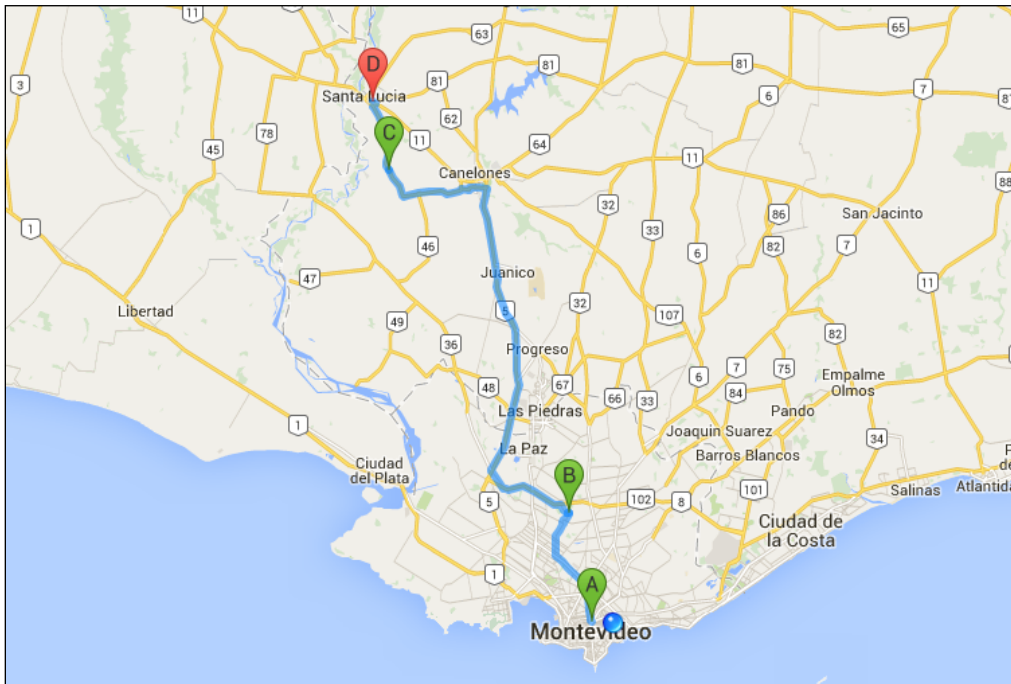


Fig. 36 LD-DE Viaje Compartido

Marcador	Lng	Lat
Origen	-56.1616462999	-34.8954147
Pick-up	-56.1612860000	-34.8857711
Drop-off	-56.1731704000	-34.8548413
Destino	-56.1852026000	-34.8502523

5.1.1.4 *MLD-DE Muy Larga Distancia con Desvío*

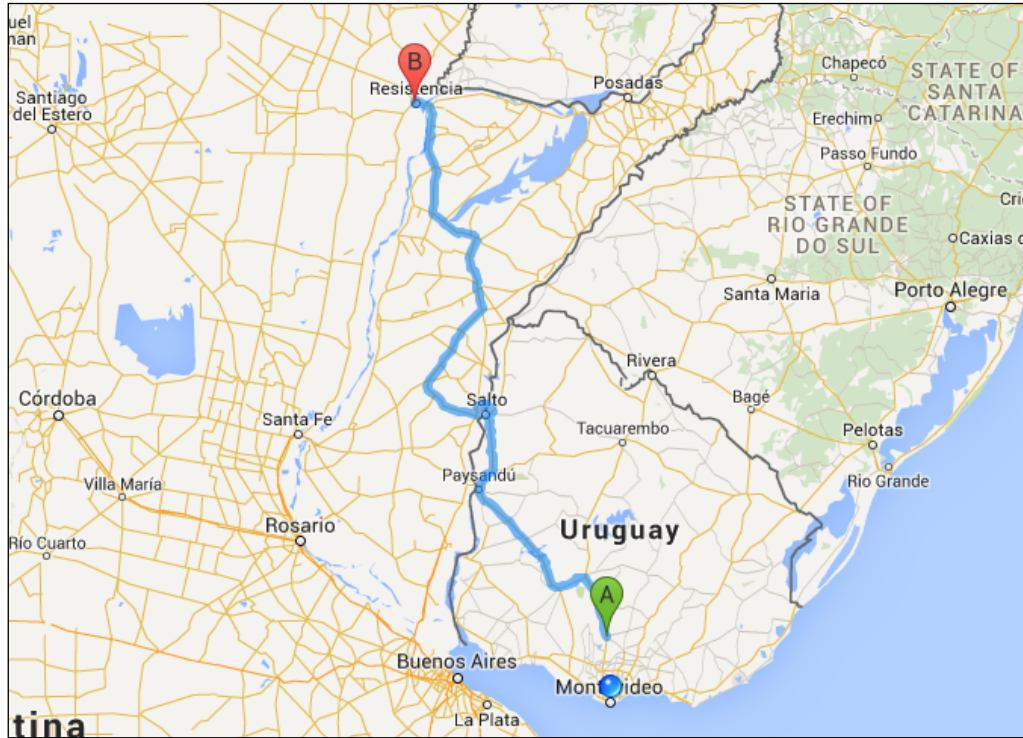


Fig. 37 MLD-DE Viaje Original

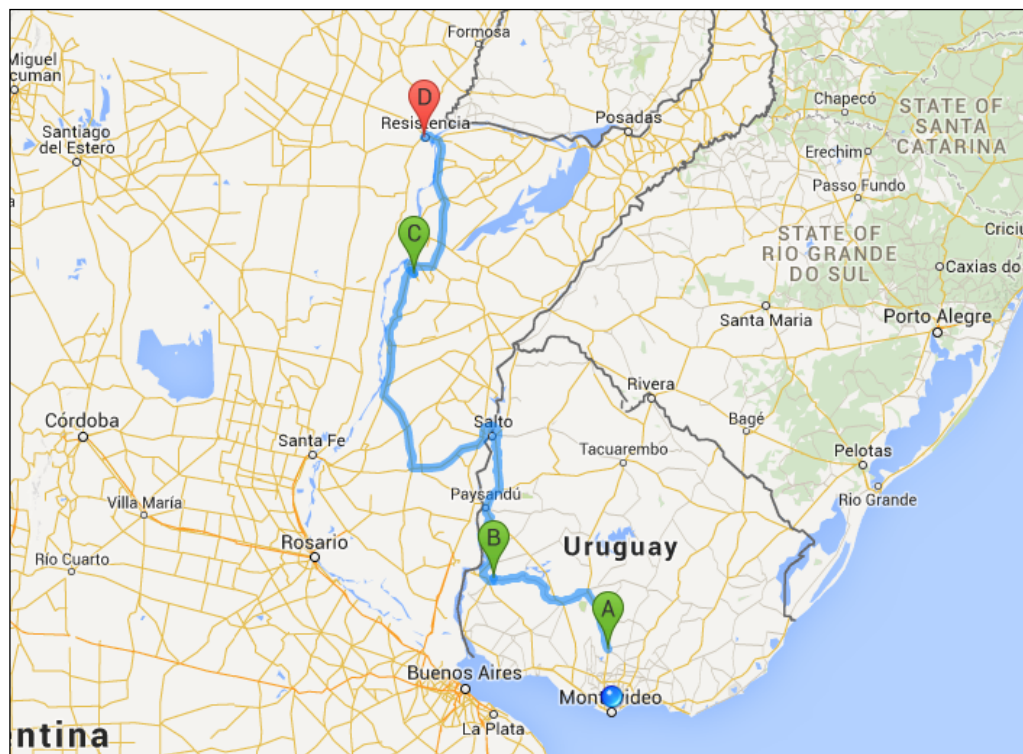


Fig. 38 MLD-DE Viaje Compartido

Marcador	Lng	Lat
Origen	-56.1957434999	-34.1012931
Pick-up	-57.9467624999	-33.2135858
Drop-off	-59.1492309999	-29.2660542
Destino	-58.99880980	-27.4496002

5.1.1.5 Por Modalidad de RideSharing

Aquí se presenta una comparativa entre las distintas modalidades de ridesharing cubiertas en el servicio. Se considera un viaje disponible (conductor) de media distancia (10km aprox.) y se prueban las cuatro variantes cubiertas por el servicio teniendo un pasajero con viaje idéntico, inclusivo, parcial y con desvío.

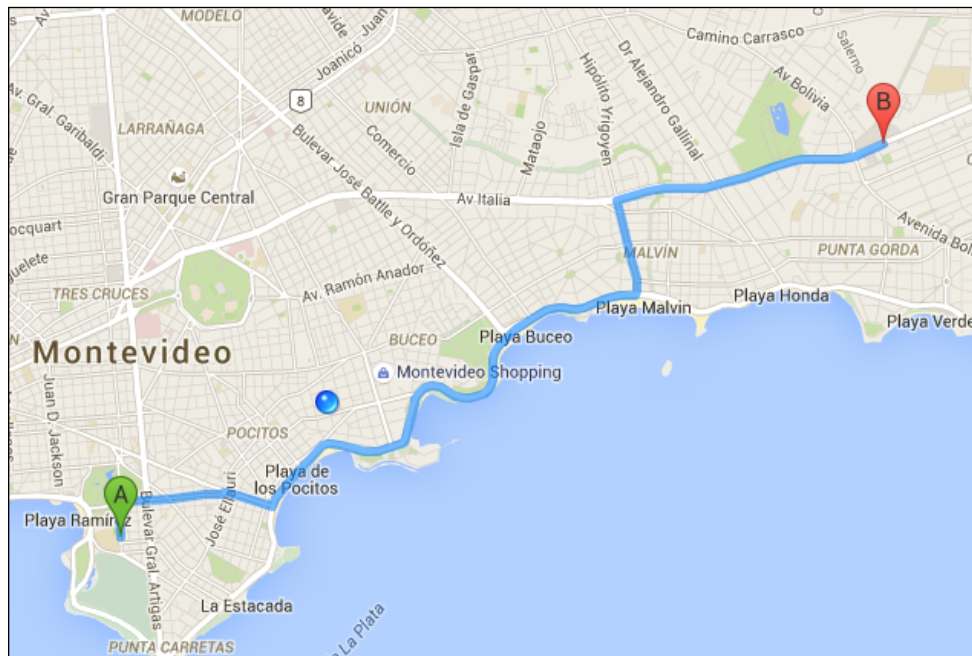


Fig. 39 Viaje Original e Idéntico

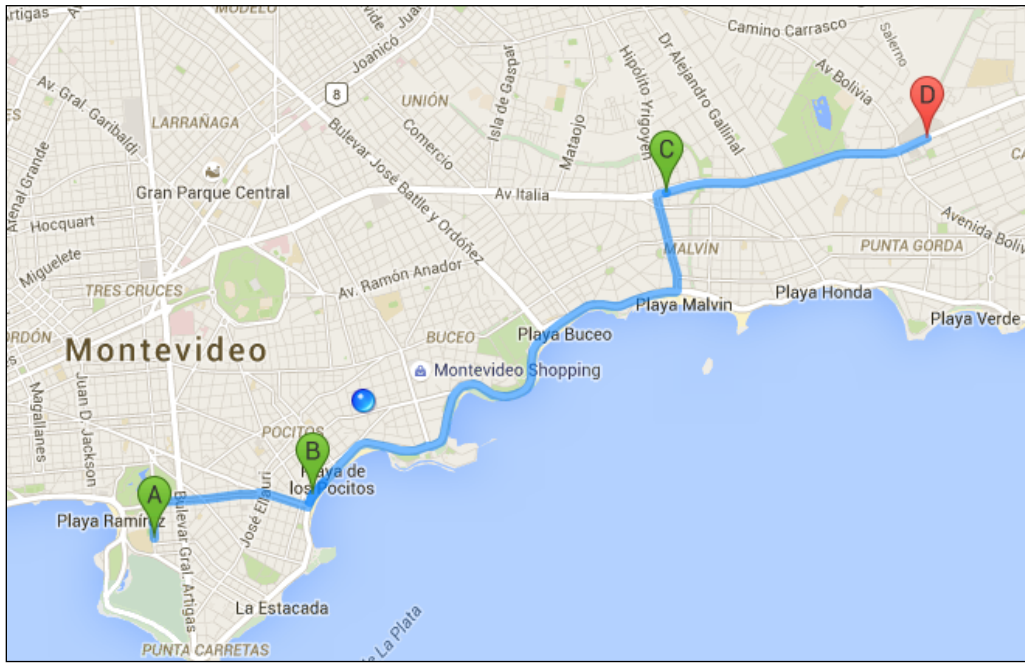


Fig. 40 Viaje Compartido Inclusivo

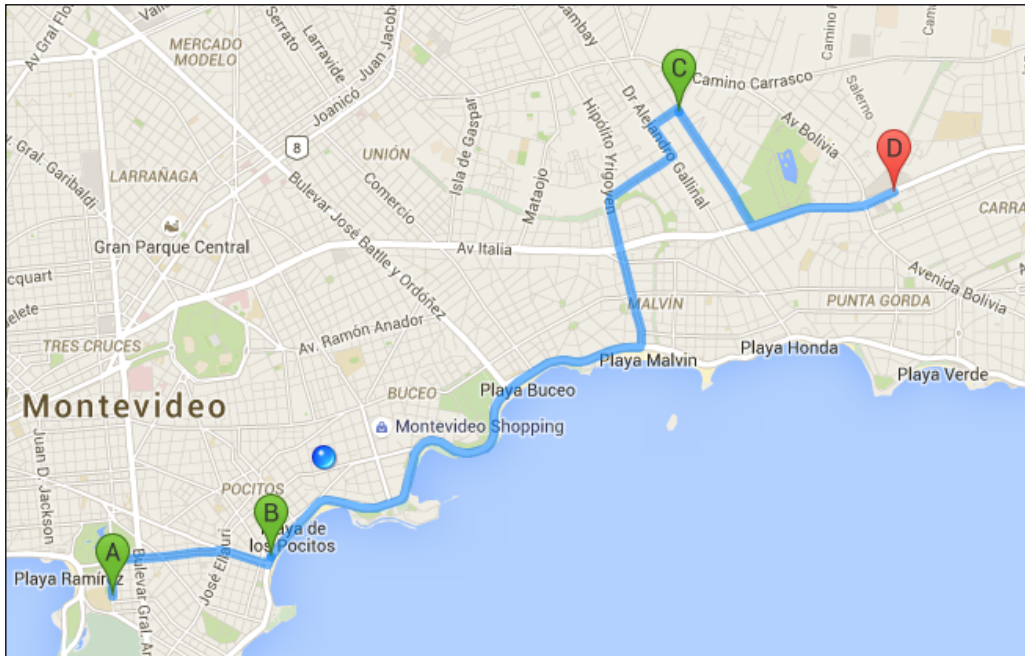


Fig. 41 MLD-DE Viaje Compartido Parcial

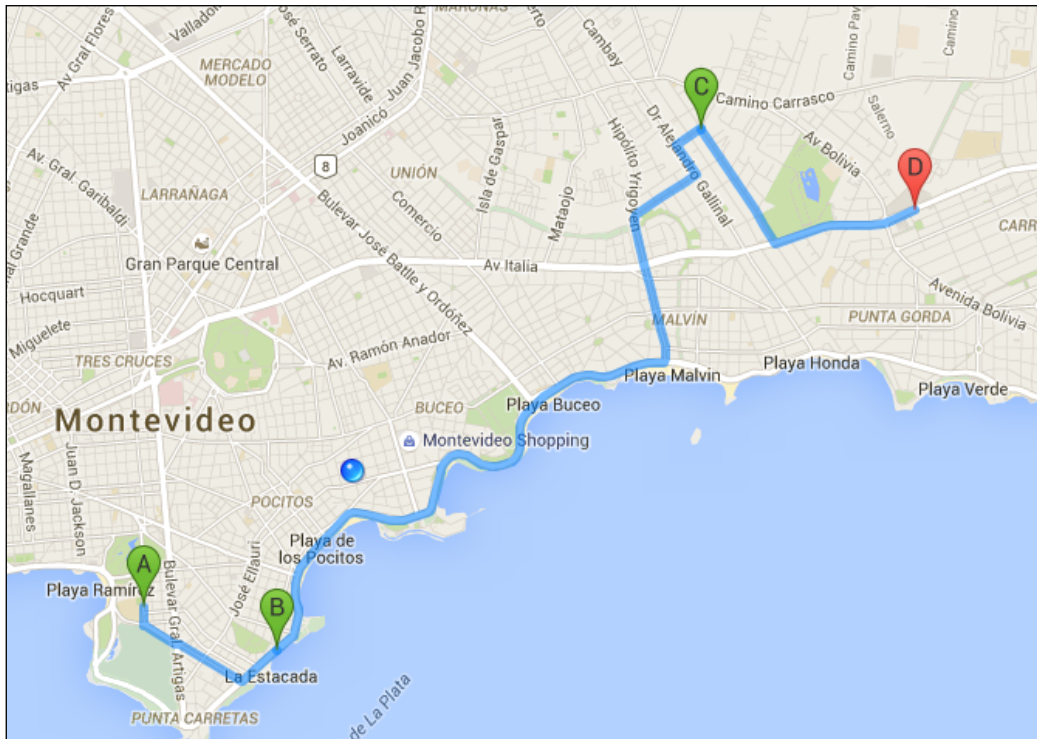


Fig. 42 Viaje Compartido con Desvío

5.1.2 Casos de Distribución de Costos

Siguiendo el modelo planteado en la Sección 5.1.4.3 referente a la función de distribución de costos ($sharedRideCost_i$), la propuesta para evaluarla consta de dividir entre ambos participantes el 50% de los costos operativos del vehículo para kilometraje compartido, y cargar al pasajero con el 100% de los costos de desvío. Se entiende que de este modo se genera un fuerte incentivo para que el conductor cubra la necesidad de tener que desviarse de su ruta original para levantar al pasajero y dejarlo en su destino (dentro de los márgenes admitidos).

Además, esta métrica permite realizar una comparativa semejante al servicio de un taxi donde haciendo la analogía, el viaje original del conductor quedaría determinado en el momento de confirmación del pedido. Considerándose como overhead a todo el recorrido desde el origen del conductor (taxi), pasando por la posición de pick-up del pasajero y finalizando el viaje para ambos en la posición de drop-off del pasajero. Los costos operativos del taxi se componen mediante la denominada “bajada de bandera”, que representa un costo fijo único por utilizar el servicio, sumado a las “fichas” que representan el costo operativo relacionado al uso del servicio. En este último, se pretende sea proporcional a la distancia o tiempo incurrido (ej. costo cada 100 mts o 10 seg) del servicio, lo que ocurra primero acorde a las tarifas establecidas. Dicha opción se ve afectada usualmente por la fluidez del tráfico, provocando el aumento de costo de los viajes cuando los vehículos avanzan a una velocidad menor a la estimada o permanecen detenidos por congestión.

En esta prueba se propone contemplar el mejor caso de fluidez del tráfico (sin congestión), calculando costos basados únicamente en las distancias, de manera de poder estimar y calcular la cota inferior de costos para viajes en esta modalidad.

Los valores utilizados como tarifa de taxi son los respectivos al último ajuste correspondiente a Noviembre de 2014 (www.cpatu.com.uy) cuyos valores son:

Bandera Diurno (\$)	Bandera Nocturna(\$)
32,840	39,408
Ficha Diurna(\$/100mts)	Ficha Nocturna(\$/100mts)
1,910	2,292

5.1.2.1 Costos Operativos

En materia de vehículos terrestres para transporte de pasajeros, el combustible es el insumo más significativo del costo operativo por distancia recorrida de un vehículo (no considerando tripulación). A este se agrega un costo de desgaste que debiera generar los importes suficientes para realizar el mantenimiento (ej. cubiertas, lubricantes, reparaciones). Todos estos costos pueden cuantificarse proporcionalmente al uso del vehículo, ya que representan insumos directamente asociados al kilometraje recorrido. Además pueden considerarse otros costos dentro del operativo, que no necesariamente son proporcionales al uso, como ser: seguro, patente o habilitación. Por último, para el caso de empresas de transporte donde su esencia es montar un negocio mediante la adquisición de vehículos como recursos, se consideran además, la depreciación e interés del costo del vehículo, que debería garantizar un ingreso suficiente para el recambio de éste, garantizando la existencia del negocio.

Estos costos pueden ser estimados y desglosados por el tipo de vehículo e incluso por el tipo de terreno en que circula (ej. empedrado), utilizando la metodología del sub-modelo V.O.C. del H.D.M. III, auspiciada por el Banco Mundial e implementada en varios países de la región como Brasil y Paraguay (Peralta et. al., 2013). Para un taxi, estos costos se encuentran incluidos dentro del valor de la ficha, junto con otros que justifican y soportan el negocio (ej. sueldos de choferes, depreciación del vehículo, ganancia).

De este modo, se valida que el costo operativo en todos los casos está fuertemente ligado al precio del combustible y desgaste. Aun considerando los costos de depreciación e interés del vehículo, los cuales no necesariamente debieran participar en la modalidad de ridesharing, el insumo combustible es superior al 30% del costo operativo total. Es así que la diferencia sustancial que tiene la modalidad de ridesharing con respecto a las empresas de transporte público o privado como los taxis, es que se deben financiar además costos fijos del servicio (ej. sueldo chofer) que no necesariamente participan en ridesharing.

Para la definición de los parámetros de los costos de desgaste, se consideran los valores porcentuales obtenidos del último estudio publicado sobre la Estructura de Costos Operativos de

Vehículos Automotores (Peralta et.al., 2013) particularmente para un automóvil estándar sobre pavimento (Fig. 43).

Costo de Operación por 1000 vehículo-km	G	1,713.07	100.0 %
Consumo de combustible	G	614.13	35.8 %
Uso de lubricantes	G	40.82	2.4 %
Consumo de llantas	G	22.93	1.3 %
Tiempo de tripulación	G	0.00	0.0 %
Tiempo de pasajeros	G	0.00	0.0 %
Retención de la carga	G	0.00	0.0 %
Mano de obra de mantenimiento	G	60.97	3.6 %
Repuestos	G	109.54	6.4 %
Depreciación	G	493.10	28.8 %
Interés	G	207.10	12.1 %
Costos indirectos	G	164.47	9.6 %

Fig. 43 Costos Porcentuales de Operación de un Automóvil sobre Pavimento (Peralta et.al., 2013)

Uno de los factores principales en los costos de la tarifa de taxi, es la necesidad de cubrir los costos de disponibilidad del servicio. Esto es la necesidad de recuperar los costos generados por su estado ocioso cuando efectivamente se vuelve activo. Por lo anterior, es natural que las organizaciones que nuclean taxis procuren realizar el manejo de demanda intentando minimizar costos ociosos y overhead, así como realizar una distribución equitativa de los servicios ofrecidos entre las distintas unidades, evaluando la demanda esperada para poder gestionar la asignación de descansos y turnos de sus flotas. Los costos relacionados a turnos y descansos son claramente inexistentes en la modalidad de ridesharing, lo que justamente vuelve de interés su análisis en materia de ahorro en costos operativos.

5.1.2.1.1 Precio de Combustibles

Se utilizarán los precios de combustibles vigentes en Uruguay al 1° de enero de 2015 (ancap.com.uy), definidos por la Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland (ANCAP). Si bien los precios de combustibles uruguayos históricamente se encuentran por encima del promedio de la región, es un insumo común a todos los medios de transporte (ej. taxi) sobre los que se basa esta prueba.

Producto	Precio por litro (\$UYU/lt)
Gasoil 50-S	\$39,90
Gasoil 10-S	\$50,80
Super 95 30-S	\$41,80
Premium 97 30-S	\$43,40

5.1.2.2 Simulación de Costos y Tiempos

Se realiza la simulación de distribución de costos para los casos planteados en la Sección 5.1, se estudian las diferencias en materia de costos y tiempo con respecto a los demás medios de

transporte comparados. También se analizan el incremento de los costos operativos con respecto a la distancia adicional requerida para efectuar un viaje compartido. En esta Sección se presentan los principales resultados obtenidos realizando una comparativa entre los casos y modalidades en cuestión.

5.1.2.2.1 Costo por Distancia

Para los costos en el caso de uso de taxi, se realiza la simulación del costo mínimo necesario basado únicamente en distancia, descartando aumentos por demoras de los viajes. Esto permite asemejar la comparación con la de ridesharing. Las tarifas se corresponden a las definidas en la Sección 5.2.3.3.1.

Para el cálculo del costo operativo del ridesharing se utilizan parámetros definidos en la Tabla 3 contemplando un rendimiento por debajo del promedio del consumo de un vehículo estándar (11 km/l) y utilizando un combustible estándar (Super 95 30-S) de modo de obtener un costo superior al esperado bajo condiciones estándar. Esta consideración además, refleja la realidad decreciente en la compra de vehículos particulares con combustibles subsidiados (Gas Oil) en el parque automotor uruguayo.

Parámetro	Valor
Rendimiento de Vehículo	10 km/l
Costo Combustible de Vehículo	4.18 \$/km
Costo Desgaste de Vehículo	1.67 \$/km
Costo Operativo de Vehículo	5.85 \$/km

Tabla 3 Parámetros Utilizados para el Cálculo de Costos

A modo de referencia se presentan en la Tabla 4 y Fig. 44 los costos operativos para las distancias de los casos evaluados.

Caso	Distancia Total(mts)	Distancia Compartida(mts)	Distancia Desvío (mts)	Costo Viaje Original(\$)	Costo Viaje Compartido(\$)
CD-DE	2.600	2.000	600	\$ 12	\$ 15
CD-ID	3.000	3.000	0	\$ 18	\$ 18
MD-DE	6.500	5.000	1.500	\$ 29	\$ 38
MD-ID	10.000	10.000	0	\$ 59	\$ 59
LD-DE	65.000	50.000	15.000	\$ 293	\$ 380
LD-ID	100.000	100.000	0	\$ 585	\$ 585
MLD-DE	650.000	500.000	150.000	\$ 2,926	\$ 3,804
MLD-ID	1.000.000	1.000.000	0	\$ 5,852	\$ 5,852

Tabla 4 Costos Operativos por Caso de Estudio

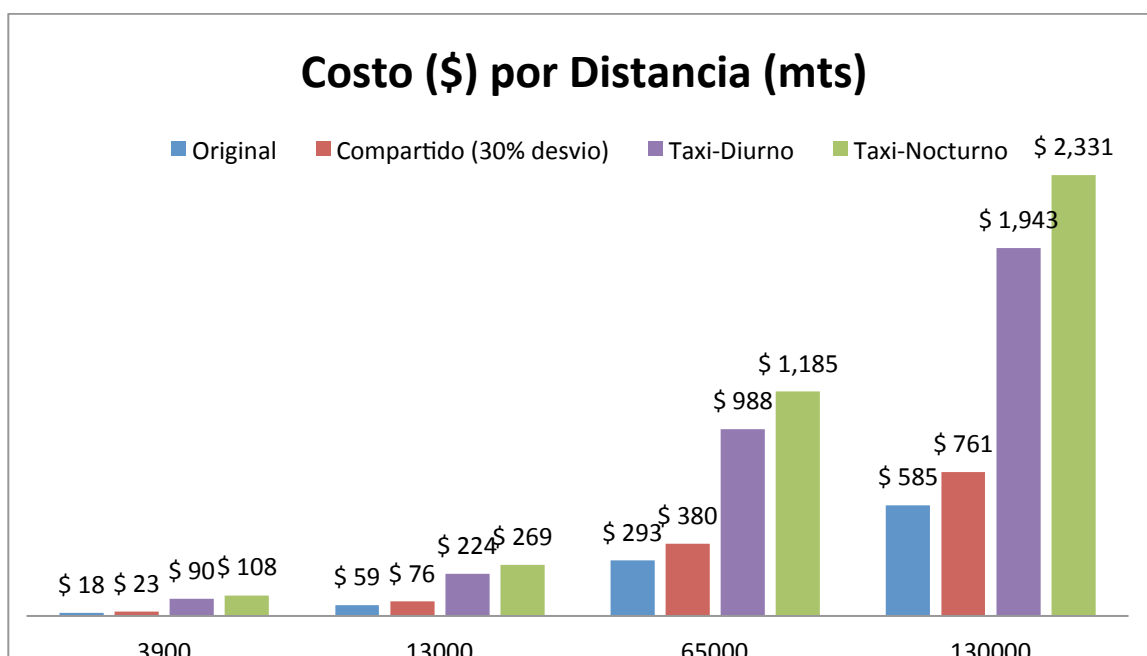


Fig. 44 Gráfico de Costos por Distancia

5.1.2.2.2 Tiempo por Distancia

En materia de cálculo de tiempos y velocidades, se consideran valores de acuerdo al promedio y normativa de la ciudad de Montevideo, Uruguay (Observatorio Iberoamericano de Seguridad Vial, 2013). Se discrimina la velocidad de los buses en zonas de alta densidad ya que su capacidad de transporte se ve afectada no solo por el tráfico, sino también por la cantidad de

pasajeros que sirve, aumentando tiempos de detención. Estas zonas se caracterizan por ser centros de alta concentración, representando zonas laborales o comerciales. Por lo que su comparativa resulta de interés ya que esa población es candidata al uso del servicio propuesto, particularmente como participantes en rol pasajero, y representa uno de los factores de mayor beneficio para ellos. La Tabla 5 muestra los valores considerados para cada uno de los casos y la Fig. 45 refleja el tiempo por distancia recorrida en base a los valores considerados.

Modalidad	Velocidad (km/h)
Vehículo Urbano (Car)	35
Bus Urbano (Bus)	16
Bus Urbano Zona Alta Densidad (Bus Downtown)	8

Tabla 5 Velocidades Promedio Consideradas

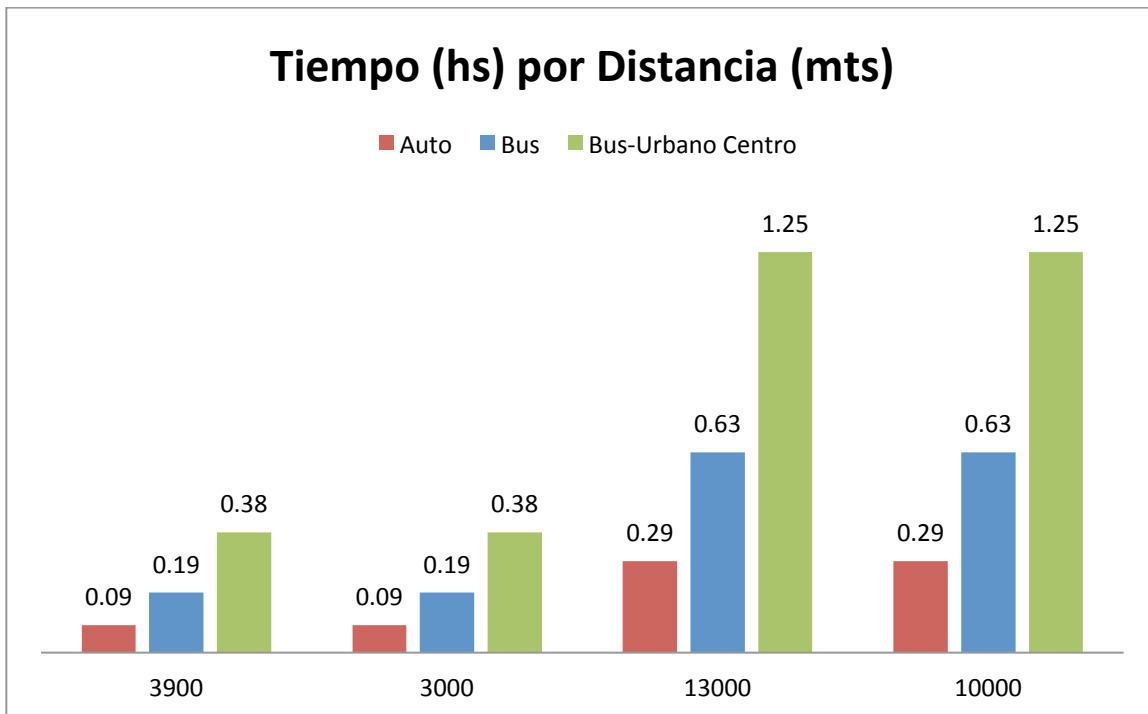


Fig. 45 Gráfico de Tiempo de viaje por Distancia Recorrida

5.1.2.2.3 Costo de Conductor por modalidad

Se realiza la comparativa entre el costo del viaje original (*Original Ride Cost*) y compartido (*Shared Ride Cost*), de manera de cuantificar el costo final del conductor por compartir su vehículo (*Driver's Shared Ride Cost*). La Fig. 46 refleja los resultados obtenidos por caso indicando la distancia y costo en pesos uruguayos.

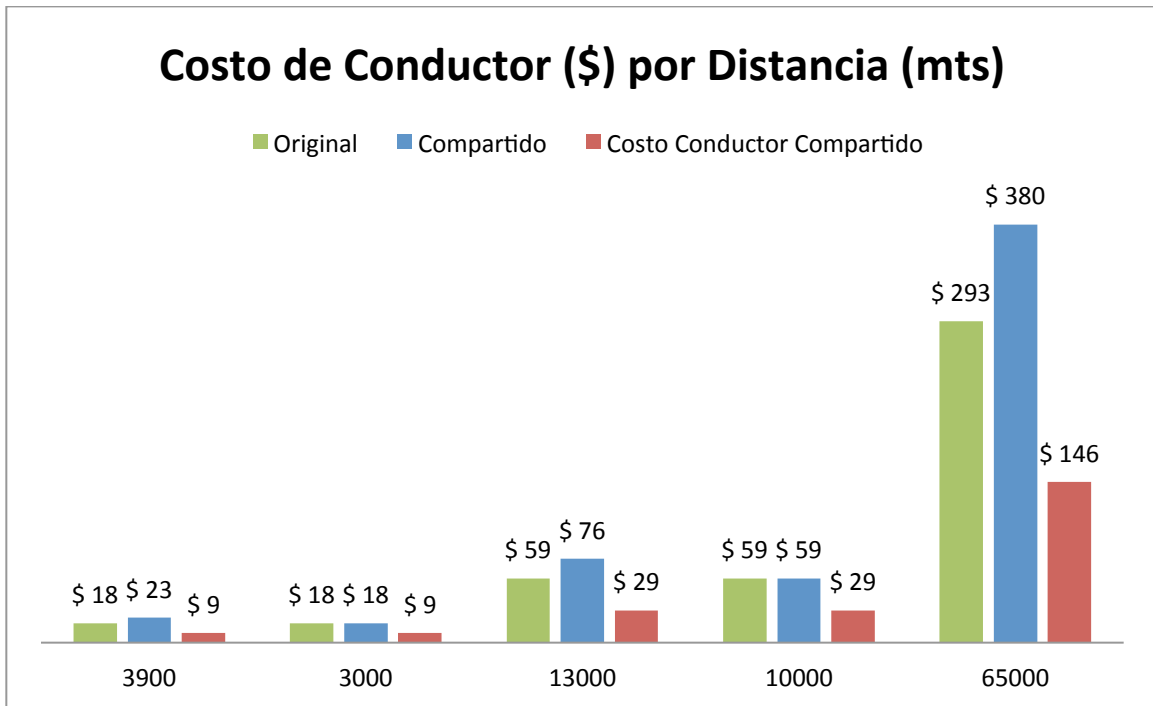


Fig. 46 Gráfico de Costos del Conductor por Distancia

5.2 Análisis de los Casos y Resultados

El análisis de la evaluación se centrará en los aspectos principales del servicio propuesto. Por un lado, la validación de la estrategia de matching para los distintos casos planteados así como los desafíos planteados para su resolución. Por otro lado, se analizarán los resultados en materia de costos y tiempos desde las perspectivas de los participantes procurando establecer comparativas que permitan cuantificar los aspectos positivos y negativos de las alternativas que éstos manejan. Por último se analizarán aspectos de uso del servicio basados en la solución tecnológica propuesta (aplicación móvil) si bien no se cuenta con una estadística real de usuarios, se presentan los aspectos principales contemplados en el desarrollo de la solución móvil procurando su usabilidad.

5.2.1.1 Algoritmia de Matching

La estrategia para evaluación de congruencia de viajes propuesta como Distance Buffer Matching presentada en la Sección 4.1.4.2.2. muestra un comportamiento estable y aceptable (acorde a las restricciones impuestas) para todos los casos, considerándose una mejor alternativa a la propuesta de OD Matching que se ve restringida a la modalidad de Identical Ride Sharing con holgura, como se explica en la Sección 4.1.4.2.1. y sobre la que se basan la mayor parte de servicios de este tipo. La solución aquí propuesta y su correspondiente validación contemplando múltiples modalidades se considera un comportamiento diferencial a la mayoría de servicios de este tipo como los presentados en la Sección 3.6.2 Fig. 15.

Por otro lado, si bien el objetivo del servicio es aumentar la probabilidad de matching entre viajes considerando todas las posibilidades entre las modalidades *identical*, *inclusive* y *detour ridesharing*, se identifica la necesidad de establecer un orden de preferencia entre ellas. De los casos estudiados y de acuerdo a la distribución de costo planteada, se pretende respetar el orden respectivamente, de modo de maximizar la cantidad de distancia compartida sobre el total del viaje original (a), así como minimizar la distancia de desvío necesaria para llevarlo a cabo (b), esto es:

- a. $\max \{kmCompartidos(v_p, v_s) / kmTotal(v_p, v_s)\}$ para todo v_s congruente con v_p
- b. $\min \{kmTotal(v_p, v_s) - kmCompartidos(v_p, v_s)\}$ para todo v_s congruente con v_p

Se entiende conveniente agregar los criterios planteados tanto para el filtrado u ordenamiento de las opciones buscando facilitar la decisión del usuario pese a que no resulten necesariamente determinantes para el participante.

5.2.1.2 Distribución del Tiempo

Dentro de los factores principales considerados, y desde el punto de vista de ponderación de asignaciones, el tiempo es quizás el que resulta más complejo de ponderar. Esto se debe a que cualquier variación en beneficio de un participante, repercute usualmente de manera negativa en el otro. Esto es, cualquier aumento en el desvío de un conductor para poder compartir un viaje con un pasajero genera beneficio en el pasajero ya que aumenta su probabilidad de ser llevado pero implica mayor tiempo de viaje para el conductor y viceversa. Si bien los costos operativos del desvío son íntegramente cubiertos por el participante, el factor tiempo puede ser determinante para que un conductor acepte una solicitud.

La ruta específica del viaje compartido es la que determina la diferencia de tiempo con respecto al viaje original, pero su variación de tiempo promedio resulta acotada al 30%. Es decir, si bien la distancia generada por el desvío no representa un beneficio directo puesto que aumenta el tiempo de viaje del conductor, en su peor caso será de un 30% de la distancia total. Esta distancia recorrida no resulta pérdida total para el conductor, ya que pese a haberse desviado, de todos modos sigue aproximándose a su destino. Para conceptualizar este planteo, basta considerar un modelo trigonométrico donde el recorrido original es representado por la hipotenusa y si bien la suma de la distancia de los catetos es mayor, no implica un desvío proporcional en materia de tiempo. La Fig. 47 muestra un comparativo porcentual del tiempo total de transporte que invierten 3 pasajeros recorriendo la misma distancia por tres medios distintos: compartiendo un vehículo (*Ride-Share*), ómnibus (*Bus*) y ómnibus desplazándose por una zona de alto densidad (*Bus-Downtown*).

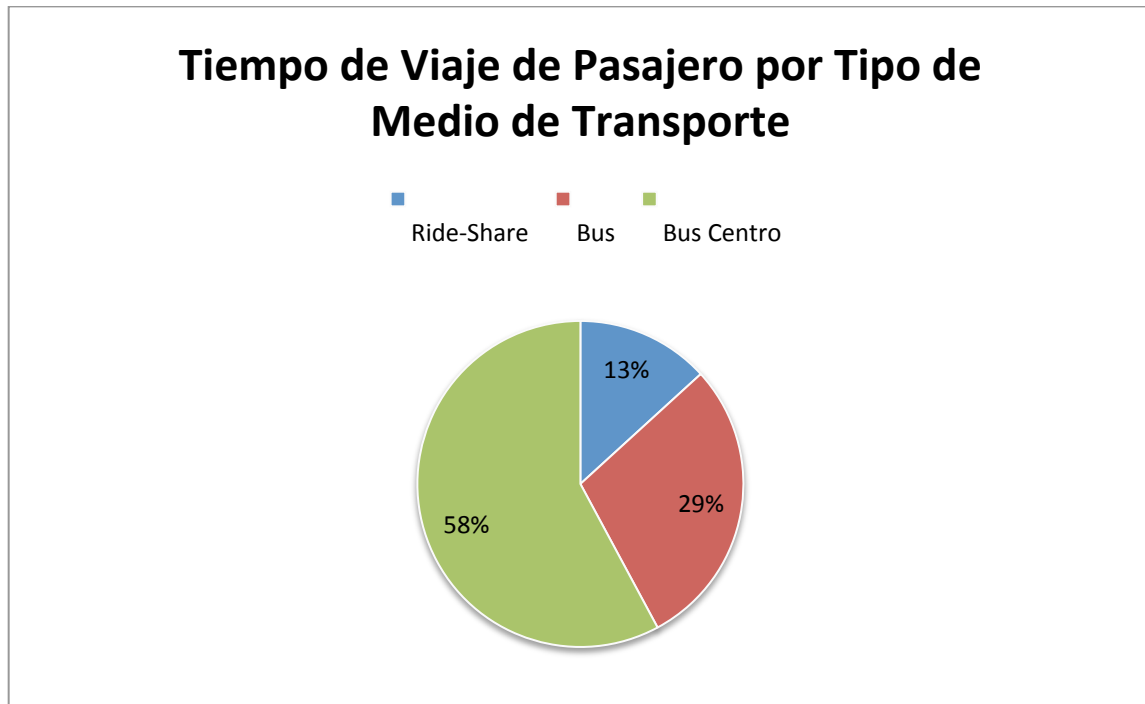


Fig. 47 Gráfico de Tiempo de Viaje Porcentual por Medio de Transporte para Pasajero

Para los pasajeros la situación es distinta y considerablemente más beneficiosa. Para ellos este tiempo resulta el factor preponderante en el incentivo de esta práctica, puesto que los tiempos de transporte considerando la única alternativa pública masiva (buses), son menores de la mitad (46,15%). En promedio, las velocidades de circulación son la principal causa de estas diferencias, lo cual es reforzado por las comparativas de tiempo de un bus en modalidad regular y de alta densidad. Esto, sin incluir la etapa de *pre-trip* planteada en la Sección 2.2.1, donde se debería considerar los tiempos de desplazamiento de los pasajeros desde y hacia las paradas, los cuáles aumentarían aún más las diferencias.

Cabe considerar que la diferencia de tiempo entre las modalidades de rideshare y bus en alta densidad (24%) aplica únicamente para viajes de hasta media distancia (menores a 7km) en el contexto de estas pruebas (Montevideo), puesto que no se consideran zonas de alta densidad de más de 10km de extensión.

5.2.1.3 Distribución de Costos

Considerando los costos operativos y su distribución entre los participantes, el sistema de ridesharing propuesto carga en promedio, con un 62% del costo total al pasajero, contra un 38% al conductor, esto es considerando el caso de peor desvío (Fig. 48). Dicha distribución resulta acorde a los criterios planteados, en donde se pretende generar un incentivo para que el conductor desee compartir su vehículo, esto es, un ahorro directo de sus costos operativos en distancia compartida en un 50%. Este caso representa el peor costo para el pasajero, en donde la colaboración que deberá aportar corresponde a un 63% al costo operativo total y un 37% en los costos de la distancia estrictamente compartida como muestra la Fig. 49.

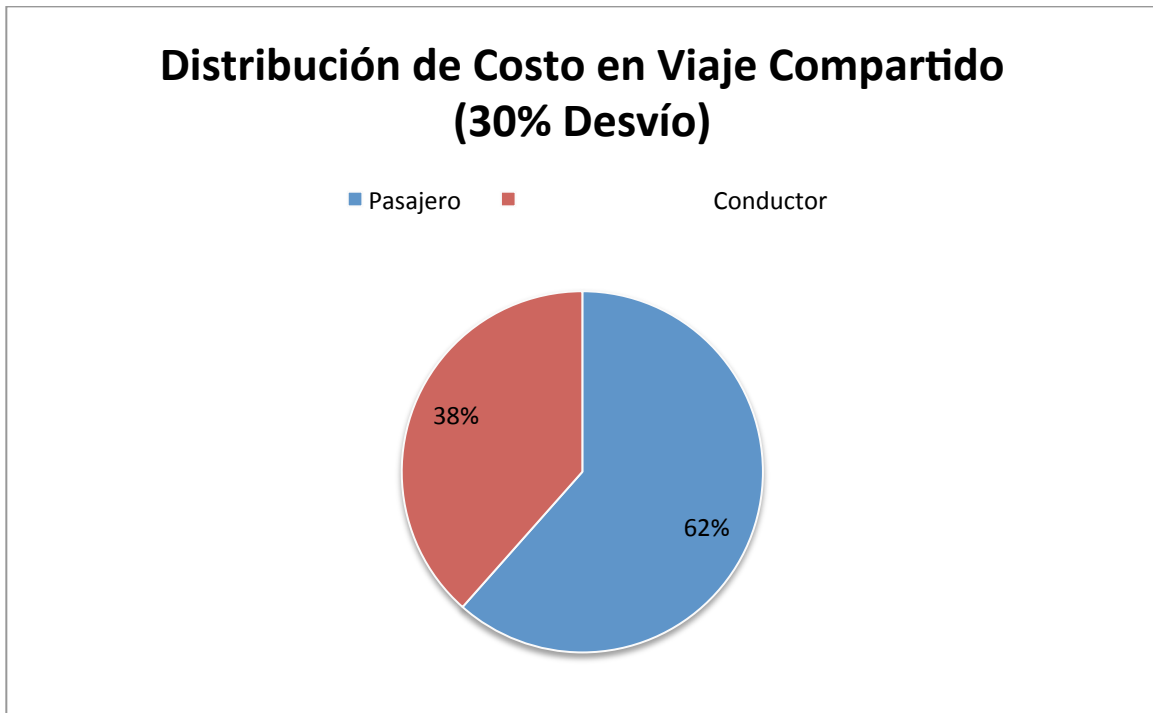


Fig. 48 Gráfico de Distribución de Costos entre Participantes

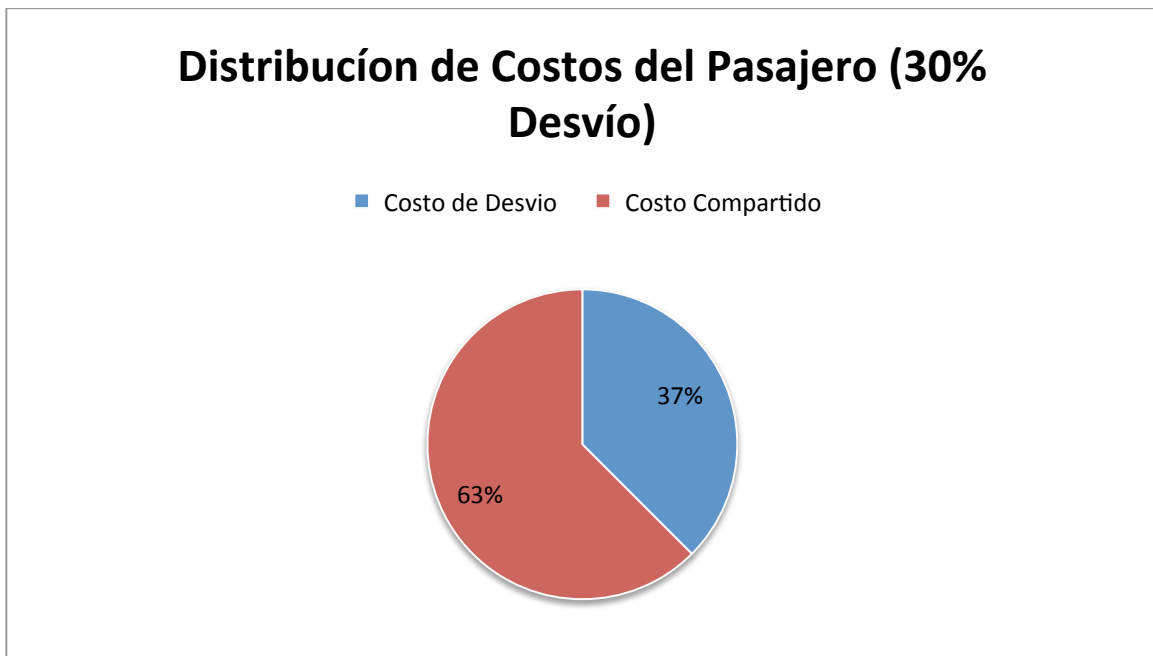


Fig. 49 Gráfico de Distribución de Costos del Pasajero

La comparativa natural y deseada para lograr ponderar qué tan atractivo resulta el servicio para un pasajero es la del servicio de taxi. Si bien el costo operativo del servicio propuesto no considera o pretende generar ganancias por el servicio de manejo brindado, es claro que existe un amplio margen para poder hacerlo. Los costos de ridesharing resultan considerablemente

inferiores a las tarifas de transporte de taxi siendo en el peor de los casos menores al 30%. A favor al taxi, cabe considerar que la modalidad de ride sharing no garantiza un 100% de disponibilidad como propone el taxi, pero sí se convierte en una alternativa conveniente para viajes con cierta anticipación que permitan compensar esa carencia en el ridesharing. Aunque el servicio permite y cubre la modalidad de publicación y búsqueda de viajes en tiempo real, se entiende que la oferta podrá verse acotada, principalmente en lo que respecta a viajes irregulares, urbanos y de corta distancia, para los cuales el taxi es la opción preferencial.

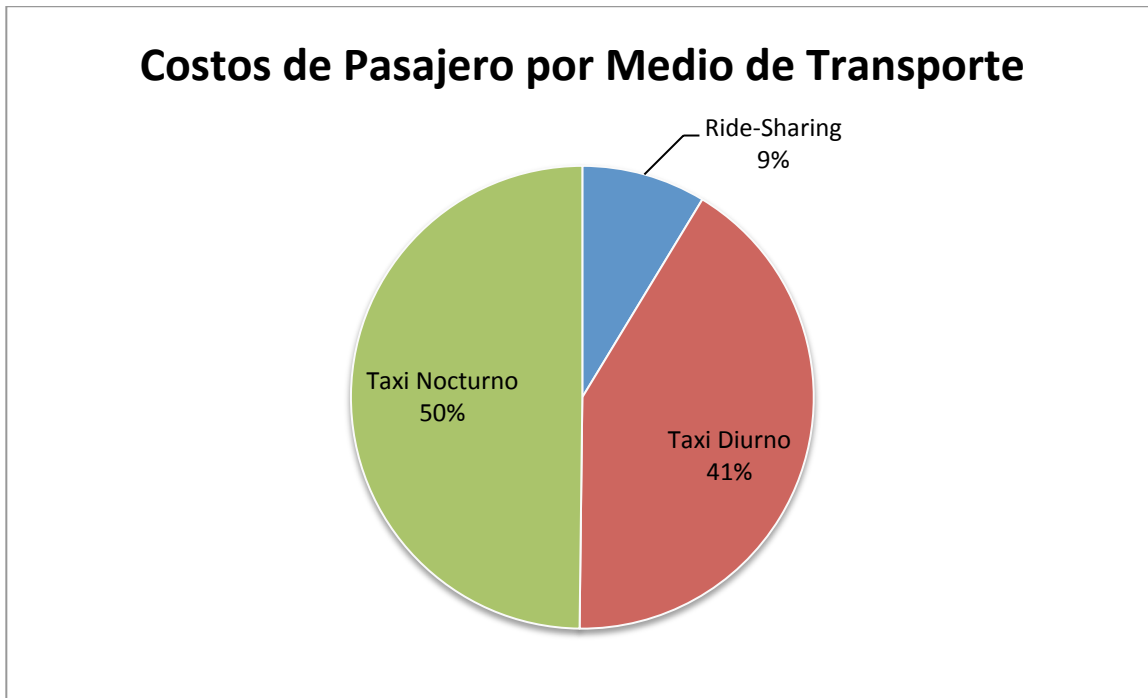


Fig. 50 Gráfico de Costos por Medio de Transporte para Pasajeros

Como se ve en los resultados presentados en la Sección 5.1.2.2.3 y Fig. 46, el ahorro del costo operativo para el conductor representa en el mejor de los casos, un 50% del costo operativo total, que se corresponde con la modalidad de identical ridesharing. Es decir, que cada pasajero adicional que el conductor lleve implica un nuevo fraccionamiento del costo operativo que comienza desde un 50% (1 pasajero) y potencialmente podría reducirlo hasta 4 pasajeros (20%). Si bien este incentivo podría no ser suficiente para motivar a los conductores, aún quedaría la posibilidad de agregar alguna retribución adicional, tal como la “bajada de bandera” que intente complementarlo. Si bien la comparativa sería aún más semejante a la del taxi, se entendió preferible realizar la comparativa con el servicio de taxi manteniendo la esencia del carpooling y no agregar un costo fijo por uso del servicio.

No resulta de interés realizar una comparativa detallada con otros medios masivos en este caso (ej. ómnibus) ya que estos usualmente representan alternativas más económicas al uso de vehículos particulares. La Fig. 51 plantea la distribución proporcional de los costos totales de

conductor realizando viaje original (*Original Trip*) y el mismo viaje original compartido en las condiciones dadas (*Shared Trip*).

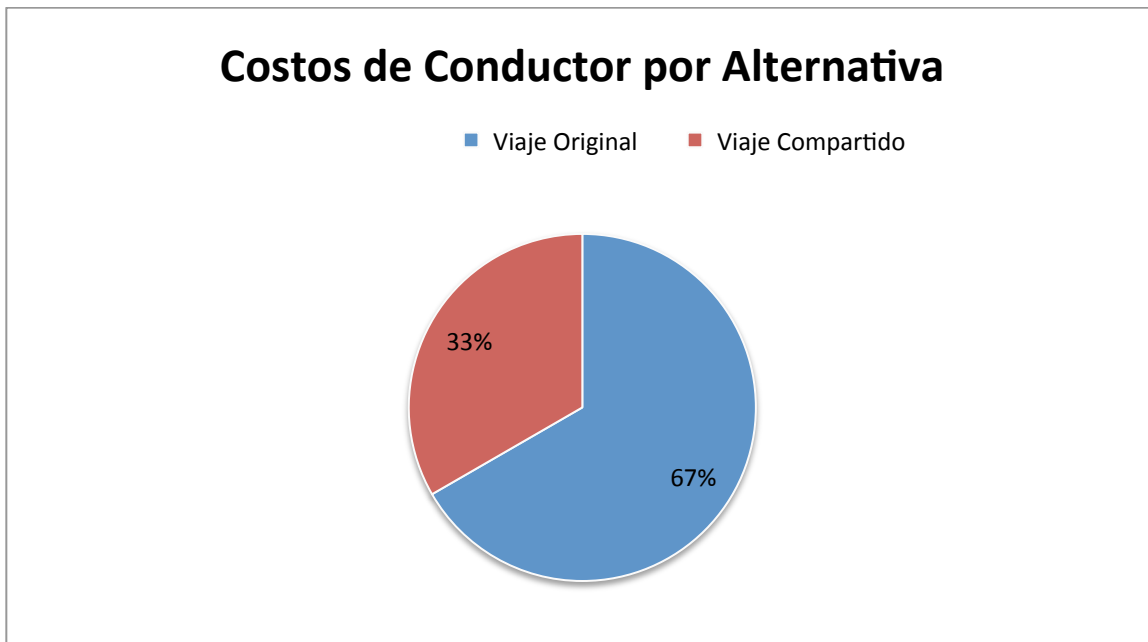


Fig. 51 Gráfico de Distribución de Costos por Alternativa para Conductor

5.2.1.4 *Uso de Aplicación Móvil*

El hecho que la propuesta de este trabajo y acceso al servicio de matching sea mediante una plataforma móvil, busca brindar una mayor accesibilidad y disposición del servicio entre los posibles participantes. De hecho la disponibilidad de dicho servicio de manera gratuita (aplicación gratuita) es crucial para la aceptación y su posible adopción por parte de los participantes. A su vez la interacción y facilidad de uso resultan cruciales dentro de esta plataforma, ya que si bien se intenta simplificar la especificación de un viaje, la aplicación propuesta requiere de un conjunto de datos requeridos para poder realizar la búsqueda (origen, destino, fecha y hora de salida).

Para cubrir la interacción planteada en la Sección 5.2.2.1.1 se consideró una interfaz de definición de viajes mediante un mapa interactivo que permite elegir el rol (conductor, participante) y especificar el origen y destino en un mapa pudiendo geo-referenciar ambas posiciones. La georreferenciación de los puntos resulta crítica para el correcto funcionamiento del servicio ya que todos los cálculos de matching se basan en posiciones y rutas con márgenes de holgura considerando estas posiciones. Luego de la especificación del viaje, se cuenta con un paso para la especificación de detalles, donde opcionalmente se podrán agregar los demás datos como por ejemplo modificar la fecha de salida, filtros de búsqueda o comentarios que hacen a aspectos secundarios e informativos entre los participantes (ej. punto de referencia para encontrarse). El tercer paso es donde se realiza la búsqueda que provee un listado de viajes disponibles. Esto define una interacción de dos pasos para la publicación de viajes en el caso de

conductores, y tres pasos en el caso de pasajeros para poder visualizar viajes. Estos pasos están dentro de la cantidad esperada para búsqueda dentro del promedio de servicios usuales (valor estimado en 2) de este tipo, con la consideración que en este caso la precisión de los viajes es mucho mayor dado el uso de georreferenciación de las posiciones de origen y destino.

Con respecto a los desafíos tecnológicos planteados cabe considerar dos requerimientos en cuanto a la plataforma utilizada. Estos son: la disponibilidad y acceso al GPS del dispositivo, así como conectividad a internet para poder realizar la codificación y referenciación de los puntos del mapa. La solución propuesta consta de una aplicación que requiere conectividad para su uso pese a que podrían diseñarse mecanismos de modalidad sin conexión (offline), pero escapan al alcance planteado.

A modo de resumen, los distintos análisis presentados en esta Sección permiten cuantificar resultados prometedores hacia la masificación de un servicio de este tipo. Se han considerado cuatro de los aspectos que se entienden principales para su evaluación, incluyendo la algoritmia, distribución de costos y tiempo, y aspectos de adopción de la aplicación móvil, que si bien no garantizan el éxito del servicio, proveen elementos técnicos cuantificables para determinar de ese modo la justificación de un incentivo suficiente para sus participantes. Si bien se trata de dimensiones de distinta naturaleza, se han evaluado los beneficios y desventajas en cada una de ellas de manera de procurar realizar un análisis objetivo sobre el que puedan plantearse mejoras.

6. Conclusiones y Trabajo Futuro

6.1 Conclusiones

En este trabajo se presentan los principales aspectos de la reciente evolución, avance y estado actual de la aplicación de tecnología al transporte mediante sistemas de transporte inteligente (ITS). Dichos avances han permitido mejorar no solo la calidad de los servicios, sino también la eficiencia de manera significativa. El uso de estos sistemas ha impactado positivamente al transporte en múltiples etapas, ámbitos y factores (ej. operativos, económicos), considerando particularmente al transporte de pasajeros, sobre el cual se enfoca este trabajo.

Para las personas, el transporte resulta una necesidad básica en su vida diaria, así como en mayor escala lo es la necesidad de medios e infraestructura de transporte masivo para cualquier sociedad urbana. Si bien las comunicaciones han mejorado, lo que ha contribuido a la potencial disminución de los requerimientos de movilidad, el desplazamiento masivo de personas en base diaria resulta una actividad necesaria y crítica para el funcionamiento de la industria y la vida urbana tal como la conocemos. La alta densidad propia de estas realidades, pone en jaque continuamente a la infraestructura vial, que debe contar con nuevas alternativas para no comprometer su disponibilidad. A su vez, la demanda por sistemas de transporte de pasajeros masivos de alta calidad, que representen una mejor alternativa al uso de vehículos particulares parecería ser el camino a seguir principalmente en grandes ciudades. La optimización del transporte de pasajeros, maximizando la capacidad de carga y minimizando los recursos necesarios, demuestra ser uno de los caminos clave para garantizar el correcto desplazamiento de las masas. Si bien los costos dependen del contexto, lamentablemente muchas veces la reestructura o creación de estos sistemas representan costos de inversión inaccesibles o no prioritarios para las empresas o autoridades a cargo. Por lo que si bien se busca sobrellevar la problemática mediante la mejora de métodos actuales con tecnología o infraestructura existente, la eficiencia de estos sistemas no se ha acompasado a las necesidades. Los pasajeros se ven desincentivados por la ineficiencia de estos medios de transporte y resulta natural que recurran al uso de vehículos privados como mejor opción. A nivel regional, este comportamiento ha llegado al caso de propietarios con múltiples vehículos para evitar las restricciones de circulación por matrícula.

Este trabajo propone incentivar una práctica potencialmente conveniente desde el punto de vista operativo, económico y social, como lo es el ridesharing, buscando combinar el uso de una tecnología novedosa y cada vez más popular, para facilitar y lograr un mejor uso de vehículos particulares. La solución aquí propuesta representa una alternativa en la lógica funcionalidad de la mayoría de las agencias de matching relevadas, proponiendo una algoritmia y distribución de costos que permiten generar beneficios no solo a sus participantes, sino también indirectamente a todo el sistema de transporte. Si bien existen muchas variantes posibles, los resultados obtenidos

reflejan que existe un amplio margen en materia de costos y tiempos sobre los cuales este servicio puede resultar una mejor alternativa al uso individual de vehículos particulares, flotas privadas como el taxi, e incluso medios de transporte masivos públicos y privados. La accesibilidad a este servicio mediante una plataforma que permite contar con una solución de amplia disponibilidad temporal accesible por los ciudadanos desde cualquier dispositivo móvil, indicaría ser un camino apropiado para poder innovar en una práctica cuyo primer antecedente se vio hace más de 30 años, que pese a contar con un fuerte respaldo desde el punto de vista operativo, aún no logra una amplia adopción. De todos modos, cada día se ve más apoyada por el contexto y múltiples iniciativas que no solo plantean el ahorro económico o eficiencia propios de esta práctica, sino también de sustentabilidad de los sistemas y medio ambiente siguiendo una línea de colaboración de pares que termina repercutiendo en un beneficio de la sociedad en su conjunto.

6.2 Trabajos Futuros

6.2.1 Ridesharing Integrado para Múltiples Pasajeros

Como fue planteado en la Sección 4.1, existen distintas modalidades de ridesharing que consideran más u otros factores para la definición de matching entre viajes. Si bien una heurística para la resolución del problema de ridesharing para múltiples pasajeros, podría ser la ejecución secuencial de múltiples instancias de la solución planteada en este trabajo, se entiende conveniente evaluar la posibilidad de atacar el problema de otra manera. Por ejemplo, contemplando variantes entre las combinaciones de matching entre múltiples pasajeros para presentar las variantes y sugerencias a los participantes. El conductor eventualmente podría definir preferencias de zonas por las que desea transitar o realizar una selección de los pasajeros que se le sugiere pudiendo visualizar el impacto en los beneficios de acuerdo al conjunto seleccionado.

6.2.2 Optimización Global de Asignaciones

El problema de buscar asignaciones congruentes entre pares de viajes dentro de un conjunto acotado permite simplificar la complejidad en comparación a considerar simultáneamente la optimización de todas las asignaciones. La ponderación de estas asignaciones (pares) mediante algún criterio (ej. cantidad de distancia compartida) permite definir un esquema de prioridad u orden entre las alternativas considerando principalmente el beneficio que dicha asignación reporta a cada uno de sus participantes. Resulta natural que esta ponderación aislada para un par de participantes se torne compleja al considerar el resto de los viajes y participantes simultáneamente. De todos modos resulta de interés poder estudiar dicho problema ya que podría evaluarse la efectividad del servicio en base a la cantidad de viajes compartidos que logra concretar. Es decir, buscando aplicar técnicas que contemplen la realidad desde un punto de vista global procurando cubrir la problemática planteada en la Sección 4.4.3. Esta se resume básicamente en la limitante generada por optimizaciones locales, donde la decisión de asignación de un par de viajes podría imposibilitar la de otros. Mientras que si se realizaran dichas

asignaciones de manera global, sería factible poder asignar pares a todos los viajes. Esto se traduce a la búsqueda de asignaciones que contemplen un beneficio global considerando el ahorro o ganancia del sistema como un todo, considerando para cada asignación, las consecuencias de realizarse o no.

Asimismo, este enfoque permitiría plantear un nuevo ámbito de estudio referente al impacto o costos negativos que enfrenta el sistema visto globalmente y poder considerar beneficios de mayor alcance como los ya planteados referentes al impacto en la sociedad como por ejemplo en materia de congestión e impacto ambiental. Esto se torna de interés, ya que la adopción masiva de estos sistemas y su eventual impacto debería ser analizada en un marco de modelado matemático, ya que podrían surgir situaciones impredecibles o no intuitivas. La Fig. 52 muestra un posible proceso secuencial para la descomposición y cálculo del costo total considerando otros aspectos aparte del operativo.

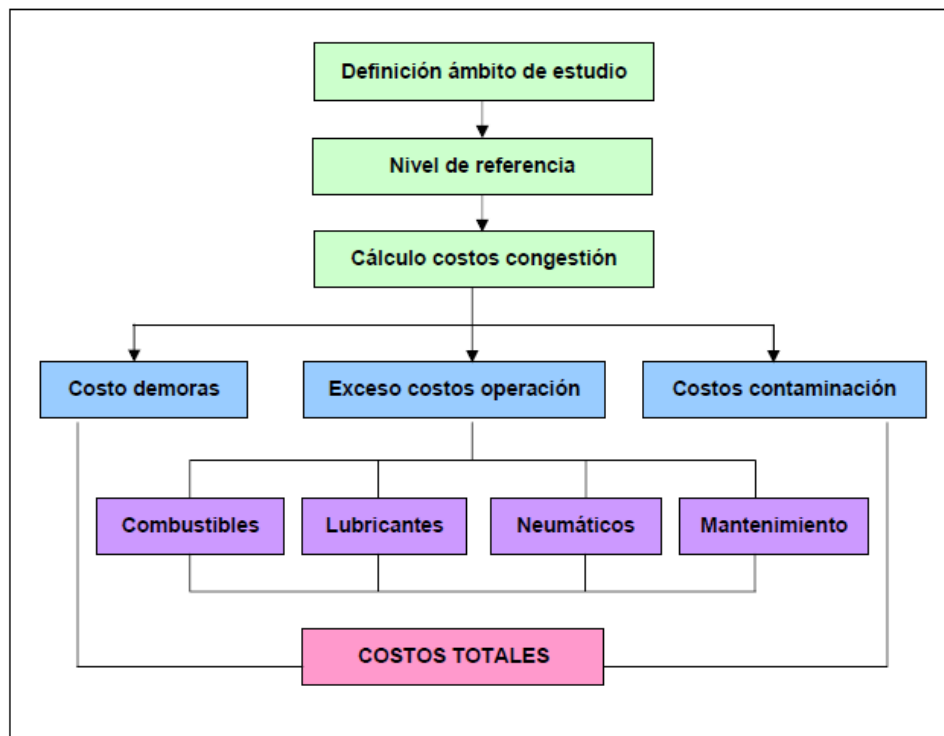


Fig. 52 Descomposición para el cálculo de costos totales del servicio a nivel macro (Díaz, 2004)

6.2.3 Incorporación del Factor Social

Aún asumiendo que se tiene la capacidad de realizar las mejores asignaciones en materia de distancias, tiempos y costos, se entiende la existencia de una variable más compleja de modelar como lo es el comportamiento humano, y la lógica detrás de sus decisiones en este contexto. Es un hecho que ante un par de sugerencias de matching de viajes, donde una opción claramente es menos costosa que la otra, en términos de tiempo y costo operativo como los aquí considerados, puede no resultar un factor determinante para la decisión de un participante. Esta puede verse

afectada por factores que no están siendo ponderados como lo es el factor social o cultural, que influye sustancialmente e incluso de manera subconsciente a la toma de decisiones de las personas (Amey et.al, 2011).

Factores demográficos como el sexo, la edad, cercanía socio-económica (Buliung, et al., 2009) hasta incluso temas de interés para conversar, puede resultar determinantes al momento de elección de un acompañante (Chen, et al., 2013). Si bien este tipo de factores categorizados como sociales o culturales escapan al alcance de este trabajo, se entiende que bien podrían aportar a la mejora e incentivo de estos servicios, procurando minimizar los problemas de resistencia que estos enfrentan, anticipando las consideraciones de los participantes ante las sugerencias o asignaciones realizadas. Algunos de los estudios más recientes (Amey et.al., 2011) muestran que el ridesharing debería enfocarse a lugares con gran cantidad de empleados ya que este público demuestra proveer grandes ventajas para la adopción del servicio, mitigando problemas de confianza y aumentando las posibilidades de viajes comunes.

Por otro lado también existen desafíos en el marco regulatorio de esta actividad (Amey et.al., 2011), los cuales deberán adaptarse para prevenir la violación de normas. Si bien estas son particulares y dependientes del contexto, existen antecedentes de estados que promocionan la práctica, como de prohibición.

7. Referencias

- A.N.D.C.U. (2014). *Los inconvenientes de viajar en ómnibus o taxi por Montevideo*. Montevideo: Asociación Nacional en Defensa de los Consumidores y Usuarios. Recuperado el 12 de 10 de 2015, de <http://andcu.org/estudio-explica-por-que-es-tan-incomodo-el-transporte-publico/>
- Adam, B. (2007). *Cooperative Game Theory*. New York: New York University Stern.
- Agatz, N., & Erera, A. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 295-303.
- Agatz, N., Erera, A., & Savelsbergh, M. (2011). Dynamic ride-sharing: A simulation study in metro Atlanta. *Transportation Research Part B*, 45(9), 1450–1464.
- Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M., & Wang, X. (2009). *Sustainable Passenger Transportation: Dynamic Ride-Sharing*. Rotterdam: Erasmus Research Institute of Management - ERIM.
- AMECO. (26 de 9 de 2013). *Uso de Teleféricos en Montevideo*. Recuperado el 10 de 11 de 2015, de América Economía: <http://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/proponen-el-uso-de-telefericos-en-montevideo-para-mejorar-el-transito>
- Amey, A., Attanucci, J., & Mishalani, R. (2011). Real-Time Ridesharing Opportunities and Challenges in Using Mobile Phone. *Transportation Research Record*, 2217, 103-110.
- Belcher, S. (4 de 12 de 2009). *Congress: Invest in Intelligent Transportation Systems to Create Jobs*. Recuperado el 12 de 10 de 2015, de www.thehill.com: <http://thehill.com/blogs/congress-blog/technology/70623-congress-invest-in-intelligent-transportation-systems-to-create-jobs>
- Beroldo, S. (1991). Ridemaching System Effectiveness: A coast-to-coast perspective. *Transportation Research Record*, 1321, 7-12.
- Bolella, G. (2010). *Intelligent Public Transportation Systems State-of-Art Transportation Tracking*. Connecticut: University of Connecticut.
- Brakewood, C., Barbeau, S., & Watkins, K. (2014). An experiment evaluation the impacts of real-time transit information on bus riders in Tampa, Florida. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 69, 409-422.
- Buliung, R., Soltys, K., Habel, C., & Lanyon, R. (2009). The "Driving" Factors Behind Successful Carpool Formation and Use. *Transportation Research Record*, 2118, 31-38.

- Caillaud, B. J. (2003). Chicken & Egg: Competition among intermediation service. *RAND Journal of Economics*, 34(2), 309-328.
- Casey, R. F. (2006). *Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art – Update 2006*. U.S. Department of Transportation - FTA.
- Casey, R. F., Labell, L. N., & Moniz, L. (2000). *Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art Update 2000*. Washington,: Federal Transit Administration.
- Castro, D., & Atkinson, R. (2008). Digital Quality of Life: Understanding the Personal and Social Benefits of the Information Technology Revolution. Obtenido de <http://ssrn.com/abstract=1278185> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1278185>
- Cats, O., Koutsopoulos, H. N., Burghout, W., & Toledo, T. (2011). Effect of Real-Time Transit Information on Dynamic Path Choice of Passengers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2217(2), 46-54.
- CCIT. (2010). *Intelligent Transportation Systems - Public Transit Technologies*. California Center for Innovative Transportation. Berkeley: ITS Berkeley.
- Chen, Y.-T., & Hsu, C.-H. (2013). Improve the Carpooling Applications with Using a Social Community Based Travel Cost Reduction Mechanism. *International Journal of Social Science and Humanity*, 3(2), 87-91.
- Dailey, D. L. (1999). Seattle smart traveler: dynamic ridematching on the. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 7(1), 17-32.
- Dessouky, M., Furuhashi, M., Ordoñez, F., Brunet, M.-E., Wang, X., & Koenig, S. (2013). *Dynamic Ridesharing Practice and Future Directions*. Obtenido de http://www-bcf.usc.edu/~maged/publications/RS_Survey.pdf
- DGMT. (2011). *Action Plan and Legal Framework For The Deployment of Intelligent Transport Systems (ITS) in Europe*. Directorate-General for Mobility and Transport. Publications Office of the European Union.
- Díaz, C. (2004). *Metodología para la evaluación de los costos de la movilidad en el transporte*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2099.1/3401>
- Eddington, R. (2011). *The Eddington Transport Study "The Case for Action: Sir Rod Eddington's Advice to Government"*. UK: Department for Transport. Recuperado el 10 de 11 de 2015, de <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-transport>
- Ellabib, I., Basir, O., & Calamai, P. (2002). An Experimental Study of a Simple Ant Colony System for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Ant Algorithms*, 2463, 53-64.

- Ezell, S. (2010). *Intelligent Transportation Systems*. Washington DC: The Information Technology & Innovation Foundation (ITIF).
- FHA. (2003). *Highway Traffic Operations and Freeway 32. Management: State-of-the-Practice Final Report*. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation. Obtenido de http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/jpodocs/repts_te/13801.html
- FTA. (20 de 08 de 2002). *Real-Time Transit Information Assessment*. Obtenido de Federal Transit Authority - National Transportation Library: http://ntl.bts.gov/lib/jpodocs/repts_te/13845.html
- Furuhata, M., Daniel, K., Koeing, S., Ordonez, F., Dessouky, M., Brunet, M., . . . Xiaoqing, W. (2014). Online Cost-Sharing Mechanism Design for Demand-Responsive Transport Systems. *IEEE Transaction on Intelligente Transportation Systems*, 16(2), 692 - 707.
- Furuhata, M., Ordóñez, F., Dessouky, M., Brunet, M.-E., Wang, X., & Koeing, S. (2013). Ridesharing: the State-of-the-art and Future Directions. *Transportation Research Part B*, 57, 28-46.
- Galland, S., Knapen, L., Yasar, A.-U.-H., Gaud, N., Janssens, D., Lamotte, O., . . . Wets, G. (2014). Multi-agent simulation of individual mobility behavior in carpooling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 45, 83-98.
- GAO. (2009). *Surface Transportation: Efforts to Address Highway Congestion 6. through Real-Time Traffic Information Systems Are Expanding but Face Implementation Challenges*. U.S. Government Accountability Office. Obtenido de <http://www.gao.gov/new.items/d10121r.pdf>
- Ghoseiri, K., Haghani, A., & Hamedi, M. (2011). *Real-Time Rideshare Matching Problem*. College Park: U.S. Department of Transportation. Obtenido de <http://www.mautc.psu.edu/docs/UMD-2009-05.pdf>
- GIGAOM. (7 de 11 de 2011). *7-charts-that-predict-the-future-of-mobile-broadband*. Obtenido de gigaom: <https://gigaom.com/2011/11/07/7-charts-that-predict-the-future-of-mobile-broadband/>
- Halsey, A. (2010). Smart traffic lights ease commuting. Except when they don't. *The Washington Post*. Obtenido de <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2010/01/04/AR2010010402807.html>
- Hwang, M., Kemp, J., Lerner-Lam, E., Neuerburg, N., & Okunieff, P. (2006). *Advanced Public Transportation Systems: State of the Art Update 2006*. Springfield: U.S. Department of Transportation.

- IDC. (10 de 01 de 2015). *Smartphone OS Market Share, 2015 Q2*. Obtenido de IDC Research Inc.: <http://www.idc.com/prodserv/smartphone-os-market-share.jsp>
- INE. (2013). Uruguay en Cifras. *Instituto Nacional de Estadística - Uruguay*.
- ITSRT. (26 de 9 de 2009). *Intelligent Transport Systems: Driving into the Future*. Obtenido de Road Traffic Technology: <http://www.roadtraffic-technology.com/features/feature42979>
- Kelley, K. L. (2007). Casual carpooling enhanced. *Journal of Public Transportation, 10*, 119-130.
- Kim, J. (2003). *Strategies for Developing an Intelligent Transportation Systems Industrial Base in South Korea*. Massachusetts Institute of Technology. Technology and Policy Program. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. Obtenido de <http://hdl.handle.net/1721.1/30031>
- Kocur, G., & Hendrickson, C. (1983). A model to assess cost and fuel savings from ride sharing. *Transportation Research Part B: Methodological, 17*(4), 305-318.
- Lee, A., & Savelsbergh, M. (2015). Dynamic ridesharing: Is there a role for dedicated drivers? *Transportation Research Part B: Methodological, 81*(2), 483-497.
- Levin, L. P., Mosell, M. K., Lamka, C. M., Savage, B. E., & Gray, M. J. (1977). Measurement of psychological factors and their role in travel behavior. *Transportation Research Record, 1*(649), 1-7.
- Merrill, K. R. (2007). *The Oil Crisis of 1973-1974: A Brief History with Documents*. Bedford/St. Martin's.
- MLIT. (2008). *ITS Handbook Japan 2007-2008*. The Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Japón: Japan Highway Industry Development Organization. Obtenido de http://www.mlit.go.jp/road/ITS/topindex/topindex_g02_handbook.html
- Morency, C. (2007). The ambivalence of ridesharing. *Transportation, 34*(2), 239-253.
- Nguyen, D. T. (2013). *Fair Cost Sharing Auction Mechanisms In Lasts Mile Ridesharing (Master Thesis)*. Singapore Management University. Singapur: Dissertation and Theses Collection (Open Access). Obtenido de http://ink.library.smu.edu.sg/etd_coll/93/
- Nielsen. (2007). *2006 Panorama Study Technical Report*. The Nielsen Company.
- Nourinejad, M., & Roorda, M. J. (2015). Agent based model for dynamic ridesharing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1*, 2-82.

- NTOC. (2007). *Executive Summary: 2007 National Traffic Signal Report Card*. National Transportation Operations Coalition. National Transportation Operations Coalition. Obtenido de <http://www.ite.org/reportcard>
- NTSTIFC. (1 de 2 de 2009). *Paying Our Way*. Obtenido de National Surface Transportation Infrastructure Financing Commission: http://financecommission.dot.gov/Documents/NSTIF_Commission_Final_Report_Advance%20Copy_Feb09.pdf
- NU.CEPAL. (2001). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Obtenido de <http://www.cepal.org/es/publicaciones/6381-la-congestion-del-transito-urbano-causas-y-consecuencias-economicas-y-sociales>
- OISEVI. (2015). Recuperado el 01 de 05 de 2015, de Observatorio Iberoamericano de Seguridad Vial: <http://www.oisevi.org>
- Penwill-Cook, F. (2008). *Intelligent Transportation Systems: Driving into The Future*. Obtenido de Road Traffic Technology: <http://www.roadtraffic-technology.com/features/feature42979>
- Peralta, C. R., & Rodas, H. V. (2013). *Estructura de Costos Operativos de Vehículos Automotores*. Dinatran, Dirección General de Planificación de Transporte. Paraguay: Dirección Nacional de Transporte. Obtenido de <http://www.dinatran.gov.py/docum/costos2013.pdf>
- Psetizki, V. (2010). *Uruguay: Un infierno fiscal*. Montevideo: BBC Economía. Recuperado el 10 de 11 de 2015, de http://www.bbc.com/mundo/economia/2010/03/100325_1654_uruguay_impuestos_gz.shtml
- Rapenning, A., & Ioannidou, A. (2006). *Mobility Agents: Guiding and Tracking Public*. *AVI '06 Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces* (pp. 127-134). New York: AgentSheets, Inc.
- RITA. (2009). *Intelligent Transportation Systems (ITS) Strategic Plan: Background and Processes*. Research and Innovative Technology Administration. U.S. Government Accountability Office (GAO).
- RUCS. (2013). Foro Nacional sobre Sustentabilidad. *Red Uruguay de Ciudades Sustentables*. Obtenido de <http://www.redciudades.org.uy/noticias/82-se-realizo-el-iv-foro-nacional-sobre-sustentabilidad>
- Rupprecht. (2012). *The State-of-the-Art of Sustainable Urban Mobility Plans in Europe*. Rupprecht Consult. Cologne, Germany: Mobility Plans.

- Savelsbergh, M., & Sol, M. (1995). The General Pickup and Delivery. *Transportation Science*, 29(1), 17-29.
- Staley, S., & Moore, A. (2013). Mobility First. *Transportation Research Forum*, 52(2), 151-153.
- Subrayado. (10 de 11 de 2014). *Colapso Establecido*. Obtenido de <http://subrayado.com.uy/Site/noticia/23835/expertos-en-transito-el-colapso-esta-establecido-en-montevideo>
- Thielman, E. (2008). Keynote Speech 15th ITS World Congress. New York: ITS World Congress.
- UIT. (2013). Midiendo la sociedad de la información. *Unión Internacional de Telecomunicaciones*.
- UKPOST. (2009). *Intelligent Transport Systems*. London: United Kingdom Parliamentary Office of Science and Technology.
- UNESCAP. (2009). *Using Intelligent Transport System (ITS) for Sustainable Development of Asia*. Bangkok: Economic and Social Commission for Asia and the Pacific - United Nations.
- URSEC. (2013). Informe de Mercado de Telecomunicaciones 2013. *Unidad Reguladora de Servicios de Comunicación - Uruguay*, 4-10. Obtenido de <https://www.ursec.gub.uy/inicio/transparencia/informacion-estadistica-y-de-mercado/telecomunicaciones/>
- USDOT. (2010). *Ridesharing Options Analysis and Practitioners' Toolkit*. Cambridge: U.S. Department of Transportation. Obtenido de U.S Department of Transportation: https://www.planning.dot.gov/documents/ridesharingoptions_toolkit.pdf
- USDOTa. (2010). *Intelligent Transportation Systems (ITS) Strategic Plan: Background and Processes*. Research and Innovative Technology Administration. U.S. Department of Transportation. Obtenido de http://www.its.dot.gov/strat_plan/pdf/IntelliDriveBook_Jan2010.pdf

A. Principales Contaminantes del Aire Relacionados al Transporte

Monóxido de carbono (CO)

El CO es un gas que se produce a partir de la combustión a bajas concentraciones de oxígeno, lo que se denomina combustión incompleta. La bibliografía indica que 86% de las emisiones mundiales de este tipo proviene del transporte, seguida con 6% por quema de combustible en la industria y 3% por procesos industriales, el 4% restante se origina en quemas y otros procesos no identificados. En forma natural se genera a partir de la oxidación de metano, comúnmente producida por la descomposición de materia orgánica.

El CO puede causar efectos adversos en la salud ya que compite con el O₂ en el torrente sanguíneo, lo que reduce la capacidad de la sangre de transportar el oxígeno a los diferentes órganos. Las personas sensibles, particularmente aquellas con problemas cardíacos, pueden ver disminuida su capacidad de oxigenación.

Sin embargo, las concentraciones de CO raras veces exceden los límites establecidos para la preservación de la salud, incluso en grandes centros urbanos.

Óxidos de Nitrógeno (NO, NO₂, NO_x)

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) describen una mezcla de dos gases: óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Son gases inorgánicos formados por la combinación de oxígeno con el nitrógeno del aire. El NO es producido en cantidades mucho mayores pero se oxida rápidamente a NO₂ en la atmósfera. La emisión de este gas se debe fundamentalmente a transporte (62%), combustión para generación de energía, mecánica y eléctrica (30%) y procesos industriales (7%). Son originados naturalmente por descomposición bacteriana, incendios forestales y actividad volcánica.

Actualmente la evidencia científica relaciona la exposición de corto plazo con efectos respiratorios. Se ha encontrado que la concentración de NO₂ en las cercanías de vías de tránsito importantes puede ser considerable, por lo que es importante considerar el efecto en individuos sensibles.

El NO₂ causa efectos perjudiciales en los bronquios, puede irritar los pulmones y bajar la resistencia a infecciones respiratorias. Contribuyen a la formación de la lluvia ácida, aumentan la concentración de nitratos en suelos y aguas superficiales. Estos óxidos reaccionan con otras partículas en el ambiente y se integran al material particulado; en presencia de compuestos orgánicos volátiles y radiación solar reaccionan generando ozono (O₃) que también puede tener efectos adversos sobre el sistema respiratorio de la población sensible.

Referencia: Six common Pollutants- Carbon Monoxide . Air emission Sources United States- Environmental Protection Agency.

Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂ es un gas muy reactivo en la atmósfera. Casi todos los combustibles fósiles tienen rastros de azufre en su composición, por lo que el SO₂ se emite fundamentalmente a través de la quema de combustibles fósiles (93%) tanto en la industria como en la generación de energía eléctrica, seguido por las emisiones asociadas a los procesos industriales y el transporte.

Actualmente la Organización Mundial de la Salud ha establecido una correlación directa entre los efectos negativos que afectan al aparato respiratorio y la concentración de SO₂ en el aire, mencionándose especialmente la aparición de broncoespasmos y efectos en asmáticos.

El SO₂ se utiliza como indicador de la familia de los óxidos azufrados que se denominan genéricamente SO_x. La presencia de SO₂ en la atmósfera es responsable directamente de la acidez de la lluvias.

Referencia: Air Pollutants- Sulfur dioxide (SO₂)- EPA Sulfur Dioxide Site -Air emission Sources. United States- Environmental Protection Agency.

Material Particulado (PM)

El término Material Particulado incluye partículas sólidas o líquidas que, por su pequeño tamaño, permanecen suspendidas en el aire. La caracterización de las partículas suspendidas en el aire se realiza de acuerdo a su tamaño. Este se indica en el nombre **PM_n**, correspondiendo la n al diámetro aerodinámico de las partículas retenidas (usualmente expresado en micrómetros –um-).

En general, se considera que cuando el diámetro aerodinámico de estas partículas es mayor a 100 um sedimentan rápidamente y no permanecen en el aire un tiempo suficiente para ser trasladadas más allá de algunos metros. Las partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor de 100 y mayor de 0,01 um son las que tienen comparativamente una alta estabilidad en la atmósfera.

Estas partículas incluyen polen, material biológico microscópico, polvo, recirculación de suelo, hollín y otros pequeños sólidos. En el ambiente urbano se originan fundamentalmente a partir de re-suspensión de suelo, quema de combustibles en fuentes móviles e industrias, incineración no controlada, algunos procesos industriales y quema de leña. Por otra parte y adicionalmente, en cercanías del mar se producen aerosoles con altas concentraciones de cloruro de sodio de origen natural.

El material particulado total se denomina **PTS (Partículas Totales en Suspensión)** y es la suma de todas las partículas suspendidas hasta 100 um de diámetro aerodinámico. El **particulado grueso o PM₁₀** corresponde a la fracción de partículas cuyo diámetro es menor de 10 um; este grupo es particularmente relevante para la salud, porque pueden ser inhaladas y penetrar las vías respiratorias más allá de la laringe. El material **particulado fino** corresponde a la fracción menor

de 2,5 um de diámetro, denominada también fracción respirable porque eventualmente puede llegar al torrente sanguíneo.

La porción de material particulado proveniente de la combustión incompleta de combustible fósil contiene una alta concentración de carbono orgánico en su composición. Este parámetro se puede evaluar a través de diferentes metodologías que permiten estimar su concentración en el aire. Usualmente se lo conoce como **humo negro** y es uno de los mayores contribuyentes del particulado fino; es suficientemente pequeño como para ser inhalado.

Referencia: IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). Organización internacional autoridad reconocida en nomenclatura y terminología química a nivel mundial. Ver Bibliografía. NACAA (National Association of Clean Air Agencies). Asociación Nacional de las agencias para el aire limpio EPA (Environmental Protection Agency)