

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación



TESIS DOCTORAL

APLICACIÓN DE SISTEMAS GNSS Y SIG A INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE. ESTUDIO SOBRE CONDUCCIÓN NATURALISTA

Programa de doctorado en INGENIERÍA CIVIL

Doctorado Internacional

Politecnico di Torino (ITALIA)

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture

Responsable doctorado internacional (PhD supervisor): Dr. Marco Bassani



Presentada por:

José Balsa Barreiro

Codirigida por:

Dr. F. Alberto Varela García

Dr. Pedro M. Valero Mora

Dr. Rubén C. Lois González

UNIVERSITY OF A CORUÑA

Engineering School of Roads, Channels and Ports (Civil Engineering)

Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación



DOCTORAL DISSERTATION

THE APPLICATION OF GNSS AND GIS SYSTEMS ON TRANSPORT INFRASTRUCTURES. A STUDY FOCUSING ON NATURALISTIC DRIVING

Doctoral programme in CIVIL ENGINEERING

International Doctorate

Politecnico di Torino (ITALY)

Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering

Responsible for international doctorate (PhD supervisor): Dr. Marco Bassani



Presented by:

José Balsa Barreiro

Codirected by:

Dr. F. Alberto Varela García

Dr. Pedro M. Valero Mora

Dr. Rubén C. Lois González



Universidade da Coruña
UDC



E.T.S. de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos



Departamento de Métodos
Matemáticos e de Representación

D. Francisco Alberto Varela García, profesor del Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad da Coruña,

D. Pedro M. Valero Mora, catedrático del Departamento de Metodología de las Ciencias del Comportamiento de la Facultad de Psicología de la Universidad de Valencia y director del grupo de simulación y nuevas tecnologías (SINTEC) del Instituto de Investigación en Tráfico y Seguridad Vial (INTRAS),

D. Rubén C. Lois González, catedrático del Departamento de Geografía de la Universidad de Santiago de Compostela,

INFORMAN

Que la memoria titulada “**Aplicación de sistemas GNSS y SIG a infraestructuras de transporte. Estudios sobre conducción naturalista**”, presentada por el Licenciado en Geografía, Ingeniero Superior en Geodesia y Cartografía e Ingeniero Mecánico D. **José Balsa Barreiro**, ha sido realizada bajo su dirección, cumpliendo los requisitos exigidos en la legislación vigente y ajustándose al proyecto de Tesis Doctoral inicialmente presentado para optar al grado de Doctor en Ingeniería Civil por la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (ETSECCP) de la Universidad da Coruña (UDC).

F. Alberto Varela García

Pedro M. Valero Mora

Rubén C. Lois González

A Coruña (España), a 01 de Septiembre de 2014.



**POLITECNICO
DI TORINO**

Department of Environment, Land
and Infrastructure Engineering

Marco BASSANI, Ph.D.

Associate Professor in Road, Railway and Airport Engineering

Torino (Italy), September 1st, 2014

I, the undersigned **Marco Bassani**, professor of Road, Railway and Airport Engineering at the department of Environment, Land and Infrastructures Engineering (DIATI) of the **Politecnico di Torino**,

INFORM THAT

the PhD thesis titled:

***The application of GNSS and GIS systems on transport infrastructures.
Studies focusing on naturalistic driving***

and presented by Mr. **José Balsa-Barreiro**, who holds a Degree in Geography, Senior Engineer in Geodesy and Cartography and Mechanical Engineer, has been developed under my responsibility to obtain the recognition of International Doctorate.

Mr. Balsa-Barreiro informed me that he fulfilled all the requirements of current legislation which adjusted to the thesis project initially submitted to complete the doctorate in Civil Engineering by the School of Civil Engineering and Ports (ETSECCP) at the University of A Coruña (UDC).

Yours faithfully,


prof. Marco Bassani

La realización de este proyecto de tesis ha contado con la financiación del *Programa María Barbeito* (2006-2009), encuadrado dentro del *Plan Galego de Investigación, Desenvolvemento e Innovación Tecnolóxica de Galicia-INCITE*.

Hoy no me desplazo a grandes trancos por la vida,
es mi andar discreto e indiscreta es mi alegría,

...

Amo el tiempo y su elasticidad.

(AV)

A Fina Barreiro

My special dedication to Josef Landsperger, one of the bravest men in the world

Agradecimientos

La finalización de este proyecto de tesis supone un cambio de ciclo en mi vida. Durante este período he aprendido a ser más relativista en mi forma de pensar, además de ser más sensible hacia las cosas que realmente importan. Este es el momento óptimo para hacer un ejercicio de memoria y agradecer, de la forma más sentida y sincera, a una serie de personas tanto desde un punto de vista profesional como personal.

A Sarah. Ha sido mi gran apoyo. Por su paciencia, empatía, comprensión y cariño. Siempre ha sido mi *pack completo*. De ella es parte de esta tesis. PD: Ahora tiene más sentido la canción de Julio de la Rosa.

A mi familia. Siempre ha estado ahí. Como siempre.

A la familia Landsperger, por su inestimable apoyo y cariño. Sé que es mutuo.

A mis directores. Supone un orgullo personal enorme el que en este proyecto de tesis pudiera contar con este equipo de directores. Rubén desde prácticamente toda mi vida universitaria, Alberto de muchos años también y Pedro desde el comienzo de este proyecto de tesis. Todos ellos han sido importantes. Gracias por permitirme seguir aprendiendo, por guiarme y aconsejarme en el desarrollo de este trabajo. Siempre he intentado estar a la altura.

Al *Instituto de Investigación en Tráfico y Seguridad Vial (INTRAS)* de la *Universitat de València* por la cesión de datos. A todo el personal (en especial a Pedro, Jaime, Jean François, Ignacio y Anita), por su buena acogida y el buen trato personal.

A Txomin Hemosilla y Andrés Rovira por ser, además de amigos, uno de mis referentes académicos durante estos últimos años. Gracias por vuestros consejos tanto profesionales como personales.

A Luis Dueñas y Raquel Fernández, por su amistad de todos estos años.

Al *Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría* de la *Universitat Politècnica de València*, excompañeros y profesorado. Quiero acordarme especialmente de José Luis Berné y José Luis Lema por todos estos años de trabajo en conjunto y de amistad personal.

Al *Centro de Investigación de Tecnología de Vehículos (CITV)* de la *Universitat Politècnica de València*, con el que pude colaborar durante el desarrollo de esta tesis.

To the *Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI)* of the *Politecnico de Torino* and, especially to Dr. Marco Bassani, for his indispensable supervision, work and cooperation. Also for his kindness and support during my vacancy in Torino. Moreover I want to remember all the people I met in Torino (especially all my friends in the residence *Paolo Borsellino*) who made me feel like at home.

Quiero además acordarme especialmente de Aréjan Op de Haar, a quien tengo un cariño enorme, y todos mis amigos de Valencia, con los que durante todos estos años he ido quedando. En especial Isabela, Raúl y Hatim, por ser los que más me sufrieron.

Quiero que sepáis todos vosotros que siento un orgullo enorme por conocerlos. Esta es una ocasión genial para recordarlo. De la misma forma espero que os sintáis correspondidos. Al menos, esa es siempre mi intención.



Autor: José Balsa-Barreiro

Título de la tesis doctoral: Aplicación de sistemas GNSS y SIG a infraestructuras de transporte. Estudio sobre conducción naturalista

Programa de doctorado: Ingeniería Civil

Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidade da Coruña

Codirección: Instituto de Tráfico y Seguridad Vial (INTRAS) de la Universidad de Valencia

Directores: F. Alberto Varela García; Pedro M. Valero Mora; Rubén C. Lois González

Doctorado Internacional: Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI). Politecnico di Torino (Italia)

Responsable del doctorado internacional: Marco Bassani

Campo de investigación: Ingeniería civil – infraestructuras de transporte – seguridad vial – tráfico – sistemas SIG – sistemas GNSS – geoprocesamiento de datos

Fecha: Septiembre, 2014

Idioma: Español, gallego e inglés

RESUMEN

Los estudios sobre tráfico presentan un gran interés en las sociedades actuales, siendo posible abordarlos desde un gran número de perspectivas de análisis. Ejemplos concretos son los estudios centrados en gestión de mercancías, la propuesta de modelos de movilidad más eficientes y los estudios sobre seguridad vial. Este último enfoque es uno de los que más interés presenta debido a los altos costes sociales y económicos derivados del siempre elevado número de muertes y heridos en carretera. El éxito de estos estudios se demuestra habitualmente con la adopción y puesta en marcha de ciertas medidas o normativas por parte de las instituciones responsables. El interés por estos temas no se limita únicamente a las administraciones públicas, sino también a numerosas empresas del sector privado tales como compañías aseguradoras o automovilísticas, entre otras.

La investigación en seguridad vial presenta una gran complejidad debido a la interacción entre diversos elementos, la influencia de ciertos escenarios o la dificultad en la modelización del comportamiento humano en determinadas circunstancias. La mayor parte de estudios precedentes emplean métodos de experimentación que ofrecen una visión parcial y/o subjetiva de la realidad. La conducción naturalista se ha convertido en uno de los métodos de experimentación más óptimos para este tipo de estudios gracias a sus numerosas ventajas, permitiendo observar de forma continuada e inobstrusiva las actitudes al volante de una serie de conductores en condiciones reales de conducción. Sin embargo, este método presenta una serie de inconvenientes asociados a su procedimiento, tales como la generación de grandes volúmenes de datos que resultan difíciles de manejar y procesar, la falta de metodologías de trabajo claramente aceptadas, las pérdidas de información y la falta de aprovechamiento de algunos datos.

La mayor parte de estudios publicados plantean estrategias de reducción y filtrado de los datos obtenidos a ciertos tramos de vía o eventos muy concretos. Para ello desarrollan programas de software propios centrados en los objetivos específicos de análisis. La mayor parte de estos programas son de pago y uso restringido, presentan interfaces de representación poco optimizadas y ofrecen una limitada capacidad de procesamiento y análisis de los datos.

Los *Sistemas de Información Geográfica* (SIG) permiten obtener una representación cartográfica del conjunto de datos en función de su componente espacial. La representación espacial favorece una interpretación más clara de los datos, permitiendo incrementar el nivel de explotación de la información. Sin embargo, las pérdidas de datos de posicionamiento son frecuentes en este tipo de experimentos. Por esta razón, se requiere la implementación de una serie de estrategias para la adquisición de este tipo de datos durante la fase de diseño, previa al experimento. Los sistemas GNSS, normalmente complementados con sistemas diferenciales u otro tipo de sensores complementarios, permiten obtener la mejor estrategia de posicionamiento en función de las especificaciones técnicas, del objetivo y del presupuesto de cada uno de los proyectos de investigación. En caso de proyectos y experimentos llevados a cabo, se propone un procedimiento altamente fiable para la recuperación de datos de posicionamiento durante pérdidas largas. Este procedimiento presenta una gran importancia debido a la gran cantidad de recursos económicos requeridos por este tipo de proyectos de conducción naturalista.

Por tanto, este trabajo propone una nueva metodología de procesamiento y análisis de datos de conducción naturalista a partir de la componente geográfica de la información. Esta metodología presenta unos mayores niveles de eficiencia en el uso de recursos durante cualquiera de las fases del proyecto: captura, análisis e interpretación de los datos. Esta metodología permite asimismo incrementar la fiabilidad de los resultados obtenidos respecto a las metodologías precedentes.



Autor: José Balsa-Barreiro

Título da tese de doutoramento: Aplicación de sistemas GNSS e SIX a infraestruturas de transporte. Estudio sobre conducción naturalista

Programa de doutoramento: Enxeñería Civil

Departamento de Métodos Matemáticos e de Representación
Escola Técnica Superior de Enxeñeiros de Camións, Canais e Portos
Universidade da Coruña

Codirección: Instituto de Tráfico e Seguridade Vial (INTRAS) da Universidade de Valencia

Directores: F. Alberto Varela García; Pedro M. Valero Mora; Rubén C. Lois González

Doutoramento Internacional: Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI). Politecnico di Torino (Italia)

Responsable do doutoramento internacional: Marco Bassani

Campo de investigación: Enxeñería civil – infraestruturas de transporte – seguridade vial – tráfico – sistemas SIX – sistemas GNSS – xeoprocesamento de datos

Data: Setembro, 2014

Lingua: Español, galego e inglés

RESUMO

Os estudos sobre tráfico presentan unha grande interese nas sociedades actuais, sendo posible abordalos dende un grande número de perspectivas de análise. Exemplos concretos son os estudos centrados na xestión de mercancías, a proposta de modelos de mobilidade máis eficientes e os estudos sobre seguridade vial. Este último enfoque é un dos de máis interese debido aos altos custos sociais e económicos derivados do sempre elevado número de mortes e feridos nas estradas. O éxito destes estudos ponse de manifesto a miúdo coa adopción e posta en marcha de certas medidas ou normativas por parte das institucións responsables. O interese por estes temas non se limita unicamente ás administracións públicas, senón tamén a numerosas empresas do sector privado tales como compañías aseguradoras ou automovilísticas, entre outras.

A investigación en seguridade vial presenta unha grande complexidade debido á interacción entre diversos elementos, a influencia de certos escenarios ou a dificultade na modelización do comportamento humano en determinadas circunstancias. A maior parte de estudos precedentes empregan métodos de experimentación que ofrecen unha visión parcial e/ou subxetiva da realidade. A conducción naturalista á un dos métodos de experimentación máis óptimos para este tipo de estudos grazas as súas numerosas ventaxas, permitindo observar de forma continuada e inobstruiva as actitudes ao volante dunha serie de condutores en condicións reais de conducción. Sen embargo, este método presenta unha serie de inconvenientes asociados ao seu procedemento tales como a xeración de grandes volúmenes de datos difíciles de manexar e procesar, a falta de metodoloxías de traballo claramente aceptadas, as perdas de información e a falla de aproveitamento dalgúns datos.

A maior parte de estudos publicados plantexan estratexias de redución e filtrado dos datos obtidos a certos tramos de vía ou eventos moi concretos. Para elo desenvolven programas informáticos propios centrados nos obxectivos específicos de análise. A maior parte destes programas son de pago e uso restrinxido, presentan interfaces de representación pouco optimizadas e ofrecen unha limitada capacidade de procesamento e análise dos datos.

Os *Sistemas de Información Xeográfica* (SIX) permiten obter unha representación cartográfica do conxunto de datos en función da súa compoñente espacial. A representación espacial favorece unha interpretación máis clara dos datos, ademais de incrementar o nivel de explotación da información. Sen embargo, as perdas de datos de posicionamento son frecuentes neste tipo de experimentos. Por esta razón, requírese a implementación dunha serie de estratexias para a adquisición de este tipo de datos durante a fase de deseño, previa ao experimento. Os sistemas GNSS, normalmente complementados con sistemas diferenciais ou outro tipo de sensores complementarios, permiten obter a mellor estratexia de posicionamento en función das especificacións técnicas, do obxectivo e do presuposto de cada un dos proxectos de investigación. No caso de proxectos e experimentos levados a cabo, propónse un procedemento altamente fiable para a recuperación de datos de posicionamento durante perdas longas. Este procedemento presenta unha gran importancia debido á grande cantidade de recursos económicos requiridos por este tipo de proxectos de conducción naturalista.

Polo tanto, este traballo propón unha nova metodoloxía de procesamento e análise de datos de conducción naturalista a partires da compoñente xeográfica da información. Esta metodoloxía presenta uns maiores niveis de eficiencia no uso de recursos durante calquera das fases do proxecto: captura, análise e interpretación dos datos. Esta metodoloxía permite así mesmo incrementar a fiabilidade dos resultados obtidos respecto ás metodoloxías precedentes.



Author: José Balsa-Barreiro

Title of the doctorate thesis: The application of GNSS and GIS systems on transport infrastructures. A study focusing on naturalistic driving

Doctoral programme: Civil Engineering

Mathematical Methods and Representation Department
Engineering School of Roads, Channels and Ports (Civil Engineering)
University of A Coruña

Codirection: Research Institute of Traffic and Road Safety of the University of Valencia

Directors: F. Alberto Varela García; Pedro M. Valero Mora; Rubén C. Lois González

International PhD: Department of Environment, Land and Infrastructures Engineering (DIATI). Politecnico di Torino (Italy)

Responsible for internacional PhD: Marco Bassani

Research field: Civil engineering – transport infrastructures – road safety – traffic – GIS systems – GNSS systems – geoprocessing of data

Date: September, 2014

Language: Spanish, galician and english

ABSTRACT

Traffic studies are of great interest in today's societies, as they provide numerous aspects of research such as studies on fleet management, on how to achieve a more efficient mobility as well as studies on road safety. The latter ones present a great importance due to their high social and economic costs caused by the elevated number of road deaths and injuries. The success of these studies can usually be observed by the implementation of certain measures and regulations by the responsible institutions. Not only public institutions are interested in these topics but also numerous private companies such as insurance and automotive companies, among others.

Research on road safety is highly complex due to the interaction of multiple factors, the influence of some scenarios or the difficulty in modelling human behavior in certain circumstances. Most previous studies use experimentation methods which offer a partial and/or subjective perspective of reality. Naturalistic driving has thus become one of the most suitable methods for these kinds of studies as it has many advantages regarding the aspect of observation. It offers the possibility to continuously and inobtrusively observe the behaviour for a group of drivers in real driving conditions. However, this method has several drawbacks regarding its procedure such as large volumes of data which are difficult to handle and process, the lack of a clearly defined work methodology, data losses and the low exploitation of some data.

Most of the published studies offer strategies to reduce and filter the collected data in certain road sections or in very specific events (incidents). For this reason, software programmes are developed for a specific object of study. Most of these programmes are pay software and restricted use, present unfriendly and low optimized user interfaces and have a limited capacity for the processing and analysis of the data.

Geographic Information Systems (GIS) provide a cartographic representation of the dataset from the spatial component of the information. This representation model provides a clearer interpretation of the data, increasing the level of exploitation of the information. However, (positioning) data losses are quite common in these experiments. Therefore, a number of strategies are needed to obtain positioning data during the previous phase to the experiment. GNSS systems, usually complemented with differential systems or other sensors, provide the best positioning strategy in function of technical specifications, the objectives and the budget for each research project. Regarding former projects and experiments, a highly reliable procedure to recover positioning data that are missing during long time periods is proposed. This procedure presents a great importance due to the elevated cost of naturalistic driving projects.

Therefore, this paper proposes a new methodology regarding the processing and analysis of naturalistic driving data from the geographic component of the information. This methodology presents a greater efficiency of use of the resources at any phase of the project: capturing, analysis and interpretation of the data. This methodology also increases the reliability of the results obtained with respect to the previous methodologies.



Autore: José Balsa-Barreiro

Titolo della tesi di dottorato: L'applicazione dei sistemi GNSS e GIS alle infrastrutture di trasporto. Studi incentrati sulle osservazioni naturalistiche di guida

Programma di dottorato: Ingegneria Civile

Dipartimento di Metodi Matematici e Rappresentazione
Scuola di ingegneria di Strade, Canali e Porti (Ingegneria Civile)
Università de A Coruña

Codirezione: Istituto di Traffico e Sicurezza Viaria (INTRAS) dell'Università di Valencia

Direttori: F. Alberto Varela García; Pedro M. Valero Mora; Rubén C. Lois González

Dottorato internazionale: Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI). Politecnico di Torino (Italia)

Responsabile del dottorato internazionale: Marco Bassani

Campo di ricerca: Ingegneria civile – Infrastrutture di trasporto – Sicurezza stradale – Traffico – Sistemi GIS – Sistemi GNSS – Trattamento dati georiferiti

Data: Settembre, 2014

Lingua: Spagnolo, galiziano e inglese

SINTESI

Gli studi di traffico sono di grande interesse nelle moderne società poiché mirano a risolvere i problemi riguardanti la gestione delle correnti veicolari, al fine di realizzare una mobilità più efficiente e sicura. Quelli sulla sicurezza, in particolare, sono di grande importanza in ragione degli elevati costi sociali ed economici associati ai morti e feriti della strada. Il successo di questi studi si ha quando sono adottate nuove misure e regole di contrasto all'incidentalità. Non solo le istituzioni pubbliche, ma anche aziende private (es. compagnie di assicurazione, case automobilistiche) sono coinvolte a pieno titolo su questi temi.

La ricerca sulla sicurezza stradale è complessa a causa dell'interazione di molteplici fattori, dell'influenza di alcuni scenari e della difficoltà di modellare il comportamento umano in determinate circostanze. La maggior parte degli studi già pubblicati utilizza metodi sperimentali che offrono una prospettiva parziale e/o soggettiva della realtà. I rilievi di guida di tipo naturalistico sono invece considerati più adatti perché prevedono l'elaborazione di dati di tipo osservazionale, in cui è assente ogni effetto prodotto dello sperimentatore. Essi prevedono l'osservazione continua e non invasiva del comportamento di un gruppo di guidatori in condizioni di guida reali. Tuttavia, il metodo naturalistico presenta alcuni inconvenienti riguardanti il trattamento di grandi volumi di dati, la mancanza di una metodologia di lavoro ben definita, le perdite di dati e il basso sfruttamento di alcuni di essi.

La maggior parte degli studi pubblicati offre strategie per ridurre e filtrare i dati raccolti in alcune sezioni stradali o in luoghi o eventi molto specifici (laddove per esempio avviene un incidente o anche un semplice conflitto tra veicoli). Per questo motivo, alcuni software sono stati sviluppati per specifici obiettivi di studio. La maggior parte di questi, tuttavia, è a pagamento e di uso limitato, presenta interfacce con l'utente ostili e di bassa qualità e hanno una capacità limitata per l'elaborazione e l'analisi dei dati.

I Sistemi Informativi Geografici (GIS) forniscono invece una rappresentazione cartografica dei dati attraverso la componente spaziale delle informazioni. Questi sistemi permettono una più chiara rappresentazione dei dati e aumentano il livello di sfruttamento delle informazioni. Tuttavia, è ancora abbastanza frequente la perdita di dati che rende necessaria l'adozione di strategie per ottenere il posizionamento. A tale scopo, i sistemi GNSS, di solito integrati con i sistemi differenziali o altri sensori, forniscono la migliore strategia di posizionamento in funzione delle specifiche tecniche, degli obiettivi e del budget disponibile per il progetto di ricerca. Rispetto a precedenti metodologie, in questa tesi si propone una nuova procedura, molto affidabile, per recuperare i dati di posizionamento che mancano per lunghi periodi di tempo. Questa procedura è di grande rilevanza se si considerano gli elevati costi associati ai rilievi di guida di tipo naturalistico.

In definitiva, nel documento di tesi si propone una nuova metodologia per l'elaborazione e l'analisi dei dati di guida naturalistica dalla componente geografica dell'informazione. La metodologia proposta presenta una maggiore efficienza di utilizzo delle risorse in ogni fase: dall'acquisizione, all'analisi e all'interpretazione dei dati. Essa comporta una maggiore affidabilità dei risultati rispetto a metodologie precedenti proposte in letteratura.



Lista de acrónimos

AB	Active Beacon
ABAS	Aircraft Based Augmentation System
ABS	Antilock Braking System
ACC	Adaptive (Autonomous) Cruise Control
ADS	Automatic Dependent Surveillance
Aena	Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea
AFI	African Indian Ocean Geographic Region
ALASCA	Automotive Laser Scanner
AMSS	Aeronautical Mobile Satellite Service
ANFIS	Adaptive Network Fuzzy Inference System
AODC	Age of Data Clock
AODE	Age of Data Ephemerides
APV	Aproximación con guía vertical
ARRB	Australian Road Research Board
A-S	Anti-Spoofing
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASQF	Application Specific Qualification Facility
ATIMU	Advanced Tactical Inertial Measurement Unit
AutoNav	Autonomous Navigation
AVL	Automatic Vehicle Location
BDS	Black Diamond System
BMI	Body Mass Index
BPSK	Binary Phase Shift Keying
C/A	Course Acquisition
CABLED	Coventry and Birmingham Low Emission Demonstrators
CAS	Collision Avoiding System
CBD	Central Business District
CCF	Central Control Facility
CDMA	Code Division Multiple Access
CEP	Circular Error Probable
CERTH	Centre for Research and Technology Hellas
CIA	Central Intelligence Agency (US government)
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CORS	Continuously Operating Reference Stations
CPF	Central Processing Facility
CSOC	Consolidated Space Operations Center
CWAAS	Canadian Wide Area Augmentation System
DaCoTa	Data Collection, Transfer and Analysis
DAS	Data Acquisition Systems
DASA	Deutsche Aerospace AG
DASS	Distress Alerting Satellite System
DBMS (SGBD)	Database Management System (Sistemas Gestores de Bases de Datos)
DBQ	Driver Behaviour Questionnaire
DFS	Deutsche Flugsicherung GmbH
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DGPS	Differential Global Positioning System
DGT	Dirección General de Tráfico
DIATI	Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (Politecnico di Torino)
DMMR	Departamento de Métodos Matemáticos e de Representación (Universidade da Coruña)
DNA	Directorate of Air Navigation
DNSS	Defense Navigation Satellite System
DoD	Department of Defense (US government)
DOP	Dilution of Precision
DoT	Department Of Transportation (US government)
DR	Dead Reckoning
DS-CDMA	Direct Sequence Code Division Multiple Access
DTM (MDT)	Digital Terrain Model (Modelo Digital del Terreno)
EC (CE)	European Commission (Comisión Europea)
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service



eLORAN	Enhanced Long Range Navigation
ENAV	Ente Nazionale Di Assistenza Al Volo
ENT	EGNOS Network Time
ESA	European Space Agency
ESESA	EGNOS Service Extension to South Africa
ESP	Electronic Stability Programme
EU (UE)	European Union (Unión Europea)
EUROFOT	Europe Field Operation Test
EWAN	Ethernet Wide Area Network
FAA	Federal Aviation Administration
FANS	Future Air Navigation System
FCW	Forward Collision Warning
FDE	Failure Detection Electronics
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FESTA	Field Operational Test Networking and Methodology Promotion
FMCSA	Federal Motor Carrier Safety Administration (US government)
FOC	Full Operational Capability
FOG	Fiber Optic Gyroscope
FOP	Final Operational Phase
FOT	Field Operational Test
FOV	Field of View
GA	Ground Antenna
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation
GB	Gigabyte
GBAS	Ground Based Augmentation System
GCC	Galileo Control Center
GDL	Graduated Driver Licensing
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GEO	Geostationary Earth Orbit
GIS	Geographic Information System
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GLONASST	GLONASS Time
GMS	Ground Monitor Station
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPST	GPS Time
GRAS	Ground-based Regional Augmentation System
GSSS	Galileo Sensor Stations
GUS	Ground Uplink Station
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
HIC	High Level of Instrumentation
HOW	Handover
IASI	Istituto di Analisi dei Sistemi ed Informatica "Antonio Ruberti"
iBOAT	Isolation Based Online Anomaly Trajectory Detection
IDW	Inverse Distance Weighted
ICAO (OACI)	International Civil Aviation Organization (Organización Internacional de Aviación Civil)
IEP	Initial Experimental Phase
ILS	Instrument Landing System
IMCC	Indian Master Control Station
IMU	Inertial Measurement Unit
INIT	Initial (mode)
INLS	Integrated Navigation and Landing System
INLUS	Indian Land Uplink Station
INRES	Indian Reference Stations
INTRAS	Instituto de Investigación en Tráfico y Seguridad Vial (Universitat de València)
IOC	Initial Operational Capability
IONO-TROP	Ionospheric-Tropospheric
IOV	In-Orbit Validation
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
ISRO	Indian Space Research Organization
IVIS	In-Vehicle Information Systems
IVTS	Intelligent Vehicle Tracking Systems



JCAB	Japanese Civil Aviation Bureau
JPO	Joint Program Office
KfV	Kuratorium für Verkehrssicherheit
LAAS	Local Area Augmentation System
LADGPS	Local Area Differential Global Positioning System
LAGC	Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía (Universidad de Cádiz)
LDW	Lane Departure Warning
LIC	Low Level of Instrumentation
LIDAR	Light Detection and Ranging
LOI	Loss of Integrity
LVANRW	Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen
MAPS	Modular Azimuth Positioning System
MCC	Master Control Center
MCS	Master Control Station
MEM	Micro-Electro-Mechanical
MEO	Medium Earth Orbit
MI	Misleading Information
MIC	Medium Level of Instrumentation
MMS	Mobile Mapping System
MRS	Monitor and Ranging Station
MS	Monitor Station
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
MTSAT	Multifunctional Transport Satellite
n	Número de ambigüedades (medida de fase)
N	Newtons
NASA	National Aeronautics and Space Administration (US government)
NATS	National Air Traffic Services (UK)
NAV	Navigation (mode)
NAV-EP	Navegação Aérea de Portugal
NAVSAT	Navy Navigation Satellite System
NAVSTAR	Navigation System Using Timing and Ranging (US government)
NGA	National Geospatial Agency (US government)
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NLES	Navigation Land Earth Station
NMA	Norwegian Maritime Authority
NMEA	National Marine Electronics Association
NTP	Navigation Technology Program
ONSV	Observatorio Nacional de Seguridad Vial
OS	Open Service
OSE	Observatorio de la Sostenibilidad en España
PACF	Performance Assessment and Check-out Facility
PB	Petabyte
PDOP	Positional 3D Dilution of Precision
PDT	Peripheral Detection Task
PNOA	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea
PoliTo	Politecnico di Torino
ppm	Partes por millón
PPP	Posicionamiento de Punto Preciso
PPS	Precise Positioning Service
PRN	Pseudo Random Noise
PROLOGUE	Promoting Real Life Observations for Gaining Understanding of Road Behaviour in Europe
PRS	Public Regulated Service
PVT	Posición, Velocidad, Tiempo
PZ-90	Parametrop Zemp 90
QNAP	Quality Network Appliance Provider
R95	Percentil 95
RACE	Real Automóvil Club de España
RAM	Random Access Memory
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RASANT	Radio Aided Satellite Navigation Technique
RDS	Radio Data System
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Stations



RMSE	Root Mean Square Error
RNAV	Area Navigation
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
S	Standard
S/A	Selective Availability
S/N	Signal to Noise (ratio)
SACCSA	Solución de Aumentación para Caribe, Centro y Sudamérica
SAGI	Sistema para el Almacenamiento y Gestión del Video
SAR	Search and Rescue
SatNav	Satellite Navigation
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SCA	Sistema para el Control y Adquisición de la información
SD	Selective Denial
SDA	Sistema de Diálogo y Almacenamiento
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring
SHRP	Strategic Highway Research Program
SIG	Sistema de Información Geográfica
SINS	Strapdown Inertial Navigation System
SLR	Satellite Laser Ranging
SMC	Space and Missile Center
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System
SoL	Safety of Life
SPL	Sistema de Posición Lateral
SPS	Standard Positioning Service
SQL	Structured Query Language
SUS	System Usability Scale
SV	Spatial Vehicle
TB	Terabyte
TDS	Technology Demonstration System
TEC	Total Electron content
TfL	Transport for London
TFSR	Tapped Feedback Shift Register
TLM	Telemetry
TØI	Transportøkonomisk Institutt
TRACE	Traffic Accident Causation in Europe
TRB	Transportation Research Board
TSRC	Transport Safety Research Centre (Loughborough University)
TT&C	Telemetry Tracking and Control
TFFF	Time To First Fix
TTI	Training and Testing International (TTI)
UDC	Universidade da Coruña
UERE	User Equivalent Range Error
UHF	Ultra High Frequency
UN (ONU)	United Nations (Organización de las Naciones Unidas)
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
UPV	Universitat Politècnica de València
USAF	United States Air Force
USB	Universal Serial Bus
USC	Universidade de Santiago de Compostela
USNO	United States Naval Observatory
UTC	Coordinated Universal Time
UV	Universitat de València
VDOP	Vertical Dilution of Precision
VHF	Very High Frequency
VLBI	Very-long-baseline interferometry
VRS	Virtual Reference Station
VTTI	Virginia Tech Transportation Institute
WAAS	Wide Area Augmentation System
WADGPS	Wide Area Differential Global Positioning System
WDR	West Deutsche Rundfunk
WGS	World Geodetic System



WHO (OMS)	World Health Organization (Organización Mundial de la Salud)
WMRA	Wavelet Multi-Resolution Analysis
WMS	Wide Area Master Station
WRS	Wide Area Reference Station



Índice de contenidos

CAP. 0 (Chapter 0): PREFACE	1
0.1. BACKGROUND.....	5
0.2. THESIS PROPOSAL	6
0.3. MOTIVATION AND HYPOTHESIS	7
0.4. DATA USED	7
0.5. STUDY OBJECTIVES	7
0.6. STRUCTURE AND STUDY CONTRIBUTION	8
0.7. SCIENTIFIC CONTRIBUTION	9
0.7.1. Thesis theme.....	9
0.7.2. Related to the thesis theme.....	9
CAP. 1: CONTEXTUALIZACIÓN	11
RESUMEN	15
1.1. EL PROBLEMA DEL TRÁFICO Y LA SEGURIDAD VIAL	15
1.2. DEFINICIÓN METODOLÓGICA	15
1.3. REVISIÓN DE LOS DATOS	16
1.3.1. La seguridad vial en el contexto europeo.....	16
1.3.2. La seguridad vial en el contexto español	25
1.3.2.1. La seguridad vial dentro del contexto autonómico.....	31
1.4. DISCUSIÓN	33
CONCLUSIONES.....	40
CAP. 2: LA CONDUCCIÓN NATURALISTA	41
RESUMEN	45
2.1. MÉTODOS TRADICIONALES DE EXPERIMENTACIÓN	45
2.2. LA CONDUCCIÓN NATURALISTA	47
2.2.1. Ventajas e inconvenientes	48
2.2.2. Parámetros estudiados.....	49
2.3. PROPUESTA DE DESARROLLO DE PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA	56
2.4. EL PROYECTO EUROPEO DE CONDUCCIÓN NATURALISTA: <i>PROLOGUE</i>	56
2.4.1. Aspectos generales.....	58
2.4.2. Sistemas de adquisición de datos	60
2.4.3. Análisis de datos.....	63
2.4.4. Proyectos piloto en diferentes países	63
2.5. EL PROYECTO PILOTO DE <i>PROLOGUE</i> EN ESPAÑA	65
2.5.1. Metodología y zona de estudio	66
2.5.2. Vehículo e instrumentación.....	67
2.5.3. Procesamiento de datos.....	72
2.5.4. Identificación de incidentes.....	73



2.5.5. Aspectos de interés.....	74
2.5.6. Resultados obtenidos	74
2.5.7. Discusión.....	76
CONCLUSIONES.....	77
CAP. 3: SISTEMAS GNSS.....	79
RESUMEN	83
3.1. EL POSICIONAMIENTO ESPACIAL	83
3.2. SISTEMAS GNSS.....	84
3.2.1. Definiciones previas	84
3.2.2. Introducción.....	84
3.2.3. Principios teóricos	89
3.2.4. Observables GNSS.....	94
3.2.5. Arquitectura de los sistemas GNSS	95
3.2.6. Fuentes de error	100
3.3. EL SISTEMA NAVSTAR-GPS	101
3.3.1. Arquitectura del sistema.....	102
3.3.2. Códigos y señal GPS.....	111
3.3.3. Servicios de posicionamiento.....	116
3.3.4. Servicios de degradación de la señal	118
3.3.5. Precisiones alcanzadas.....	119
3.4. SISTEMAS DE MEJORA Y AUMENTACIÓN	122
3.4.1. Sistema GPS Diferencial (DGPS).....	124
3.4.2. Sistemas de aumentación basados en aeronaves (ABAS)	125
3.4.3. Sistemas de aumentación basados en tierra (GBAS)	126
3.4.4. Sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS).....	126
3.5. DISCUSIÓN	132
CONCLUSIONES.....	136
CAP. 4: ESTRATEGIAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE POSICIONAMIENTO EN PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA	137
RESUMEN	141
4.1. INTRODUCCIÓN	141
4.2. ESTRATEGIAS DE POSICIONAMIENTO CON SISTEMAS GNSS	143
4.2.1. Técnicas y sistemas de aumentación aplicadas a la señal GNSS.....	146
4.2.2. Integración de sistemas GNSS con sensores inerciales	148
4.3. DATOS Y ZONA DE ESTUDIO	152
4.3.1. Instrumentación del vehículo para la adquisición de datos de posicionamiento	152
4.3.2. Datos	153
4.4. DISCUSIÓN	153
CONCLUSIONES.....	157



CAP. 5: RECUPERACIÓN DE DATOS DE POSICIONAMIENTO EN PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA EMPLEANDO SISTEMAS SIG	159
RESUMEN	163
5.1. INTRODUCCIÓN	163
5.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS	164
5.3. METODOLOGÍA	165
5.4. RESULTADOS	169
5.5. FUENTES DE ERROR ASOCIADO	172
5.6. DISCUSIÓN	173
CONCLUSIONES.....	174
CAP. 6: REPRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS EN PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA EMPLEANDO SISTEMAS SIG	175
RESUMEN	179
6.1. INTRODUCCIÓN	179
6.2. EMPLEO DE SIG COMO HERRAMIENTA	181
6.3. DATOS	182
6.4. METODOLOGÍA	182
6.5. RESULTADOS	184
6.5. DISCUSIÓN	191
CONCLUSIONES.....	195
CAP. 7: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS OBTENIDOS EN PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA EMPLEANDO SISTEMAS SIG. ESTUDIO SOBRE PATRONES DE CONDUCCIÓN	197
RESUMEN	201
7.1. INTRODUCCIÓN	201
7.2. DATOS Y ZONA DE ESTUDIO	204
7.3. METODOLOGÍA	205
7.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	205
7.5. DISCUSIÓN	221
CONCLUSIONES.....	224
CAP. 8: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	225
8.1. DISCUSIÓN	229
8.2. CONCLUSIONES	235
8.3. FINAL CONCLUSIONS	238



CAP. 0 (Chapter 0)

PREFACE



Chapter 0

0.1. BACKGROUND	5
0.2. THESIS PROPOSAL	6
0.3. MOTIVATION AND HYPOTHESIS	7
0.4. DATA USED	7
0.5. STUDY OBJECTIVES	7
0.6. STRUCTURE AND STUDY CONTRIBUTION	8
0.7. SCIENTIFIC CONTRIBUTION.....	9
0.7.1. Thesis theme.....	9
0.7.2. Related to the thesis theme.....	9



0.1. BACKGROUND

Today's societies are dynamic. From a global demographic perspective, trends to population growth as well as to a concentration in urban areas are observed (*UN Population Division*, 2013). In the last years, cities have become in the main economic poles, conforming societies focused in the services sector. This leads to decrease of the convergence levels between regions. As a consequence a number of social and natural processes take place.

Increasing of the mobility rates is one of the clearest consequences. Modern societies are mobile as demonstrated by their high motorization ratios. The traditional perspective shows how the most developed countries have higher ratios of motorization. However, the excessive urban concentration and the development of efficient public transport systems lead the rates to be reduced in recent years. Furthermore, these countries support alternative transportation modes with higher rates of energy efficiency and lower levels of pollution. Meanwhile, motorization ratios in developing countries are increasing drastically due to accelerated social changes (*World Bank*, 2011; Urry, 2004).

The most critical topic related to traffic management is the road safety. Over 1.2 million people die each year on the world's roads, and between 20 and 50 million suffer non-fatal injuries (*World Health Organization*, 2009). It is expected that road deaths involve the sixth leading cause of death in 2020. This trend implies a huge social cost derived from the obstruction of traffic flows and the health attention to the injured people, among other factors. For this reason, countries have proposed to research more exhaustively on road safety for decreasing the number and the impact of road fatalities, finding possible effective actions that can be applied.

The large research tradition related to traffic management of the developed countries has led to tackle this problem before. Important strategies and active policies to reduce the accidents have been implemented in recent years. These strategies are based on a multi-sectoral and coordinated response that takes into account the complete scenario of the accident.

Research on traffic and road safety presents a high level of complexity and a large number of analytical approaches mainly for two reasons. First, road fatalities occur due both to technical and human factors, being required a perspective from the social and technical scientific research. Second, there is a great complexity regarding the identification and analysis of relevant research events (or incidents) and how to parametrize them from both a quantitative and qualitative perspective.

Scientific studies have been performed to research more exhaustively about this topic. The research methods traditionally used are based both on the simulated observation of the phenomenon and the use of traffic reports or questionnaires. Studies based on simulators are highly controlled and its conditions are developed in a laboratory. Meanwhile, questionnaires and traffic reports present different results due to the subject's perception both the traffic agents' and the drivers themselves. Therefore, results obtained by any of these methods of study cannot be easily extrapolated to real life.

Naturalistic driving is a new experimental method applied in studies of traffic flows and road safety in the recent years. This method proposes a direct observation of the driving behaviour for one or more drivers in real conditions and over long periods of observation using different levels of instrumented cars. Therefore it is a direct and real observation method in which the researcher hasn't the control over the studied phenomenon. Data collection occurs in real driving conditions (not simulated in the laboratory) as no constraints regarding the driver behaviour are given.

Naturalistic driving presents several advantages over traditional methods that can be summarized in the collection of more and better data. Its work methodology requires a comprehensive monitoring of all parameters involved (or which may be involved) regarding the driving behavior of the driver taking into account the whole scenario, that is (a) the driver, (b) the vehicle, (c) other vehicles and surrounding elements, and (d) the road environment. Thus, the monitoring of driving variables to very high temporal frequencies is required. The experimental vehicles must be instrumented cars equipped with powerful *data acquisition systems* (DAS) to ensure a continue data record. These experiments generate huge databases due to the high frequencies in the data collection, the time and distance traveled and the number of drivers. For this reason, naturalistic driving experiments require the handling and processing of much larger databases than traditional experimentation methods.

However, naturalistic driving presents some problems. The generation of huge databases, whose handling and processing results very complicated. Thus, the risk to extract unreliable results is highly increased.



The absence of an optimal strategy for the previous vehicle instrumentation, calibration, and maintenance of the data acquisition systems, the running of devices for large time periods or incompatibility problems between devices are the main reasons for the eventual occurrence of data losses, which are quite common in these experiments.

As this is a relatively new experimental method, there is not accepted work methodology. Prior to the experiment performance, there is no clear strategy about the level of instrumentation of the vehicle and what devices must be performed. Data losses require the implementation of strategies to fill gaps on raw collected data during the processing data phase. Simple linear interpolation can be applied if data losses are registered during short temporal intervals. More complex strategies should be implemented if data losses are registered during long temporal intervals. These strategies should be based on automatic or semi-automatic procedures due to the huge databases obtained, thus reducing and minimizing the manual workload.

The management of the huge databases is usually the main problem during the phase of data analysis. A manual review of the data is unapproachable. It is common to apply filtering strategies of the data which lead to reduce the databases. An alternative strategy is to analyze some specific situations through statistical thresholds in order to locate certain events (incidents) related to the research purpose. However, such strategies often obtain sub-optimal results due to the large number of *false alarms* usually detected.

The software used in the most of the previous studies present some problems. Proprietary software can only be used in specific situations and its implementation results expensive. Statistical software programs have frequent problems when large databases. Furthermore, the data representation is low suited and it is impossible to integrate data from different parameters and/or drivers easily and efficiently. Therefore, these software programs present as main problems (a) the limited capacity for the data processing, (b) the use of suboptimal models of data representation that complicate the analysis and the interpretation of databases, and (c) the use of unfriendly user interfaces.

0.2. THESIS PROPOSAL

This thesis goal is to propose a new methodology focusing on the spatial component of the information for a better design and management of naturalistic driving studies. This work offers a solution to the problems for all phases of a naturalistic study ranging from the experimental design to the processing of the data. Thus, these experiments require both strategies for the optimal registration of the positioning data during the stage prior to the data collection, and new models for the analysis and representation of the data during the stage of the data processing.

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) lead to register positioning data cheaply and at relatively high temporal frequencies. The GNSS systems offer the most effective solution and, for this reason, have been commonly used in most of the previous studies. The American system, called *NAVSTAR-GPS* (or simply *GPS*) is the only GNSS system in level operational since its inception. The most relevant aspects about the operation and performance of these systems are treated here in detailed

However, naturalistic driving experiments require particular strategies for the acquisition of positioning data. These strategies should lead to collect positioning data at very high frequencies (similar to other sensors) and to reduce the number and duration of the losses of the positioning data. Some strategies are proposed, evaluating the requirements and objectives of research as well as the ratio between quality data and cost of the DAS units. The use of differential receivers (DGNS) and the integration of GNSS with inertial systems are discussed. These strategies lead to reduce the number and frequency of errors and data losses, furthermore to increase the accuracies and the reliability of the signal.

In case of (positioning) data losses during large temporal periods, the implementation of automatic (or semi-automatic) procedures is necessary to estimate these values. This kind of procedures leads to reduce the manual workload required for the georeferencing process of large data volumes. A novel method to recover the missing (positioning) data through *Geographical Information Systems* (GIS) is proposed in this work. The estimation of the positioning data with this procedure offers high levels of accuracies.

Data representation must be performed through software programs with a optimal graphical interface. GIS systems are an excellent tool for naturalistic driving data as it enables the spatially continuous



representation of discrete parameters. Besides, the data representation through geometric entities (points, line and polygons) leads to obtain a clear and simple data vision. The kinematic parameters recorded in these experiments like speed and acceleration forces can be spatially represented for one or more drivers. The spatial continuous representation of these kinematic parameters proposed here supposes an improvement over GIS-based methodologies commonly used in traffic studies, most of them limited to spatial representation of static parameters.

Finally, it is proposed a concrete example regard to the analysis and interpretation of naturalistic driving data, focused on the study of the driving patterns. This study requires the integrated and comprehensive representation of large datasets through GIS systems. The continuous representation of the kinematic parameters and the overlap between data layers lead to identify driving trends and to compare the behaviour of the different drivers. The proposed methodology is innovative for this kind of studies, lead to reach a more exhaustive analysis and interpretation of the data.

0.3. MOTIVATION AND HYPOTHESIS

An efficient management of traffic flows and road accidents lead to reach higher levels of social welfare. Thus, it is possible to reduce the negative impact and associated costs. For this objective, exhaustive research should be carried out for knowing more about the real causes about the appearance of road incidents. New research methods for a real and continuous observation of the behaviour of the drivers and the complete scenario in each time are required.

Naturalistic driving offers more and better information about driving performance than traditional methods. However, this method is still a new experimental method that presents some drawbacks as the huge databases obtained and the absence of effective work methodologies clearly accepted.

This thesis proposes the implementation (and integration) of procedures of the cartographic engineering to naturalistic driving data. The goal is to improve all the phases of the experiment from the experimentation design until the data processing. GNSS systems, implemented with some complementary systems during the phase of experimentation design, lead to obtain the positioning data, whereas GIS systems offer multiple possibilities for the analysis and representation of the data obtained during the experimentation phase.

The importance of the *geographic component* in naturalistic driving studies is shown. A methodological approach towards proactive promotion of both the mapping information and the naturalistic driving observation is proposed, including data processing methods and applications, which are of importance to the scientific community, industry and society. The objective is to standardize the methodology proposed for such studies and to reach a more generalized use of these data by non-experts users, contributing to the development and diffusion of the naturalistic driving method.

The hypothesis raised is related to the proposed methodology is more efficient than the traditional ones and lead to increase the analysis possibilities and data exploitation thanks to its possibilities and to obtain better reliable results.

0.4. DATA USED

The data used in this thesis were obtained by the Spanish trial of the project *PROLOGUE (Promoting Real Life Observations for Gaining Understanding of Road Behaviour in Europe)*. The Spanish trial was performed in the surroundings of the city of Valencia during the months of June and July, 2010. Data have been provided by INTRAS (*Spanish University Research Institute on Traffic and Road Safety*), a research center belonging to the *University of Valencia*, through private contract confidentiality.

0.5. STUDY OBJECTIVES

The main objective of this study is to propose a new work methodology to use in naturalistic driving studies regarding both to the design of this experiment and to the data processing. Specific objectives are grouped in the next points:



1. to represent and analyze data from incidents and fatalities in the European and the Spanish roads;
2. to review the scientific literature related to the most relevant naturalistic driving studies;
3. to study and present the performance of the GNSS systems;
4. to analyze the different strategies for the acquisition of positioning data in naturalistic driving studies;
5. to implement a procedure for recovering positioning data from large data losses in naturalistic driving studies performed;
6. to propose methodologies for the representation of naturalistic driving data using GIS systems; and
7. to propose a proper methodology for the analysis of driving patterns from naturalistic driving data.

0.6. STRUCTURE AND STUDY CONTRIBUTION

The present thesis is structured in eight chapters. A brief description of each section is presented in the following points:

Chapter 1: *Context*. A review of the main road safety indicators for the European and Spanish case is carried out. A relatively wide time frame is taken as reference to analyze the temporal evolution of the data. Mapping offers a clear representation of the data.

Chapter 2: *Naturalistic driving*. In this chapter, the traditional research methods used in traffic and road safety studies are discussed, prior to the introduction of the naturalistic driving method. A comprehensive literature review of the main naturalistic driving studies is performed. Finally, a comprehensive study of *PROLOGUE project* and its Spanish pilot trial is introduced.

Chapter 3: *GNSS systems*. These systems lead to record positioning data in traffic experiments. In this section the performance and most important issues related to the main satellite positioning systems are introduced with special focus on the American positioning system *NAVSTAR-GPS*, the only GNSS system fully operational since its origin.

Chapter 4: *Strategies for the acquisition of positioning data in naturalistic driving studies*. Several strategies lead to obtain a more reliable and cost-efficient positioning, furthermore to minimize the frequency and duration of data losses. Most of these alternatives propose the complementary use of GNSS with other systems and/or the use of more sophisticated receivers. The choice of any alternative positioning strategy must be suitable for the technical and circumstantial requirements of each project.

Chapter 5: *Recovering of positioning data in naturalistic driving studies through GIS systems*. The proposed procedure leads to estimate these data in experiments with partial or total data (positioning) losses. This procedure only requires the manual determination of two fixed points in the extremes of the traveled route.

Chapter 6: *Representation of naturalistic driving data through GIS systems*. These systems offer a clear, dynamic and integrated data representation, easily interpretable by each user. Free and low cost GIS software will allow a higher exploitation of these data in the next years.

Chapter 7: *Analysis and interpretation of naturalistic driving data through GIS systems. Study of driving patterns*. A novel methodology for the study of the driving behaviour of some drivers is proposed. Within these patterns both normal trends and anomalies are detected and analyzed. GIS systems offer optimal tools for the representation and the comparison of these data.

Chapter 8: *Discussion and final conclusions*.



0.7. SCIENTIFIC CONTRIBUTION

Papers and international conferences related to the thesis topic and yet published or presented are exposed in the next points:

0.7.1. Thesis theme

- I. Balsa-Barreiro, J; Pareja-Montoro, I; Tontsch, A and Sánchez-García, M (2012): "Preprocessing of data for recovery of positioning data in naturalistic driving trial". In *European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, Valencia (Spain), June 14-15, pp. 235-245.
- II. Balsa-Barreiro, J; Tontsch, A; Valero-Mora, PM and Pareja-Montoro, I (2012): "Análisis de patrones de conducción en experimentos de conducción naturalista a través de la representación GIS". In *Expo-Urbano*, Sao Paulo (Brazil), November 21-23.
- III. Balsa-Barreiro, J; Valero-Mora, PM; Pareja-Montoro, I and Sánchez-García, M (2013): "Geo-referencing naturalistic driving data using a novel method based on vehicle speed". *IET Intelligent Transport Systems* 7(2), pp. 190-197.
- IV. Balsa-Barreiro, J; Valero-Mora, PM; Pareja-Montoro, I and Sánchez-García, M (2014): "Quality control procedure for naturalistic driving data using Geographic Information Systems". In *European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, Vienna (Austria), June 5-6. Resource available online on <http://conference2014.humanist-vce.eu/Proceedings/Balsa.pdf> (Data access: 2014 July, 1st).
- V. Balsa-Barreiro, J; Valero-Mora, PM; Pareja-Montoro, I and Sánchez-García, M (submitted): "Proposal of GIS methodology for Quality Control procedure of data obtained in naturalistic driving experiments". *IET Intelligent Transport Systems*.

0.7.2. Related to the thesis theme

Some papers related to the overview of the GIS systems (I-IV), cartographic representation (V), *LiDAR* performance (IV) and its applications (VI-VIII), furthermore the management and processing of large datasets as point clouds obtained with *LiDAR* and the estimation of the statistical parameters more representative (IX-XI).

- I. Balsa-Barreiro, J (2008): "Análise para a implementación dun SIX co fin da xestión de servizos en calquera nivel da Administración. Particularización e aplicacións de mellora para o caso da Dirección Xeral de Turismo-Turgalicia (Consellería de Innovación e Industria)". Monografía nº9. Santiago de Compostela: *Galicia School of Public Administration* (EGAP), Xunta de Galicia.. 291 pp (In Galician language). Resource available online on [http://egap.xunta.es/Documentos/Publicacions/\[1275644324\]analise_public65.pdf](http://egap.xunta.es/Documentos/Publicacions/[1275644324]analise_public65.pdf) (Data access: 2014 July, 1st).
- II. Balsa-Barreiro, J and Brocal, R (2011): "Los sistemas GMAO y SIG como herramientas para la gestión integrada en la administración local". New York: *United Nations Public Administration Network* (UNPAN), 255 pp. Resource available online on <http://unpan1.un.org/intradoc/groups/public/documents/icap/unpan046326.pdf> (Data access: 2014 July, 1st).
- III. Balsa-Barreiro, J and Brocal, R (2011, June 09): "Implementación de GMAO+SIG dentro de las Administraciones Públicas". *Blog IDEE*. Resource available online on <http://blog-idee.blogspot.de/2011/06/implementacion-de-gmaosig-dentro-de-las.html> (Data access: 2014 July, 1st).
- IV. Balsa-Barreiro, J. and Brocal, R. (2011): "Aplicación de metodologías de la ingeniería industrial y geográfica a los modelos de gestión de las administraciones públicas". *Revista Centroamericana de Administración Pública* 60-61, pp. 135-169.
- V. Balsa-Barreiro, J and Lois-González, RC (2010): "Particularidades y estado actual de la cartografía turística oficial en Galicia" *Cuadernos de Turismo* 26, pp. 25-46.
- VI. Balsa-Barreiro, J and Lerma, JL (2006). "La tecnología LiDAR: una visión general". *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía* 23(135), pp. 28-33.



- VII. Balsa-Barreiro, J (2012): “Conferencia sobre la tecnología LIDAR y la ingeniería”. *Papeles de la Ingeniería* (Bulletin of the *Institute for Spanish Engineering*) 68, pp. 4.
- VIII. Balsa-Barreiro, J (2012): “La tecnología LIDAR y sus posibles aplicaciones técnicas al mundo de la ingeniería”. In *Comité de Tecnologías para la Defensa del Instituto de la Ingeniería de España*, headquarter of the *Institute for Spanish Engineering*, Madrid (Spain), June 27. Resource available online on http://www.iies.es/Conferencia-La-tecnologia-LIDAR-y-sus-posibles-aplicaciones-tecnicas-al-mundo-de-la-ingenieria_a2352.html (Data access: 2014 July, 1st).
- IX. Balsa-Barreiro, J; Avariento, JP and Lerma, JL (2012): “Airborne light detection and ranging (LiDAR) point density analysis”. *Scientific Research and Essays* 7(33), pp. 3010-3019.
- X. Balsa-Barreiro, J and Lerma, JL (2014): “A new methodology to estimate the discrete-return point density on airborne LiDAR surveys”. *International Journal of Remote Sensing* 35(4), pp. 1496-1510.
- XI. Balsa-Barreiro, J and Lerma, JL (2014): “Empirical study of variation in lidar point density over different land covers”. *International Journal of Remote Sensing* 35(9), pp. 3372-3383.



CAP. 1

CONTEXTUALIZACIÓN



Capítulo 1

RESUMEN	15
1.1. EL PROBLEMA DEL TRÁFICO Y LA SEGURIDAD VIAL	15
1.2. DEFINICIÓN METODOLÓGICA	15
1.3. REVISIÓN DE LOS DATOS	16
1.3.1. La seguridad vial en el contexto europeo	16
1.3.2. La seguridad vial en el contexto español.....	25
1.3.2.1. La seguridad vial dentro del contexto autonómico	32
1.4. DISCUSIÓN	34
CONCLUSIONES	41



RESUMEN

Las sociedades actuales viven en un estado permanente de movimiento. Desde un punto de vista físico, la gestión de flujos de personas y mercancías supone uno de los principales temas de investigación por parte de cualquier estudioso del territorio. El modelo económico contemporáneo, el aumento constante de población y la democratización del automóvil son los tres factores determinantes que conducen a un incremento permanente de los flujos de tráfico y, con ello, a una mayor complejidad en la gestión de los mismos. Existen diferencias en los niveles de siniestralidad vial entre las distintas regiones debido al nivel de adecuación de sus políticas de gestión de tráfico. En este trabajo analizamos las principales cifras de siniestralidad, tanto a nivel europeo como español, publicados por los institutos y administraciones competentes.

1.1. EL PROBLEMA DEL TRÁFICO Y LA SEGURIDAD VIAL

Según datos oficiales publicados por la *Organización Mundial de la Salud* (OMS), cada año fallecen en el mundo en torno a 1,24 millones de personas en accidentes de tráfico, constituyendo actualmente la octava causa de muerte en el mundo y la primera entre gente joven, entendiéndose por este grupo el formado por individuos de entre 15 y 29 años. Según estimaciones futuras, los accidentes de tráfico supondrán un problema cada vez más importante, pasando previsiblemente a ser la sexta causa de muerte en 2020 y la quinta en 2030 si no se toman, durante los próximos años, medidas de prevención significativas que ayuden a revertir esta tendencia. A los fallecidos en accidentes de tráfico, hay que añadir además el alto número de heridos que, según datos publicados por la propia OMS, se estiman dentro de un amplio abanico de cifras que va entre los 20 y los 50 millones de personas (OMS, 2009).

Esta tendencia al aumento de la fatalidad en carretera se debe a que muchos países en desarrollo están conociendo unos incrementos muy acelerados de sus índices de motorización. Sin embargo, estos mayores índices no van acompañados de un desarrollo parejo de sus infraestructuras, las cuales todavía presentan enormes deficiencias debido, sobre todo, a las bajas inversiones públicas. Este bajo nivel de inversión se debe sobre todo a que estos países cuentan con modelos de crecimiento económico poco sólidos, los cuales se basan además en una inadecuada gestión de los usos del suelo. La situación en estos países en desarrollo es completamente antagónica a la de los países ricos, los cuales han puesto en marcha en los últimos años importantes estrategias y políticas activas de contención y reducción de la accidentalidad con resultados muy óptimos. Estas estrategias se basan en una respuesta multisectorial y coordinada que no tiene en cuenta únicamente al usuario, sino también el propio vehículo, la carretera, el ambiente circundante e, incluso, el escenario post-accidental.

1.2. DEFINICIÓN METODOLÓGICA

Existe un gran número de conceptos referidos a la aparición de diversos eventos de interés para estudios de seguridad vial. Sin embargo, no existe una clasificación de los mismos universalmente aceptada. En este estudio tomamos como referencia la empleada en estudios como los de Dingus *et al.* (2006) y de Hickmann *et al.* (2005), la cual fue adoptada por el *Virginia Tech Transportation Institute* (VTTI), una de las principales instituciones de investigación dentro de este campo de estudio. Esta clasificación establece cinco tipos de eventos (o categorías) ordenados en sentido decreciente en función de su nivel de siniestralidad:

- *Accidente*. Se entiende por *accidente* cualquier contacto del vehículo con otro vehículo u elemento, ya sea en movimiento o inmóvil, a una velocidad a la cual parte de su energía cinética es transferida o disipada. Entre estos objetos podemos hablar de elementos viarios como los quitamiedos u otros elementos que estén dentro y/o fuera de la carretera.
- *Casi-accidente*. Este término comprende cualquier circunstancia que requiere de una maniobra evasiva por parte de cualquiera de los vehículos que interactúan con objeto de evitar así una colisión. Ejemplos de este tipo de maniobras serían volantazos, frenazos y/o cualquier otra acción en la que el sujeto fuerce su vehículo al límite de sus capacidades.



- *Conflicto relevante*. Es una situación muy semejante a la anterior, aunque en un estado que presenta menos severidad.
- *Desviación o cambio involuntario de carril*. Situación que se da en el momento en el que el conductor sobrepasa la línea de su carril sin ningún motivo aparente.
- *Maniobra ilegal*, entendida como aquella que incumple con la legislación viaria vigente.

1.3. REVISIÓN DE LOS DATOS

En este apartado llevaremos a cabo una contextualización general de los niveles de seguridad vial en diversos ámbitos geográficos, empleando para ello las estadísticas oficiales publicadas por los organismos oficiales competentes. Analizaremos fundamentalmente tres parámetros para determinar el nivel de seguridad vial en un determinado ámbito de estudio, ordenados dichos parámetros en función de su nivel de gravedad: (a) número de muertes, (b) de heridos y (c) de accidentes. A partir de estos parámetros es posible establecer una serie de ratios que permiten establecer comparaciones entre los distintos ámbitos geográficos. Destacamos fundamentalmente dos: (a) el *índice de fatalidad* y (b) el *de letalidad*. El *índice de fatalidad* (o *de mortalidad*) en carretera establece una relación entre el número de fallecidos en accidentes de tráfico respecto a un cierto número de habitantes, de conductores y/o de vehículos. Por su parte, el *índice de letalidad* relaciona el número de fallecidos en accidentes de tráfico respecto al número de heridos y/o de accidentes.

En este apartado analizamos los datos estadísticos en distintos ámbitos geográficos, tanto a escala internacional como nacional. A nivel internacional revisamos estos datos tanto para el conjunto del escenario europeo comunitario (UE-27) como para cada uno de los países que la integran, representando de esta forma la variabilidad geográfica de la información. A escala nacional el procedimiento empleado es el mismo, analizando a una escala administrativa inferior, la determinada por las *Comunidades Autónomas* (CCAA), la variabilidad estadística de los parámetros estudiados. Como fuentes estadísticas empleamos para Europa la *Community Road Accident Database* (CARE), la principal base de datos sobre siniestralidad viaria publicada por la UE, mientras que para el caso español empleamos los datos publicados por el *Observatorio Nacional de la Seguridad Vial* (ONSV) de la *Dirección General de Tráfico* (DGT).

La información presentada pretende contextualizar de una forma breve y clara tanto la evolución temporal de los datos como su variabilidad espacial. Sin embargo, no se pretende llevar a cabo en este punto un estudio exhaustivo de las causas, ya sean generales o particulares, que explican la variabilidad de los datos. De la misma forma intenta ponerse de manifiesto la dificultad de análisis e interpretación de la información, siendo muy difícil tanto cuantificar todos los parámetros que intervienen (o pueden llegar a intervenir) en un determinado incidente como establecer el nivel de correlación entre los diversos parámetros debido a la complejidad de elementos que forman parte del escenario viario.

1.3.1. La seguridad vial en el contexto europeo

En los últimos veinte años se observa dentro de los veintisiete países de la UE actual una tendencia muy clara a la reducción de la siniestralidad en carretera. Entre los años 1991 y 2010, el número de muertes en carretera se ha logrado reducir en 44.397, lo que significa una reducción del 58,9%. En términos relativos, esta reducción es muy superior a la propia del número de accidentes (-22,1%) y de heridos (-23,4%) para ese mismo período temporal (Figura 1-1.a).

La reducción de todos estos parámetros en su conjunto es muy significativa, sobre todo la del número de fallecidos, más aún en un contexto en el que la población europea se incrementa en un 5,8%. Los ratios asociados a los parámetros anteriores en función del peso demográfico reflejan una reducción más significativa debido a la propia reducción del parámetro analizado (numerador) y al incremento de la población (denominador). De esta forma se pasa de los más de 3.021 accidentes por millón de personas en 1991 a 2.225 en 2010 (-26,4%), de 4.060 heridos (por millón de personas) en 1991 a 2.940 en 2010 (-27,6%) y de los 159 muertos (por millón de personas) en 1991 a casi 62 en 2010 (-61,1%) (Figura 1-1.b).

Dentro de una tendencia a la baja generalizada, podemos analizar la evolución un análisis de los parámetros estudiados en función de diferentes escalas temporales (Figura 1-2). Se observa así como durante el período 1991-2000 no logra reducirse ni el número de heridos (+0,6%) ni de accidentes

(+2,2%), aunque sí se logra una reducción significativa del número de fallecidos (-25,2%). Desde principios de la década del 2000-2010 se entra en una fase de reducción significativa de todos los parámetros, alcanzándose la reducción más clara en los últimos años (2005-2010) donde, en un período de solo cinco años, logra reducirse en un 31,6% el número de muertes, un 15,9% el número de accidentes y un 14,2% el número de heridos, y esto a pesar de darse un incremento poblacional del 2% (Figura 1-2.d).

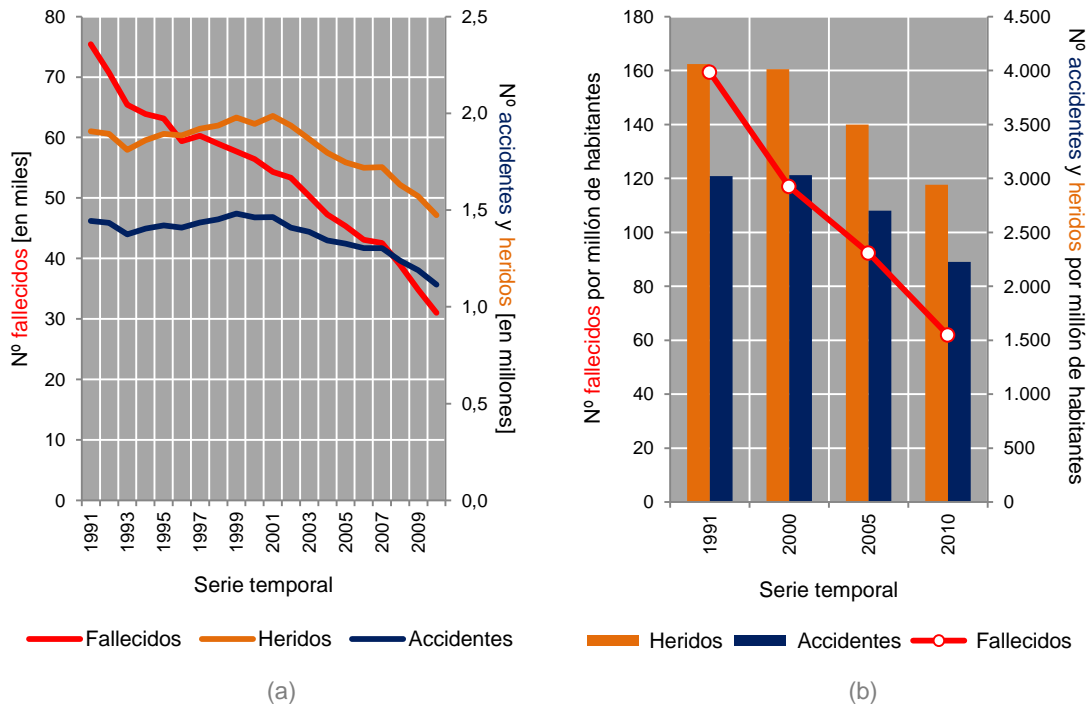


Figura 1-1: Fallecidos, accidentes y heridos en la UE durante los últimos veinte años: (a) datos en número absoluto y (b) por millón de habitantes. Fuente: CARE, 2010.

A nivel europeo, todos los países que forman parte de la UE han logrado reducir su *índice de fatalidad* en los últimos veinte años (Figura 1-3). Los países con menores índices son los países centroeuropeos, del Norte y de las Islas Británicas, los cuales presentan ratios de entre 25 y 50 fallecidos por millón de habitantes. Los países de este grupo que presentan los mejores ratios son Suecia (28 fallecidos por millón), Reino Unido (31) y Holanda (32). Por su parte los peores ratios a nivel europeo se alcanzan en los países del Este (Rumanía: 111 fallecidos por millón de habitantes; Bulgaria: 103; Polonia: 102), entorno del mar Báltico (Lituania: 90; Letonia: 97) y alguno de los países mediterráneos como Grecia (111).

El estudio de la evolución temporal de dicho índice durante las dos últimas décadas muestra grandes diferencias tal y como vemos en la Figura 1-4. Los países de la Europa Oriental son los que menos han logrado reducir este índice, aunque curiosamente todos ellos presentaban en el año 1991 un ratio de muertes considerablemente inferior a la media europea. Rumanía es el país europeo que menos ha logrado reducir este índice (-17,7%), de un orden similar a Bulgaria (-20,2%). Los siguientes países por la cola muestran, sin embargo, unos niveles de reducción considerablemente superiores: Rep. Checa (-40,1%) y Eslovaquia (-41,3%). Debido a estos relativamente bajos niveles de reducción¹, este grupo de países ha pasado a formar parte de aquellos países que presentan actualmente niveles superiores a la media europea.

En los países del Sur de Europa se observa una doble evolución: mientras Grecia e Italia alcanzan niveles de reducción del orden del 50%, España y Portugal alcanzan niveles superiores al 75%, los más importantes a nivel europeo junto con los propios de los países bálticos: Estonia (-81,5%), Letonia (-74,1%) y Lituania (-71,6%). Unos y otros presentaban en 1991 los más altos índices de fatalidad a nivel europeo, aunque han conseguido aproximarlos a la media europea en el año 2010. De momento sólo España y Francia, en el caso de los países del Sur, y Estonia, en el caso de los bálticos, han logrado

¹ Niveles bajos de reducción si los comparamos con los propios del resto de países europeos.

situar su índice de fatalidad en carretera por debajo de la media europea. Por su parte, el resto de países europeos de la Europa Occidental han logrado niveles de reducción de su índice de fatalidad de un orden muy considerable, entre el 60 y el 70%, lo que les ha permitido perpetuarse muy por debajo de la media europea (Figura 1-6).

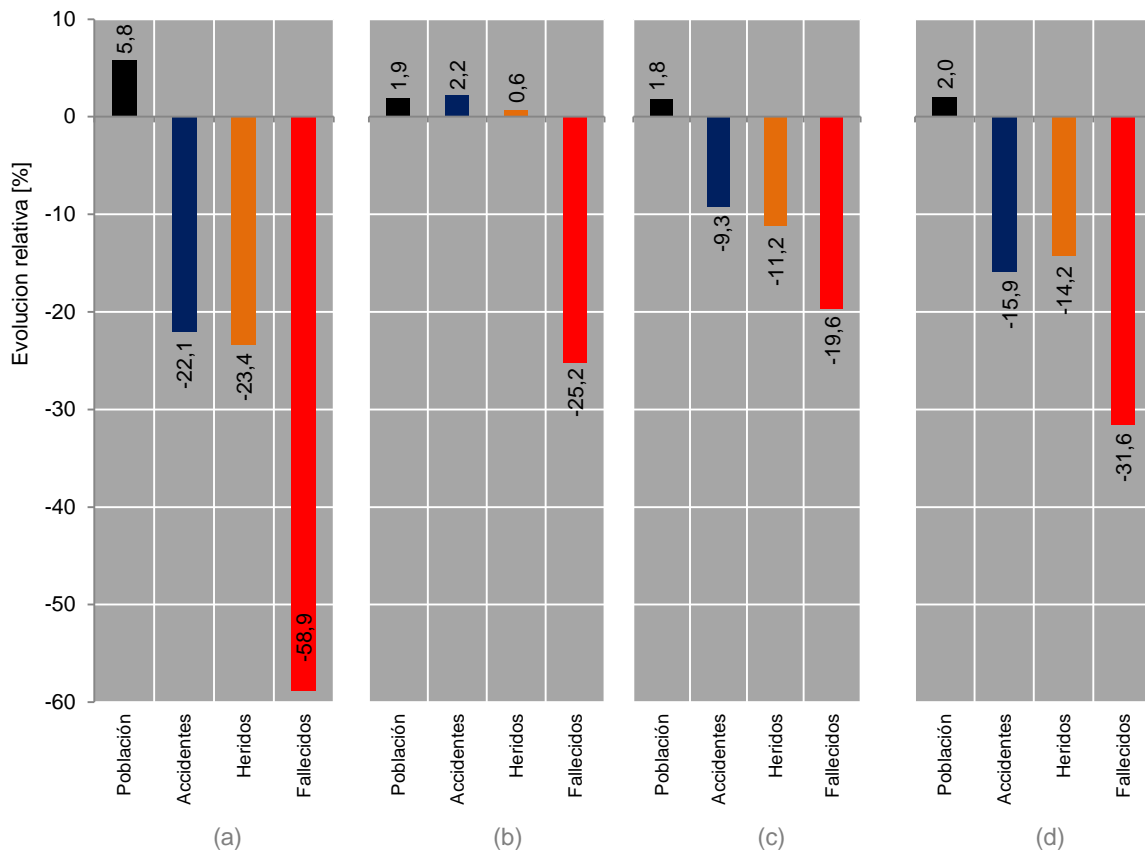


Figura 1-2: Evolución relativa del volumen de población, número de fallecidos, accidentes y heridos en carretera en la UE en diferentes periodos temporales: (a) entre 1991 y 2010, (b) entre 1991 y 2000, (c) entre 2000 y 2005 y (d) entre 2005 y 2010. Fuente: CARE, 2010.

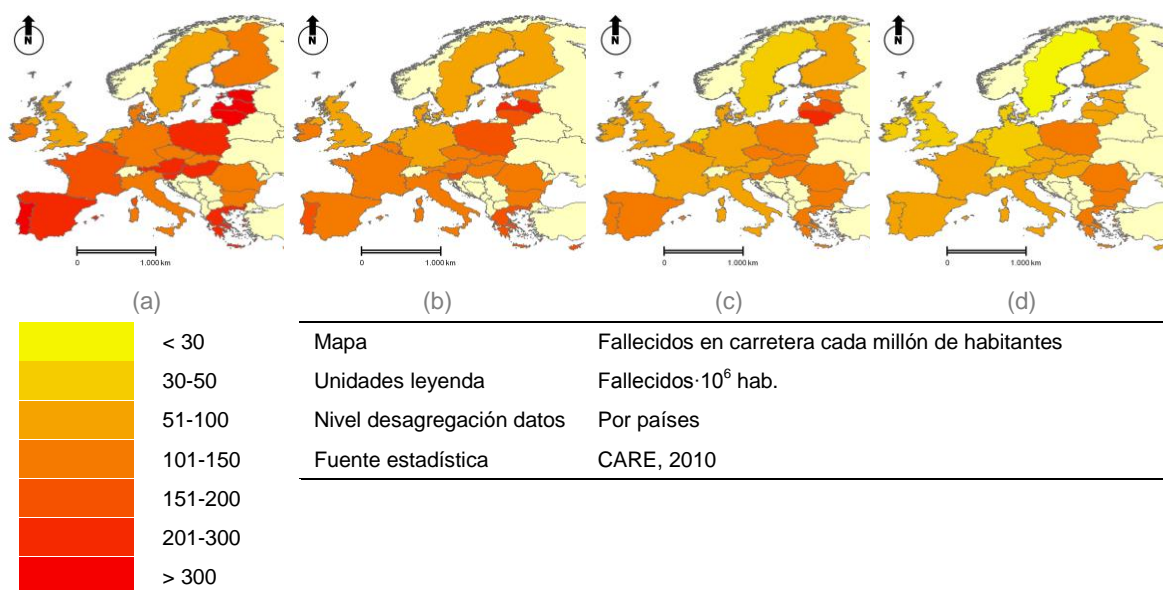


Figura 1-3: Fallecidos en las carreteras europeas por cada millón de habitantes en diferentes años: (a) 1991, (b) 2000, (c) 2005 y (d) 2010. Fuente: CARE, 2010.

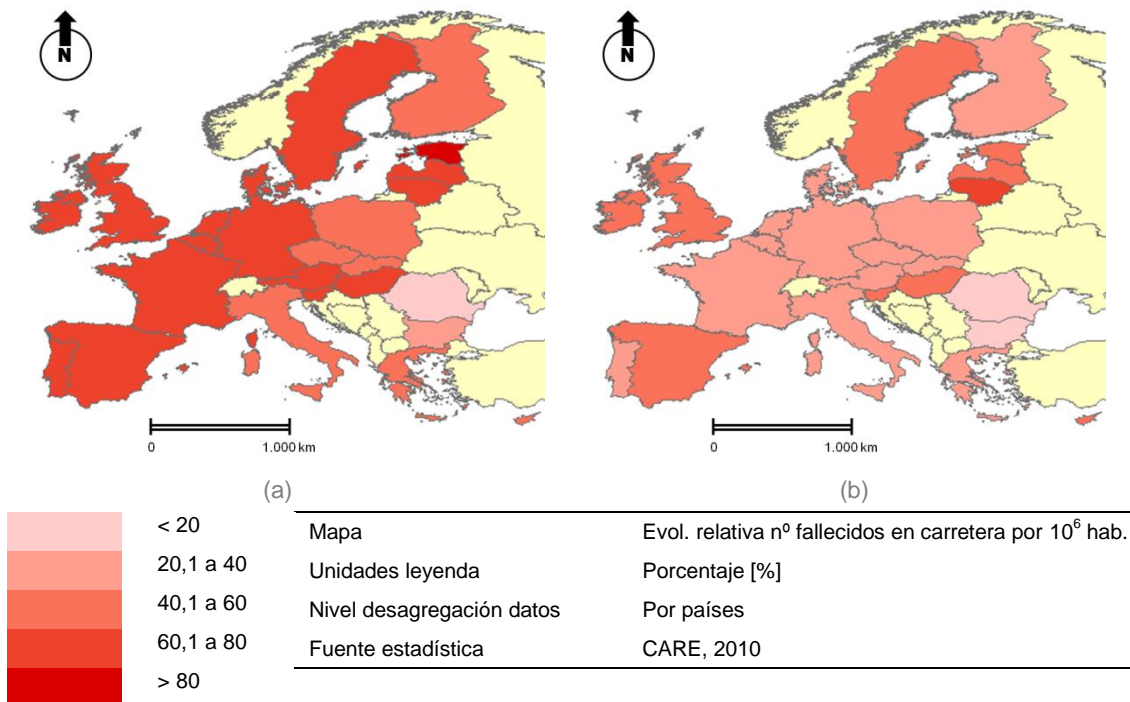


Figura 1-4: Reducción relativa del número de fallecidos en las carreteras europeas por cada millón de habitantes (a) en los últimos veinte años (1991-2010) y (b) en los últimos cinco años (2005-2010). Fuente: CARE, 2010.

En cuanto al número de heridos, los datos ofrecen una enorme variabilidad (Figura 1-5.d). Son los países del sector más septentrional de Centroeuropa los que presentan actualmente una menor tasa de heridos (en torno a 750 heridos por millón de habitantes en el caso de Dinamarca y Holanda). A continuación estarían una buena parte de los países del Este (Bulgaria, Polonia) y Bálticos (Lituania, Estonia) con ratios considerablemente superiores, del orden de los 1.200 heridos por millón de habitantes. Sin embargo, los ratios más elevados se encuentran en muchos de los países más desarrollados, sobre todo del centro, como Austria (5.475,4 por millón de habitantes), Italia (5.017,1), Alemania (4.537,4) y Suecia (2.495).

De los veintisiete países de la UE, veinte de ellos logran reducir su número de heridos en las últimas décadas aunque en niveles muy dispares (Figura 1-5). Los países Bálticos, salvo Lituania (-29,1%) tienden a una estabilización (Letonia: +4,7%; Estonia: -5,6%), mientras que los países centroeuropeos tienden a una reducción muy moderada, entre el 13 y el 18% (Austria, Rep. Checa y Eslovaquia). Los niveles de reducción más importantes los encontramos de nuevo en los países más septentrionales de Centroeuropa, como Holanda (-76,1%) o Dinamarca (-62,4%), y en algún país mediterráneo como Francia y Grecia. En el lado contrario estarían siete países, pertenecientes a diversas regiones geográficas, que incrementan su número de heridos, aunque en unos niveles muy diferentes Suecia incrementa muy ligeramente su índice (+1,8%) si lo comparamos con países del Este como Bulgaria (+92,4%) o Rumanía (+349,7%) (Figura 1-6).

Una revisión del índice de accidentes durante las dos últimas décadas muestra de nuevo una tendencia generalizada a la reducción (Figura 1-7). Así, son de nuevo los países del Norte los que más logran reducir sus índices (Holanda: -75,9%; Dinamarca: -62,9%). En el resto de países de la Europa Occidental los porcentajes de reducción se sitúan entre el 25% y el 40%, englobando este grupo un total de diez países. En el otro lado de la balanza están cuatro países que incrementan su índice de accidentes, aunque en niveles muy diversos: Italia (+16,5%), Eslovenia (+36,6), Bulgaria (+55,4) y Rumania (+213,9).

De esta forma, se mantiene una distribución en la que de nuevo Dinamarca (632 accidentes por millón de habitantes) y Holanda (650,3) presentan los índices más bajos de accidentes, junto con algunos países del Este como Bulgaria o Estonia, con ratios del orden de los 1.000 accidentes por millón de habitantes. Todos estos países presentan unos ratios muy inferiores a los propios de los países más desarrollados como Suecia (1766,9), Reino Unido (2580,6) o Alemania (3524,3) (Figura 1-8).

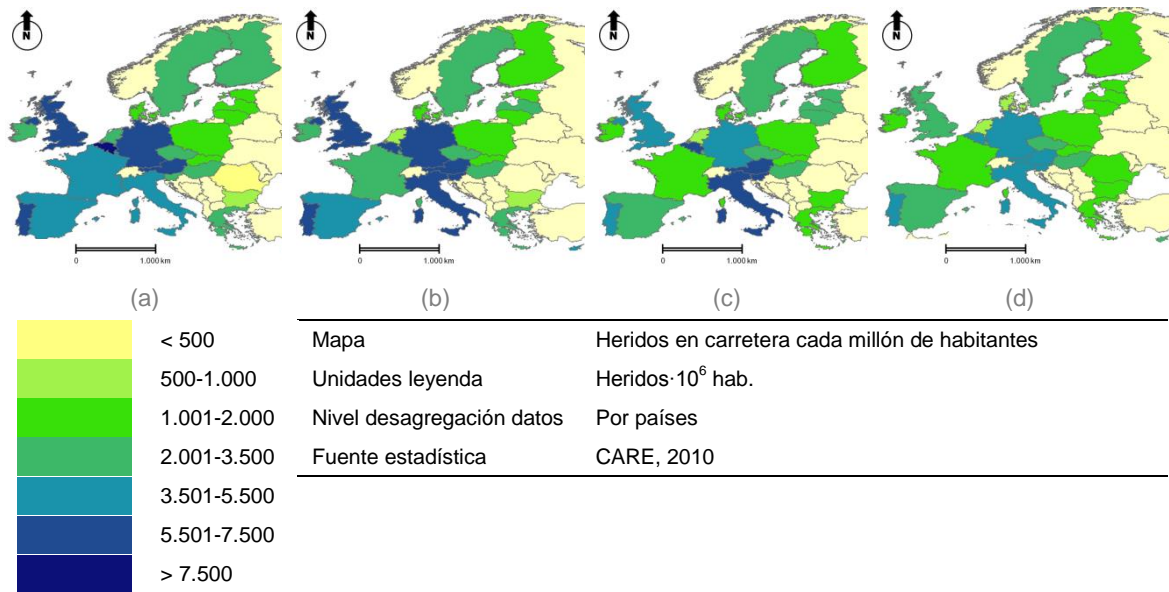


Figura 1-5: Heridos en las carreteras europeas por cada millón de habitantes en diferentes años: (a) 1991, (b) 2000, (c) 2005 y (d) 2010. Fuente: CARE, 2010.

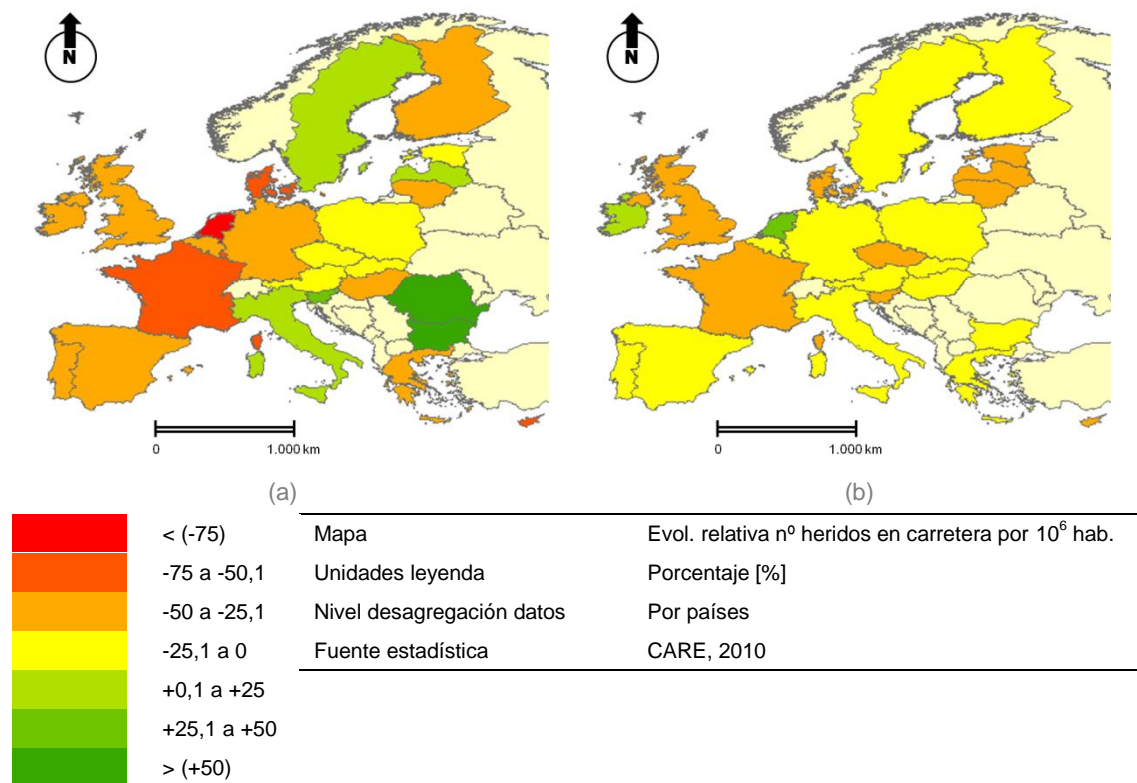


Figura 1-6: Evolución relativa del número de heridos en las carreteras europeas por cada millón de habitantes (a) en los últimos veinte años (1991-2010) y (b) en los últimos cinco años (2005-2010). Fuente: CARE, 2010.

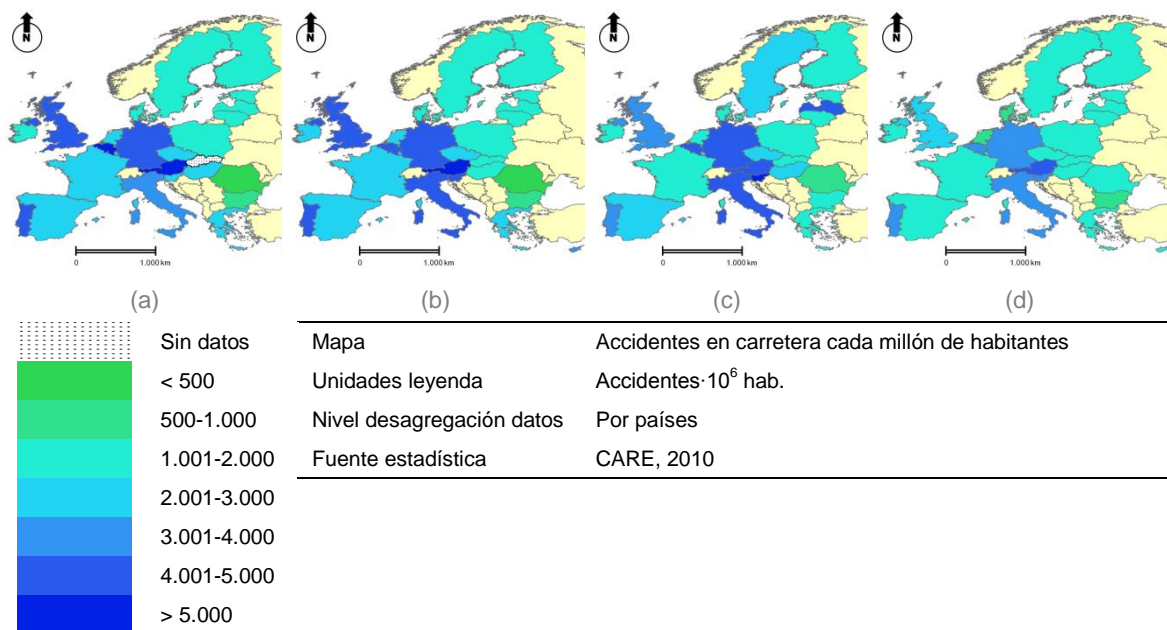


Figura 1-7: Accidentes en las carreteras europeas por cada millón de habitantes en diferentes años: (a) 1991, (b) 2000, (c) 2005 y (d) 2010. Fuente: CARE, 2010.

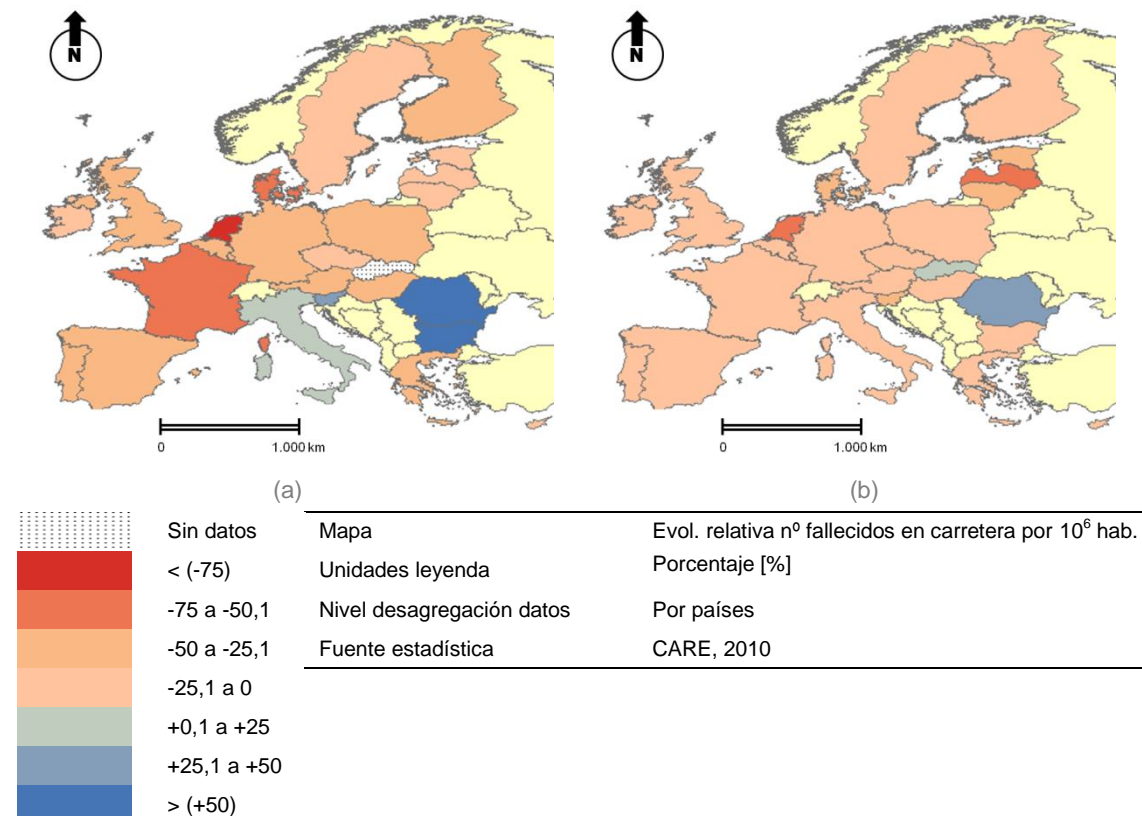


Figura 1-8: Evolución relativa del número de accidentes en las carreteras europeas por cada millón de habitantes (a) en los últimos veinte años (1991-2010) y (b) en los últimos cinco años (2005-2010). Fuente: CARE, 2010.

En la Figura 1-9 se presentan los ratios asociados a los principales indicadores de siniestralidad viaria para todos los países de la UE en los años 1991 y 2010. Se presentan así los ratios de (a) fallecidos, (b) heridos y (c) accidentes respecto a una población absoluta. Esta figura ofrece una visión estática de la evolución temporal de dichos ratios durante las dos últimas décadas.

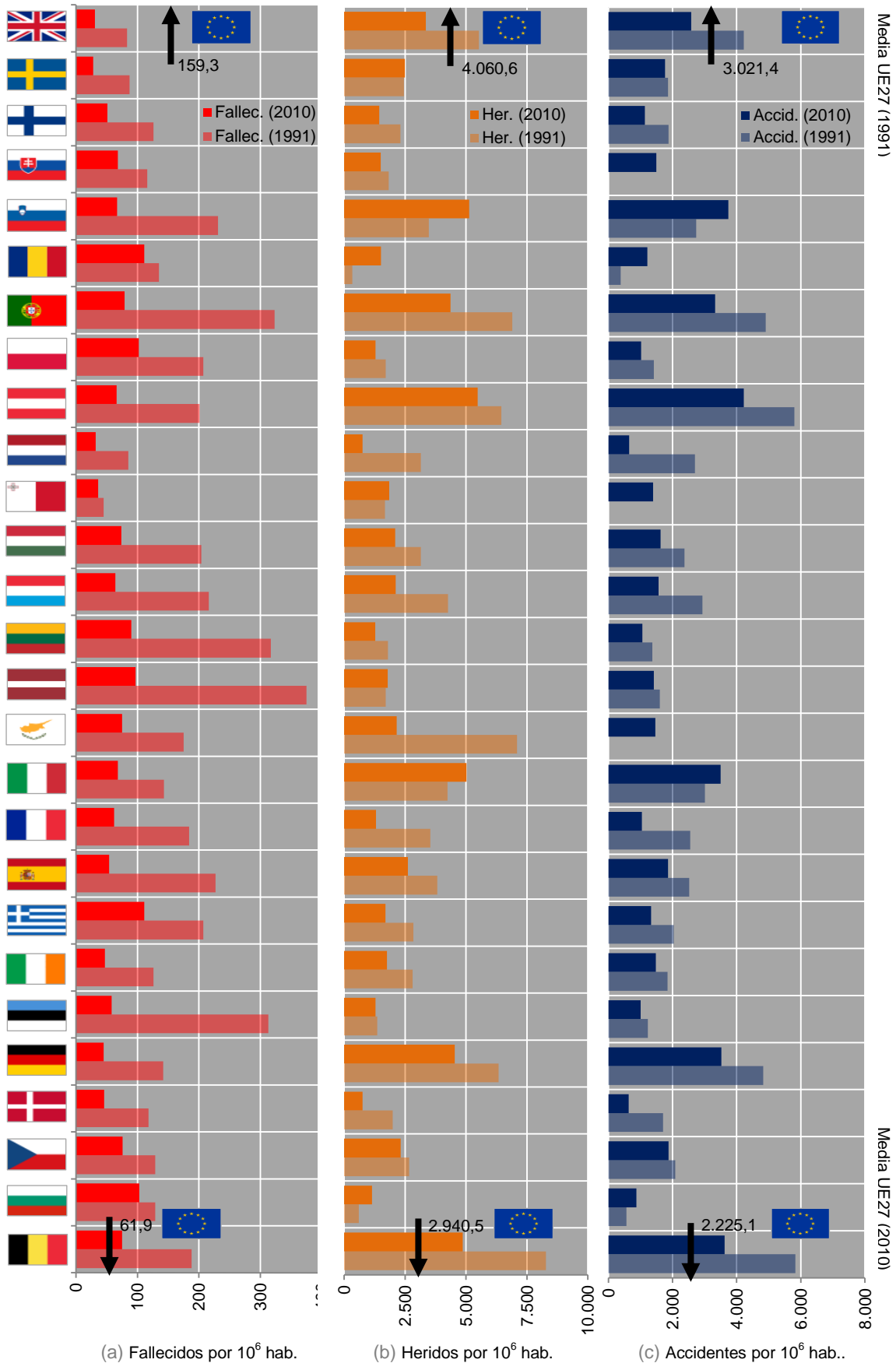


Figura 1-9: Niveles de siniestralidad vial en los países de la UE entre los años 1991 y 2010. Cálculo de los ratios de (a) fallecidos, (b) heridos y (c) accidentes por millón de habitantes. Fuente: CARE, 2010.

Este mismo gráfico permite establecer comparaciones entre los respectivos países tanto en los niveles de siniestralidad asociados como en los niveles de reducción alcanzados. Los datos además pueden ser comparados respecto a los valores medios europeos para cada una de las fechas.

Además de los datos cuantitativos existen una serie de índices cualitativos cuya evolución temporal reciente muestra, de la misma forma, una tendencia clara a una reducción generalizada. El *índice de gravedad de los accidentes* se calcula en función del número de fallecidos en carretera y el de accidentes. Un índice muy semejante es el *índice de letalidad*, que se calcula en función del número de fallecidos y de heridos en carretera. Ambos índices suelen ser expresados en tanto por cien. La evolución relativa de ambos índices muestra a nivel europeo una reducción próxima al 50% durante las dos últimas décadas. Otro índice de interés es el *de heridos por accidente*, cuyo comportamiento evolutivo claramente de los anteriores y presenta una tendencia a la estabilización para el conjunto de la UE (Tabla 1-1).

Tabla 1-1: Evolución de una serie de ratios cualitativos de seguridad vial para el conjunto de la actual UE entre los años 1991 y 2010. Fuente: CARE, 2010.

	1991	2000	2005	2010
Ratio muertes/accidentes (cada 100 accidentes)	5,27	3,86	3,42	2,78
Ratio muertes/heridos (cada 100 heridos)	3,92	2,92	2,64	2,11
Ratio heridos/accidentes	1,34	1,32	1,30	1,32

En cuanto a su distribución geográfica, el *índice de gravedad de los accidentes* dentro del contexto europeo presenta grandes diferencias. Los países más desarrollados presentan ratios de entre 1 y 2 fallecidos por cada 100 accidentes (Reino Unido: 1,2; Alemania: 1,3; Suecia: 1,6), mientras que los países menos desarrollados, i.e., los del Este y Bálticos, llegan a presentar ratios superiores a 8 (Rumania: 9,2; Polonia: 10; Bulgaria: 11,8) (Figura 1-10). Una distribución geográfica semejante, se obtiene para el segundo índice, el *de letalidad*. Los países más desarrollados presentan ratios de un orden inferior al 2 (fallecidos por cada 100 heridos), mientras que los países del Este presentan ratios superiores a 7, llegando a alcanzar niveles superiores a 9 como el caso de Bulgaria (Figura 1-11).

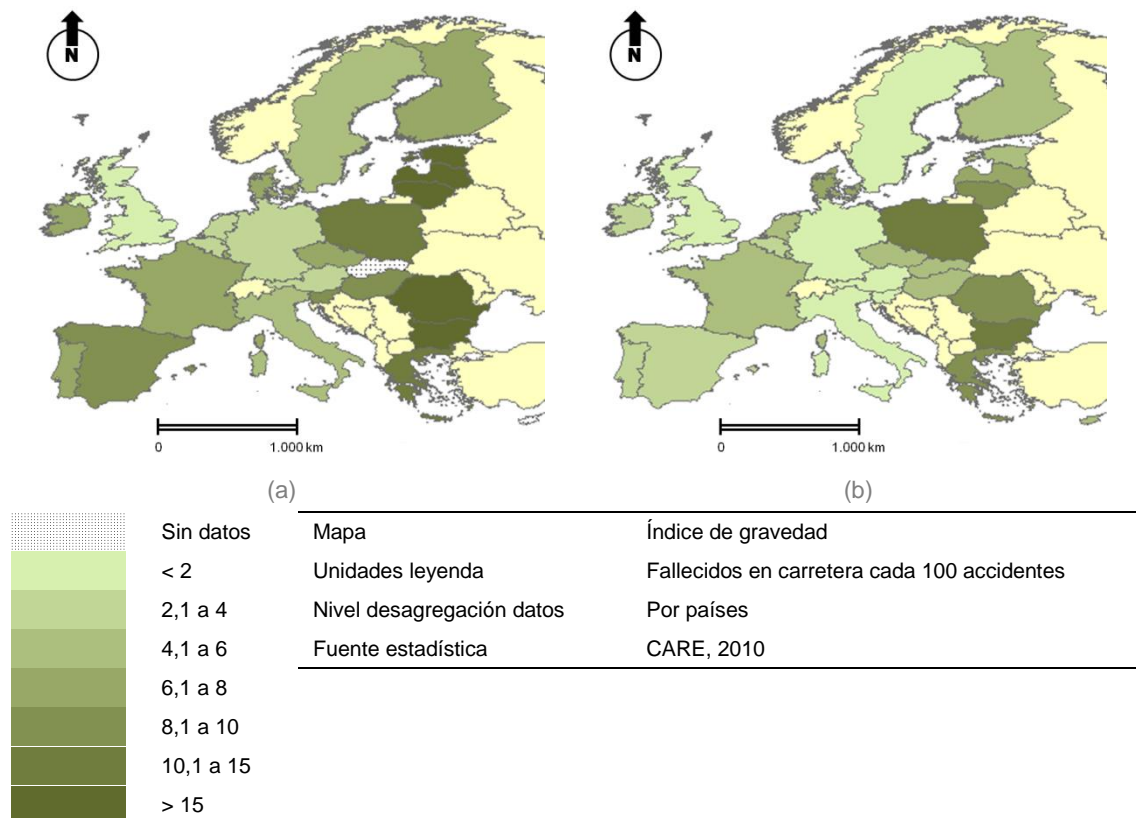


Figura 1-10: Índices de gravedad asociados a los diferentes países de la UE en los años 1991 y 2010. Fuente: CARE, 2010.

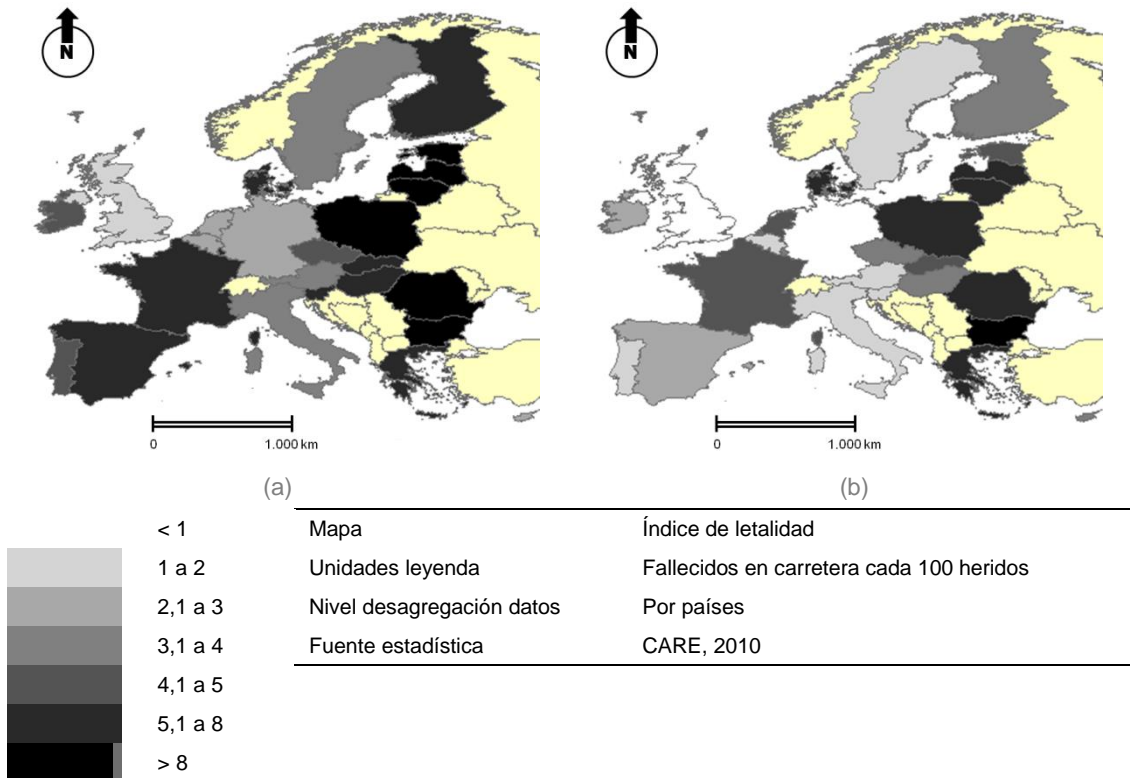


Figura 1-11: Índices de letalidad asociados a los diferentes países de la UE en los años 1991 y 2010.
Fuente: CARE, 2010.

El análisis y revisión de los índices anteriores muestra la existencia de grandes desigualdades nacionales dentro del contexto europeo. Sin embargo, estas desigualdades no deben limitarse solo a un punto de vista geográfico determinista. Existen así otras posibles perspectivas que ponen de manifiesto grandes diferencias. El *proyecto DaCoTA EU Road Safety* conforma cada año una de las principales bases de datos de seguridad vial, llevándose a cabo de forma simultánea en más de treinta países europeos (*DaCoTa*, 2014). Su nivel de análisis permite analizar los principales parámetros de siniestralidad teniendo en cuenta un gran conjunto de variables.

Una revisión profunda de las bases de datos publicadas dentro de este proyecto permite determinar desigualdades en cualquier escenario de análisis, no solamente el geográfico. A nivel europeo en conjunto, existen así grandes diferencias si analizamos las diferentes componentes que forman parte del escenario de conducción: sujeto, vehículo, vía y entorno (Brandstaetter *et al.*, 2012). Respecto al sujeto, el *proyecto DaCoTa* tiene en cuenta un gran número de aspectos como el sexo, el modo de transporte y la edad de la víctima. En cuanto al sexo, por cada mujer fallecida en las carreteras europeas, perecen 3,2 hombres. La diferencia entre sexos determina diferencias muy claras entre porcentajes de fatalidad. Más del 80% de los hombres fallecidos estaban al volante, mientras que en el caso de las mujeres, el porcentaje es de sólo el 35,8%. Estas grandes diferencias se observan en la *Figura 1-12.a* en la que se determina en función de la posición y sexo del sujeto el porcentaje de fatalidad asociado. En lo relativo a la edad, el 37,6% de los fallecidos en carretera eran personas de entre 25 y 49 años, el 21,6% mayores de 65 años, el 18% tenían entre 50 y 64, mientras que el 16,2% eran jóvenes de entre 18 y 24 años. La edad determina además diferencias muy claras entre sexos. Se observa así como la mayor parte de los hombres fallecidos eran adultos de mediana edad, mientras que en el caso de las mujeres eran mujeres de edades avanzadas (*Figura 1-12.b*). Si se tiene en cuenta el vehículo, las estadísticas demuestran como casi en la mitad de las muertes en carretera el fallecido iba en coche (48,1%), mientras que un 18,9% en motocicleta o ciclomotor y un 20,5% eran peatones (*Figura 1-12.c*).

El tipo de vía es uno de los factores que determina a nivel europeo más desigualdades. Así, en áreas urbanas tienen lugar casi un 70% de los accidentes, pero menos del 40% de las víctimas mortales. Son las vías interurbanas, fuera de los ámbitos urbanos las que, a pesar de no concentrar un porcentaje muy alto del número de accidentes (en torno a una cuarta parte), concentran la mayor parte de las muertes en carretera (55,7%). Por tanto, es en este tipo de vías donde, por consiguiente, se dan los accidentes más graves tal y como se muestra en la *Figura 1-12.d*. Las *Figuras 1-12.e* y *1-12.f* relacionan, en función del



tipo de vía, el número de accidentes y de muertes en carretera. Se observa como sólo en las vías de alta capacidad, i.e., autovías y autopistas, se produce un cierto equilibrio entre el número de accidentes y el de fallecidos en carretera. En las dos clases restantes se produce, sin embargo, una clara asimetría entre ambos eventos en unos niveles de relación muy desiguales.

Por último, el entorno supone un ámbito de estudio muy amplio bajo el cual pueden ser analizados aspectos como el ambiente (rural o urbano), el nivel de saturación del tráfico de la vía, las condiciones meteorológicas, el momento temporal (año, mes, día y hora), etc. A partir de todo este conjunto de características pueden analizarse aspectos concretos como el grado de visibilidad e iluminación de la vía por parte del conductor o muchos otros. La revisión de los datos a nivel europeo muestra como alguna de las conclusiones más relevantes el hecho de que más de la quinta parte de los fallecidos se dan en los dos principales meses estivales (20,4%) y que un 42,1% de las muertes se producen en fin de semana, entre viernes y domingo². La Figura 1-12.g muestra como en los meses estivales cuando se produce la mayor parte de fallecimientos al volante y como en los meses otoñales se produce una concentración muy marcada de peatones fallecidos. En cuanto a las condiciones meteorológicas más del 80% de las muertes en carretera se producen en condiciones de tiempo seco y poco más del 10% en condiciones de lluvia³.

1.3.2. La seguridad vial en el contexto español

De los países más desarrollados del mundo, los que forman parte de la OCDE, España era en 2010 el decimotercer país en cuanto a su *índice de fatalidad*, presentando un índice de 54 fallecidos en carretera por millón de habitantes (OCDE⁴, 2010). Si aportamos una visión relativa, el ratio español es considerablemente mejor que el de los países de su entorno inmediato, el sur de Europa, aunque considerablemente peor que el de los países del norte de Europa.

La evolución de España ha sido muy positiva en los últimos años, pasando de un ratio de 135 fallecidos en carretera (por millón de habitantes) en 2001 a 54 en 2010, lo que le ha permitido pasar dentro del ranking desde el puesto 22º en 2001 al 13º en 2010. España es así el país de la OCDE que más logró reducir su ratio de fatalidad en carretera entre los años 2001 y 2011 (-60,3%), sólo por detrás de Islandia (-70,1%).

Si ampliamos el rango temporal a los últimos veinte años, España ha logrado reducir su índice de fatalidad en un 76,2% desde el año 1991, cuando el número de fallecidos en carretera era de 257 por millón de habitantes. Esta fuerte reducción ha permitido a España situarse actualmente por debajo de la media europea, pasando de ser el vigésimo segundo país en 1991 al octavo con menos fallecidos en carretera. España es el segundo país europeo que más logra reducir su índice de fatalidad durante los últimos veinte años, solo por detrás de Estonia. Sin embargo, España todavía presenta un índice de fatalidad muy superior al de países como Suecia (28 fallecidos en carretera por millón de habitantes), Reino Unido (31), Holanda (32) y, en general, ligeramente superior al de los países más desarrollados de Centroeuropa, como Alemania (45) y Dinamarca (46).

La evolución del número de fallecidos en carretera durante los últimos cincuenta años ha experimentado grandes variaciones, tal y como se observa en la Figura 1-13. España alcanza sus valores máximos a finales de la década de 1980 con casi 6.000 fallecidos en el año 1989. Es a partir de este momento cuando las autoridades competentes se implican de forma más decidida en la reducción de este problema. Desde entonces la apuesta por campañas de concienciación colectiva sobre los riesgos al volante permitió reducir los niveles de siniestralidad vial de forma continuada. En 1992 se aprueba el *Reglamento de Circulación*⁵ que, con variaciones y actualizaciones, ha ido llegando hasta nuestros días. Se incompatibiliza el uso de alcohol en conducción, se promueven duras campañas publicitarias en las que se apela a la responsabilidad social y se actúa contra los infractores de forma más rápida y decidida promoviendo juicios rápidos y estipulando diversas infracciones al volante como delitos penales.

² Datos obtenidos para 22 países de la UE en el año 2010.

³ Datos obtenidos para 23 países de la UE en el año 2010.

⁴ De esta lista de 32 países pertenecientes a la OCDE se excluyen dos países (Chile e Israel).

⁵ Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la *Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial* (RCL 1990\578 y 1653).

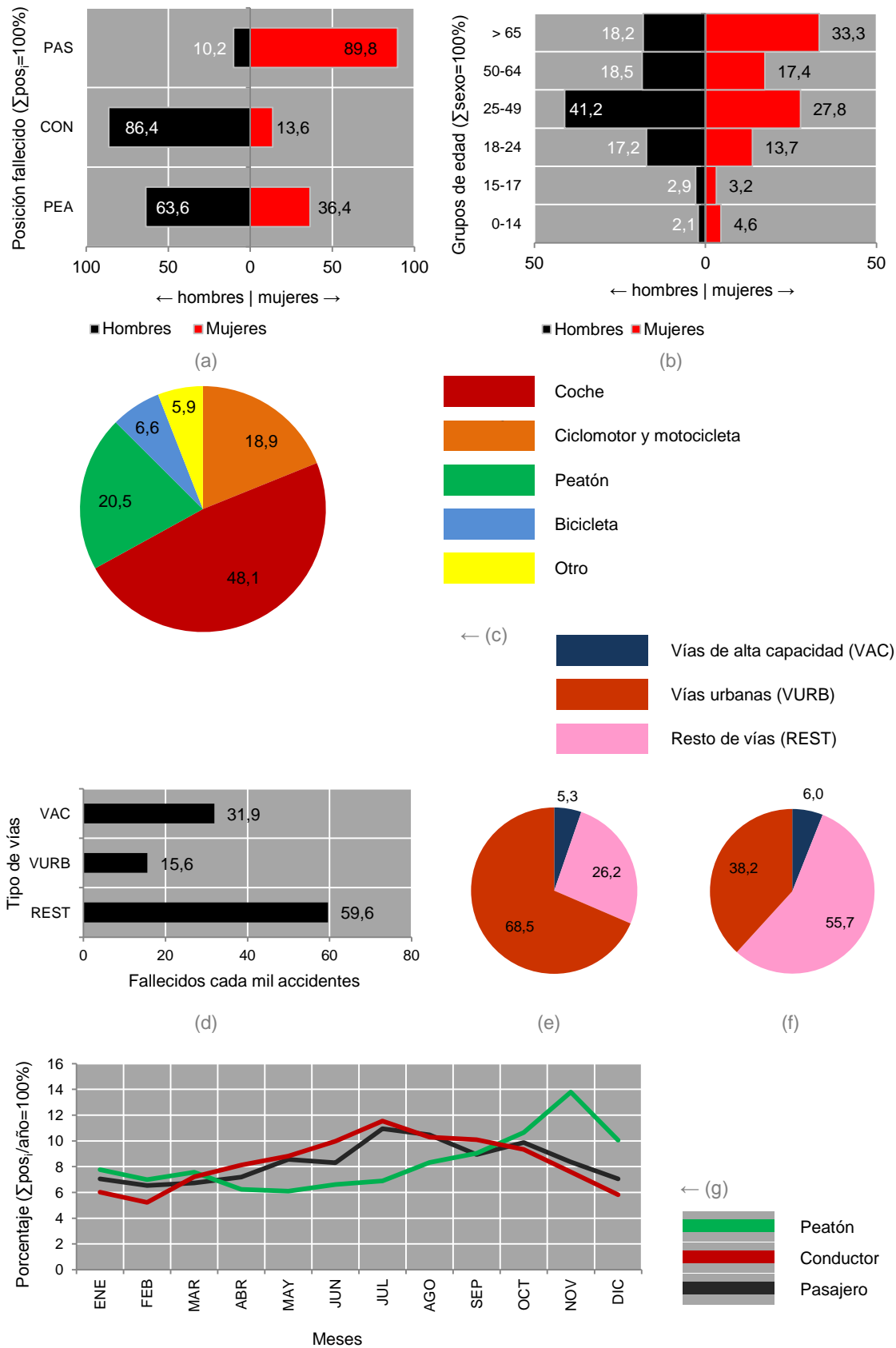


Figura 1-12: Relación entre incidentes y diversos parámetros del escenario viario en los países de la UE en el año 2010: (a) posición y sexo de la víctima (datos para UE-19); (b) edad y sexo (UE-19); (c) índice de gravedad de accidentes en función del tipo de vía (UE-22); (e) n° de accidentes y (f) fallecidos por tipo de vía (UE-19); (g) fallecidos en función de la posición y el mes de año. Fuente: CARE, 2010.

En los dos extremos de la serie temporal representada en la Figura 1-13 se alcanzan los valores mínimos de siniestralidad. La cifra absoluta de víctimas mortales en las carreteras españolas en el año 2011 se sitúa en el nivel del año 1962. Sin embargo debe tenerse en cuenta que el escenario de movilidad es completamente diferente respecto a entonces, cuando en España había únicamente 1,5 millones de vehículos.

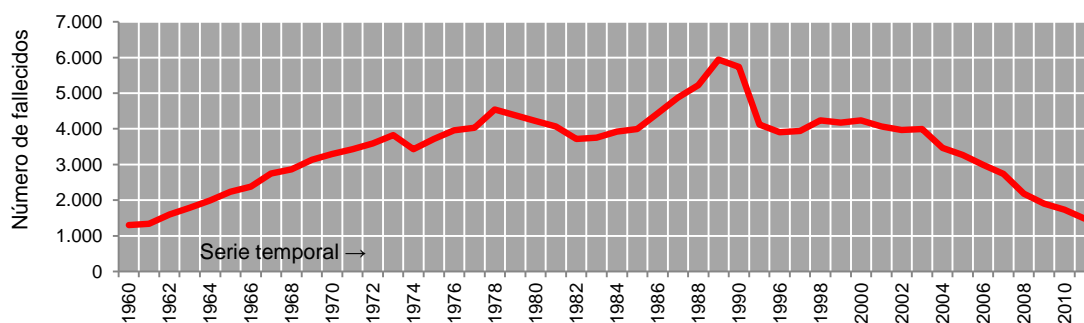


Figura 1-13: Evolución histórica del número de fallecidos en las carreteras españolas desde 1960 hasta 2011⁶. Fuente: DGT, 2011.

La evolución más reciente refleja una clara reducción del número de muertes en un contexto en el que el parque móvil crece de forma espectacular (+75,6%) pasando de menos de 18 millones de vehículos en 1993 a más de 31 en 2011 (DGT, 2011). Esta evolución reciente puede ser simplificada en tres etapas:

- Período 1990-1994. Es un período de marcado descenso en el número de fallecidos en carretera, el cual viene precedido por un período de fuerte carácter alcista (1983-1989) en el que se alcanza el máximo histórico en 1989.
- Período 1995-2003. Aunque presenta ligeras oscilaciones se observa una tendencia clara al estancamiento en el número de víctimas.
- Período 2004-2010: Se produce un fuerte descenso en el número de fallecidos en carretera, pasando de 3.464 en 2004 a 1.479 en 2010.

Una serie de ratios reflejan claramente la fuerte disminución de la mortalidad en las carreteras españolas. El número de fallecidos en carretera por cada 10.000 vehículos pasa de 4 a 1 entre los años 1993 y 2011, mientras que el de fallecidos en carretera por cada 10.000 habitantes pasa de 1,62 a 0,44. De la misma forma, España reduce significativamente dentro de este mismo período temporal tanto el *índice de gravedad* de los accidentes, que pasa de 80 a 25 fallecidos cada 1.000 accidentes, como el *índice de letalidad*, que disminuye en casi dos tercios pasando de 5,2 a 1,8 fallecidos por cada 100 heridos.

Como resultado de los índices anteriores se aprecia un cambio significativo en el modelo de distribución piramidal de los damnificados en accidentes de tráfico (fallecidos, heridos graves y heridos leves). En el año 1965 el 5% de los damnificados eran víctimas mortales, un 26% eran heridos graves y un 68% heridos leves. Actualmente, esa proporción es significativamente diferente, siendo un 1,8% víctimas mortales, un 9,6% heridos graves y un 88,6% heridos leves. Ha sido sobre todo durante los últimos años cuando ha logrado reducirse de forma más significativa el número de víctimas mortales y de heridos graves (Figura 1-14). En el año 2010, se produjeron en España 85.503 accidentes con víctimas, en los que resultaron heridas 122.823 personas. De éstas 2.478 fueron víctimas mortales, 11.995 heridos graves y 108.350 heridos leves. Estos datos suponen una reducción de un 55% tanto en el número de víctimas mortales como de heridos graves respecto al año 2001 (DGT, 2011).

A nivel europeo, España era en 2010 el vigésimo país con menor índice de heridos en carretera con 2.616,8 por millón de habitantes, una posición similar a la que presentaba en el año 1991 (19^o), a pesar de reducir su número en un 31,5%. El ratio de heridos en carretera en España está muy lejos de los países tanto del centro y norte de Europa como de la mayor parte de países del Este y Bálticos, los cuales presentan ratios inferiores. A pesar de todo, España presenta un ratio más bajo que el propio de países

⁶ Se consideran únicamente aquellas víctimas mortales dentro de las primeras 24 horas del accidente. Debe tenerse en cuenta la variación metodológica en el recuento de víctimas por parte de la *Dirección General de Tráfico* (DGT) desde 1993. Hasta el año 1993 el recuento de víctimas se consideraba dentro de las primeras 24 horas, para a partir de entonces ampliar el marco temporal a los 30 días después del accidente.



altamente desarrollados como Alemania o Reino Unido. Los países que presentan los mejores índices son Dinamarca y Holanda, ambos con ratios inferiores a 750 heridos por millón de habitantes.

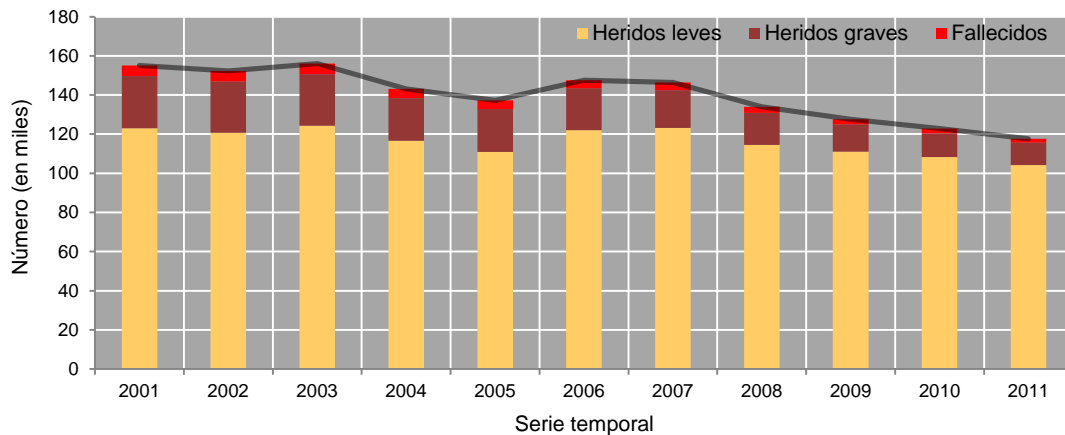


Figura 1-14: Evolución histórica del número de heridos y fallecidos en las carreteras españolas entre los años 2001 y 2011. Cómputo de muertes a 30 días. Fuente: *Observatorio Nacional de la Seguridad Vial* de la DGT, 2011.

A nivel de accidentes, España es el decimonoveno país europeo con menos accidentes (1.859,2 por cada millón de habitantes), una posición relativa que ha empeorado desde 1991, cuando era decimocuarto⁷. Esto a pesar de haber logrado reducir de forma considerable el número de accidentes (-26,3%) durante estas dos últimas décadas. El ratio de accidentes en España es, de nuevo, muy superior al propio de los países del Norte y de otros países tanto del Este como del centro de Europa. Aún así España presenta un índice de accidentes mucho menor que países como Reino Unido (2.580,8) o Alemania (3.524,3). Los países que presentan los mejores ratios a nivel europeo son de nuevo Dinamarca (632 accidentes por millón de habitantes) y Holanda (650).

En cuanto a la gravedad de los accidentes, España vuelve a presentar índices ligeramente superiores a la media europea (2,8 fallecidos cada 100 accidentes en 2010). España es el décimo país europeo con 2,9 fallecidos cada 100 accidentes, una cifra muy superior a la propia de países como Reino Unido (1,2) o Alemania (1,3). Si la estimación del índice de gravedad se hace en función del número de heridos, España sigue presentando una posición similar dentro del contexto europeo con 2,1 fallecidos por cada 100 heridos. El ratio español es de un orden muy semejante a la media europea y considerablemente superior a los índices propios de los países más desarrollados como Reino Unido (0,9 fallecidos cada 100 heridos), Alemania (1) o Suecia (1,1). Una revisión más completa de los principales índices de siniestralidad en las carreteras españolas durante la última década se expone en la Tabla 1-2.

Tabla 1-1: Siniestralidad en las carreteras españolas durante la última década (2001-2010)⁸. Fuente: *Observatorio Nacional de la Seguridad Vial* de la DGT, 2011.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Accidentes con víctimas	100.393	98.433	99.987	94.009	91.187	99.797	100.508	93.161	88.251	85.503
Fallecidos	5.517	5.347	5.399	4.741	4.442	4.104	3.823	3.100	2.714	2.478
Heridos graves	26.566	26.156	26.305	21.805	21.859	21.382	19.295	16.488	13.923	11.995
Heridos leves	123.033	120.761	124.330	116.578	110.950	122.068	123.226	114.459	111.043	108.350
Muertos por millón de personas	135	128	128	110	102	93	86	68	59	54
Promedio diario de fallecidos	15	15	15	13	12	11	10	8	7	7
Parque vehículos (en millones)	25,79	26,82	27,01	28,34	29,61	31,02	32,34	32,96	32,79	32,96
Muertos por millón de vehículos	214	199	200	167	150	132	118	94	83	75
Índice letalidad	3,6	3,5	3,5	3,3	3,2	2,8	2,6	2,3	2,1	2

⁷ En el año 1991 no se cuenta con datos de accidentes de Chipre, Malta y Eslovaquia.

⁸ La metodología del ONSV establece cómputos de fallecidos en carretera durante los primeros 30 días a partir del accidente.



Al igual que para el caso europeo, haremos una breve revisión de los aspectos y patrones más significativos para el caso español teniendo en cuenta los diferentes componentes que forman parte del escenario viario para, a partir de ahí, establecer comparaciones con los datos obtenidos para el conjunto de Europa.

El primero de los componentes que analizamos es el relativo al propio sujeto. En España, fallecen en carretera 3,45 hombres por cada mujer, un dato ligeramente superior a la media europea, donde esa misma relación es de 3,2 hombres por mujer⁹. Pero la diferencia entre sexos es mucho más marcada si tenemos en cuenta la posición del sujeto. El 70,9% de los hombres fallecidos en las carreteras españolas estaba al volante, mientras que en el caso de las mujeres al volante este porcentaje es de sólo el 27%. En ambos casos los porcentajes relativos son del orden de un 10% inferior a lo ocurrido en las carreteras europeas. Pero las diferencias entre sexos en España van mucho más allá. Si tenemos en cuenta únicamente fallecidos que estaban al volante, el 90% son hombres. Sin embargo, existe un equilibrio bastante marcado entre sexos si tenemos en cuenta los fallecidos que eran peatones o que ocupaban la posición de acompañante (Figura 1-15.a). En lo relativo a la edad de la víctima, el 44,1 de los fallecidos en carretera eran personas de mediana edad, entre 25 y 49 años, el 21,5% personas mayores de 65 años, el 16,5% entre 50 y 64 y el 12,7% jóvenes entre 18 y 24 años. La comparativa con los datos europeos refleja como diferencia más significativa el hecho de que el grupo de mediana edad es mucho más afectado en España, con una diferencia relativa de más de un 6,5% respecto a la media europea¹⁰ (Figura 1-15.b).

Si tenemos en cuenta el vehículo, la comparativa entre el caso español y europeo no refleja grandes diferencias siendo quizás la más significativa el menor peso relativo que tiene el grupo de víctimas mortales que iban en bicicleta en el caso español, en torno a un 3,8% menor a la media europea debido probablemente a una menor tradición de este modo de transporte en España respecto a muchos países europeos (Figura 1-15.c).

Si tenemos en cuenta el tipo de vía, en España se presenta, al igual que en el caso europeo, una discrepancia muy clara entre los niveles de accidentalidad y fatalidad en función del tipo de vía. En España, aunque más de la mitad de los accidentes tienen lugar dentro de ambientes urbanos, sólo representan poco más de la quinta parte de las muertes en carretera. Por el contrario, son en las vías interurbanas, fuera estrictamente de ambientes urbanos, donde a pesar de sólo darse un tercio de los accidentes, se concentran más del 60% de las víctimas mortales (Figuras 1-15.e y 1-15.f). El cálculo del índice de gravedad de los accidentes refleja, si lo comparamos con Europa, un índice considerablemente inferior para el caso de vías interurbanas (-8,1). Sin embargo, los ratios obtenidos son considerablemente superiores a los europeos en el caso de vías de alta capacidad, es decir, autopistas y autovías (+10,5) (Figura 1-15.c).

En función del entorno existen también diferencias muy significativas entre el caso español y el europeo. A nivel nacional, el grado de concentración de muertes en carretera en los dos principales meses estivales, julio y agosto, no es tan marcado como ocurre en el caso europeo, observándose una diferencia de -2,4%. La Figura 1-15.g refleja patrones muy diferentes de fallecidos en función del mes del año y modo de transporte. El mayor porcentaje de fallecidos se da entre pasajeros, observándose además un patrón muy diferente al europeo, con dos claros máximos, uno en verano y otro en otoño. En el caso de peatones no se observa un patrón de comportamiento tan marcado como el europeo observándose una fase de máximo que ocupa las estaciones de otoño e invierno. En el grupo de los conductores sí se observa un patrón más similar al europeo, aunque mucho menos marcado y con algunas diferencias puntuales.

La tendencia a la concentración es mucho más marcada en el caso español si tenemos en cuenta el día de la semana. Casi la mitad de las muertes en las carreteras españolas tienen lugar en fin de semana, entre viernes y domingo. Este dato es considerablemente superior a la media europea¹¹ (+7,2%). En cuanto a las condiciones meteorológicas en España se produce una distribución similar a la media europea, aunque con una tendencia más marcada a condiciones de tiempo seco. Así, en España se produce, si lo comparamos con Europa, un 4,1% más de muertes en carretera en condiciones de tiempo seco¹².

⁹ Datos obtenidos para 19 países de la UE en el año 2010.

¹⁰ Datos obtenidos para 22 países de la UE en el año 2010.

¹¹ Datos obtenidos para 22 países de la UE en el año 2010.

¹² Datos obtenidos para 23 países de la UE en el año 2010.

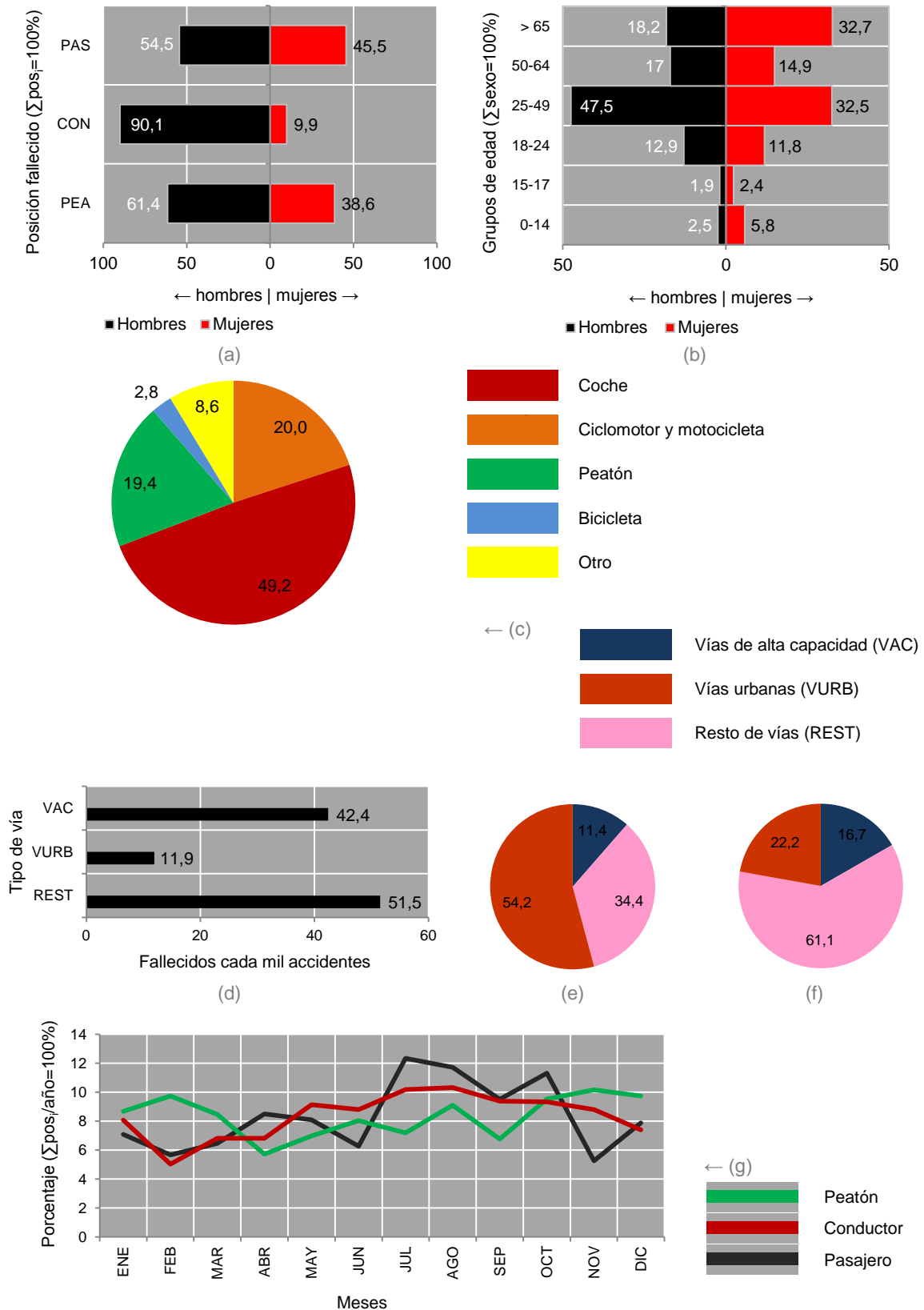


Figura 1-15: Relación entre incidentes y diversos parámetros del escenario viario en España en el año 2010: (a) posición y sexo de la víctima (datos para UE-19); (b) edad y sexo (UE-19); (c) índice de gravedad de accidentes en función del tipo de vía (UE-22); (e) n° de accidentes y (f) fallecidos por tipo de vía (UE-19); (g) fallecidos en función de la posición y el mes de año. Fuente: CARE, 2010.



responsables del 23,6% de las muertes de población de entre los 15 y los 24 años y del 13,9% de la población de entre 25 y los 34 años que fallece por causas externas (DGT, 2010). Pero además de las víctimas mortales, los accidentes de tráfico conllevan un gran número de damnificados de muy diversa índole. Entre el colectivo de más gravedad están los que presentan algún nivel de discapacidad, que conforman un grupo muy numeroso. De hecho, en España viven unas 78.961 personas con discapacidad permanente provocada por accidentes de tráfico (*Encuesta Nacional de Discapacidad*, 2011).

Los costes económicos van unidos a los costes sociales y presentan una cuantía muy elevada. Un estudio reciente de la *Dirección General de Tráfico* (DGT), elaborado en colaboración con la *Universidad de Murcia* (UM), analizó los costes económicos que tenían para la Administración los accidentes de tráfico con víctimas, incluyendo dentro de este importe los costes tanto directos como indirectos. Dentro de los costes indirectos se engloban todos aquellos costes médicos, administrativos y de cualquier otro tipo. Según dicho estudio, cada víctima mortal en carretera supone un coste al Estado español de 1,4 millones de €, un herido grave de unos 219.000 € y un herido leve de unos 6.100 €. La extrapolación de estos costes al conjunto de la campaña del año 2011 genera un coste total de entre 6.000 y 11.000 millones de €, lo que equivale en términos relativos a un coste variable de entre el 0,56 y el 1,04% del PIB nacional (DGT, 2011).

La revisión de los datos estadísticos presentados muestra como en los últimos años se ha conseguido, tanto a nivel nacional como europeo, revertir la tendencia de unos años atrás, lográndose limitar y disminuir todos los parámetros de siniestralidad en carretera. La evolución de los tres principales parámetros analizados (accidentes, heridos y fallecidos) así lo demuestra, con más mérito si cabe en un contexto en el que aumenta la población en general y, por consiguiente, tanto el número de conductores como el parque móvil.

Aunque en todos los contextos espaciales analizados se observa una clara tendencia a la reducción de la siniestralidad vial durante los últimos años, siguen existiendo grandes desigualdades desde un punto de vista geográfico. A nivel europeo se observa claramente como los países del Centro y Norte de Europa son los que presentan índices de fatalidad más bajos. Se observa un cierto patrón en el que se aprecia como los países más ricos presentan los más bajos índices de fatalidad en carretera. Existe así un grado de relación lineal moderado entre índice de fatalidad en carretera y el PIB per cápita en los países europeos ($r^2=0,56$) (Figura 1-19.a).

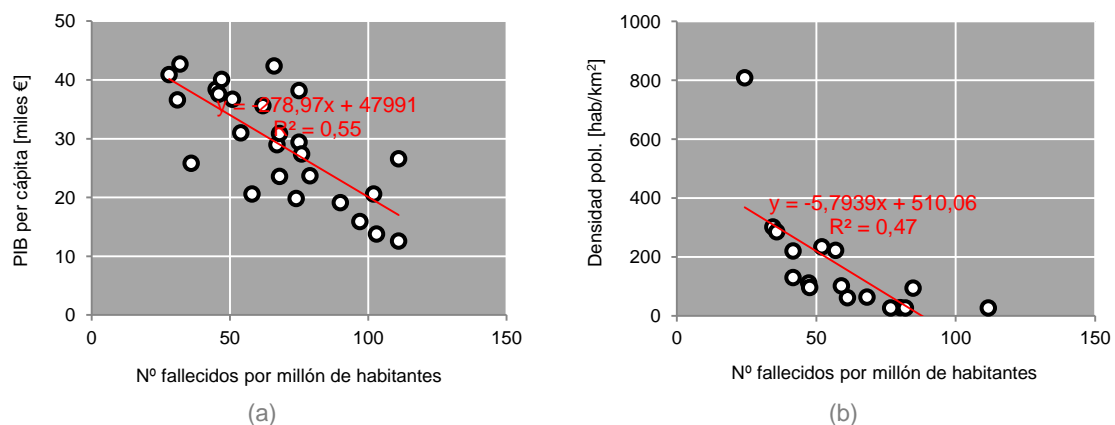


Figura 1-19: (a) Grado de relación lineal entre índice de fatalidad y PIB per cápita en los países europeos¹³. (b) Grado de relación lineal entre índice de fatalidad y densidad de población en las CCAA españolas. Fuente: (a) *CIA World Factbook*, 2010; (b) INE, 2012.

En España la situación presenta una mayor variabilidad interregional y se observa un patrón con ciertas diferencias. Son País Vasco y Madrid, la primera y tercera regiones más ricas, las que presentan los más bajos índices de fatalidad en carretera, mientras que varias de las CCAA más pobres como Extremadura o Castilla La Mancha presentan los más altos. Sin embargo, en otras muchas regiones no se observa esta norma de distribución. Pero el patrón más claro observable en España es el que relaciona población y fatalidad en carretera. Existe así una tendencia moderada a presentar índices de fatalidad en carretera

¹³ No se toman en consideración el caso de Luxemburgo, cuyo PIB per cápita es entre dos y tres veces más alto que el resto de países europeos más desarrollados al contar con un status económico y fiscal especial (PIB per cápita: 78.664 \$ según el *Fondo Monetario Internacional* en 2014; 86.124 \$ según el *Banco Mundial* en 2010; 84.700 \$ según *CIA World Factbook* en 2011). Por esta razón consideramos el valor de su PIB per cápita como un *outlier* fuera de la normalidad de la muestra.



más altos aquellas regiones con menores densidades de población. Esto se observa en las dos Castillas, Galicia, Aragón, Extremadura, La Rioja, Navarra y Asturias, todas ellas con índices superiores a 60 fallecidos en carretera (por millón de habitantes) y densidades de población de un máximo de unos 100 hab/km², aunque con enormes desigualdades entre ellas. La Figura 1-19.b muestra la existencia de un cierto grado de relación lineal entre índice de fatalidad y densidad de población en las CCAA españolas ($r^2=0,47$).

Sin embargo, si tomamos los datos de heridos en carretera (por millón de habitantes), los resultados tienden a presentar una distribución completamente diferente. Cuatro de las cinco CCAA con más PIB per cápita presentan los mayores índices de heridos por millón de habitantes, mientras que cuatro de las CCAA más pobres presentan los más bajos, del orden de la mitad de las primeras. A nivel de Europa se observa algo similar, aunque no tan marcado. Muchos de los países del Este, con niveles de PIB per cápita muy inferiores a los países del Centro de Europa, presentan los más bajos índices de heridos en carretera. Dentro del grupo de los seis países que presentan los índices más bajos en 2010, cuatro de ellos pertenecen al grupo de los más pobres como Bulgaria (26º país de UE en PIB per cápita), Lituania (24º), Polonia (22º) y Estonia (21º). Todos estos países presentan índices de heridos en torno a 3-4 veces más bajos que los de países más ricos como Alemania, Bélgica o Austria. Esto obliga a una interpretación compleja de los datos. Una posible explicación se relaciona con la tasa de motorización de cada uno de estos países. Tradicionalmente se asocia que los países más ricos presentaban mayores ratios de vehículos por habitante. Esto explicaría que países como Bulgaria presentaran índices de heridos en carretera mucho más bajos. La tasa de motorización en Bulgaria es de 368 vehículos por mil habitantes, muy inferior a la propia de los países centroeuropeos como Holanda (470) o Alemania (525) (Eurostat, 2011). Sin embargo, otros países como Polonia (470) o Lituania (570) presentan tasas de motorización similares o superiores, lo que contradice la anterior hipótesis. En este caso, debe tenerse en cuenta que la diferencia entre países ricos y pobres no solo es una diferencia cuantitativa en número de vehículos por habitante, sino también cualitativa respecto a mejores vehículos, mejores infraestructuras y servicios de transporte público, además de una más rápida y mejor atención sanitaria en caso de accidente. De esta forma pueden explicarse tanto para el caso europeo como el español el por qué muchos de los países o regiones más pobres presentan mejores índices de heridos.

En este capítulo evaluamos los niveles de gestión viaria en los respectivos ámbitos geográficos empleando una serie de índices, definidos a partir de un indicador de accidentalidad sobre una determinada población estadística. El cálculo de estos índices se hace en función de unos ratios cuyo numerador se refiere a un *parámetro de siniestralidad* (fallecidos, heridos o accidentes), mientras que el denominador se refiere a un denominado *parámetro de exposición*. El uso y la metodología de cálculo de la mayor parte de índices están aceptados internacionalmente por las principales instituciones competentes. Entre ellos el *índice de fatalidad en carretera* (fallecidos cada cierta población), el *de letalidad* (fallecidos cada cierto número de heridos) y el *de gravedad de los accidentes* (fallecidos cada cierto número de accidentes). Sin embargo, la información aportada por muchos de estos índices tienden a ser generalista o muy abstracta. Así por ejemplo, ratios cuyo parámetro de exposición se refiere a grupos de población en su conjunto aportan información de interés, aunque no es estrictamente fehaciente de la situación real debido a la influencia de factores estructurales sobre dicha población. Entre estos factores estaría la tasa de motorización de esa sociedad, la edad media de la misma o el peso de grupos de población más jóvenes y mayores sin aptitudes para la conducción.

En las Figuras 1-20 y 1-21 se representan los ratios de fallecidos y heridos en las carreteras españolas en función del parque móvil. Los resultados presentan importantes diferencias si se comparan las diferentes CCAA. La comunidad balear era en 2004 la duodécima con menos muertes por habitantes, aunque era la séptima si se tenía en cuenta el parque móvil. Algo similar pasa si se revisa el número de heridos. En ese mismo año 2004, Baleares era la comunidad autónoma española que presentaba el ratio más alto de heridos en carretera por habitantes, aunque si se tenía en cuenta el parque móvil era la décima. La explicación a esto se debe en que la comunidad balear, al ser insular como Canarias, presenta unos mayores ratios de motorización que otras provincias debido a unas menores infraestructuras e inferiores redes de servicios de transporte público. El *Observatorio de la Sostenibilidad en España* (OSE) analiza para la mayor parte de las ciudades españolas los índices de motorización. La ciudad de Palma de Mallorca presentaba en 2007 un índice de motorización de 77,2 vehículos por cada 100 habitantes, mientras la de Tenerife uno de 70,66, muy superiores en cualquier caso a ciudades como Madrid (62,10), Barcelona (57,25) o Valencia (61,99) y/o cualquier otra ciudad de su tamaño, las cuales presentan un índice de motorización medio de unos 60 vehículos cada 100 habitantes (Jiménez-Herrero *et al.*, 2008).



semana y el momento del día, el 40,2% de las muertes de pasajeros en vehículos se producen en fin de semana, sobre todo en las horas centrales de la tarde, entre las 18 y las 20 horas¹⁵.

La revisión de todos los datos expuestos y de los publicados por las principales instituciones permite ahondar en el conocimiento de siniestralidad vial y causas que explican los principales incidentes en los diversos ámbitos geográficos. La investigación llevada a cabo en los últimos años ha permitido una mejora de los sistemas preventivos por parte de las empresas automovilísticas y una adopción de políticas adecuadas por parte de las autoridades competentes, lo que ha permitido reducir la siniestralidad en las carreteras. Según el estudio de Glassbrenner (2003) se estima que sólo en los EEUU unas 147.246 personas salvaron sus vidas entre 1975 y 2001 gracias al uso del cinturón de seguridad, y unas 8.369 entre 1987 y 2001 gracias al uso del airbag. De cualquier forma, aún presentándose resultados muy halagüeños durante los últimos años, es necesario seguir investigando y trabajando en esta línea, desarrollando nuevas metodologías y técnicas de trabajo que permitan continuar con esta tendencia positiva de cara al descenso definitivo de todos los parámetros de siniestralidad vial.

Sin embargo aún queda mucho por investigar. Además de los cuatro componentes estudiados que forman parte del escenario de la vía, existen una serie de *factores concurrentes* que tienen o pueden tener una relación directa con el propio incidente. Molinero *et al.* (2008) llevaron a cabo el proyecto TRACE (*Traffic Accident Causation in Europe*) en el que cuantificaron el peso de las distintas acciones que llevan a accidentes en carretera. En España, el *Informe de las principales cifras de siniestralidad vial en España 2010* (DGT, 2011) se enumeran los factores concurrentes más importantes, llegando a presentar estudios estadísticos relacionados con el consumo de alcohol, la conducción a velocidades inadecuadas, el (no) uso de dispositivos de seguridad como el casco o el cinturón de seguridad, la comisión de infracciones y de distracciones por parte del conductor, etc. En este sentido, algunos estudios científicos internacionales han analizado la influencia de estos factores sobre la conducción. Existe una amplia bibliografía científica que analiza la conducción de velocidades inadecuadas (Aarts y Van Schagen, 2006; Elvik, Christensen y Amundsen, 2004; Taylor, Baruya y Kennedy, 2002; Bowie y Walz, 1994). Otros estudios, como el de Kloeden *et al.* (1997), evaluaron el riesgo de conducir a velocidades inadecuadas y compararon este tipo de conducción con la propia bajo los efectos del alcohol.

Respecto a la interpretación de las estadísticas publicadas por las instituciones competentes existen una serie de aspectos a tener en cuenta. El primero de ellos se relaciona con el propio nivel de desagregación de los datos. De esta forma hay que tener en cuenta que hay regiones o países con características socio-geográficas muy diversas, cuyos datos son difícilmente comparables. Sirva de ejemplo desde un punto de vista espacial la gran dificultad que tendremos para comparar el tipo habitual de accidentes en países de tamaño tan diferentes como Malta, donde el 100% de los accidentes se dan en ambientes urbanos, o Alemania, donde el patrón de distribución de accidentes es muy similar a la media europea.

El segundo de estos aspectos se relaciona con la representatividad del índice calculado. Como hemos mostrado anteriormente, el uso de parámetros de exposición poco adecuados para el cálculo de algunos índices reduce su representatividad real. Por ello proponemos una visión dinámica de estos índices calculando cualquiera de los parámetros de siniestralidad en función de la movilidad real de un determinado territorio, expresada en número de vehículos, distancia y tiempo de desplazamiento. De esta forma es posible obtener una cartografía del riesgo real de conducción en función de los diferentes ámbitos geográficos y tipos de vía. En las Figuras 1-22 y 1-23 se representan los índices de accidentalidad y fatalidad asociados a las vías de alta capacidad españolas respecto a criterios de distancia (Figuras 1-22.a y 1.23.a) y de movilidad real, expresada en vehículos/km (Figuras 1-22.b y 1.23.b).

Por último debemos hacer constar la variabilidad existente entre los datos estadísticos en función de la fuente consultada. La mayor parte de los datos presentados toman como fecha más actual la del año 2010, último año del que se cuenta con datos en la mayor parte de las instituciones competentes y organismos oficiales. A nivel europeo existe una gran dificultad para la integración del conjunto de datos de todos los países que la integran, teniendo en cuenta que suelen existir disparidades de criterios a la hora de cuantificar determinados parámetros¹⁶ y distintos grados de compromiso y responsabilidad por parte de los censos de los distintos países.

¹⁵ Datos obtenidos para 22 países de la UE en el año 2010.

¹⁶ Ejemplos de discrepancias en los criterios de contabilidad y censo de cifras se observa en la *Pirámide de lesiones* del año 2011, en la que se establece la relación entre *muertes:heridos:accidentes*. Según el *Registro de accidentes de circulación con víctimas* de la DGT la relación es 1:6:51 y según la *Encuesta Europea de Salud* publicada por el *Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad* la relación es de 1:11:266.

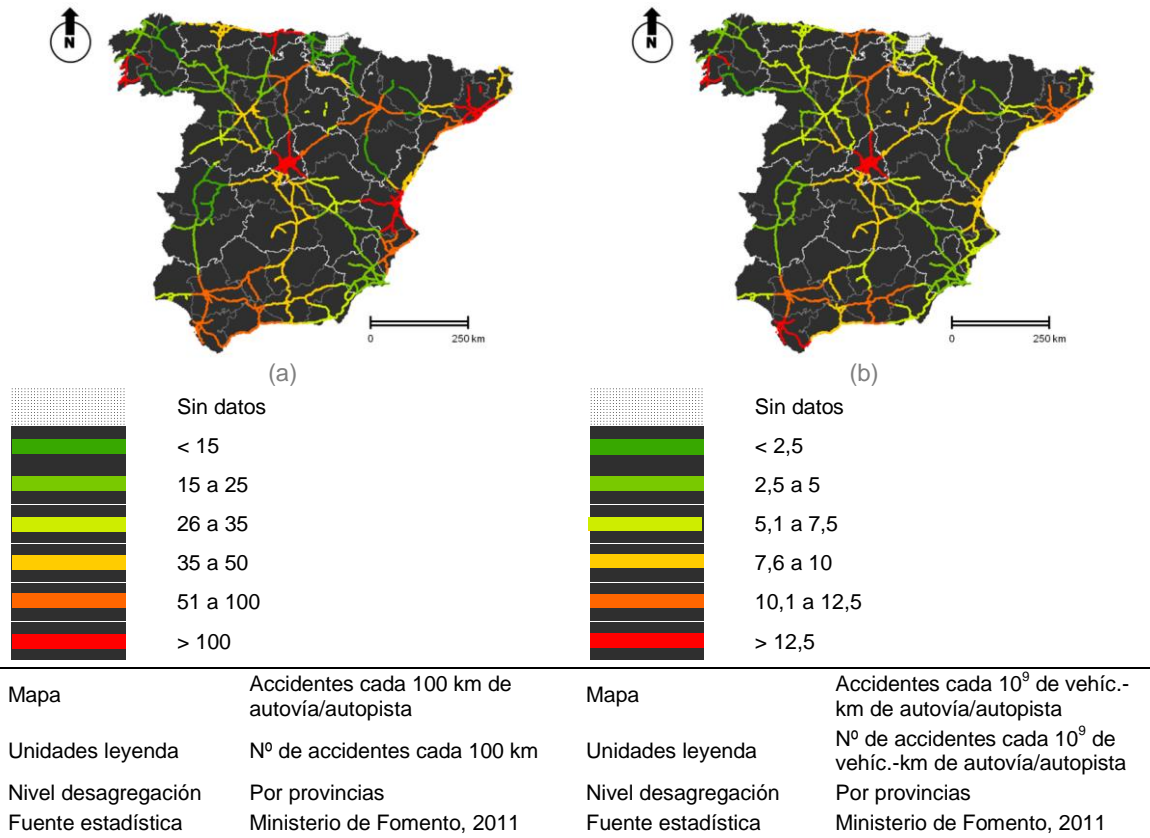


Figura 1-22: Número de accidentes en las vías de alta capacidad españolas en función de (a) longitud de la vía y (b) flujo de tráfico en el año 2010. Fuente: *Ministerio de Fomento*, 2011.

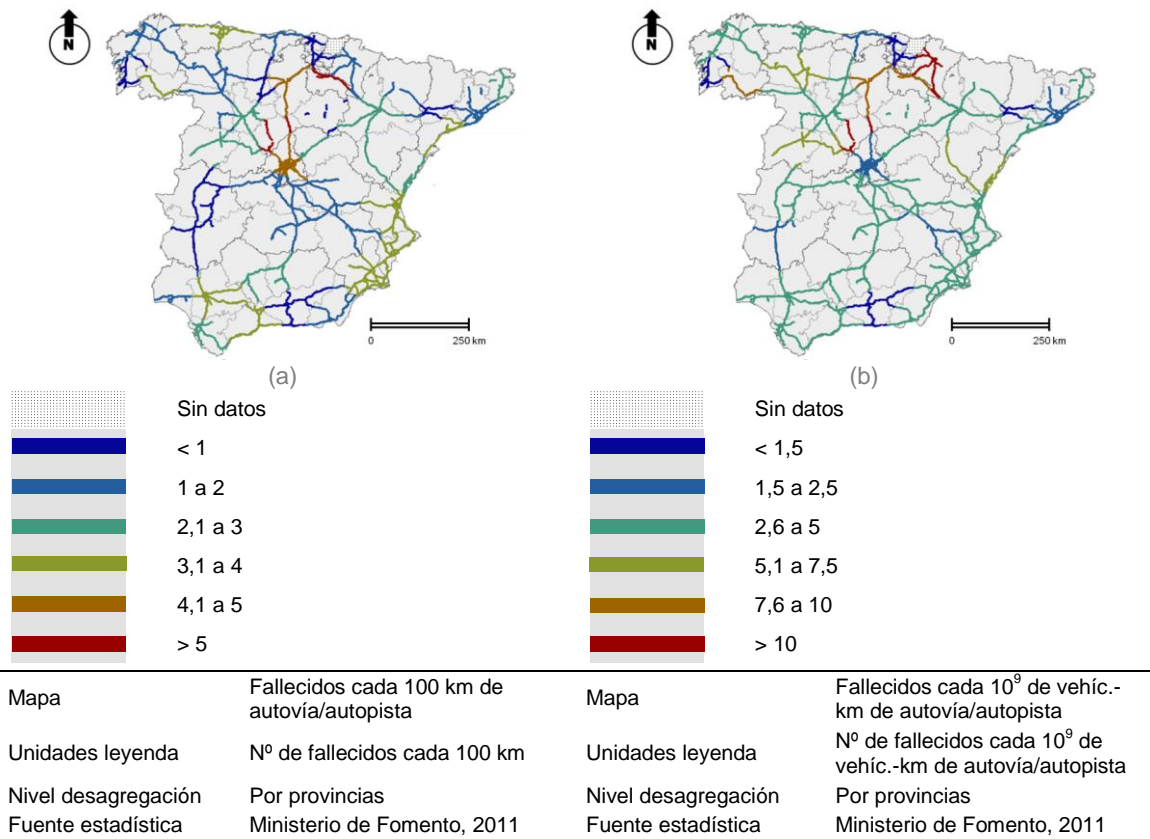


Figura 1-23: Número de fallecidos en las vías de alta capacidad españolas en función de (a) longitud de la vía y (b) flujo de tráfico en el año 2010. Fuente: *Ministerio de Fomento*, 2011.



CONCLUSIONES

En este capítulo hemos analizado en diversos ámbitos geográficos los principales indicadores de siniestralidad vial durante los últimos años. Desde un punto de vista geográfico son observables algunas diferencias claras entre regiones, aunque la tendencia durante los últimos años ha sido a una mejora generalizada de los principales ratios en todas ellas. A nivel europeo se observan desigualdades marcadas fundamentalmente entre los países del Centro-Norte de Europa y los del Este.

España es uno de los países que más ha mejorado en todos los indicadores durante las últimas décadas y uno de los países de su entorno que presenta actualmente mejores ratios. Sin embargo, dentro de España existen también claras desigualdades entre las diferentes regiones, siendo Madrid la comunidad autónoma que presenta los mejores ratios. Las diferencias entre indicadores en las distintas regiones están relacionadas con aspectos físicos y socio-geográficos, aunque también relativos a la gestión por parte de las autoridades competentes.

A nivel europeo se observa una relación considerablemente marcada entre el nivel de siniestralidad vial y el de renta per cápita, mientras que a nivel nacional la relación es más clara si se tiene en cuenta el factor demográfico.

La gestión más adecuada será aquella que mejor se adapte a las condiciones físicas, sociales, culturales de las respectivas sociedades. Futuros estudios deberán profundizar más en las causas reales por las que se producen accidentes en cada momento y/o lugar, adoptando así un enfoque integral y multidisciplinar del problema.



CAP. 2

LA CONDUCCIÓN NATURALISTA



Capítulo 2

RESUMEN.....	47
2.1. MÉTODOS TRADICIONALES DE EXPERIMENTACIÓN	47
2.2. LA CONDUCCIÓN NATURALISTA	49
2.2.1. Ventajas e inconvenientes.....	50
2.2.2. Parámetros estudiados.....	51
2.2.2.1. Características del conductor	51
2.2.2.2. Errores del conductor	53
2.2.2.3. Distracciones y falta de atención.....	53
2.2.2.4. Falta de sueño y/o fatiga	54
2.2.2.5. Interacciones entre vehículos.....	55
2.2.2.6. Sistemas de asistencia.....	55
2.2.2.7. Cambios de carril y adelantamientos	56
2.2.2.8. Interacción y uso de móviles u otros dispositivos.....	56
2.2.2.9. Eco-driving	57
2.3. PROPUESTA DE DESARROLLO DE PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA	58
2.4. EL PROYECTO EUROPEO DE CONDUCCIÓN NATURALISTA: <i>PROLOGUE</i>	58
2.4.1. Aspectos generales	60
2.4.2. Sistemas de adquisición de datos	62
2.4.2.1. Sensores especializados o específicos.....	63
2.4.2.2. Almacenamiento y gestión de datos.....	64
2.4.3. Análisis de datos	65
2.4.4. Proyectos piloto en diferentes países.....	65
2.4.4.1. Israel	65
2.4.4.2. Austria	65
2.4.4.3. Holanda.....	66
2.4.4.4. Grecia.....	67
2.5. EL PROYECTO PILOTO DE <i>PROLOGUE</i> EN ESPAÑA.....	67
2.5.1. Metodología y zona de estudio.....	68
2.5.2. Vehículo e instrumentación	69
2.5.2.1. Indicadores y medidas	70
2.5.2.2. Problemas en la recogida de datos.....	74
2.5.3. Procesamiento de datos.....	74
2.5.4. Identificación de incidentes	75
2.5.5. Aspectos de interés	76
2.5.6. Resultados obtenidos.....	76
2.5.7. Discusión.....	78
CONCLUSIONES.....	79



RESUMEN

Los estudios sobre seguridad vial son complejos de abordar. Los métodos de observación tradicionalmente empleados se basan en experimentos de observación simulada o bien en cuestionarios y atestados de tráfico. Los experimentos realizados con simulador se desarrollan en ambientes de laboratorio altamente controlados por el experimentador, en los que condiciones de conducción no son reales y los resultados obtenidos no son fácilmente extrapolables a la realidad. Tanto los cuestionarios como los partes y atestados de tráfico introducen una visión subjetiva del conductor y del agente (o técnico) de tráfico, respectivamente. En los últimos años, se ha introducido un nuevo método de experimentación basado en la observación directa y real: la conducción naturalista. Este método de experimentación permite estudiar el comportamiento del sujeto durante largos periodos de tiempo y en condiciones reales de conducción. En este capítulo se presentan los aspectos más relevantes referidos a este método de experimentación. Se describen además los principales proyectos que están siendo llevados a cabo y se presenta, con un cierto nivel de detalle, la experiencia del proyecto piloto español desarrollado dentro del programa europeo de conducción naturalista *PROLOGUE*.

2.1. MÉTODOS TRADICIONALES DE EXPERIMENTACIÓN

La investigación en tráfico vial demuestra que la mayor parte de los accidentes se deben a factores humanos (Antin *et al.*, 2011). Sin embargo, la mayor parte de los estudios científicos publicados en los últimos años presentan unas claras limitaciones respecto a sus resultados y conclusiones debido al uso de metodologías de trabajo poco adecuadas. Estas metodologías de trabajo presentan importantes carencias como, entre otras, (a) el uso de datos imprecisos derivados de testimonios de testigos y de los propios conductores los cuales suelen ofrecer una visión retrospectiva sesgada y subjetiva, (b) el diseño inadecuado de los partes policiales, (c) una visión excesivamente técnica por parte del personal investigador y (d) la falta de multidisciplinariedad de los equipos de trabajo (Gordon, 2009). Dentro del grupo de los factores humanos, uno de los de más peso es el de las *distracciones al volante*, responsable directo de un gran número de accidentes. Aún siendo difícil de cuantificar estadísticamente, se estima que las distracciones al volante son responsables de entre el 25 y el 50% de los accidentes en EEUU (NHTSA, 1997). En España, un estudio reciente (RACE, 2013) considera que las distracciones al volante constituyen la primera causa de siniestralidad en carretera, presentes en uno de cada dos accidentes y siendo responsable directo de unas 650 muertes en carretera al año.

Las distracciones al volante constituyen un concepto genérico y relativamente complejo. No debe además ser confundido con el concepto de *sobrecarga*, con el que guarda una cierta relación. La sobrecarga de un determinado conductor responde a la necesidad del mismo por atender a la realización casi simultánea de varias tareas, lo que puede llevar a la superación de unos límites y a la pérdida del control del vehículo.

Ambos conceptos tienen en común una situación de exceso de confianza por parte del conductor, aunque se diferencian en la presencia de una situación de carga y en el estado de conciencia por parte del conductor. Ante una distracción, el conductor asume una situación de poca carga en la que se descuida y deja de ser consciente de la aparición de un determinado imprevisto. Mientras tanto, en una situación de sobrecarga, el conductor asume de forma consciente varias tareas. El estudio de la influencia de los conceptos anteriores sobre la conducción apenas ha sido estudiado. Es en este punto en el que la investigación en seguridad vial tendrá que desarrollar nuevos métodos de investigación que permitan un conocimiento más profundo acerca del origen y la presencia de patrones de falta de atención teniendo en cuenta unas determinadas características tanto del conductor como del medio.

La aparición de signos que muestran falta de atención al volante puede estar motivada por una serie de causas relacionadas tanto con el propio sujeto como con la propia monotonía de la conducción. Respecto al sujeto, intervienen además de sus condiciones inherentes (condición física, edad, actitud, salud), otros factores como la falta de unas condiciones físicas adecuadas (cuadros de cansancio, estrés) y la presencia de estados de sobrecarga o interacción de la conducción con otras actividades, como por ejemplo el uso de dispositivos electrónicos (móviles, navegadores), conductas inadecuadas relacionadas con ciertos hábitos (comer, fumar), factores ambientales excesivos (música demasiado alta), etc.



Las distracciones al volante se identifican con comportamientos anómalos por parte del conductor en los que este cae en una actitud desprevenida e inesperada. Su dificultad por conocer más profundamente el fenómeno de distracción al volante se debe a una serie de causas inherentes como su carácter excepcional y la propia dificultad para registrarlas e identificarlas de forma experimental.

En general, los métodos de investigación aplicados en estudios de seguridad vial estudian el comportamiento de un determinado conductor de dos formas principalmente: (a) preguntándole directamente o (b) mediante la observación. El primero de estos métodos se basa en suministrar al conductor una serie de encuestas o cuestionarios. El segundo de los métodos se basa en la observación de la conducción de un determinado sujeto pudiendo distinguirse dos tipos en función del entorno de experimentación: (a) observación simulada y (b) observación directa o real. La observación simulada es aquella que se lleva a cabo en entornos simulados o virtuales (simuladores) en los que se reproducen las condiciones reales. Por su parte, la observación directa o real es aquella que se lleva a cabo en condiciones de conducción estrictamente reales.

Los métodos de experimentación presentados son, o pueden ser, adecuados en función de los objetivos de investigación. Para el estudio concreto de situaciones de distracción y sobrecarga en conducción, el método de preguntar directamente al conductor no se plantea como un método válido ya que induce a resultados sesgados al introducir por parte del encuestado una variable subjetiva que no suele coincidir con la realidad objetiva.

La observación de fenómenos de sobrecarga puede ser analizada mediante procesos de observación en ambientes simulados, donde es posible programar una serie de experimentos en los que pueden observarse las reacciones de los conductores bajo ciertas circunstancias específicas. Sin embargo, estudios fiables sobre la influencia real de distracciones al volante no pueden ser llevados a cabo de forma efectiva en estas condiciones de laboratorio debido al carácter imprevisto y excepcional de las mismas. De esta forma resulta imposible extraer, a partir de estudios simulados, resultados válidos y fiables que sean extrapolables a la realidad. Por esta razón sólo la observación real y continuada de un amplio número de conductores bajo un determinado rango de ambientes y condiciones de conducción, permite estudiar de forma más profunda cómo, cuándo y por qué se producen las distracciones al volante.

Hasta ahora, las metodologías de experimentación más habituales para estudios de conducción se basaban en la observación, normalmente simulada, cuestionarios a los propios conductores, análisis de las estadísticas de accidentes, atestados de tráfico y estudios en detalle de accidentes. Estos métodos han contribuido en gran medida al análisis del comportamiento de los conductores al volante y de la presencia de otros factores que intervienen en la aparición de accidentes.

Sin embargo, todas estas metodologías presentan importantes limitaciones. Los resultados de estudios basados en observación simulada no siempre son extrapolables de forma fácil y directa a condiciones de tráfico real. En los estudios basados en métodos de observación directa los participantes conducen en ambientes reales. Sin embargo, suelen tratarse de experimentos controlados con vehículos altamente instrumentados, donde los participantes suelen ir acompañado por un investigador a bordo. Suelen ser, por tanto, experimentos desarrollados en condiciones de laboratorio donde se determinan objetivos de investigación muy específicos. Los partes o cuestionarios rellenados por el propio conductor presentan fuertes sesgos en los que el participante adopta respuestas socialmente deseables, además de una visión subjetiva condicionada por claras limitaciones de percepción y memoria. En situaciones de accidentes con cierto nivel de severidad suele contarse con partes o atestados de tráfico, además de cuestionarios y declaraciones tanto de los propios sujetos involucrados como de testigos casuales. Los datos obtenidos de todas estas fuentes de información pueden no ser fiables por ser el resultado de una investigación reducida en tiempo y recursos. Además, estas fuentes de información incorporan una variable de apreciación subjetiva de la realidad por parte tanto de los propios conductores y testigos como del propio agente (o técnico) de tráfico. La información de partes de accidente sólo puede ser obtenida de accidentes con cierto nivel de severidad, observándose una falta generalizada de fuentes de datos en situaciones de accidentes menos severos y de casi-accidentes. Por lo tanto, todas estas fuentes de información comentadas presentan visiones sesgadas e incompletas.



2.2. LA CONDUCCIÓN NATURALISTA

La conducción naturalista o naturalística (*naturalistic driving*) constituye un método de observación directa del conductor que está siendo aplicado en estudios de investigación sobre tráfico y seguridad vial en los últimos años. La particularidad de este método radica en el análisis prolongado, durante largos períodos de exposición, del comportamiento al volante de uno o varios conductores en ambientes reales y en situaciones cotidianas. La conducción naturalista es un método de experimentación no *obstrusivo*, lo que quiere decir que no entorpece o condiciona, al menos en teoría, el comportamiento normal del sujeto durante la conducción. Para la recogida de información se emplean una serie de *sistemas de adquisición de datos* (DAS) que van integrados en el propio vehículo. Una característica adicional, aunque muy relacionada con el propósito de este punto, es la discreción de todo el instrumental de monitorización empleado en el experimento con objeto de no entorpecer o condicionar el comportamiento normal del conductor.

La investigación naturalista ha sido aplicada en otras áreas del conocimiento ajenas al mundo de la conducción como, por ejemplo, el mundo de la psicología o la medicina. Chapman *et al.* (1997) estudiaron si un grupo de trabajadores fumaba de forma más compulsiva durante las pausas en su jornada laboral. Por su parte, Steptoe y Wardle (1999) analizaron en un grupo de hombres y de mujeres la relación entre alcohol y humor. En todos los estudios en los que se aplica el método de experimentación naturalista, la metodología de trabajo supone una observación continuada y prolongada de una serie de conductas (o comportamientos) en situaciones reales para, a partir de ahí, entender el por qué las cosas suceden de una determina forma en la realidad.

La excepcionalidad con la que se producen algunos fenómenos que pretenden ser investigados en seguridad vial (como las distracciones al volante), unido al propósito de no influir en la conducta del sujeto e inducir a un método de experimentación lo más real posible, obliga al experimentador a llevar a cabo períodos de investigación muy prolongados. Por ello es necesario contar con un amplio instrumental de recogida de datos que permita un seguimiento constante y continuado a través de una monitorización del máximo número de variables que pueden influir sobre el fenómeno analizado de una forma total o parcial. Por esta razón Balsa-Barreiro *et al.* (2012a y 2013) describieron al método de conducción naturalista como un método de captura de datos *masivo* y *ciego*, ya que intenta recoger de forma ininterrumpida y constante datos de todas las variables posibles que afectan(o pueden afectar) el comportamiento al volante del conductor.

La monitorización de un gran número de variables requiere de la configuración de un complejo instrumental en el vehículo que permita recopilar todos los datos a frecuencias temporales muy bajas y de forma sincronizada. De esta forma es posible el registro de situaciones excepcionales y la obtención de una resolución temporal adecuada para una discriminación clara de cualquier evento de interés. Entre los dispositivos de monitorización suelen ser empleadas varias cámaras de video, tanto internas como externas al vehículo, sensores de velocidad y aceleración, unidades inerciales, además de sensores múltiples de todo tipo como, por ejemplo, los sensores de seguimiento ocular implantados en vehículos con una alta instrumentación. Los dispositivos usados en los vehículos experimentales dependerán de los objetivos de estudio propuestos por el grupo de investigación. Valero-Mora *et al.* (2013) analizan, a partir de sus propias experiencias en diversos proyectos piloto de conducción naturalista llevados a cabo en Europa, el nivel de relación más óptimo entre los objetivos de investigación propuestos *a priori* y el nivel de instrumentación del vehículo, distinguiendo tres niveles: HIC (vehículo con alto nivel de instrumentalización), MIC (medio) y LIC (bajo).

El nivel de instrumentación del vehículo conlleva unas necesidades de espacio que aunque disponibles físicamente, deberán cumplir al máximo con los principios de discreción, integración y mimetización con el vehículo, permitiendo de esta forma un ambiente más natural y real que no condicione el comportamiento del conductor al volante.



2.2.1. Ventajas e inconvenientes

La comparación entre el método de conducción naturalista con los métodos de experimentación tradicionalmente empleados permite establecer un estudio de pros y contras. Según Backer-Grondahl *et al.* (2009) la conducción naturalista supera muchas de las limitaciones y problemas que presentaban los métodos tradicionales. Otros autores creen que la gran ventaja de este método de experimentación es que ofrece una metodología complementaria para la validación de los resultados obtenidos con los métodos de experimentación tradicionales. Regan *et al.* (2012) resumen las ventajas propias de este método en función de unas determinadas perspectivas de análisis:

- (a) Exposición. La conducción naturalista permite tanto ampliar los campos de investigación como profundizar en los niveles de conocimiento. De esta forma el marco de estudio no tiene que limitarse únicamente al conductor, sino que puede ampliarse a un escenario más amplio, dentro del cual formarían parte el conductor, el vehículo, la vía, el tráfico circundante e incluso los factores medioambientales que pueden llegar a incrementar el riesgo de accidente. El método de conducción naturalista permite analizar, interpretar e incluso cuantificar variables como el grado de distracción o de somnolencia del conductor, el grado de desobediencia de las señales e incluso la influencia de algunas condiciones ambientales, no sólo las meteorológicas sino también las relacionadas con el tiempo cronológico (día o noche) y con el espacio geográfico (diferentes culturas y normativas). Además, como señalan Regan *et al.* (2012) dentro del entorno podríamos referirnos a la influencia del medio humano, pudiendo distinguir, por ejemplo, entre modelos de conducción en espacios rurales y urbanos, influidos estos últimos por factores como la congestión del tráfico, el bullicio e incluso la publicidad, los cuales influyen de forma determinante sobre los distintos modos de conducción.
- (b) Riesgo de accidente. El incremento exponencial de los volúmenes de datos obtenidos por una monitorización continuada y constante de grupos de conductores permite llevar a cabo un análisis más amplio y complejo de la casuística que explica la aparición y frecuencia de accidentes.
- (c) El estudio de *casi-accidentes*. Esta es una de las grandes ventajas del método de conducción naturalista, al permitir capturar datos de los que antes no se disponía, ya que nunca eran registrados. El método de conducción naturalista permite analizar tanto la forma en cómo se producen estos incidentes, de carácter totalmente imprevisible y excepcional, como estudiar la reacción de los conductores en su intento por evitar que lleguen a ser accidentes.
- (d) El estudio de accidentes propiamente. Este estudio resulta complejo debido al escaso número de accidentes que llegan a registrarse en la práctica debido básicamente al reducido tamaño de las muestras, que raramente superan los cien vehículos participantes (Antin *et al.*, 2011; Klauer *et al.*, 2006 *et al.*). Este tipo de estudios permite analizar los factores que contribuyen de forma real a que un determinado incidente se convierta en accidente. Además, estudios de este tipo junto con los del punto anterior, permiten discriminar las diferencias reales habidas entre situaciones de accidente y casi-accidente.
- (e) Modelos de conducción. Los experimentos de conducción naturalista permiten recopilar datos fundamentales sobre cómo la gente conduce (cómo evitan los accidentes, cómo mantienen la velocidad, cómo controlan el vehículo, etc.) y cómo influyen una serie de factores como la edad del conductor, su experiencia al volante o su condición física, entre otros.
- (f) Nivel de (in)cumplimiento y/o (des)obediencia de las leyes de tráfico. Los experimentos de conducción naturalista proporcionan información acerca del nivel de cumplimiento de las normas de circulación por parte de determinados grupos de conductores, dónde, cuándo y en qué situaciones.
- (g) Validación. Los datos procedentes de experimentos de conducción naturalista pueden ser empleados para validación de los cuestionarios de los propios conductores, procedentes tanto de situaciones reales como simuladas. En caso de accidentes y siguiendo el mismo procedimiento, pueden analizarse los factores reales que intervienen con los contenidos en los atestados de tráfico, pudiendo ser evaluada, de esta forma, la fiabilidad de la información contenida en dichos atestados.
- (h) Estudios de evaluación y seguimiento. Los datos de conducción naturalista permiten evaluar de forma real el nivel de efectividad de determinados cambios y medidas aplicadas a la vía. Ejemplos concretos son la apertura de trazados alternativos, el uso de sistemas de asistencia en conducción, la aplicación de nuevas normativas de tráfico o el cambio en la señalización de un determinado tramo de vía.



Al igual que presenta ventajas, el método de conducción naturalista presenta una serie de inconvenientes. De estas, las más relevantes se exponen a continuación:

- (a) La generación de grandes volúmenes de datos que son difíciles de almacenar, manipular, analizar e interpretar.
- (b) La aparición (relativamente) habitual de fallos durante la recogida de datos debido a errores puntuales y/o permanentes en los dispositivos de recogida de datos, los cuales conllevan a pérdidas de datos. Varios factores determinan fallos en el funcionamiento de estos dispositivos, aunque en su mayor parte se deben a una exposición prolongada de los mismos a períodos de funcionamiento muy largos.
- (c) El alto coste económico de algunos de los dispositivos empleados.
- (d) La complejidad del análisis de la información debido a la gran cantidad de datos que se generan de forma instantánea debido a la sincronización de los dispositivos de recogida de datos. Por esta razón es importante la propuesta e implementación *a priori* de metodologías de trabajo adecuadas al objetivo de investigación, las cuales permitan llevar a cabo un análisis más eficiente de los datos.
- (e) La dificultad para estudiar y analizar algunos incidentes como accidentes o casi-accidentes, debido a su carácter imprevisto y su baja frecuencia de aparición.
- (f) La complejidad (e imposibilidad) por llevar a cabo experimentos (de conducción naturalista) “puros” debido a una serie de limitaciones tanto técnicas como presupuestarias. El hecho de que el vehículo de experimentación no sea el propio vehículo del conductor o que los dispositivos de recogida de datos no estén totalmente mimetizados en el propio vehículo supone un cierto condicionamiento sobre la actitud al volante del conductor. Además, por cuestiones de tiempo y económicas, resulta habitual y prudente que el investigador exponga una serie de consejos y advertencias previas a la realización del experimento. Todo este conjunto de circunstancias tienden a influir sobre el comportamiento del conductor, lo que supone un alejamiento del carácter “puro” del experimento.

2.2.2. Parámetros estudiados

Hasta el año 2012 han sido llevados a cabo en todo el mundo en torno a unos cuarenta estudios de conducción naturalista, casi todos ellos en EEUU. Una clasificación de los mismos puede hacerse en función de una serie de criterios como (a) el tipo de vehículo empleado, principalmente coches y camiones, (b) el número de participantes, desde menos de una decena a los más de 3.000 con los que cuenta el programa estadounidense *SHRP-2 (Strategic Highway Research Program 2)* (Antin *et al.*, 2011) y (c) el tiempo de recogida de datos, que va desde menos de una semana hasta varios años.

Regan *et al.* (2012) elaboraron un estudio en el que hacen una revisión exhaustiva de los principales estudios de conducción naturalista publicados. En este estudio analizan sus principales temas de investigación y proponen una clasificación de los mismos. Nuestra propuesta de clasificación se basa en la publicada en el estudio anterior, a la cual incorporamos una serie de temas adicionales. Una revisión completa de esta propuesta de clasificación junto a los estudios más relevantes dentro de cada tema se expone en los siguientes apartados:

2.2.2.1. Características del conductor

Lee *et al.* (2011) estudiaron una serie de incidentes (accidentes y casi-accidentes) en los que estaban envueltos conductores adolescentes novatos y adultos con experiencia. Los vehículos de 42 adolescentes y de sus padres fueron monitorizados con dispositivos que recogían continuamente imágenes de video y datos cinemáticos durante un período de 18 meses. Los conductores novatos comenzaban a participar a partir de las tres semanas de haber obtenido el permiso de conducción. Las conclusiones del estudio mostraron que los índices de accidentes y casi-accidentes fueron más altos en los conductores novatos que en los adultos. Además, dentro del grupo de los conductores novatos, los índices de accidentes y casi-accidentes fueron más altos durante los primeros seis meses del período de monitorización, descendiendo de forma significativa durante los doce meses posteriores.



Prato *et al.* (2010) investigaron el comportamiento de diez conductores durante su primer año de permiso de conducción dentro del *Programa Israelí de Conducción* (GDL). Este programa presenta como valor añadido respecto a otros el hecho de que el conductor debe conducir en compañía durante los tres primeros meses desde la obtención del permiso de conducción. En el estudio en cuestión fueron monitorizadas un total de 62 conductores noveles durante un período de doce meses desde el momento en que obtuvieron su permiso de conducción. De estos doce meses, los tres primeros el sujeto conducía obligatoriamente acompañado mientras que durante los nueve siguientes podía conducir sólo. Los dispositivos implementados en el vehículo permitían capturar datos de velocidad, aceleración, tiempos de viaje y ciertas maniobras del conductor. Las conclusiones de este estudio demostraron que el alto nivel de experiencia adquirida durante el período de conducción en compañía llevaba a una exposición a unos menores índices de riesgo en el momento en que los conductores pasaban a conducir sólo. De esta forma este estudio confirma el éxito del programa *GDL*.

Algunos estudios de conducción naturalista evalúan en conductores novatos y en sus padres los efectos de suministrar respuestas (*feedbacks*) con objeto de promover comportamientos seguros al volante. McGehee *et al.* (2007) monitorizaron durante doce meses los vehículos de 26 participantes, los cuales fueron equipados con un sistema de video que grababa datos durante 20 segundos en el momento en que los valores del sensor sobrepasaban un determinado límite de seguridad. La respuesta a los conductores era proporcionada de forma inmediata, a través intermitente que se encendía cuando se excedían los valores del umbral de aceleración. La respuesta a los padres se proporcionaba en una reunión semanal en la que se repasaban videos y alguna información gráfica. En un estudio similar, Lotan y Toledo (2005) contaron con un total de 120 conductores novatos durante ocho meses. Para ello emplearon cámaras de video, además de dispositivos que permitían registrar datos de aceleración y de velocidad. La respuesta se proporcionaba de dos formas: (a) una en tiempo real, que era visible tanto por el conductor a través de una pantalla dentro del propio vehículo como por los padres a través de mensaje SMS y (b) una fuera de línea, mediante un informe mensual que se enviaba únicamente al conductor. Las conclusiones del estudio demostraron que suministrar la respuesta tanto a los conductores jóvenes como a sus padres permitía reducir comportamientos inseguros al volante, presentando una gran influencia el visionado de videos con los padres.

El grupo de conductores de más edad es uno de los más estudiados. Con este propósito, Blanchard *et al.* (2010) monitorizaron a un grupo de 61 conductores de edad avanzada durante una semana. Los dispositivos de recogida de datos de cada vehículo permitían grabar las maniobras al volante del conductor, además de recopilar información relativa al momento del día, el tipo de carreteras recorridas, la distancia recorrida y la duración del viaje. En un estudio muy similar, Myers *et al.* (2011) monitorizaron a un grupo de 47 conductores mayores durante un período de dos semanas. Los estudios anteriores concluyeron que los conductores mayores subestimaban a menudo su grado de exposición al riesgo en carretera y no conducían de la forma que ellos mismos pensaban, lo que se demostraba en las contradicciones apreciables al comparar los datos observados con los informes y cuestionarios que los propios conductores rellenaban a posteriori. El trabajo de Myers *et al.* (2011) concluyó además que tanto el grado de exposición al riesgo como el recorrido estaban condicionados por una serie de factores como el tiempo y las condiciones de la vía, el género, la estación del año y la percepción del conductor acerca tanto del confort del vehículo como de sus propias habilidades de conducción.

Diversos estudios se centraron en determinados grupos de conductores de alto riesgo. Un ejemplo de estudios de este tipo es el llevado a cabo por Luo y Peli (2011) en el que evaluaron la conducción de un grupo de personas con discapacidades visuales. Otro de los grupos más estudiados es el de conductores con un cierto grado de demencia, trastorno que afecta a muchas tareas críticas necesarias para la conducción. Sin embargo, a día de hoy, muchas personas con ciertos niveles de demencia continúan conduciendo, especialmente cuando el trastorno está en una fase inicial en las que los déficits cognitivos son leves. Eby *et al.* (2012) monitorizaron durante un mes el comportamiento al volante de un grupo de 17 conductores que estaban en una fase temprana de la enfermedad. Entre otra información recopilaron video, audio, datos de velocidad, aceleración, posición, distancias a vehículos a los que preceden, etc. Las conclusiones del estudio demostraron que, comparados con conductores de edad avanzada que no presentaban signos de demencia, el grupo de conductores con demencia tendieron a conducir demasiado cerca de otros vehículos y de una forma más lenta que el tráfico circundante. Mostraban además una menor actividad en la conducción, conduciendo en su mayoría sólo de día, a distancias más cortas, a menos destinos y evitando el paso por vías de alta capacidad como autopistas. Asimismo fue apreciable como estos conductores se olvidaban de usar, en muchas ocasiones, el cinturón de seguridad.



Silverstein *et al.* (2009), en un estudio semejante, monitorizaron a un grupo de 12 conductores con demencia durante al menos un mes. Los resultados fueron comparados con los cuestionarios que rellenaban *a posteriori* y con las recomendaciones tanto de los médicos como de sus propios familiares. Este estudio propone, como conclusión, que los vehículos de conductores con cierto grado de demencia deberían llevar implementados una serie de dispositivos especiales para la monitorización del comportamiento al volante del conductor de una forma continuada. Estos dispositivos permitirían determinar, de una forma objetiva y casi inmediata, la capacidad (o incapacidad) del conductor.

2.2.2.2. Errores del conductor

Con objeto de analizar las causas de los accidentes en Japón, Uchida *et al.* (2010) llevaron a cabo un experimento en el que monitorizaron a un grupo de 60 conductores durante un período de entre 18 y 24 meses. Los vehículos experimentales llevaban implementados, además de cámaras y micrófonos, una serie de dispositivos que permitían recopilar datos cinemáticos mediante un sensor que se disparaba a partir de unos determinados umbrales de aceleración y deceleración. El estudio se centró en el análisis de una serie concreta de incidentes: giros en cruces e intersecciones en los que interactuaban automóviles y motocicletas. Los resultados demostraron que la mayor parte de los automóviles subestimaban el riesgo sobre las motocicletas en el momento de girar, produciéndose numerosas situaciones de peligro (casi-accidentes).

Toledo *et al.* (2008), en un estudio similar aunque tomando una muestra más amplia, monitorizaron a un grupo de 191 conductores de camionetas durante ocho semanas. Los vehículos experimentales contaban con sensores inerciales y acelerómetros que permitían recoger, entre otros, datos de velocidad, aceleración y posicionamiento. El estudio concluyó que los índices de riesgo asociados a los conductores estaban directamente relacionados con sus respectivos historiales de accidentes, y que su comportamiento al volante cambiaba sobre todo en función de su exposición a una serie de *feedbacks* que les eran suministrados.

En otro estudio, uno de los más relevantes y ambiciosos de los llevados a cabo, el de los *100 coches* (*100 car Naturalistic Driving Study*) desarrollado por el *Virginia Tech Transportation Institute* (VTTI), un total de 100 vehículos fueron monitorizados durante año y medio. En total participaron 241 conductores, tanto primarios y secundarios, que condujeron unos tres millones de km durante unas 42.300 horas (Dingus *et al.*, 2006). Los vehículos experimentales llevaban implementados cámaras y una serie de dispositivos que permitían registrar datos sensoriales. Entre las conclusiones de este estudio destaca la clasificación (y catalogación) de cuatro tipos de comportamientos al volante en función de su exposición al riesgo: (a) conducción a velocidades inapropiadas, (b) conducción en estado de somnolencia, (c) miradas perdidas al horizonte durante más de dos segundos y (d) conducción agresiva. Este mismo estudio demostró cómo los conductores adultos presentaban un menor riesgo que los jóvenes de verse involucrados en incidentes críticos. Se observó además cómo el grupo de conductores de mayor riesgo empleaba menos el cinturón de seguridad, conducía con más sueño, etc. Llegando a presentar unos índices (de incidentes) críticos más de 100 veces superiores al grupo de conductores de menor riesgo.

2.2.2.3. Distracciones y falta de atención

El estudio de los *100 coches* demostró además que la falta de atención al volante, sobre todo las miradas perdidas, se relacionaba con muchos de los incidentes que tienen lugar en carretera (Dingus *et al.*, 2006). Este mismo estudio llega a cuantificar el riesgo que supone para la conducción centrarse en segundas tareas complejas y hacerlo bajo los efectos del sueño, acciones que incrementan el riesgo de accidentes y casi-accidentes en dos y seis veces respectivamente respecto a los niveles habituales (Klauer *et al.*, 2006).

Para el estudio del grado de aparición e impacto de acciones que distraen (o pueden distraer) de una conducción segura, Stutts *et al.* (2005) monitorizaron un grupo de 70 conductores durante una semana empleando vehículos implementados con cámaras de video. En un estudio similar, Koppel *et al.* (2011) analizaron el grado de distracción sobre los conductores provocado por un conjunto de niños que iban a bordo. Un total de 12 conductores con hijos pequeños fueron monitorizados durante tres semanas. Los vehículos experimentales contaban con cámaras de video que permitían grabar imágenes frontales tanto



del conductor, como de los niños que iban a bordo. Los estudios anteriores demostraron que resulta habitual por parte de los conductores, además de hablar con el resto de ocupantes, llevar a cabo o participar en acciones ajenas a la conducción, las cuales podían llevar a distracciones al volante. El estudio de Koppel *et al.* (2011) demostró además cómo los niños suelen distraer a los conductores, llegando a ser cuantificado el tiempo de distracción provocado por los niños en una media de unos tres segundos. Por su parte, el estudio de Stutts *et al.* (2005) demostró de qué forma las distracciones al volante pueden afectar a la conducción, siendo visibles acciones como la separación de las manos del volante o el cese de fijación sobre la carretera durante intervalos de tiempo considerables.

Barr *et al.* (2003) analizaron las distracciones al volante en conductores de vehículos de alta capacidad. Para ello estudiaron el comportamiento al volante de seis conductores de camiones durante dos semanas empleando cámaras de video. Hanowski *et al.* (2005), en un estudio similar, analizaron el comportamiento al volante de 33 camioneros a partir de datos cinemáticos e imágenes de video. Olson *et al.* (2009) llevaron a cabo un estudio similar en dos fases. En una primera participaron un total de 103 camioneros durante 12 semanas, mientras en una segunda, independiente de la primera, participaron 100 camioneros durante un período de cuatro semanas. Los vehículos experimentales portaban cámaras y micrófonos, además de sensores inerciales que permitían registrar datos cinemáticos. Todos los estudios anteriores demostraron que era muy habitual que los camioneros prestaran parte de su atención al volante en una serie de actividades ajenas a la conducción que podían distraerles (Barr *et al.*, 2003), lo que incrementaba su riesgo de accidentes, sobre todo bajo determinadas condiciones ambientales (Olson *et al.*, 2009).

2.2.2.4. Falta de sueño y/o fatiga

Dingus *et al.* (2006) evaluaron el grado de fatiga y seguridad de un grupo de camioneros que recorrían largas distancias. Para ello llevaron a cabo un estudio en el que participaron 56 conductores, 30 de los cuales viajaban solos mientras el resto (26) lo hacían acompañados en equipos de dos (13 equipos). Los resultados demostraron que los conductores que viajaban solos sufrieron más incidentes críticos en todos los niveles de severidad. Además, la frecuencia de incidentes críticos debidos a la fatiga del conductor tendió a variar significativamente entre las distintas horas del día, concentrándose la mayor parte de los mismos en las primeras horas de la noche.

La ley viaria estadounidense¹⁷ llevó a cabo en 2003 una revisión del número de horas de servicio que podían trabajar los camioneros de largas distancias. Dicha ley aumentaba en dos el número de horas libres al día, pasando de ocho a diez, aunque también permitía ampliar el máximo de horas de conducción al día en una, pasando de diez a once. Para evaluar los efectos que los cambios de esta ley acarrearían, Hanowski *et al.* (2007) examinaron el sueño y la fatiga de un grupo de camioneros en función de la aparición de incidentes críticos. Un total de 82 camioneros de largas distancias fueron monitorizados durante 16 semanas empleando monitores de sueño, además de otros dispositivos. Los resultados de este estudio demostraron que, con la revisión de la ley, los camioneros tenían más sueño mientras conducían. Para evaluar si la ampliación del máximo de horas de conducción permitido por ley también elevaba el riesgo, 103 camioneros de largas distancias fueron monitorizados durante 12 semanas. Los resultados mostraron como durante la primera hora al volante se producía una frecuencia más alta de incidentes críticos, mientras que desde la segunda a la undécima hora los registros no mostraban cambios significativos. Las conclusiones de este estudio contradicen parcialmente las expuestas por Dingus *et al.* (2006), en cuyo estudio se mostraba como la frecuencia de incidentes críticos presentaba variaciones claras en función del momento del día y de la densidad del tráfico.

Wiegand *et al.* (2009) estudiaron en camioneros de largas distancias la relación entre condición física y fatiga al volante. Para el estudio de la condición física los autores midieron el *índice de masa corporal* (BMI) de cada uno de los conductores. Los resultados de su estudio demostraron que los conductores obesos padecían unos mayores riesgos de fatiga y presentaban una mayor probabilidad de verse involucrados en un incidente crítico que los conductores no obesos.

Otros estudios analizaron esta misma relación, aunque se centraron en los camioneros que recorrían distancias más cortas. Hanowski *et al.* (2003) monitorizaron un grupo de 42 camioneros durante dos semanas empleando cámaras de video y una serie de dispositivos de vigilancia que permitían medir la atención del conductor aplicando una serie de estímulos mediante los cuales se buscaba alguna

¹⁷ Norma de la FMCSA (*US Department of Transportation's Federal Motor Carrier Safety Administration*) referida a las horas de servicio de los camioneros y aprobada el 24 de abril de 2003 por la FMCSA (49 CFR, Part. 395, Chapter III).



respuesta. Los resultados concluyeron que la aparición de signos de fatiga incrementaba el riesgo de enfrentarse a un accidente en el que el propio camionero tenía la culpa. La revisión de los datos ponía de manifiesto además que la fatiga se debía en la mayoría de las ocasiones a períodos prolongados de monotonía y/o aburrimiento. Barr *et al.* (2005) demostraron además cómo la conducción en determinados ambientes y bajo ciertas condiciones reducía la fatiga y aumentaba la atención por parte del conductor. Un ejemplo concreto era la conducción en condiciones de pobre visibilidad y en vías de alta capacidad con una división en carriles poco clara.

2.2.2.5. Interacciones entre vehículos

Varios estudios se centran en el análisis de la interacción entre vehículos ligeros y pesados. Dos estudios desarrollados por un mismo grupo de autores, investigaron sobre el tema tanto desde el punto de vista de los vehículos ligeros (Hanowski *et al.*, 2006) como de los pesados (Hanowski *et al.*, 2007). En el primero de estos estudios se analizaron los incidentes sufridos por vehículos ligeros en interacciones con vehículos pesados a partir de datos obtenidos en el estudio de *los 100 coches* (Hanowski *et al.*, 2006). En el segundo estudio, el que adopta la perspectiva de los vehículos pesados, se monitorizó durante unas dos semanas a 48 camioneros de largas distancias y a 42 de cortas (Hanowski *et al.*, 2007). Los resultados de ambos estudios demostraron que en incidentes críticos el vehículo ligero era el culpable en la mayor parte de las ocasiones.

2.2.2.6. Sistemas de asistencia

Este tipo de sistemas ayudan al conductor a hacer más fácil y segura la conducción. Por esta razón resulta de sumo interés la elaboración de estudios que evalúen el uso de estos sistemas en un contexto de conducción real analizando, por ejemplo, cómo los conductores emplean un determinado dispositivo, con qué frecuencia, si su funcionamiento es el esperado, si reducen el riesgo de accidente e incluso cómo afecta su uso al comportamiento del conductor al volante.

Un ejemplo de estudios de este tipo son los programas FOT (*field operational tests*), cuya definición más completa fue la propuesta por Karlsson *et al.* (2009). El principal objetivo de los programas FOT es el testado, mediante el método de conducción naturalista, de un determinado sistema o dispositivo instalado en el vehículo, ya sea de forma permanente o provisional. Numerosos programas FOT tales como *TeleFOT*, *SemiFOT*, *Test Site Sweden*, *EuroFOT*, *AOS*, *SIMTD*, *FESTA*, etc. han sido puestos en marcha en Europa durante los últimos años.

Los programas FOT y los estudios *puros* de conducción naturalista comparten la misma metodología de trabajo aunque el enfoque de análisis permite diferenciar entre ambos tipos de estudios. Así, mientras en los primeros el objetivo es evaluar el uso de un determinado dispositivo o sistema, en los segundos el objetivo se centra en el análisis de cómo el uso de dicho dispositivo influye sobre el comportamiento al volante del conductor. Sin embargo, para algunos autores las diferencias entre ambos estudios no está clara (Backer-Grøndahl *et al.*, 2009).

Sayer *et al.* (2005) descartaron el aumento de distracciones y faltas de atención cuando se hacía uso de sistemas de reducción de accidentes tipo FCW (*advertencia de colisión frontal*) y ACC (*control de velocidad de crucero adaptativo*). Sin embargo sí advirtieron la aparición de un efecto de compensación del riesgo que se concretaba, por ejemplo, en una conducción más rápida. McLaughlin *et al.* (2008) propusieron un método para evaluar el funcionamiento de los CAS (*sistemas anti-colisión*) en situaciones de accidentes y casi-accidentes. Para ello emplearon datos de velocidad y aceleración del vehículo, además de la distancia con respecto al vehículo al que precedía. Los resultados concluyeron que el dispositivo incurría en numerosas ocasiones en falsas alertas.



2.2.2.7. Cambios de carril y adelantamientos

Se estima que los accidentes por cambios de carril suponen aproximadamente entre un 4 y un 10% de todos los accidentes (Lee *et al.*, 2004). La información derivada del comportamiento del conductor en cambios de carril puede ser aplicada tanto para un modelado más eficiente de flujos de tráfico como para el diseño de *sistemas anti-colisión* (CAS) más eficientes.

En el estudio de Lee *et al.* (2004) se analizaron los patrones de visión de una serie de conductores durante la ejecución de maniobras de cambios de carril. Entre otros aspectos se analizaron la forma, frecuencia y duración de la maniobra, además de las variaciones de las mismas en función del tráfico y del tipo de vehículo. Los resultados mostraron cómo los conductores miraban al frente durante al menos tres segundos antes del cambio de carril y que el intermitente sólo lo usaban una media del 44% del tiempo de maniobra, usándose más en los cambios al carril izquierdo que al derecho.

Toledo y Zohar (2007), en otro estudio similar, estimaron un tiempo medio de cambio de carril (4,6 segundos) mucho más reducido que el estimado por Lee *et al.* (2004) (9,1 segundos), aunque ambos estudios concluyeron que los cambios de carril a la izquierda tenían una duración media más larga que los cambios a la derecha. Esto se explica como un efecto de aversión al riesgo debido al hecho de que cambiar al carril de la izquierda significa incorporarse a un carril más rápido, lo que obliga a los conductores a tomar más precauciones y más tiempo. Varios factores determinan la duración de los cambios de carril, entre los que destacan las condiciones del tráfico, la dirección del cambio y la presencia de otros vehículos alrededor. En este mismo estudio, los autores investigaron además los diferentes patrones de cambio de carril en vehículos ligeros y pesados, determinando que la duración media de la maniobra era más corta en los vehículos pesados.

La investigación dentro de este campo de estudio debe ser ampliada durante los próximos años ya que a día de hoy el número de trabajos científicos es escaso. De hecho, las conclusiones extraídas del estudio de Lee *et al.* (2004) sólo pueden ser extrapolables parcialmente, ya que dicho estudio fue llevado a cabo en un área rural con una densidad de tráfico baja. Toledo y Zohar (2007) criticaron el estudio anterior por analizar los cambios de carril de una forma aislada e instantánea, no teniendo en cuenta un período de tiempo y un patrón de conducción más amplio.

2.2.2.8. Interacción y uso de móviles u otros dispositivos

El uso del móvil al volante es un tema de gran interés que ha sido ampliamente estudiado durante los últimos años. Los teléfonos móviles distraen al conductor de dos formas: física y cognitivamente. La *distracción física* se da cuando los conductores tienen que llevar a cabo dos tareas simultáneamente, tal y como coger sus móviles y seguir conduciendo. La *distracción cognitiva* se da cuando el conductor tiene que desviar parte de su atención al volante a la conversación al móvil. Sin embargo, la habilidad del ser humano para dividir la atención en dos tareas simultáneas es limitada. Por tanto, el uso del teléfono móvil mientras conducimos afecta o puede afectar negativamente a la acción de conducir. Se estima que el uso de móviles en conducción puede incrementar por cuatro el riesgo de estar envuelto en un accidente (Dragutinovic y Twisk, 2005),

Varios estudios analizaron los efectos reales que el uso del móvil tenía sobre la conducción. Los primeros estudios de este tipo fueron llevados a cabo en ambientes simulados. Redelmeier y Tibshiranin (1997) compararon los efectos del alcohol con los derivados del uso del teléfono móvil sobre el comportamiento al volante de un grupo de conductores. En un estudio más exhaustivo, aunque también desarrollado en simulador, Burns *et al.* (2002) cuantificaron el nivel de distracción derivado de conversaciones por teléfono móvil, tanto agarrado como con el *manos libres*. Posteriormente compararon los resultados con los obtenidos en la conducción bajo efectos del alcohol. Participaron un total de 20 personas que condujeron en un simulador una ruta de 15 km en tres situaciones distintas: (a) conversación con el móvil agarrado, (b) conversación con el *manos libres* y (c) bajo los efectos del alcohol. Este estudio concluyó que los conductores que hablaban por teléfono móvil tendían a reducir su velocidad incluso cuando se les pedía explícitamente mantenerla constante, mientras que el alcohol presentaba el efecto contrario. Además, bajo el uso del teléfono móvil, los tiempos de reacción de los conductores a las señales de tráfico eran más lentos, llegando incluso a hacer caso omiso a algunas de ellas. Esta conclusión coincide con la aportada en estudios similares como el de Alm y Nilsson (1994), Brookhuis *et al.* (1991), Caird *et al.* (2004) y el de Horrey y Wickens (2006). Además, fueron apreciables algunas diferencias significativas en



función del tipo de móvil. Un ejemplo concreto era la mayor variabilidad de velocidades observable en el momento en el que los conductores conversaban a través del manos libres, al resultarles más complicado mantener el vehículo a una velocidad constante.

La percepción subjetiva del riesgo en el momento en el que los conductores conversan por móvil presenta un gran interés. Esbjörnsson *et al.* (2007) analizan, desde un punto de vista etnográfico, el uso del móvil al volante con objeto de analizar esa interacción y evaluar si los conductores subjetivamente minimizan los riesgos derivados del uso del móvil al volante. Los conductores que participaron en el estudio de Burns *et al.* (2002) valoraron que era más fácil conducir bajo los efectos del alcohol que conversando por teléfono móvil.

Patten *et al.* (2004) analizaron la influencia en la conducción tanto del tipo de móvil (con o sin *manos libres*) como del nivel de complejidad de la conversación (compleja, simple o no conversación). Para ello emplearon un dispositivo de *detección visual periférica* (PDT) para cuantificar el nivel de distracción del conductor en cada caso. Plantearon además una prueba en marcha en la que los participantes debían pulsar un micro-interruptor situado junto a su dedo índice izquierdo como respuesta a unos estímulos de luz que se iluminaban de forma esporádica. En el experimento participaron 40 conductores sobre un trazado de 74 km de autopista con bajo nivel de complejidad. La respuesta correcta a los estímulos pasó de un 96% en condiciones normales a un 85% en el momento que los participantes hablaban por móvil. En cuanto a los resultados obtenidos con el PDT, las variaciones más significativas se debían al tipo de conversación. Los conductores que participaban en una conversación compleja mostraban menos cambios (visuales periféricos) que los que no estaban sujetos a la distracción de una conversación telefónica. El tipo de móvil influyó en la velocidad media del vehículo, alcanzándose velocidades más altas con manos libres.

En un estudio similar, Liu y Lee (2005) plantearon un experimento con 12 conductores distribuidos en función de su nivel de agresividad al volante (seis conductores agresivos y seis no agresivos). La zona de estudio comprendía una sección de 7 km de vía urbana en la ciudad de Taipei (China). La vía contaba con un total de cuatro carriles y 24 intersecciones señalizadas. El experimento permitía el uso de manos libres al volante, aunque también fueron requeridas una serie de tareas adicionales a la conducción. Los resultados mostraron como ambas acciones (conducción y conversación al móvil) se veían afectadas, a la vez que la respuesta media a los test adicionales se incrementaba de 3,8 a 5,6 segundos.

Las conclusiones de este estudio y de otros similares como el de Hancock *et al.* (2003) ponen de manifiesto como ante una mayor carga de trabajo, los conductores tienden a presentar un *comportamiento compensatorio*, reduciendo su atención en una determinada acción en un intento por cumplir con la demanda de tareas (Backer-Grøndahl *et al.*, 2009). Este último estudio mostró cómo los conductores que circulaban por intersecciones mientras conversaban por teléfono móvil adoptaban una posición más conservativa en su modo de conducción al reducir su velocidad en un 6,4% de media y aumentar los tiempos de parada. Sin embargo, aunque los conductores frenaron más fuerte con la distracción, la línea de intersección fue excedida con más frecuencia que en condiciones normales. Respecto a la agresividad de los conductores, los conductores agresivos tendieron a conducir más rápido y frenar más tarde que los no agresivos, incluso en el momento en el que conversaban por teléfono móvil.

Estudios similares, aunque centrados en el uso de la radio en el vehículo, permiten extraer conclusiones muy similares. Consiglio *et al.* (2003) demostraron como el escuchar la radio en el vehículo inducía a un retardo en el tiempo de reacción del conductor, aunque éste no tenía apenas importancia estadística. Strayer y Johnston (2001), por su parte, no encontraron una reducción de la atención de los conductores cuando escuchaban la radio, aunque sí cuando intentaban sintonizar emisoras o llevaban a cabo acciones similares.

2.2.2.9. Eco-driving

Eco-driving o *green driving* se refiere a un estilo de conducción suave e inteligente que permite reducir tanto el consumo de combustible como el de emisiones. En un estudio de este tipo, Ericsson (2001) analiza y trata de identificar tipos de patrones de conducción sostenible.

El método de conducción naturalista permite un análisis más exhaustivo de los factores reales que contribuyen (o pueden contribuir) a una conducción más respetuosa con el medioambiente. Varios estudios han evaluado los efectos a largo plazo de los programas de entrenamiento diseñados para



promover patrones de conducción económicos, tanto en conductores de vehículos ligeros (Beusen *et al.*, 2009) como de autobuses (af Wåhlberg, 2007). Dentro de este mismo tema, el estudio de Sagberg *et al.* (2011) pone de manifiesto el interés por analizar, desde un punto de vista estratégico, la planificación del viaje por parte de los conductores y conocer los factores que la determinan.

2.3. PROPUESTA DE DESARROLLO DE PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA

Existe un conjunto de razones que justifican la necesidad de llevar a cabo experimentos de conducción naturalista a diferentes escalas espaciales y particularizados para un determinado territorio. De hecho, muchos de los resultados y conclusiones expuestas tanto en los anteriores estudios como en proyectos a gran escala no pueden extrapolarse a otros territorios debido a diferencias tanto físicas como humanas. Ejemplos de estas últimas serían diferencias en culturales, normativas viarias, flotas de vehículos, tipos de vía, condiciones ambientales y tipos de usuarios. Aún en el caso de que los resultados de otros proyectos fueran plenamente extrapolables existe, tal y como señala Regan *et al.* (2012), una contraprestación en cuanto a la propiedad y consulta de los datos, debido a aspectos legales, comerciales y éticos que pueden limitar el acceso público a la información tal y como sucede, por ejemplo, en el caso del estudio de *los 100 coches* desarrollado por el *Virginia Tech Transportation Institute* (VTTI), donde los videos del experimento no pueden ser consultados por personal ajeno al propio grupo de investigación.

Regan *et al.* (2012) exponen una serie de razones que justifican la necesidad de llevar a cabo un proyecto propio de conducción naturalista en Australia, aunque estas mismas razones son válidas para la propuesta de proyectos de este tipo a cualquier otra escala espacial. Una revisión de estas razones se expone a continuación:

- (a) Mejora de los niveles de eficiencia y eficacia relativos a la gestión en seguridad vial.
- (b) Conocimiento más profundo de los problemas reales del tráfico en un determinado territorio, permitiendo plantear nuevos enfoques de análisis.
- (c) Estudio sobre diferentes patrones o tipologías de accidentes ocurridos en determinadas condiciones.
- (d) Análisis de las diferencias al volante entre conductores de distintos entornos y ámbitos geográficos.
- (e) Estudio exhaustivo de las interacciones reales entre el vehículo, el conductor y el ambiente circundante.
- (f) Posibilidad de situarse en la vanguardia mundial de la investigación de temas de tráfico y seguridad vial.

Un ejemplo concreto de proyecto de conducción naturalista a gran escala es *PROLOGUE*. Este proyecto está actualmente en una de sus fases iniciales, aunque ya han sido llevados a cabo varios proyectos piloto previos a pequeña escala. En el siguiente apartado presentamos los aspectos más importantes relativos a este proyecto.

2.4. EL PROYECTO EUROPEO DE CONDUCCIÓN NATURALISTA: *PROLOGUE*

PROLOGUE, acrónimo de *Promoting Real Life Observations for Gaining Understanding of Road Behaviour in Europe*, es un proyecto de investigación cuyo principal objetivo es el de evaluar la posibilidad de llevar a cabo un estudio de conducción naturalista a gran escala dentro del continente europeo. El desarrollo del proyecto *PROLOGUE* ha permitido ampliar su campo de investigación al conjunto de todo el *escenario viario*, compuesto por el conductor, vehículo, vía y ambiente. El proyecto *PROLOGUE* está financiado por la *Comisión Europea* dentro del *7º Programa Marco para Investigación y Desarrollo*. Dentro del consorcio que comprende *PROLOGUE* se integran nueve institutos y centros de investigación, todos los cuales, salvo el israelí, pertenecen a países europeos (Tabla 2-1).



Tabla 2-1: Instituciones y centros de investigación que forman parte del consorcio para el desarrollo del proyecto *PROLOGUE*.

Centro	País
Institute for Road Safety Research (SWOV)	Holanda
Centre for Research and Technology Hellas (CERTH-HIT)	Grecia
Austrian Road Safety Board (KfV)	Austria
Transport Safety Research Centre, Loughborough University	Reino Unido
Or Yarok	Israel
Defence, Security and Safety, BU Human Factors (TNO)	Holanda
Institute for Transport Economics (TØI)	Noruega
Training and Testing International (TTI)	Austria
Instituto de Tráfico y Seguridad Vial, Universidad de Valencia (INTRAS)	España

El proyecto se encuentra en una fase previa a su puesta en marcha a nivel europeo. Varios proyectos piloto y estudios previos han sido llevados a cabo en los últimos años por parte de los grupos de trabajo de los diferentes países, centrados en distintos aspectos de interés que van desde la metodología de trabajo a la tecnología empleada (Tabla 2-2). Hasta ahora han sido llevados a cabo cinco proyectos piloto a pequeña escala en los siguientes países: Israel, Austria, Holanda, España y Grecia. Sagberg *et al.* (2011) coinciden en la necesidad de llevar a cabo proyectos piloto previos que permitan evaluar la metodología de trabajo y el funcionamiento de los dispositivos, asegurando de esta forma una alta calidad de los datos obtenidos y una reducción del riesgo de pérdidas de información.

Tabla 2-2: Documentos técnicos publicados por el proyecto *PROLOGUE*.

Código	Título documento	Fecha publicación
D1.1	Topics and applications of previous and current ND studies	08/ABR/2009
D1.2	Areas of interest of potential users for naturalistic observation studies	08/ABR/2010
D1.3	A catalogue of applications and research topics for future ND studies	08/ABR/2010
D2.1	Data collection, analysis methods and equipment for naturalistic studies and requirements for the different application areas	31/MAY/2010
D2.2	Methodological and organizational issues and requirements for ND studies	25/MAY/2010
D3.2	Potential benefits of in-vehicle systems for understanding driver behaviour. A series of small-scale ND studies in Israel	20/DIC/2010
D3.3	Video-based feedback for learner and novice drivers. A small-scale ND study in Austria	20/DIC/2010
D3.4	In-vehicle and site-based observations of vehicles and cyclists. A small-scale ND study in the Netherlands	20/DIC/2010
D3.5	Using a highly instrumented car for ND research. A small-scale study in Spain	20/DIC/2010
D3.6	Effects of forward collision and lane deviation warnings on road user behaviour. A small-scale ND study in Greece	20/DIC/2010
D3.7	Summary and integration of a series of ND field trials	19/JUL/2011
D4.1	Recommendations for a large-scale European ND observation study	28/JUL/2011
D4.2	Towards a large-scale European ND study: final report of <i>PROLOGUE</i>	29/JUL/2011
D5.6	1 st <i>PROLOGUE</i> Workshop Minutes	21/MAY/2010
D5.8	Strategy and materials for regional workshops	16/JUL/2010
D5.11	Minutes of six regional workshops about ND	19/JUL/2011
D5.13	Final <i>PROLOGUE</i> Workshop Minutes	19/JUL/2011

Existen dos tipos de proyectos de conducción naturalista que sirven como referente al proyecto *PROLOGUE*: (a) el proyecto *SHRP-2* (*Strategic Highway Research Program 2*) y (b) los denominados *FOT* (*field operational tests*). El proyecto de conducción naturalista *SHRP-2* es el más ambicioso proyecto de este tipo a nivel mundial. Se inició en el año 2010 y se estima que su duración sea de unos cinco años. Se desarrolla de forma simultánea en seis estados (Carolina del Norte, Washington, Indiana, Nueva York, Florida y Pennsylvania) y cuenta con un presupuesto estimado de unos 232,5 millones de dólares (TRB,



2013). Este proyecto contará con la participación de unos 3.100 conductores durante un período de recogida de datos de unos tres años.

Varios aspectos deben plantearse antes de la puesta en marcha de un proyecto de este tipo a nivel continental. Sagberg *et al.* (2011) establecen una serie de recomendaciones para la puesta en marcha de *PROLOGUE*, basadas tanto en sus propias experiencias como en las de proyectos similares llevados a cabo. De la misma forma, avances recientes tanto en la metodología de trabajo como en la tecnología empleada deben ser tenidos en cuenta. Pero sobre todo el éxito en la puesta en marcha de un proyecto tan ambicioso como *PROLOGUE* obliga a integrar, involucrar y tener en cuenta la opinión de una serie de grupos de interés como la industria automovilística, empresas aseguradoras, administraciones públicas, institutos y centros de investigación, además de centros de aprendizaje, entre otros.

Los resultados obtenidos en *PROLOGUE* pueden revertir en la sociedad en la sociedad proporcionando (a) una gestión más eficaz y eficiente de los flujos de tráfico, (b) una reducción de la siniestralidad vial, (c) el planteamiento de cursos de aprendizaje para jóvenes y de reciclaje para conductores mayores reincidentes (entre otros grupos), (d) la propuesta de modelos de conducción sostenibles, (e) el fomento de la sensibilización social al volante, (f) el establecimiento de unos umbrales de riesgo en carretera, etc.

2.4.1. Aspectos generales

Sagberg *et al.* (2011) proponen la creación de una matriz genérica de temas de análisis para el proyecto europeo. El planteamiento de *PROLOGUE* como un estudio a gran escala debe permitir obtener datos que puedan ser empleados para investigar cualquiera de los temas globales identificados en dicha matriz. Dentro de cada tema global, pueden analizarse otras cuestiones específicas menores.

Para la implementación de dicha matriz se combinan una serie de categorías relacionadas con el conductor (ocho en total) con otras ambientales o situacionales (cuatro), bajo las cuales se observa el comportamiento del conductor. Las categorías relativas al comportamiento o estado del conductor son las siguientes:

- (a) Distracción y falta de atención.
- (b) Fatiga, sueño y otros impedimentos.
- (c) Toma de decisiones, errores en conducción, estilo de conducción y comportamiento general al volante.
- (d) Cambio de carril y de posición sobre la carretera.
- (e) Velocidad y aceleración.
- (f) Distancias entre vehículos.
- (g) Conducción agresiva.
- (h) Aprendizaje.

Respecto a las categorías situacionales o ambientales se distinguen las siguientes:

- (a) Factores de fondo del conductor y características del viaje.
- (b) Tipo de carretera y condiciones ambientales.
- (c) Diseño del vehículo, equipamiento y condiciones.
- (d) Volumen de tráfico e interacción con otros usuarios de la vía.

El planteamiento de un proyecto de conducción naturalista a gran escala requiere considerar una serie de aspectos como el modelo experimental, el tipo de dispositivos de recogida de datos, el tamaño de la muestra, los tipos de indicadores y medidas y la metodología de trabajo.

Respecto al modelo experimental, debe plantearse un equilibrio entre, por una parte, la sofisticación tecnológica y, por otra, el tamaño de la muestra y la duración del estudio, ya que tanto el uso de una tecnología altamente sofisticada como el empleo de una gran base de datos implican altos costes asociados. Un gran estudio de conducción naturalista a nivel europeo debe plantearse como un estudio multi-nivel de tres pasos. En el primer extremo se optaría por una muestra de conductores muy amplia



sobre los que se registran parámetros de conducción básicos. En el otro extremo se optaría por un planteamiento opuesto, es decir, una muestra pequeña sobre la que se registran datos muy especializados que se obtendrían únicamente con una tecnología muy avanzada y dispositivos muy caros. En el medio se plantearía una situación intermedia entre las dos anteriores.

Respecto a los dispositivos empleados, deben tenerse en cuenta una serie de aspectos generales. Los requerimientos básicos que deben cumplir los dispositivos de recogida de datos empleados en experimentos de conducción naturalista son:

- (a) Grabación inobstrusiva.
- (b) Potencial para grabación continuada.
- (c) Suficiente capacidad de almacenamiento de datos.
- (d) Facilidad en la transferibilidad de los datos.
- (e) Fiabilidad contra pérdidas de datos.
- (f) Fiabilidad para la identificación de cada conductor en cada viaje.
- (g) Protección de datos incluso en caso de accidentes o manipulación intencionada.

Este tipo de dispositivos deben permitir registrar, al menos, datos cinemáticos, de posicionamiento y video. De la misma forma puede ser importante la recogida de datos audio en los que se pueda apreciar el tono de voz del conductor, el ruido ambiente e incluso el ruido del motor. Todos estos datos deben grabarse de forma continua a altas frecuencias. En el caso del video la resolución de la imagen debe ser la suficiente como para permitir distinguir elementos de la vía como las señales de tráfico teniendo en cuenta el desplazamiento del vehículo. Además, los dispositivos de recogida de datos deben estar sincronizados temporalmente entre sí. Por esta razón deben implementarse en el vehículo sistemas DAS integrados en un mismo conjunto, que eviten las incompatibilidades entre dispositivos y que permitan una sincronización temporal en todos los canales de datos.

En cuanto a los indicadores y medidas podemos distinguir tres grandes grupos: (a) las basadas en el conductor, (b) en el vehículo y (c) las ambientales y/o situacionales. Ejemplos de medidas basadas en el conductor serían, por ejemplo, las imágenes de video que pueden incluir movimientos de la cabeza o pestañeo para estudiar la fatiga, la falta de atención, el nivel de distracción e incluso el comportamiento visual por parte del conductor. Entre las medidas del vehículo estarían, por ejemplo, los datos cinemáticos del vehículo, mientras que dentro del grupo de medidas ambientales y/o situacionales se englobarían tanto las referidas a condiciones meteorológicas como al estado de la vía.

La revisión de datos numéricos y visuales permite un análisis e interpretación de los mismos. Por ejemplo, la velocidad de giro del motor y la frecuencia del cambio de marchas son indicadores representativos de la sostenibilidad de un modelo de conducción de un determinado sujeto. La distancia de un vehículo respecto al que precede, en combinación con la velocidad, permite describir comportamientos agresivos, siendo posible definir umbrales de riesgo de accidentabilidad por alcance entre vehículos contiguos.

Algunos estudios previos, como el de Sagberg *et al.* (2011) para el caso del proyecto *SHRP-2*, advierten de la dificultad en el reclutamiento de conductores en este tipo de proyectos. La muestra de participantes debe determinarse por el que ofrezca una mayor representatividad en función del objetivo de investigación establecido a priori. Sin embargo, un estudio a gran escala como el planteado por *PROLOGUE* debe ofrecer unas posibilidades de investigación *a posteriori* mucho mayores. Así, en función de los intereses de algún sector interesado en particular y/o el planteamiento de ciertas cuestiones secundarias puede plantearse un sobre-muestreo de ciertos grupos.

Debe tenerse en cuenta la posibilidad de que algunos conductores abandonen o puedan abandonar el experimento en cualquier momento. Por esta razón debe tenerse en cuenta la posibilidad de contar con equipos de participantes suplentes. Las experiencias de proyectos precedentes aconsejan que los participantes deban ser compensados por el tiempo invertido. Además deben tenerse en cuenta una serie de aspectos éticos y legales relativos a los propios participantes, obligando a la firma de un informe de consentimiento previo. Cualquier manipulación o cesión de los datos ha de ser confirmada a los propios participantes. Otro aspecto de interés al que aluden algunos proyectos previos, es que los vehículos empleados en el experimento deben ser lo más nuevos posible para que las conclusiones del estudio puedan ser relevantes para una amplia flota de vehículos durante largos períodos de tiempo.



La base de datos obtenida a partir de los dispositivos de registro de datos debe ser complementada con datos procedentes de otras fuentes relevantes como la relativa a las características del vehículo, el tipo de infraestructuras, etc. Estos datos pueden ser acoplados a la base de datos a través de códigos de tiempo o posición para cada uno de los conductores y vehículos.

Finalmente, en cuanto al análisis de datos, son necesarias una serie de herramientas adecuadas, incluyendo algoritmos y procedimientos que permitan identificar incidentes críticos y determinadas maniobras concretas del conductor. Un problema muy habitual en el análisis de datos procedentes de estudios de este tipo es el de las falsas alarmas. Por eso es necesario contar con el máximo volumen de parámetros analizados para así analizar el comportamiento de todos ellos. Un ejemplo de este tipo es el de los disparadores cinemáticos (fuerzas g), los cuales por sí mismos no permiten identificar los incidentes de una forma fiable, siendo necesaria una revisión simultánea y complementaria de las imágenes obtenidas en video. Entre otras consideraciones relativas al punto de análisis de datos se destacan las siguientes:

- (a) Fijación de los puntos inicial y final de validez de la información.
- (b) Determinación de rutinas de control de calidad de datos.
- (c) Desarrollo de taxonomías de accidentes e incidentes basadas en las medidas grabadas.
- (d) Desarrollo de taxonomías de comportamiento estableciendo definiciones operacionales de conceptos esenciales como fatiga, falta de atención, sueño, etc.
- (e) Planteamiento de estrategias de semi-automatización para la revisión de las imágenes de video.
- (f) Planteamiento de métodos de análisis estadístico de los datos.

Por tanto, a modo de recapitulación, la puesta en marcha de un macro-proyecto de conducción naturalista a nivel europeo debe tener en cuenta todos los aspectos anteriores y algunos otros como los expuestos por Sagberg *et al.* (2011):

- (a) Debería incluir a peatones y vehículos de dos ruedas y camiones, para hacerlo más ambicioso que otros proyectos puestos en marcha.
- (b) Las distintas tecnologías que forman parte del sistema DAS deberían estar integradas entre sí.
- (c) Deberían combinarse, al menos parcialmente, las observaciones recogidas a bordo del vehículo con otras estáticas, recogidas en determinados lugares de interés como por ejemplo, en intersecciones cuando se estudian giros.
- (d) Deberían contrastarse los datos obtenidos con la percepción subjetiva del conductor.
- (e) Deberían analizarse los niveles de consumo de combustible y emisiones.
- (f) Deberían estudiarse la planificación previa del viaje por parte del conductor y determinar qué factores determinan los cambios durante el recorrido.
- (g) Deberían ser tenidas en cuenta y analizadas las diferencias culturales y geográficas en los patrones de conducción entre participantes de distintos países.
- (h) Deberían ser armonizados algunos aspectos relevantes con respecto a los del proyecto estadounidense *SHRP-2* y a otros proyectos a gran escala, con objeto de que los resultados puedan ser analizados conjuntamente y comparados entre sí.

2.4.2. Sistemas de adquisición de datos

Normalmente los participantes conducen sus propios vehículos. Los dispositivos de registro de datos más modernos comprenden sistemas telemétricos que funcionan conectados a un computador (enchufado o sin cable) mediante suministro eléctrico. Estos sistemas telemétricos pueden llegar a alcanzar frecuencias de registro de datos de hasta 1.000 Hz.

Pueden establecerse tres categorías de dispositivos de adquisición de datos (DAS): (a) los estándar o genéricos, (b) los de diseño propio (a medida) y (c) los híbridos. Las diferencias entre uno y otros se



basan en su complejidad tecnológica y coste. Una breve revisión de las ventajas y desventajas de cada una de estas categorías se enumeran en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3: Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de adquisición de datos. Fuente: Van Schagen *et al.*, 2011.

Sistema DAS	Ventajas	Inconvenientes
Estándar	a) Fácil de instalar y de usar b) Relativamente baratos	a) Presentan dificultades en la adición de canales extra y acoplamiento de funcionalidades diferentes a las básicas
Diseño propio	a) Adaptable a las necesidades específicas b) Permite adaptar el uso de componentes avanzados	a) Requieren de niveles de conocimiento y experiencia tanto para el desarrollo de estos sistemas como para su puesta en marcha
Híbrido	a) Permiten cierta flexibilidad en las especificaciones de componentes b) La ampliación del sistema es relativamente sencilla c) Suelen presentar una mayor rentabilidad	a) Requieren de programas software propios b) Requieren de personal experto en programación para su adaptación

2.4.2.1. Sensores especializados o específicos

En algunas ocasiones un registro de datos relativos a parámetros básicos puede no ser suficiente de acuerdo a los objetivos de investigación, siendo necesario implementar en el vehículo dispositivos de adquisición de datos muy específicos. Ejemplos concretos de dispositivos de este tipo son aquellos dispositivos que permiten determinar la posición tanto del pedal de embrague como del acelerador, la fuerza de frenada ejercida, la posición del volante o el movimiento de suspensión. Este tipo de dispositivos se montan en los propios vehículos y se acoplan al sistema DAS integral añadiendo nuevos canales extra.

El uso de estos dispositivos puede acarrear múltiples problemas que serían complejos de resolver. El investigador debe, por tanto, alcanzar un equilibrio entre la necesidad de un determinado dispositivo específico y los problemas añadidos que su uso o su propia instalación generan. Entre los inconvenientes asociados a estos dispositivos podemos destacar su alto precio, su calibración continua para la obtención de medidas fiables, su integración dentro de sistemas DAS estándares y su ubicación en compartimentos específicos que ofrezcan una protección ante golpes y permitan un uso y un reemplazamiento óptimo

a) Imágenes de video

Los estudios de conducción naturalista llevados a cabo hasta ahora llevan a cabo una revisión en detalle de los videos registrados durante el experimento. El visionado de los videos es muy importante para la interpretación de los parámetros numéricos registrados y para la comprensión general de comportamiento del conductor al volante. Varios aspectos determinan la calidad y desarrollo tecnológico de las cámaras de video, tales como la resolución de las imágenes, la velocidad de los fotogramas, el zoom óptico de la imagen y la capacidad de almacenamiento de la cámara.

Uno de los problemas más recurrentes del análisis del video es su alto coste temporal. La localización de un número muy limitado de incidentes requiere del visionado continuo de un gran número de horas de video. Valero-Mora *et al.* (2010) estimaron que el tiempo de visualización de los videos en su proyecto fue de 2,5 veces el tiempo real de conducción y que según la frecuencia de incidentes observada, todos ellos pocos relevantes, se necesitarían unas 250 horas de video para localizar una media de 100 incidentes. Una alternativa a este gran coste temporal es la activación de interruptores de grabación de video en el momento en el que el conductor sobrepasan ciertos umbrales en alguno de los parámetros registrados o cuando llevan a cabo maniobras anormales en su conducción, tal como fuertes aceleraciones, volantazos, derrapes, etc. Sin embargo, la estimación de umbrales de activación de la grabación de video no resulta sencilla, siendo muy frecuente la aparición de un gran número de errores tanto por exceso (*falsos positivos*) como por defecto (*falsos negativos*).

Para una comprensión más completa tanto del vehículo como de los factores ambientales se recomienda emplear un mínimo de cuatro cámaras, cuyas posiciones concretas dentro del vehículo deberán ser determinadas en función de los objetivos específicos de investigación. La ubicación de las cámaras dentro



del vehículo puede ser determinada además por otros factores tanto técnicos (ubicaciones óptimas para el montaje y desmontaje de las cámaras) como legales y éticos (restricciones a la grabación de imágenes de los pasajeros).

b) Seguimiento ocular

El empleo de sistemas de seguimiento ocular permite analizar aspectos como el grado de distracción, falta de atención, nivel de somnolencia y fatiga del conductor al volante. Este tipo de sistemas son muy específicos y presentan un alto coste, empleándose únicamente en vehículos altamente instrumentados (HIC). El análisis de datos generados con este tipo de sistemas suele ser complejo y muy costoso, tanto desde un punto de vista temporal como de la interpretación de los datos.

Un método alternativo, más sencillo y económico para el estudio del comportamiento visual de un determinado conductor es el seguimiento y la codificación cuidadosa de videos de alta calidad en los que se enfoca la cara del conductor. La revisión de las imágenes por parte de analistas competentes permite la codificación de una amplia gama de comportamientos a partir del estudio de ciertas facciones, actitudes y comportamientos del conductor. Entre otros aspectos pueden analizarse aspectos como el gesto, la mirada, la métrica, el grado de humor, la aparición de signos de fatiga e incluso la involucración en acciones secundarias a la conducción tales como comer o hablar por teléfono móvil.

2.4.2.2. Almacenamiento y gestión de datos

Los estudios de conducción naturalista generan grandes volúmenes de datos cuyo almacenamiento y gestión pueden resultar complicados. En muchas ocasiones se opta por el uso de discos duros portátiles extraíbles con tarjetas de memoria flash. La descarga de datos se lleva a cabo bien mediante sistemas inalámbricos o bien mediante descarga directa. Estos dispositivos de almacenamiento deben ser discretos y estar ubicados en lugares seguros, a los que acceder sea fácil en caso de ser necesarias acciones de recuperación de datos. Para evitar o minimizar pérdidas de datos, los dispositivos de almacenamiento deben incorporar funciones de carga de datos y permitir hacer copias de seguridad de forma automática.

El almacenamiento de los datos alfanuméricos debe hacerse en bases de datos preferentemente relacionales y en soporte de programación SQL, que permitan un rápido acceso a los datos almacenados además de la aplicación de funciones avanzadas para *scripts*. Por su parte, el almacenamiento de los videos puede hacerse en un servidor de archivos o dentro de una base de datos en la que cada fotograma almacenado sea una imagen separada e independiente, con extensión tipo **.jpg* o **.Blob* en función de la capacidad de almacenamiento disponible de la base de datos. Un ejemplo concreto de estudio de conducción naturalista a gran escala es el proyecto *SHRP-2*, para el cual se estiman unas necesidades de almacenamiento de datos del orden de los cuatro petabytes (PB), equivalente a $4 \cdot 10^6$ gigabytes (GB) (SHRP-2, 2014).

Por esta razón es necesario llevar a cabo procesos de reducción de los datos, con el fin de aligerar el peso y facilitar las tareas de análisis y gestión de los mismos. Este proceso es necesario e ineludible debido a que los objetivos del estudio suelen centrarse en situaciones muy concretas y en un determinado tipo de incidentes.

En cuanto a la elección del software, la mayoría de los proyectos de este tipo ha desarrollado su propio software adaptado a sus necesidades específicas. La elección del software para el procesamiento de los datos debe cumplir con una serie de requerimientos funcionales, tales como:

- (a) Realizar consultas directas a la base de datos.
- (b) Permitir la implementación de funciones de cálculo matemático o semi-automático de indicadores y de algoritmos de selección de datos para la localización de eventos de interés
- (c) Procesamiento tanto de datos numéricos como imágenes de video a través, por ejemplo, de algoritmos de visión por computador que permitan la detección de señales de tráfico.
- (d) Análisis de grupos de datos.
- (e) Permitir la exportación de resultados a formato tabular y a programas de procesamiento estadístico.



Un estudio más en detalle sobre los aspectos más importantes relativos a los sistemas de adquisición, almacenamiento y gestión de datos procedentes de experimentos de conducción naturalista se presenta en Welsh *et al.* (2010).

2.4.3. Análisis de datos

El análisis de los datos debe llevarse a cabo empleando varios programas de software. Los programas más utilizados para las consultas a las bases de datos son programas en lenguaje *SQL*, mientras que para la fase de procesamiento y visualización de los datos suele emplearse software estadístico genérico (*SAS*, *SPSS*, *Statgraphics*) y, con una menor frecuencia software matemático como *MatLab*. La mayoría de los proyectos llevados a cabo hasta ahora han recurrido a soluciones a medida (software propietario) que permiten un análisis de grandes conjuntos de datos e incorporan interfaces gráficas sencillas y fáciles de usar.

2.4.4. Proyectos piloto en diferentes países

PROLOGUE ha llevado a cabo cinco proyectos piloto en cinco países diferentes: Israel, Austria, Holanda, Grecia y España. La experiencia de estos cinco proyectos ha servido como banco de pruebas para la puesta en marcha del proyecto a gran escala. Una breve revisión de estos cinco primeros proyectos piloto se expone a continuación, presentando con más detalle el proyecto piloto desarrollado en España.

2.4.4.1. Israel

El proyecto israelí consistió en cuatro pequeños tests que se centraron fundamentalmente en conductores novatos. En todos ellos se empleó un sistema DAS particular, el llamado sistema *GreenRoad*, un sistema barato, fácilmente instalable y que permitía una transferencia sencilla de los datos. El sistema no incluía videocámaras y se centraba fundamentalmente en la recogida de datos de posicionamiento y cinemáticos. La metodología de trabajo dentro de este proyecto se dividía en cuatro fases:

- (a) Recogida de datos, principalmente de posición y velocidad.
- (b) Identificación de incidentes, tales como maniobras peligrosas, frenazos, velocidades anormales, etc.
- (c) Análisis de los incidentes de cada conductor para cuantificar su exposición al riesgo. Posteriormente, el estilo de conducción de cada conductor fue clasificado en tres tipos: precavido, moderado o agresivo.
- (d) Realización de informes subjetivos de los conductores y comparación con los datos obtenidos. El proyecto propone además la posibilidad de suministrar advertencias o *feedbacks* a los conductores, tanto en el momento en que conducen como a posteriori.

Los resultados de este proyecto fueron publicados en el documento D3.2 de *PROLOGUE*. Entre sus conclusiones se destaca el gran potencial de este método de experimentación para la observación de similitudes y diferencias entre grupos de conductores con marcadas diferencias sociales y culturales. Otra de las conclusiones de este estudio se refiere a los altos requerimientos de tiempo invertidos en la preparación y procesamiento de los datos para que estos pudieran ser comparables. Más información detallada sobre este proyecto piloto puede ser consultada en Lotan *et al.* (2010).

2.4.4.2. Austria

El proyecto piloto austríaco se centró también en un grupo de conductores jóvenes con poca experiencia al volante, e incluso nula en alguno de los conductores. Participaron un total de 12 conductores noveles que acababan de obtener su permiso de conducción en un experimento que tenía



una duración intermedia de entre uno y tres meses. Durante el experimento, la mitad de los conductores recibía un *feedback* en video, mientras la otra mitad no. Como dispositivos de recogida de datos se empleó un sistema denominado *pdrive* que permitía grabar datos cinemáticos y de posicionamiento. El sistema contaba además con dos cámaras digitales acopladas, una de las cuales apuntaba directamente al conductor y la otra a la parte delantera del vehículo.

Los objetivos técnicos del experimento austriaco fueron tres: (a) extraer una serie de indicadores (y escalas) de riesgo en función de los datos cinemáticos, (b) analizar la influencia del *feedback* en video sobre el comportamiento de los conductores y (c) comparar los datos obtenidos en el experimento con los datos subjetivos obtenidos en los informes.

Fueron desarrolladas una serie de rutinas de pre-procesamiento de los datos para su transferencia a una base de datos SQL. Entre estas rutinas estaba el chequeo manual de los datos, la identificación y codificación de los conductores y el cartografiado de los trayectos recorridos.

Debido al problema derivado de la manipulación de grandes volúmenes de datos, el proyecto austriaco planteó que la grabación de video sólo tuviera lugar en momentos puntuales. Fueron definidos una serie de umbrales de aceleración lateral y longitudinal para clasificar los niveles de severidad accidental. En el momento en que se sobrepasaban estos umbrales, las cámaras pasaban a grabar imágenes de forma automática durante cortos espacios de tiempo. El cálculo de las frecuencias de los niveles de severidad en función del tiempo de conducción permitió determinar escalas de riesgos y establecer comparaciones entre los distintos grupos de conductores.

Los resultados indicaron que en áreas urbanas, el grupo que no recibía *feedback* tendía a sufrir más incidentes. En autopistas no se encontraron grandes diferencias, aunque sí se observó un patrón semejante. Además, el proyecto mostró diferencias significativas en función del sexo del conductor.

Como conclusiones de este estudio se demostró el potencial de suministrar *feedbacks* a los conductores, aunque también se advirtió de la presencia de grandes problemas, tal como la gran carga de trabajo manual requerida (a pesar de la estrategia de reducción de datos empleada), las pérdidas de datos o la necesidad de llevar a cabo más estudios exhaustivos para incrementar la fiabilidad de los datos. Más información detallada este proyecto piloto puede ser consultada en Gatscha *et al.* (2010).

2.4.4.3. Holanda

El objetivo del proyecto piloto holandés se centró en la interacción entre vehículos y ciclistas en intersecciones con carril-bici en los que pueda darse un conflicto potencial entre conductores que giran a la derecha y ciclistas que siguen recto. El proyecto planteó dos perspectivas de análisis: una primera más dinámica, obtenida desde el propio vehículo, y una segunda más estática, obtenida desde una ubicación fija dentro del propio escenario de análisis (intersección). Los resultados obtenidos en ambas perspectivas fueron combinados y analizados de forma conjunta.

El proyecto comprendía la monitorización de ocho vehículos durante un total de ocho semanas. El sistema DAS empleado fue el mismo que el empleado en el proyecto piloto austriaco (*pdrive system*). Se emplearon además dos cámaras de video, una centrada en la cara del conductor y una segunda situada en la parrilla frontal del vehículo. Las cámaras de video fueron programadas para funcionar únicamente en el momento en que se producía algún incidente relevante o bien cuando el vehículo se aproximaba a una determinada intersección, basándose para ello en la posición determinada por el sistema GPS.

En cuanto a las cámaras estáticas, se dispuso de dos cámaras en cada una de las intersecciones estudiadas. Ambas cámaras fueran posicionadas a diferentes ángulos con objeto de proporcionar una panorámica amplia del área de estudio. Los vehículos fueron marcados con un gran punto en el techo para facilitar su identificación en su paso ante las cámaras estáticas.

Los resultados de este proyecto piloto demostraron que los encuentros vehículo-ciclista en situaciones en las que no se detuvo el vehículo al llegar al semáforo llevaron asociados unos mayores riesgos que las situaciones en las que el vehículo se detenía. La cámara fija permitió definir la posición exacta en la que el vehículo y la bicicleta coincidían, pudiendo ser cuantificado así el tiempo de colisión. Los datos de a bordo permitieron elaborar análisis más profundos y complementar las imágenes de las cámaras estáticas.



Entre las conclusiones de este proyecto piloto destacar que el procesamiento manual de la información, sobre todo de la visual, permitió buenos resultados en precisión aunque supuso grandes esfuerzos. Por su parte, el procesamiento automático permitió alcanzar resultados menos precisos aunque mucho más rápidos. El proyecto incide en la necesidad de un equilibrio entre ambos modelos de procesamiento, o lo que es lo mismo, entre la fiabilidad de los análisis y la rapidez del procesamiento.

Entre otros problemas fueron observados errores en los datos y ciertas pérdidas. Por esta razón, el estudio sugiere la necesidad de llevar a cabo ciertos procedimientos regulares de control de calidad de los datos. Más información detallada sobre este proyecto piloto puede ser consultada en Christoph *et al.* (2010).

2.4.4.4. Grecia

El proyecto piloto griego planteó como objetivo el análisis del efecto que tenía sobre la conducción el uso de dos sistemas de asistencia al conductor como son el FCW (*sistema de advertencia de colisión frontal*) y el LDW (*sistema de alerta de cambio de carril*). Se planteó como hipótesis si existía una compensación (o aumento) del riesgo como respuesta al incremento teórico de la seguridad proporcionada por estos sistemas de asistencia. Asimismo también se valoró la opinión de los participantes siendo propuestos tres tipos de cuestionarios: (a) uno centrado en su comportamiento al volante (DBQ), (b) una escala de uso del sistema (SUS) y (c) un diario de a bordo que debía ser complementado cada día del experimento.

Participaron cinco conductores, cada uno de ellos durante tres semanas consecutivas. El experimento estableció una ruta fija por la que los conductores debían pasar a diario, aunque en condiciones diferentes según las diferentes semanas: (a) en la primera sin ayuda de sistemas de asistencia, (b) en la segunda con el sistema FCW activado y (c) en la tercera con el LDW activado. El vehículo experimental presentó un alto nivel de instrumentación, aunque el objetivo de los investigadores fue seleccionar para futuros proyectos todos aquellos dispositivos de registro de datos más importantes.

Como precaución ante posibles pérdidas de datos y para evitar el colapso de los discos de almacenamiento de datos, el equipo griego descargó a diario a una base de datos los datos obtenidos durante cada jornada del experimento. Los resultados de este proyecto piloto demostraron que, con la activación de los sistemas de asistencia, los conductores tendieron a distraerse más en la realización de actividades secundarias. Según los cuestionarios, todos los conductores se definían a sí mismos como conductores seguros y consideraban que el empleo de los dos sistemas de asistencia evaluados era útil.

El experimento griego valora el interés y complementariedad que ofrecen los cuestionarios como fuentes de información. Desde el punto de vista del análisis de los datos, fue requerida una carga de trabajo manual muy costosa en términos temporales. Por esta razón, el equipo griego propone, de cara a futuros proyectos, una recogida de datos más selectiva en cuanto a número de parámetros y un mayor esfuerzo en la reducción de los datos con objeto de lograr una manipulación y gestión más rápida y fiable de los datos. Más información detallada sobre este proyecto piloto puede ser consultada en Toulidou y Margaritis (2010).

2.5. EL PROYECTO PILOTO DE *PROLOGUE* EN ESPAÑA

España puso en marcha a través del INTRAS, un proyecto piloto a pequeña escala similar al puesto en marcha en otros países. El INTRAS es el *Instituto de Investigación en Tráfico y Seguridad Vial*, adscrito a la *Universidad de Valencia* (UV), el cual forma parte, junto a otros ocho partners, del consorcio *PROLOGUE*.

El objetivo de investigación principal del proyecto piloto español era el estudio de los efectos que el uso de ciertos sistemas IVIS (*sistemas de información de a bordo*) tiene sobre la conducción, centrándose particularmente en navegadores. El tema de investigación planteado es un tema recurrente dentro de estudios de tráfico, aunque la mayor parte de los trabajos emplean metodologías de experimentación tradicionales como la observación simulada. El proyecto piloto español planteó un estudio de conducción naturalista en condiciones totalmente reales, considerando aspectos que no podían ser tenidos en cuenta



en laboratorio, tal como las complejas interacciones del vehículo con otros vehículos de la vía o el propio comportamiento del conductor en condiciones de tráfico real.

El coche empleado fue un vehículo experimental altamente instrumentado (HIC) denominado *ARGOS*, propiedad de la *Dirección General de Tráfico* (DGT). La implementación instrumental del vehículo fue llevada a cabo por la DGT en colaboración con la *Universidad Politécnica de Madrid* (UPM).

El gran número de parámetros monitorizados en el proyecto español requirió de un equipamiento y dispositivos muy sofisticados, muchos de los cuales eran grandes y complejos. Esto conllevó a una mayor dificultad en la integración, calibración y utilización de estos dispositivos. La experiencia del proyecto piloto español permitió plantear una serie de recomendaciones finales para el desarrollo de nuevos proyectos de este tipo, como *PROLOGUE* a escala europea. Estas recomendaciones eran relativas a todas las fases del experimento, desde la fase de captura de datos hasta la fase de procesamiento de los mismos. El uso de un vehículo experimental altamente instrumentado (HIC) permitió además establecer una comparativa con otros proyectos pilotos desarrollados dentro de *PROLOGUE*, como el británico o el griego, donde los vehículos experimentales presentaban diferentes dispositivos y niveles de instrumentación (Valero-Mora *et al.*, 2013).

2.5.1. Metodología y zona de estudio

El experimento presentaba dos tramos de estudio diferenciados. El primero de ellos transcurría en los alrededores de la ciudad de Valencia. Los participantes recogían el vehículo en las instalaciones del INTRAS, próximas al *campus dels Tarongers* de la *Universidad de Valencia* (UV) a las 8:30 a.m., y de ahí lo conducían hasta el término municipal de Puzol, a unos 15 km al norte de la ciudad de Valencia. El trayecto recorrido era el de la *Autovía del Mediterráneo* en ambos sentidos de circulación. El tráfico de la vía suele ser denso durante las horas en las que el experimento tenía lugar. Este tramo de vía era de paso común para todos los participantes durante los todos los días del experimento. La obtención de datos de conducción en este tramo de vía permitía llevar a cabo análisis comparativos en los modos de conducción de cada participante. El segundo tramo de estudio del experimento discurría entre distintas localizaciones dentro de la ciudad de Valencia. En esta parte el experimento pretendía evaluar la capacidad de los participantes para localizar ciertos hitos o destinos. Dependiendo del día, los participantes podían hacer uso de un navegador. Los conductores recibían instrucciones sobre cómo usar el navegador pero no sobre si debían usarlo ni cuando debían hacerlo. Sólo el segundo y el cuarto día del experimento tenían la posibilidad de usarlo.

La *Figura 2-1* muestra la ruta completa seguida por el tercer participante durante su segundo día de experimento. El punto G determina la ubicación de las instalaciones del INTRAS, punto de partida del experimento. El punto B corresponde a la primera de las paradas, ubicada a las afueras del núcleo urbano de Puzol. Este punto de parada era común para todos los participantes. Desde B el vehículo retorna de nuevo al centro de la ciudad, siguiendo la secuencia CDF, para volver a G de nuevo. Los destinos anteriores, salvo el determinado por el punto G, no eran los mismos para los distintos participantes, aunque sí lo eran las zonas aproximadas de paso. El punto C corresponde a un barrio cercano al casco histórico de la ciudad caracterizado por calles estrechas y tráfico denso. El punto D se localiza en un barrio relativamente nuevo de la ciudad que presenta un flujo de tráfico bastante fluido durante la mayor parte del día. El punto E se localiza al lado del puerto y el punto F en la zona de los *Poblados Marítimos*, unos barrios históricos con un entramado urbano muy particular (Balsa-Barreiro y Lois-González, 2010). El círculo sombreado señalado en la figura indica el área donde los destinos no eran fijos, sino que variaban para cada uno de los conductores y/o días del experimento.

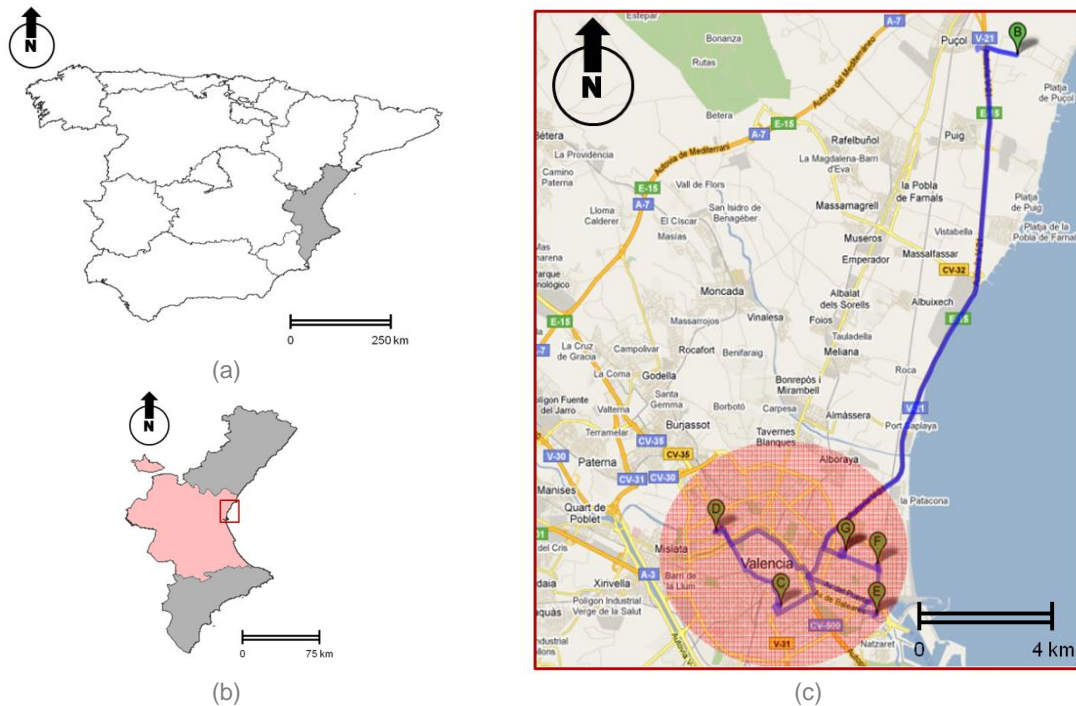


Figura 2-1: (a y b) Localización de la zona de estudio. (c) Trazo del recorrido de uno de los participantes durante una de las jornadas del experimento. Fuente: Valero-Mora *et al.*, 2010.

Participaron un total de cinco voluntarios durante cuatro días diferentes cada uno de ellos. Los participantes eran personas de mediana edad con hábitos al volante sensiblemente diferentes. La Tabla 2-4 muestra las tendencias al volante de cada uno de los participantes respecto al uso de ciertos dispositivos.

El hecho de que el experimento se realizara con un vehículo que no era el propio de los participantes, por una parte, y que su instrumentación durante el experimento fuera tan voluminosa y aparatosa, por otra parte, pudo influir o condicionar el comportamiento al volante de los participantes. Por esta razón, los investigadores propusieron que los días de conducción de cada participante fueran seguidos para que así pudieran familiarizarse, lo máximo posible, a las condiciones tanto del propio vehículo como del experimento.

Tabla 2-4: Información de los participantes obtenida en un cuestionario previo al experimento. Fuente: Valero-Mora *et al.*, 2010.

Edad	Sexo	km/año (en miles)	Uso de Dispositivos (IVIS)				
			Navegador	Teléfono	Radio	¿Otros?	Cuáles
45	H	>30	Sí	Sí	Sí	Frecuent.	CD
43	H	15-30	No	Frecuent.	Frecuent.	No	-
45	M	5-15	Sí	No	Sí	No	-
44	M	<5	No	No	Frecuent.	No	-
36	H	15-30	No	No	Sí	No	-

2.5.2. Vehículo e instrumentación

El vehículo ARGOS empleado en el proyecto piloto español es un vehículo experimental de segunda generación. La base de este vehículo experimental fue un monovolumen, modelo Seat Alhambra, sobre el que aparentemente, visto desde el exterior, apenas se notaba nada diferente de un modelo estándar. Sólo tres sensores experimentales eran apreciables sobre la carrocería del vehículo: dos en los laterales y uno en la parrilla frontal (Figura 2-2.a).



El interior del vehículo, sin embargo, presentaba un aspecto muy aparatoso. Entre otros dispositivos, ordenadores, pantallas y hardware de todo tipo eran claramente visibles desde el exterior del vehículo (Figura 2-2.b). Los responsables del experimento optaron por tintar las lunas traseras del vehículo para reducir la atención de curiosos y evitar acciones vandálicas. La ubicación de los dispositivos de registro de datos obligó incluso a modificar el aspecto original del vehículo. Así, una pantalla plana situada en la parte delantera del vehículo obligó a modificar el salpicadero del vehículo.



(a)



(b)

Figura 2-2: (a) Imagen exterior e (b) interior del vehículo experimental (ARGOS) empleado en el proyecto piloto español. Fuente: Valero-Mora et al., 2010.

Los dispositivos de registro de datos instalados en el vehículo son clasificados en cinco grandes categorías de sistemas: (a) para el control y adquisición de la información -SCA-, (b) para el almacenamiento de la información -SDA-, (c) para el almacenamiento y gestión del video -SAGI-, (d) para la detección de la posición lateral -SPL- y (e) para la medición de distancias -IBEO-. Una breve revisión de las medidas e indicadores obtenidos a partir de estos dispositivos se expone a continuación.

2.5.2.1. Indicadores y medidas

Los parámetros medidos en el proyecto piloto español pueden ser agrupados en diferentes categorías: (a) dinámica del coche, (b) interacción vehículo-conductor, (c) confort del conductor, (d) indicadores del salpicadero, (e) condiciones ambientales, (f) datos del conductor e (g) imágenes video. A continuación se exponen los principales parámetros medidos en cada una de las categorías (Tabla 2-5):

(a) Parámetros relativos a la dinámica del vehículo, entre los cuales destacamos:

- La distancia recorrida en cada trayecto, medida en cm.
- La posición lateral del vehículo [cm], determinada en tiempo real a partir de imágenes de video.
- La distancia frontal respecto a otros vehículos [cm]. Esta medida se determina empleando un dispositivo de cálculo de distancias denominado *ALASCA (Automotive LAsErSCAnner)*. Este dispositivo permite determinar la distancia entre un sensor y un punto cualquiera en el espacio. El sensor empleado en el dispositivo, situado en la parte frontal del vehículo, hace un barrido continuo de un amplio sector empleando un haz de luz láser pulsada. Estos pulsos pueden ser reflejados por los objetos cercanos. El registro de la diferencia temporal entre la emisión y recepción de un mismo pulso láser permite determinar la distancia a la que un objeto cualquiera se encuentra. El sistema permite además conocer la dirección de cada objeto a partir de la posición angular de un mecanismo interno de espejo rotante y el ángulo de barrido al que el pulso láser es emitido. El funcionamiento de este dispositivo es muy similar al de los sistemas *LiDAR* empleados en diversos campos de la ingeniería civil (Balsa-Barreiro y Lerma, 2006).

El dispositivo *ALASCA* empleado permite determinar la distancia absoluta y el ángulo del elemento en relación al propio sensor, valores que combinados permiten obtener las distancias reales. Según las instrucciones del fabricante, el sensor puede calcular las distancias a los tres elementos más cercanos situados en el área frontal del vehículo. La tolerancia o distancia máxima registrada por el sensor es de 282 metros. La determinación de las distancias frontales, sobre todo las de los objetos más próximos,



constituye un parámetro claro de incidentes críticos durante la conducción. Los valores más bajos observados en el proyecto piloto español mientras el coche estaba en movimiento fueron de 1,5 metros.

- La distancia lateral [cm]. Permite medir la distancia respecto a un objeto que se mueve en paralelo. Según las instrucciones del fabricante, se establece un rango de distancias de medida de entre uno y seis metros.
- Determinación de las componentes intrínsecas de la aceleración del vehículo [10^{-3}m/s^2], aceleración normal $\overline{(a_N)}$ y tangencial $\overline{(a_T)}$, a partir de las cuales es posible estimar el módulo del valor de aceleración en cada instante.

(b) Interacción vehículo-conductor

Dentro de este grupo se distinguen un conjunto de medidas relacionadas con el control del vehículo entre las cuales destacamos el ángulo y la velocidad de rotación del volante, la posición del pedal del acelerador y de embrague, la fuerza de frenada y la posición del freno de mano, la frecuencia de giro del motor en revoluciones por minuto, la posición de la palanca de marchas. Además de este conjunto de medidas se incluyen dentro de este mismo grupo aquellas relacionadas con el uso de señales y luces durante la conducción. Ejemplos concretos de este tipo de medidas sería la activación de las luces intermitentes, el claxon, las luces y faros antiniebla, la regulación de las luces o el uso de señales luminosas a otros conductores.

Las medidas más importantes son las relacionadas con la fuerza de frenada y la posición del volante. El ángulo de rotación del volante permite medir el control lateral del vehículo mientras que su velocidad de rotación, junto a la fuerza de frenada aplicada, permiten detectar maniobras anormales y repentinas. La frecuencia de giro del motor permite evaluar diferentes estilos de conducción en función de sus niveles de consumo de combustible. Esta medida debe ser contextualizada dentro de un escenario concreto de conducción en el que se tenga en cuenta el conductor, el tipo de vía, el estado del tráfico, etc.

(c) Confort del conductor

Dentro de este grupo se engloban todos aquellos indicadores que no están directamente relacionados con el control del vehículo. Se incluyen entre otras medidas el uso de los elevavinas, las luces internas, el control del cierre centralizado del vehículo, la regulación de la ventana térmica, el uso del dispositivo de asistencia de aparcamiento.

(d) Indicadores del salpicadero

Dentro de este grupo se incluyen una serie de medidas que son habitualmente monitorizadas en el salpicadero de cualquier vehículo estándar. Entre otras se incluyen indicadores de información y advertencia de la temperatura del aceite, del agua, del líquido de frenos y del nivel de combustible. Se incluyen además indicadores de activación de sistemas como el ABS, el airbag, el ESP.

(e) Condiciones ambientales

Dentro de este grupo se incluyen una serie de indicadores relativos a medidas de luminosidad ambiental, temperatura en el exterior e interior del vehículo, nivel de ruido interior, etc.

(f) Datos del conductor

Entre otros dispositivos, el vehículo cuenta con un sistema de seguimiento ocular que permite medir el diámetro del ojo y conocer las coordenadas a las que el conductor fija su visión. Este sistema toma una imagen del ojo del conductor a una distancia de entre medio metro y un metro, determinando el centro de la pupila y de las córneas. El ojo se ilumina mediante dos luces infrarrojas que operan en una longitud de onda de los 880 nm (10^{-9} m), muy próxima a la región del espectro visible (entre los 380 y los 780 nm).

(g) Grabación de video

El vehículo ARGOS empleado en el experimento español contaba con un total de siete cámaras, cuatro de ellas ubicadas en posiciones interiores (cámaras 1, 2, 3 y 4) y tres en

exteriores (cámaras 5, 6 y 7). La posición de las cámaras y sus campos de visión (FOV) aproximados son representados en la Figura 2-3.b:

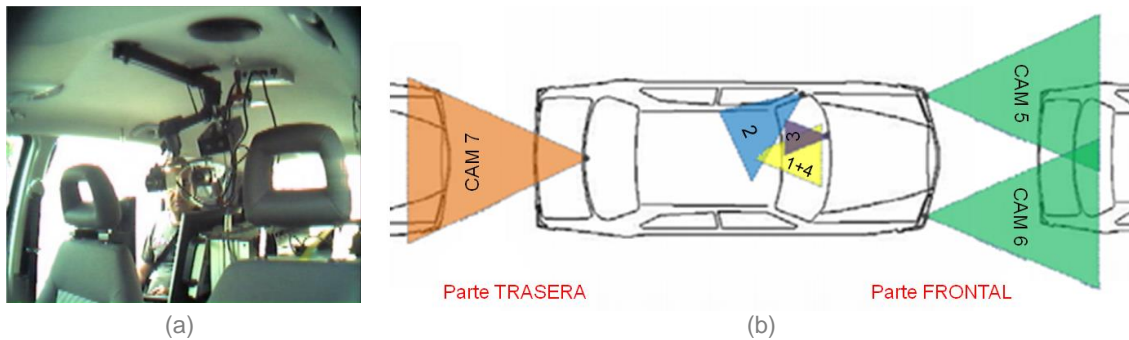


Figura 2-3: (a) Imagen de la posición real de las cámaras 1 y 4 dentro del vehículo experimental. (b) Posición y campos de visión (FOV) de las cámaras de video empleadas en el vehículo ARGOS. Fuente: Valero-Mora et al., 2010.

La cámara 1 se centraba en la vista externa desde el interior del coche. Esta cámara estaba situada aproximadamente sobre el hombro del conductor y aportaba una visión aproximada de lo que el conductor veía mientras conducía. La cámara 2 apuntaba al interior del vehículo y se centraba en la cara del conductor. Las cámaras 3 y 4 estaban empleadas para el seguimiento ocular del sujeto. La cámara 3 apuntaba al ojo derecho del conductor, mientras que la cámara 4 integraba la posición del ojo con una perspectiva del escenario tanto externo como interno del vehículo. Estas cámaras debían ser ajustadas y calibradas a la altura del conductor para poder llevar a cabo un estudio óptimo.

Las cámaras 5 y 6 se ubicaban en la parte delantera del vehículo e iban incrustadas en las ranuras de los faros antiniebla. Cubrían la mayor parte de la vista frontal del vehículo y su campo de visión presentaba un solape parcial. Por último, la cámara 7 se localizaba en la parte trasera del vehículo. Para cubrir el máximo campo de visión empleaba una lente de tipo *ojo de pez* que distorsionaba considerablemente la visión de los lados.

Tabla 2-5: Indicadores y medidas recogidas por el vehículo ARGOS en el proyecto piloto español. Fuente: García et al. (2008).

Tipo	Código	Descripción	Frec. [Hz]	Unidad SI	Rango	Resolución	Tipo datos	Tipo señal	
Dinámica del coche	Long	Longitud	1	grados decim.	[-10,5]	10 ⁻⁴ grad.	int32	Sensor GPS	
	Lat	Latitud	1	grados decim.	[-35,45]	10 ⁻⁴ grad.	int32	Sensor GPS	
	Alt	Altitud	1	metros [m]	[-35,45]	10 ⁻⁴ m	uint16	Sensor GPS	
	DisR	Distancia recorrida	0,5	cm [10 ⁻² m]	[0,4294967295]	10 ⁻² m	uint32	Sensor especif.	
	PosII1	Posición lateral izquierda 1	0,04	cm [10 ⁻² m]	[-2000,2000]	0,1 m	int16	Sensor especif.	
	PosII2	Posición lateral izquierda 2	0,04	cm [10 ⁻² m]	[-2000,2000]	0,1 m	int16	Sensor especif.	
	PosII3	Posición lateral izquierda 3	0,04	cm [10 ⁻² m]	[-2000,2000]	0,1 m	int16	Sensor especif.	
	PosID1	Posición lateral derecha 1	0,04	cm [10 ⁻² m]	[-2000,2000]	0,1 m	int16	Sensor especif.	
	PosID2	Posición lateral derecha 2	0,04	cm [10 ⁻² m]	[-2000,2000]	0,1 m	int16	Sensor especif.	
	PosID3	Posición lateral derecha 3	0,04	cm [10 ⁻² m]	[-2000,2000]	0,1 m	int16	Sensor especif.	
	DisF	(1)_x	Distancia frontal 1	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
		(1)_y	Distancia frontal 1	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
		(1)_z	Distancia frontal 1	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
		(2)_x	Distancia frontal 2	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
		(2)_y	Distancia frontal 2	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
		(2)_z	Distancia frontal 2	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
		(3)_x	Distancia frontal 3	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
		(3)_y	Distancia frontal 3	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
		(3)_z	Distancia frontal 3	0,01	metros [m]	[0,282]	7·10 ⁻² m	float	IBEO
	DisID	Dist. lateral derecha	0,01	cm [10 ⁻² m]	[100,600]	10 ⁻² m	uint16	Sensor especif.	
DisII	Dist lateral izquierda	0,01	cm [10 ⁻² m]	[100,600]	10 ⁻² m	uint16	Sensor especif.		
Velocim	Veloc. adquirida	0,01	km/h	[0,200]	1 km/h	uint8	Buses		
Velo	Veloc. instantánea	0,01	km/h	[0,200]	1 km/h	uint8	Calculada		
AcelL	Acel. longitud	0,01	mG	[-3000,3000]	10 mG	uint8	Sensor especif.		
AcelT	Acel. transversal	0,01	mG	[-3000,3000]	10 mG	uint8	Sensor especif.		
AcelV	Acel. vertical	0,01	mG	[-3000,3000]	10 mG	uint8	Sensor especif.		



Cont. (...)

Tipo	Código	Descripción	Frec. [Hz]	Unidad SI	Rango	Resolución	Tipo datos	Tipo señal	
Interacción vehículo-conductor	AnVol	Angulo de giro de volante	0,01	grados sexag.	[-1433,1433]	1°	uint16	Buses	
	VGVol	Velocidad de giro de volante	0,01	grados sexag/s	[-1433,1433]	1°/s	uint16	Buses	
	Pacel	Posición del acelerador	0,01	[%]	[0,100]	1%	uint8	Buses	
	Freno	Fuerza sobre el freno	0,01	newtons [N]	[0,1000]	1 N	uint8	Buses	
	Embrgue	Posición del embrague	0,01	[%]	[0,100]	1%	uint8	Buses	
	Fmano	Freno de mano	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	RPM	Velocidad del giro del motor	0,01	revol. min. [rpm]	[0,16256]	1 rpm	uint16	Buses	
	Cambio	Cambio	0,01	marcha	[0,7]	1	bit-3	Sensor especif.	
	lizo	Intermitente izquierdo	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit-1	Sensor especif.	
	ldcho	Intermitente derecho	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit-1	Sensor especif.	
	Claxon	Claxon	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	LPos	Estado de las luces	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-1	Buses	
	LCru	Luz crucera	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-1	Buses	
	LCarr	Luz carretera	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-1	Buses	
	Parámetros de confort	Aniebla	Luz antiniebla posterior	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-1	Buses
RFaros		Regulador de altura de faros	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
Rafaga		Actuación sobre la palanca de ráfagas	0,2	act./desact.	[0,1]	2	bit	Buses	
ElevelC		Elevelunas	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
BqAlzac		Bloqueo elevelunas	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
CierreC		Cierre centralizado	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
LunetA		Luneta térmica	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
AAparc		Asistencia aparcamiento	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
LuzImp		Luz imperial	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
LuzCort		Luz cortesía	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
PuertC		Puertas abiertas	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
TAgua		Temperatura Agua	0,2	grados [°C]	[0,200]	1 °C	uint8	Buses	
TAceite		Temperatura Aceite	0,2	grados [°C]	[0,150]	1 °C	uint8	Buses	
NCombust		Nivel de Combustible	0,02	litros	[0,126]	1 litro	uint8	Buses	
Indicadores del salpicadero		PAceite	Indicador de presión de aceite	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses
	ITAgua	Indicador de temperatura de agua	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	IComb	Indicador de combustible bajo	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	ILFren	Indicador del líquido de frenos	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	ABS	Indicador de activación de ABS	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	ESP	Indicador de activación del ESP	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	Airb	Indicador de activación de Airbag	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	Cintu	Testigo del cinturón de seguridad	0,02	act./desact.	[0,1]	1	bit	Buses	
	Condiciones ambientales	Lumin	Luminosidad ambiental	0,02	lux	[0,120000]	468,75 lux	uint8	Sensor especif.
		TExt	Temperatura Exterior	0,02	grados [°C]	[0,100]	1 °C	uint8	Buses
TInt		Temperatura Interior	0,02	grados [°C]	[-20,50]	1 °C	uint8	Buses	
Ruido		Ruido en el interior	0,02	decibelios [dB]	[0,120]	1 dB	uint8	Sensor especif.	
PupX		Conducta visual	0,02	-	-	-	tipo	Imagen	
PupY		Conducta visual	0,02	-	-	-	tipo	Imagen	
DPupil		Conducta visual	0,02	-	-	-	tipo	Imagen	
Bal		Paso por baliza	0,04	act./desact.	[0,1]	1	bit	Imagen	
PVA		Pulsador Amarillo (conductor)	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-N	Sensor especif.	
PVV		Pulsador verde (conductor)	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-N	Sensor especif.	
PVA		Pulsador azul (conductor)	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-N	Sensor especif.	
PVR		Pulsador rojo (conductor)	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-N	Sensor especif.	
PACR		Pulsador AC_rojo (acompañante)	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-N	Sensor especif.	
PACV	Pulsador AC_verde (acompañante)	0,2	act./desact.	[0,1]	1	bit-N	Sensor especif.		
Otros	COMM	Comentario	asíncrono	-	-	-	alfanumérico	Registrada	



2.5.2.2. Problemas en la recogida de datos

Los dispositivos de adquisición de datos empleados en el proyecto piloto español experimentaron una serie de problemas. Desde un punto de vista físico relacionado con la propia forma y ubicación de los dispositivos, el grupo de investigación responsable constató como los dispositivos que iban sobre la propia carrocería del vehículo experimental, a pesar de no ser muy voluminosos, eran claramente visibles para los conductores de otros vehículos. Esta circunstancia pudo haber influido y alterado el comportamiento de sus conductores en su paso cercano al vehículo ARGOS. De la misma forma, la aparatosidad de todos los dispositivos ubicados dentro del propio vehículo experimental condicionó, sin ninguna duda, el comportamiento al volante de los participantes en el experimento. A esto contribuía no solo el impacto visual de los propios dispositivos, sino también el hecho de que su funcionamiento era claramente perceptible al oído.

Desde el punto de vista del registro de los datos, algunos dispositivos presentaron ciertos errores. El sensor de posición lateral falló en numerosas ocasiones, debido a un error continuado en la detección de las marcas de carretera. El sensor de distancia frontal fluctuó de forma habitual entre valores medidos y no medidos (equivalentes al valor -100), siendo necesario aplicar un filtrado previo al análisis de los datos para evitar la influencia estadística de los valores no medidos.

El sensor de distancia lateral constató un error frecuente de medida que le impidió registrar valores inferiores a 1,6 m, a pesar de que en pruebas en laboratorio se llegó a acercar el vehículo a objetos situados a distancias inferiores y de que la tolerancia del dispositivo era del orden del metro. Otra crítica se relacionó con la posición de estos dispositivos en el vehículo experimental, acoplados en las puertas traseras. De esta forma, la medida obtenida no cubría de ninguna forma las distancias frontales-laterales, lo que generaba una amplia área ciega. Esto suponía una limitación importante para estudios de giros o de cambios de carril.

El dispositivo GPS presentó un fallo continuado, lo que conllevó a una ausencia generalizada de datos de posicionamiento para todo el experimento. Tampoco fue posible disponer de datos audio del interior del vehículo a pesar de ser grabados, debido a un problema de *códecs* en el dispositivo de registro.

2.5.3. Procesamiento de datos

Las bases de datos obtenidos en el experimento requirieron un almacenamiento total de unos cinco TB. Se recurrió a un servidor tipo QNAP de fácil acceso desde internet, el cual permitía incrementar la capacidad de almacenamiento e incorporar medidas de protección de datos.

La preparación de los datos se llevó a cabo de dos formas diferentes en función de si eran de tipo alfanumérico o video. Aunque el sistema implementado permitía en teoría una exportación de datos alfanuméricos a ficheros de tipo *ASCII*, en la realidad no fue posible, siendo necesario programar nuevas rutinas para organizar los datos registrados en formatos de archivos válidos para programas software de tipo genérico.

El tamaño de los bases de datos fue muy considerable, siendo registrados más de 13 millones de registros (filas). Esto hizo imposible la ejecución de algunas operaciones de análisis básicas como, por ejemplo, la representación gráfica de los datos. Fue necesario programar estrategias de reducción de los datos o bien llevar a cabo selecciones para poder llevar a cabo operaciones básicas de manipulación y edición de datos. Aún así, era frecuente la aparición de problemas durante la fase de procesamiento de datos debido a la limitación de memoria RAM de los equipos y a las altas exigencias de algunos programas de software empleados.

Fue necesario aplicar un proceso posterior de filtrado previo a la aplicación de análisis estadísticos con objeto de eliminar aquellos datos erróneos. La visualización de horas de video era necesaria para la detección de valores anormales o ausencia de datos. La presencia de datos erróneos se debió al malfuncionamiento puntual de algún dispositivo y a las limitaciones técnicas de los propios sensores.

Respecto a la visualización de los videos, se implementó un programa software propio con una interfaz simple y muy clara que permitía una visualización integrada de los datos alfanuméricos y videos. La sincronización de los dispositivos de captura de datos permitió una coincidencia absoluta entre los tiempos de registro de datos de los diferentes sensores. Esto suponía un valor añadido para el análisis de los datos y la detección de errores gracias a la visualización integrada y simultánea de los datos



alfanuméricos y de las imágenes grabadas. Sin embargo, el software presentaba algunas limitaciones en su funcionamiento. Entre otras, no era posible ir a un punto específico del video sin volver pasar por el inicio, ni saltar adelante o atrás la visualización del video a una velocidad superior a la de visualización. Esto imposibilitaba la repetición de secuencias específicas. Además, el reproductor dejaba de funcionar correctamente cada cierto tiempo, siendo necesario reiniciarlo con relativa frecuencia.

2.5.4. Identificación de incidentes

En principio se pensó la determinación de unos umbrales sobre algunos de los parámetros alfanuméricos para identificar determinados tipos de incidentes en carretera. Para ello se implementó un método propio siguiendo la metodología de trabajo de algunos estudios publicados dentro de *PROLOGUE* como el de Groenewoud *et al.* (2010) y de algunos estudios científicos relevantes, como el de Klauer *et al.* (2006). La fijación de unos umbrales óptimos presenta una gran complejidad y dificultad. Unos umbrales demasiado altos incrementan la frecuencia de *falsos negativos*, dejando de ser detectados muchos incidentes. Por su parte, la definición de unos valores de umbral demasiado bajos incrementa la frecuencia de *falsos positivos*, determinando como incidentes eventos que en realidad no lo son. Por esta razón, la fijación de estos umbrales debe obedecer a un equilibrio muy complejo. Los investigadores del proyecto piloto español determinaron estos umbrales a partir de análisis estadísticos que fueron posteriormente corroborados en una serie de tests prácticos de conducción. Algunos umbrales fueron fijados en función de la propia experiencia práctica. El valor umbral de la velocidad de rotación de volante fue fijado en unos 500 grados por segundo, la fuerza de frenada en unos 70 N mientras que las distancias frontales y laterales en 1,5 m. El valor umbral de fuerza de frenada se fijó como considerablemente superior al propio de un coche estándar del mismo tamaño, debido a que el equipamiento y los dispositivos portados por el vehículo experimental incrementaban considerablemente su peso.

Sin embargo, la definición y aplicación de umbrales no fue totalmente satisfactoria. Un conjunto muy numeroso de incidentes eran, en su mayoría, falsas alarmas. Esto sucedía, por ejemplo, cuando el vehículo tenía que parar o arrancar en semáforos, siendo registradas variaciones repentinas de la velocidad del vehículo. Por otro lado, algunos incidentes reales visualizados en los videos no pudieron ser localizados mediante los umbrales numéricos. Entre estos incidentes destacaban cambios de carril involuntarios y maniobras ilegales por parte del conductor. Estas situaciones eran difíciles de localizar a través de umbrales ya que el conductor no variaba su comportamiento al volante al no tener conciencia del incidente o al no verse forzado a realizar ninguna acción extrema.

Dada la dificultad de fijación de unos umbrales óptimos para la identificación de incidentes a partir de los datos alfanuméricos, fue necesaria la visualización de horas, un proceso muy laborioso, costoso en tiempo y muy dependiente de la destreza del operador. El tiempo de revisión de los videos fue aproximadamente 2,5 veces el tiempo de grabación, aunque esta estimación dependía de varios factores como la calidad del video, el número de situaciones críticas y de incidentes, etc. (Valero-Mora *et al.*, 2010).

Al igual que en la base de datos alfanumérica, los videos presentaban numerosos errores debido a fallos de funcionamiento de algunas cámaras durante pequeños y/o largos intervalos de tiempo. La propia disposición de las cámaras durante el experimento provocó que, ante el fallo de algunas de ellas, no siempre se pudiera disponer de imágenes de apoyo. Un ejemplo de una disposición poco óptima de las cámaras durante el experimento se daba en la parte frontal-lateral del vehículo, donde en teoría debían registrarse las interacciones del vehículo con otros usuarios de la vía y donde se existía un gran campo de visión vacío (Figura 2-4.a). Los propios investigadores responsables, tras concluir el experimento y analizar los videos, propusieron una reubicación de las cámaras (Figura 2-4.b), con diferencias notables sobre la posición original de las mismas (Figura 2-3.b).

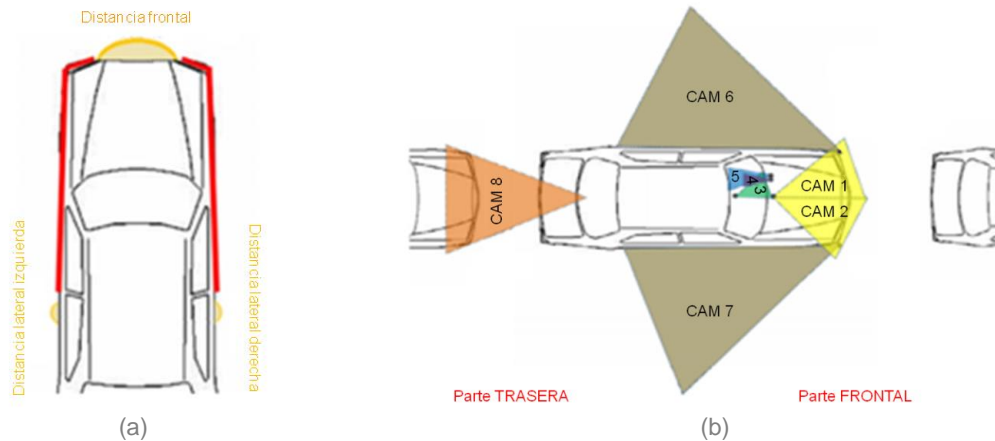


Figura 2-4: (a) En rojo se destacan las áreas sin visión (ciegas) del vehículo ARGOS durante el experimento con la ubicación de las cámaras real. (b) Propuesta *a posteriori* de reubicación de las cámaras por parte del INTRAS. Fuente: Valero-Mora *et al.*, 2010.

2.5.5. Aspectos de interés

La experiencia del proyecto piloto español permitió determinar algunos aspectos relevantes ajenos a la parte experimental que presentan gran interés para la puesta en marcha de futuros proyectos de conducción naturalista. Desde una perspectiva ética y legal, aspectos relativos a la privacidad y seguridad de los participantes requirieron de una especial atención. En cuanto a la privacidad de los participantes, el experimento contó con el asesoramiento de un experto legal de la *Universidad de Valencia* (UV) que elaboró un contrato de derechos de imagen que los participantes en el experimento debían firmar. En cuanto a la seguridad de los participantes, el *Centro de Seguridad en el Trabajo* de la *Universidad de Valencia* (UV) redactó un informe de consentimiento que los participantes debían firmar. En dicho informe se hacía una descripción del proyecto, de la metodología experimental, los riesgos e incluso de las condiciones de abandono por parte de los participantes. En este mismo punto fue necesario asegurar tanto el propio vehículo como los dispositivos de registro de datos que iban a bordo.

2.5.6. Resultados obtenidos

Más de 1.000 km y unas 40 horas de conducción fueron recogidas en el proyecto piloto español de conducción naturalista. Un resumen de algunos resultados relevantes obtenidos en el proyecto piloto español se expone en la *Tabla 2-6*. La revisión de los valores medios refleja una velocidad global considerablemente baja (27,9 km/h), debido a que una gran parte del experimento transcurre en vías urbanas. En esta tabla se representa la distancia recorrida, el tiempo invertido y la velocidad media de cada uno de los participantes. En la última columna se estima la relación entre el consumo de combustible y la distancia recorrida, lo que constituye un buen estimador del modelo de conducción de cada participante y de su impacto ambiental. Son observadas algunas diferencias considerables entre los respectivos conductores.

Tabla 2-6: Resultados obtenidos en el experimento para cada participante. Fuente: Valero-Mora *et al.*, 2010.

Conductor	Dist. recorrida[km]	Veloc. media[km/h]	Tiempo [min]	Combustible [litros]	Ratio comb./dist [litros/km]
1	216	30	434	31	0,14
2	162	24	411	38	0,23
3	248	33	451	39	0,15
4	195	28	413	42	0,21
5	220	25	536	32	0,14
Media	208,3	27,9	448,8	36,4	0,17



Respecto al número de incidentes, expondremos los resultados siguiendo la clasificación y definición de incidentes propuesta por Dingus *et al.* (2006) y Hickman *et al.* (2005), adaptada posteriormente el VTTI. Fueron observados un total de 16 incidentes, todos ellos de muy baja relevancia, no siendo observado ningún accidente o casi-accidente. Los resultados detallados son expuestos en la Tabla 2-7.

Tabla 2-7: Incidentes registrados durante el experimento. Fuente: Valero-Mora *et al.*, 2010.

Tipo de incidente	Frecuencia
Accidente	0
Casi-accidente	0
Accidente conflicto relevante	6
Cambio de carril involuntario	1
Maniobra ilegal	9
Total	16

La relación entre el número de incidentes registrados y el tiempo de grabación muestra un ratio de un incidente registrado cada 2,5 horas. Del total de incidentes, la mayor parte se han producido en interacciones con peatones en áreas urbanas (10), y sobre todo a través de maniobras ilegales (8). Dos de los conductores, el cuarto y quinto, no han registrado ningún incidente, mientras que los tres restantes presentan un balance equilibrado en cuanto a número de incidentes (Tabla 2-8).

Tabla 2-8: Tipos de incidentes registrados durante el experimento. Fuente: Valero-Mora *et al.*, 2010.

Tipo de incidente	Conductor					Total
	1	2	3	4	5	
Accidente conflicto relevante	2	4	0	0	0	6
Cambio de carril involuntario	1	0	0	0	0	1
Maniobra ilegal	2	2	5	0	0	9
Total	5	6	5	0	0	16

Como uno de los objetivos principales de investigación de este proyecto era evaluar si el uso de sistemas IVIS influía sobre la conducción fueron cuantificados los incidentes teniendo en cuenta si el participante disponía de un dispositivo de este tipo, en este caso, un navegador. Los resultados obtenidos se exponen en la Tabla 2-9:

Tabla 2-9: Incidentes registrados durante el experimento teniendo en cuenta el uso del navegador. Fuente: Valero-Mora *et al.*, 2010.

Conductor	Uso de IVIS (por días)		Total
	No	Sí	
1	5	0	5
2	2	4	6
3	4	1	5
Total	11	5	16

Una revisión de los resultados expuestos parece contrarrestar la hipótesis propuesta inicialmente según la cual el uso de sistemas IVIS aumenta la distracción del conductor y el número de incidentes en carretera. Los resultados obtenidos muestran como en 11 de los 16 incidentes (68,7%) tuvieron lugar en días en los que los conductores no llevaban operativo el navegador. Además, la revisión del video de los días en los que se produjeron los cinco incidentes restantes, en los que sí disponían de navegador, demuestra que no hubo ninguna relación entre el incidente y el uso de este dispositivo. De hecho, todos los participantes detuvieron el vehículo para introducir las direcciones en el navegador, mostrando así una actitud muy precavida al volante.



2.5.7. Discusión

Varios estudios científicos han evaluado si el uso de sistemas IVIS influye sobre el comportamiento al volante de los conductores. Yordanov y Hussein (2010) estudiaron la interacción de varios conductores con dispositivos IVIS, determinando tres niveles de interacción: (a) manual, (b) audible-visible y (c) sólo audible. El experimento fue llevado a cabo en un simulador y en él participaron 15 conductores. Los resultados mostraron que la interacción manual con el dispositivo IVIS era la que causaba mayor estrés, frustración y peores resultados en los parámetros medidos. Xie *et al.* (2013) analizaron los efectos del uso de sistemas IVIS sobre el conductor. Para ello cambiaron la posición de un navegador dentro del vehículo y permitieron su uso alterno con y sin voz según el día. Una parte del experimento se llevó a cabo en un simulador, en el que se observó a los 12 conductores participantes ejecutando una serie de tareas secundarias de tipo manual, visual y cognitivo. Los resultados obtenidos mostraron como algunas de las posiciones del navegador en el vehículo resultaban más cómodas y causaban menor carga mental para los conductores.

La mayor parte de los estudios sobre este tema se basan en métodos de observación simulada, en el que las condiciones de conducción no son las reales. En los estudios simulados se llevan a cabo experimentos controlados con un bajo nivel de validez externa de sus resultados, mientras que en los estudios naturalísticos *puros* no se lleva a cabo ningún control de las variables externas y los resultados presentan altos niveles de validez externa (McLaughling *et al.*, 2009; Backer-Grøndahl *et al.*, 2009). En este sentido, algunos trabajos como el de Wang *et al.* (2010) evaluaron la validez real de los resultados obtenidos con simulador en un estudio sobre el uso de sistemas IVIS en conducción.

La experimentación en conducción naturalista permite analizar el tipo de interacción del conductor con dispositivos IVIS en condiciones reales de conducción. Sin embargo, la aplicación del método de experimentación naturalista en este tipo estudios es muy reciente y no está muy desarrollada. Un estudio de este tipo es el propuesto por Huth *et al.* (2012), en el que analizó el uso de teléfonos móviles al volante empleando el método de experimentación de la conducción naturalista.

El proyecto piloto español de conducción naturalista enmarcado dentro de *PROLOGUE* se centra en el estudio de la influencia de los sistemas IVIS sobre la conducción. La hipótesis *a priori* estima que el uso de estos dispositivos puede incrementar el número de distracciones al volante. Sin embargo, la revisión de los resultados del proyecto piloto español pone de manifiesto que no existe una relación clara entre el uso de IVIS y el aumento del grado de distracción de los conductores, no siendo observable un incremento del número de incidentes. Sin embargo, hay muchas matizaciones que se pueden hacer al experimento tal como fue planteado. Una de ellas es que la muestra de datos fue muy reducida, lo mismo que la duración del experimento. De esta forma, los resultados obtenidos en este experimento deben de ser situados dentro de un determinado contexto.

No existe, en principio, una relación directa entre la aparición de un determinado tipo de incidentes y las medidas obtenidas en ciertos indicadores. Por esta razón, el uso del video es una herramienta necesaria para la valoración e interpretación de incidentes. La relación y uso de datos numéricos y video debe ser en términos complementarios, siendo empleadas ambas fuentes de información de una forma simultánea, lo que obliga a una óptima sincronización de los tiempos de captura de información con los diferentes dispositivos.

En cuanto a la forma, una vez revisado los resultados del experimento, deben plantearse algunas cuestiones. Respecto a los dispositivos de recogida de datos, el nivel de agregación temporal de los datos obtenidos no siempre es el más óptimo. La frecuencia temporal con la que se registraron muchas medidas fue muy alta (10^{-2} s), lo que llevó a una saturación de datos que dificultó el análisis posterior. Estos niveles de frecuencias de datos solo presentan interés en momentos muy concretos. Por esta razón debe plantearse un estudio previo al experimento acerca de los dispositivos de recogida de datos más óptimos con objeto de llevar a cabo una captura de datos más eficiente. Respecto al video debe plantearse una nueva disposición de las cámaras dentro del vehículo que permita reducir, o evitar en la medida de lo posible, la presencia de campos de visión reducidos o anulados sobre todo en la parte frontal-lateral. La propuesta de los investigadores del INTRAS es la de incorporar una segunda cámara a la vista escenario, incorporar dos cámaras laterales y retrasar ligeramente la ubicación de las cámaras escenario existentes (cámaras 1 y 2). Este cambio de ubicación de estas últimas cámaras se haría sobre un pequeño carril sobre el que se podría calibrar la posición final antes del experimento, siendo posible de esta manera evitar una excesiva insolación que pudiera limitar la calidad de las imágenes obtenidas (Figura 2-3.b).



Actualmente es imposible plantear un proyecto *puro* de conducción naturalista. El experimento español empleó un vehículo altamente instrumentado (HIC) que permitió monitorizar un gran número de parámetros. Sin embargo el proyecto presentó ciertas deficiencias desde el punto de vista experimental. El hecho de que los conductores emplearan un vehículo que no era el suyo, cuya instrumentación era visible y audible, que su ruta estuviera parcialmente planificada y que además recibieran una serie de instrucciones iniciales por parte de uno de los investigadores pudo condicionar parcialmente los resultados del experimento. Se explica así que todos los conductores mostraran una actitud tan precavida en el momento de usar el navegador o el nerviosismo del tercer participante, que sufrió cinco incidentes en su primer día y ninguno el resto de los días. Esto se justifica probablemente en el desconocimiento y la falta de familiaridad con el vehículo experimental y las condiciones del experimento.

CONCLUSIONES

La conducción naturalista supera muchos de los inconvenientes de los métodos de experimentación tradicionalmente empleados en estudios de seguridad vial y flujos de tráfico. Esta metodología de experimentación permite la observación directa y real de un cierto número de conductores en ambientes reales de conducción y durante largos períodos temporales. De esta forma, el método de conducción naturalista permite generar más información y de más calidad. Sin embargo, este modelo de experimentación presenta algunas desventajas o inconvenientes. Entre otras, el gran volumen de datos generado, la ausencia de metodologías de procesamiento de los datos, las habituales pérdidas de datos, etc.

Se presenta aquí una amplia revisión de los temas de investigación que durante los últimos años emplean este método de experimentación. Las amplias perspectivas de estudio y el grado de innovación aportado han llevado a la puesta en marcha de varios proyectos a gran escala, siendo los más ambiciosos el experimento de los *100 coches* y *SHRP-2* en EEUU, y de *PROLOGUE* en Europa.

El proyecto *PROLOGUE* todavía está en fase de desarrollo. Hasta el momento se han llevado a cabo varios proyectos piloto a pequeña escala en diferentes países. En España se ha puesto en marcha uno de ellos, en un experimento llevado a cabo en la ciudad de Valencia y sus proximidades. El objetivo de investigación planteado era analizar si el uso de IVIS al volante inducía a distracciones. La experiencia del proyecto español no pudo demostrar una relación concluyente, aunque sí sirvió para proponer algunas recomendaciones. En este capítulo se presentan los aspectos más relevantes de este proyecto.



CAP. 3

SISTEMAS GNSS



Capítulo 3

RESUMEN	85
3.1. EL POSICIONAMIENTO ESPACIAL	85
3.2. SISTEMAS GNSS.....	86
3.2.1. Definiciones previas	86
3.2.2. Introducción.....	86
3.2.3. Principios teóricos	91
3.2.3.1. Cálculo de la posición	93
3.2.3.2. Cálculo de la velocidad	95
3.2.3.3. Cálculo del tiempo.....	96
3.2.4. Observables GNSS	96
3.2.5. Arquitectura de los sistemas GNSS	97
3.2.5.1. Segmento espacial.....	98
3.2.5.2. Segmento de control	99
3.2.5.3. Segmento usuario	100
3.2.6. Fuentes de error.....	102
3.3. EL SISTEMA NAVSTAR-GPS	103
3.3.1. Arquitectura del sistema	104
3.3.1.1. Segmento especial.....	104
3.3.3.2. Segmento control	110
3.3.2. Códigos y señal GPS	113
3.3.2.1. Códigos C/A y P.....	113
3.3.2.2. Mensaje de navegación	115
3.3.2.3. Modulación de las señales	117
3.3.3. Servicios de posicionamiento	118
3.3.4. Servicios de degradación de la señal	120
3.3.5. Precisiones alcanzadas.....	121
3.4. SISTEMAS DE MEJORA Y AUMENTACIÓN	124
3.4.1. Sistema GPS Diferencial (DGPS)	126
3.4.2. Sistemas de aumentación basados en aeronaves (ABAS)	127
3.4.3. Sistemas de aumentación basados en tierra (GBAS)	128
3.4.4. Sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS).....	128
3.4.4.1. Sistema WAAS.....	130
3.4.4.2. Sistema EGNOS	131
3.4.4.3. Sistema MSAS	132
3.4.4.4. Sistema GAGAN	133
3.4.4.5. Otros sistemas SBAS.....	134
3.5. DISCUSIÓN	134
CONCLUSIONES	138



RESUMEN

Desde siempre, las distintas civilizaciones han intentado determinar de forma más o menos precisa su posicionamiento espacial, lo que les ha permitido mantener, desarrollar y expandir sus actividades económicas. A lo largo de la historia han sido planteados sistemas de posicionamiento que han permitido obtener distintos niveles de precisión y fiabilidad. Sin embargo, la mayor parte de ellos presentaban soluciones a pequeña o mediana escala.

Desde la segunda mitad del siglo XX se ha apostado, sobre todo, por la puesta en marcha de sistemas de posicionamiento satelitales, siendo los más importantes los que presentan cobertura global (GNSS). Estos sistemas permiten estimar con óptimos niveles de precisión y fiabilidad el posicionamiento de un determinado objeto en cualquier momento y/o lugar de la superficie terrestre. Sin embargo, presentan una serie de limitaciones que impiden el cumplimiento actual de algunos requerimientos de ciertos sectores, sobre todo los del campo de la aviación civil. Por esta razón se han propuesto soluciones complementadas como paso previo (y provisional) a una modernización y mejora de estos sistemas.

La estimación del posicionamiento mediante sistemas GNSS constituye la forma más frecuente de hacerlo, dados los óptimos niveles de precisión obtenidos y la posibilidad de acceder de forma pública y gratuita a la señal en cualquier condición, momento y/o lugar del mundo. Este capítulo propone una revisión de estos sistemas en sí y de los aspectos más importantes relativos a su funcionamiento.

3.1. EL POSICIONAMIENTO ESPACIAL

La determinación de la posición espacial del hombre y/o sus actividades ha supuesto desde siempre un reto para todas las sociedades históricas. Una estimación precisa del posicionamiento permite llevar a cabo desplazamientos en cualquier medio de transporte, lo que tradicionalmente ha repercutido en una mayor expansión comercial y cultural por parte de las distintas civilizaciones. Por esta razón el hombre ha desarrollado a lo largo de la historia diferentes *sistemas de posicionamiento* con objeto de estimar de forma precisa su localización sobre el espacio.

Los sistemas de posicionamiento pueden clasificarse en dos grandes grupos: (a) los denominados sistemas *dead reckoning* y (b) los *active beacon*. Los sistemas del primer tipo (*dead reckoning* o DR) determinan la posición de un determinado elemento considerando de forma continua tanto el rumbo que sigue como la distancia que recorre. La principal ventaja de los sistemas DR es que permiten un posicionamiento a un coste relativamente bajo, mientras que su principal inconveniente es que sus precisiones tienden a degradarse con el tiempo debido al *efecto deriva* del instrumento. Un ejemplo de este tipo de sistemas son los sistemas inerciales. Por su parte, los sistemas *active beacon* (AB) son aquellos que emplean radio frecuencias, fuentes de luz o ultrasónicas para transmitir el posicionamiento relativo entre un determinado elemento y un punto de referencia conocido denominado *baliza*. El principio de este sistema se basa en los conceptos de *triangulación y/o trilateración* mediante los cuales es posible estimar la posición de un determinado elemento en función de medidas de ángulos y/o distancias respectivamente. Las principales ventajas de los sistemas de este tipo son (a) su mayor eficiencia computacional al requerir una menor potencia de procesamiento y (b) la ausencia de errores derivados de fenómenos de deriva del instrumento. Entre sus inconvenientes destaca la necesidad de una mayor infraestructura *in situ*. Un ejemplo de sistemas de este tipo son los sistemas de balizas tanto terrestres como marítimas, aunque los sistemas *active beacon* más representativos son los denominados *sistemas de posicionamiento satelital* (SatNav).

Los sistemas *SatNav* son los que más se han desarrollado en los últimos años por ser los que mejor responden, y de forma más eficiente, a las necesidades tanto del mundo militar como civil. Estos sistemas aunque presentan una infraestructura compleja su funcionamiento es relativamente sencillo. Permiten obtener altos niveles de precisiones y ofrecen amplias coberturas a diferentes escalas espaciales, presentando alguno de ellos niveles de cobertura globales. La apuesta reciente por estos sistemas surge, en un primer momento, de las necesidades militares de varios países. Superada esta fase de tensión bélica, son las aplicaciones civiles el verdadero eje de desarrollo actual de estos sistemas. Dentro de las



aplicaciones civiles, es el sector de la aviación el que desde la década de 1980 apuesta de forma más decidida por el desarrollo a medio plazo de estos sistemas debido a algunas carencias de los sistemas tradicionalmente empleados que empiezan a verse desbordados a raíz del incremento continuado del tráfico aéreo. En los últimos años, la popularización de los navegadores y receptores de bajo coste junto al desarrollo informático son otros factores que contribuyen de forma determinante al desarrollo de estos sistemas de posicionamiento, y su difusión entre los ciudadanos de todo el mundo.

Los sistemas SatNav pueden clasificarse en función de varios factores, aunque la clasificación más habitual es en función de su grado de cobertura espacial. Los sistemas SatNav más importantes son los que presentan niveles de cobertura global (GNSS), los cuales permiten un posicionamiento en cualquier parte del globo. Una revisión de los aspectos más importantes relativos a los sistemas GNSS se presenta a continuación.

3.2. SISTEMAS GNSS

Una revisión general de los principales aspectos relativos a los sistemas GNSS y sus principios de funcionamiento se expone en los siguientes apartados:

3.2.1. Definiciones previas

- *Precisión* (o *nivel de precisión*). Se define como la diferencia estadística entre la medida estimada y el valor real. Cuando se trabaja con sistemas GNSS, estas diferencias estadísticas suelen expresarse para un determinado percentil (95% normalmente) o a partir del error medio cuadrático (RMSE).
- *Disponibilidad* (de la señal). Se refiere al porcentaje de tiempo que un receptor puede recibir señales del sistema
- *Continuidad* (de la señal). Se refiere al porcentaje de tiempo que el sistema funciona en condiciones óptimas.
- *Nivel de cobertura*. Superficie o volumen espacial en la que se obtiene la señal del sistema con el nivel de precisión esperado.
- *Integridad*. Estimador que expresa el nivel de confianza sobre la información suministrada por el sistema. Este concepto incluye la capacidad del sistema para proporcionar alertas (alarmas o advertencias) a los receptores en caso de fallos en la señal. El *tiempo de alerta* se refiere al intervalo de tiempo que transcurre desde la aparición de un fallo en la señal hasta que el mensaje del mismo es recibido por receptor. Cuando los niveles de error exceden los límites de alarma el sistema suministra *información engañosa* (MI) y una situación de *pérdida de integridad* (LOI).
- *Fiabilidad*. Capacidad del sistema para llevar a cabo sus funciones requeridas sobre un determinado intervalo de tiempo. La fiabilidad incluye a los conceptos de continuidad e integridad.

3.2.2. Introducción

Los GNSS (*Global Navigation Satellite System*) son los sistemas de posicionamiento satelital (SatNav) que presentan los más altos niveles de cobertura espacial. Este tipo de sistemas permiten determinar la localización precisa de un elemento concreto, además de aportar información de navegación para plataformas móviles tales como barcos, aeronaves y automóviles en cualquier lugar de la superficie terrestre o del espacio cercano. El principio teórico de funcionamiento de estos sistemas se basa en la medida precisa del intervalo de tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de la señal transmitida de forma simultánea por varios satélites.

Cualquiera de los sistemas GNSS actuales proporciona información precisa sobre posición y tiempo (cuatro dimensiones) de un determinado elemento localizado en cualquier parte del mundo, durante las 24 horas del día y en todas las condiciones climatológicas. La cobertura global se logra mediante constelaciones nominales de unos 24-27 satélites ubicados en diferentes planos orbitales (3 o 6) con



inclinaciones que van entre los 55° y los 65°. Los satélites orbitan a una altura que oscila entre los 19.100 y los 28.180 km (órbitas medias o MEO), lo que supone períodos orbitales de unas 12 horas.

En los sistemas GNSS actuales la comunicación se establece, en principio, de forma pasiva en un único sentido descendente (espacio-tierra). Sin embargo, la implementación de un segmento terrestre cada vez más complejo, en el que se disponen estaciones de carga (o de subida de datos), y la puesta en marcha de los llamados *sistemas de mejora* o *augmentación* supone una variación en esta configuración estableciéndose flujos de comunicación entre satélite y receptor en un doble sentido (descendente y ascendente).

Es relativamente frecuente confundir el acrónimo de GNSS con el de GPS, lo que equivale a un error de metonimia al asociar el todo con la parte. El sistema estadounidense *NAVSTAR-GPS* o simplemente *GPS* (*Global Positioning System*) es el único sistema GNSS plenamente operativo a día de hoy y el que acapara, en cierta parte, el monopolio de los sistemas de posicionamiento global. Sin embargo, además del sistema *NAVSTAR-GPS*, existen otros sistemas de posicionamiento GNSS.

Rusia tiene su propio sistema GNSS, denominado *GLONASS* (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*). Este sistema es operativo desde 1996, aunque actualmente está sumido en un proceso de reestructuración de sus infraestructuras debido a la crisis político-económica rusa. En los últimos años, *GLONASS* ha dejado de ser un sistema de posicionamiento estrictamente global, limitando su cobertura a Rusia y algunas repúblicas ex-soviéticas. Se espera que próximamente el sistema re-adquiera nuevamente su cobertura global.

Los sistemas *NAVSTAR-GPS* y *GLONASS* son, hasta el momento, los únicos sistemas de posicionamiento GNSS que están (o han estado) operativos a nivel global. Ambos sistemas presentan grandes similitudes debido a que son, en origen, sistemas militares desarrollados en un contexto de Guerra Fría. La puesta en marcha de estos sistemas se debió básicamente a un intento por salvaguardar la seguridad nacional de los bloques capitalista y comunista respectivamente. Estos sistemas permitían obtener información de primera calidad de países adversarios que debía ser controlada, manipulada y propagada solamente entre los estamentos militares, limitándose el acceso a la señal de los usuarios civiles. El cese de este clima de desconfianza, tras la caída del muro de Berlín (1989) dio paso al acercamiento político entre los grandes bloques y a la apertura de estos sistemas al mundo civil, permitiendo una explotación de la señal de dichos sistemas por parte del mercado civil.

Por su parte Europa está pendiente de la puesta en marcha de su propio sistema de posicionamiento global, *Galileo*, cuyo funcionamiento plenamente operativo se espera para el año 2016, tras continuos retrasos temporales. *Galileo* presenta grandes diferencias respecto a los dos sistemas anteriores siendo la más significativa el que será un sistema de posicionamiento de origen civil orientado a aplicaciones de mercado y que contará con financiación tanto pública como privada. La puesta en marcha del sistema *Galileo* fue acordada por la *Comisión Europea* (CE) en 1999 para garantizar las necesidades estratégicas europeas en materias de transporte, política exterior y defensa, evitando costes y/o riesgos excesivos derivados de la dependencia respecto a otros sistemas GNSS. De esta forma, el sistema *Galileo* deberá garantizar la independencia tecnológica de Europa en el área de la navegación por satélite y constituirá además un pilar básico de la *Política Europea de Transporte*¹⁸ (Banister *et al.*, 2000).

Tanto *NAVSTAR-GPS* como *GLONASS* son, en origen, sistemas militares que no están orientados al cumplimiento de los requerimientos planteados por las aplicaciones civiles actuales. La apertura de estos sistemas a la sociedad civil durante los últimos años ha permitido crear un mercado en el que se han desarrollado un gran número de aplicaciones. Los sistemas GNSS presentan actualmente una serie de prestaciones, no sólo en términos de precisión en el posicionamiento, sino también de continuidad, integridad y disponibilidad de la señal. Las prestaciones de los actuales sistemas GNSS permiten alcanzar un posicionamiento válido para ciertas necesidades de la sociedad civil, aunque no para otras. El sector de la aviación civil es el que más apuesta por el desarrollo de este tipo de sistemas en pro de la mejora de sus prestaciones y del cumplimiento de los requerimientos de posicionamiento en ciertas maniobras. Entre otros retos se persigue una mejora de los niveles de cobertura en latitudes altas y en ciertos ambientes en los que actualmente son habituales problemas de recepción de la señal como áreas

¹⁸ El *Libro Blanco de Transportes* (*La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad*) analiza en su cuarta parte, punto II.C. titulado "El imperativo de realizar un programa de envergadura mundial: *Galileo*" la importancia estratégica de implementar en Europa un sistema de posicionamiento por satélite propio para el sector de los transportes (*Comisión Europea*, 2001).



con una alta tasa de densidad edificatoria o espacios interiores. Además, el sector de la aviación civil apuesta por una mejora de los niveles de precisiones y por un incremento de la integridad del sistema.

Desde hace años se trabaja en el desarrollo de receptores duales que permitan calcular el posicionamiento combinando medidas de satélites tanto del sistema NAVSTAR-GPS como de GLONASS. Sin embargo, la compatibilidad entre los sistemas GNSS actuales y, por extensión, su interoperabilidad supone un gran desafío. NAVSTAR-GPS y GLONASS son sistemas que fueron diseñados para competir, por lo que sus características y especificaciones técnicas de funcionamiento son muy diferentes (Tabla 3-1). La interoperabilidad entre estos sistemas y el desarrollo de receptores duales resulta complejo al ser necesario fusionar datos procedentes de diferentes *datums* geodésicos (WGS-84 y PZ-90), sistemas de referencia temporal (GPST y GLONASS-T), técnicas de separación de la señal (CDMA y FDMA), frecuencias y longitudes de onda asociadas.

Tabla 3-1: Comparativa entre los principales sistemas GNSS. Fuente: Actualizada a partir de Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008.

Características	NAVSTAR-GPS	GLONASS	Galileo
Primer lanzamiento	22/02/1978	12/10/1982	Test 28/12/2005 Operativo 21/10/2011
FOC	17/07/1995	18/01/1996	2016 (previsto)
Financiación	pública	pública	pública + privada
Nº nominal de satélites	24	24	27 + 3 repuesto (30) (4 por ahora)
Planos orbitales	6	3	3
Inclinación orbital	55°	64,8°	56°
Altura órbitas [km] (sobre superficie)	28.180 (GPS-M)	19.100 (GLONASS-M)	23.616
Semieje mayor [km]	26.560	25.508	29.601
Separación planos orbitales	60°	120°	120°
Fase dentro de planos	irregular	± 30°	± 40°
Período de revolución	11h 57,96min	11h 15,73min	14h 4,75min
Período repetición seguimiento en tierra [días siderales]	≈ 1	≈ 8	≈ 10
Ciclo de repetición de pista en tierra [órbitas]	2	17	17
Datos incluidos en efemérides	Elementos Kepler, coeficientes de correlación	Vectores de posición, velocidad y aceleración	Elementos Kepler, coeficientes de correlación
Sistema de referencia geodésico	WGS-84	PE-90	GTRF
Sistema de tiempo	GPS-T, UTC (USNO)	GLONASS-T, UTC (SU)	Sistema de Tiempo Galileo
Segundos intercalares	no	sí	no
Separación de señales	CDMA	FDMA	CDMA
Nº de frecuencias	3-L1, L2, L5	una por 2 SV antipodales	3(4)-E1, E6, E5(E5a, E5b)
Frecuencia [MHz]	L1: 1575,420	G1: 1602,000	E1: 1575,420
	L2: 1227,600	G2: 1246,000	E6: 1278,750
	L5: 1776,450	G3: 1204,704*	E5: 1191,795
Nº de códigos telemétricos	11	6*	10
Integridad de transmisión	no (GPS III: sí)	no (GLONASS-K: sí)	sí

El desafío planteado a favor de la compatibilidad e interoperabilidad de los sistemas GNSS ha sido planteado ya hace unos años, a raíz del clima de confianza y el cese de hostilidades entre los antiguos bloques. Se planteó así un proyecto a medio plazo en el que se propusieron una serie de soluciones transitorias basadas en la implementación de una serie de sistemas complementarios denominados *sistemas de aumentación (fase GNSS-1)*. Esta propuesta constituye una solución transitoria previa a una más ambiciosa a largo plazo en la que se apostará por una modernización de toda la infraestructura, la puesta en marcha de nuevos sistemas como el europeo Galileo y el chino COMPASS, además de una apertura civil de la señal de los sistemas GNSS actuales. El sistema de posicionamiento Galileo será el

primero de origen plenamente civil y que estará orientado al cumplimiento de requerimientos de la mayor parte de las aplicaciones de mercado (*fase GNSS-2*). Un diagrama del modelo de desarrollo de los sistemas GNSS en su conjunto se representa en la Figura 3-1.

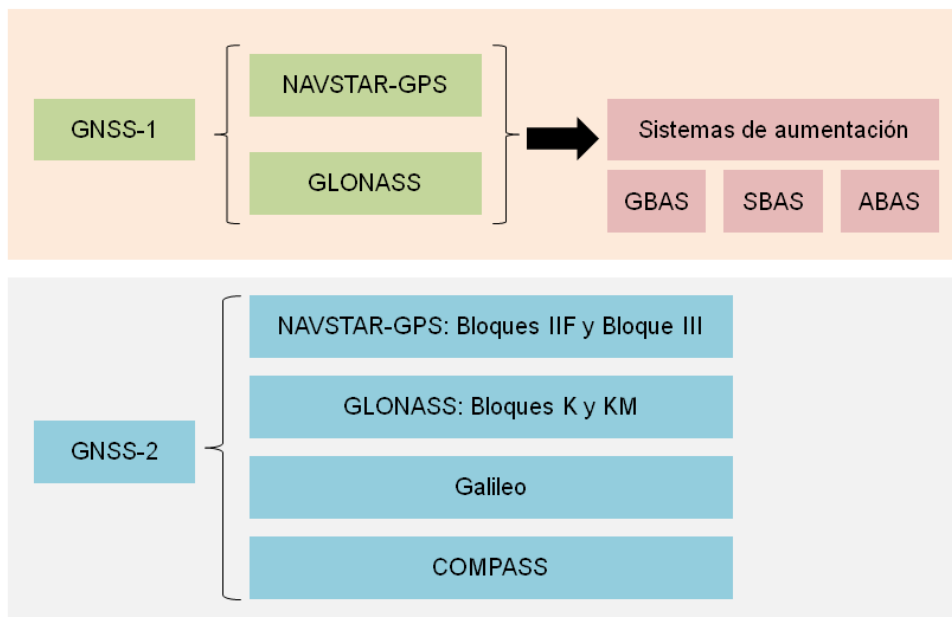


Figura 3-1: Fases de desarrollo de los sistemas GNSS.

La *fase GNSS-1* comenzó en el año 2002 y se prevé que dure hasta 2019, aunque esta última fecha sólo puede ser considerada como orientativa. En esta fase se propone como solución transitoria o provisional la complementariedad de los sistemas GNSS operativos con una serie de *sistemas de mejora* o *aumentación* que incrementan las prestaciones dentro de un ámbito regional. Estos sistemas de *aumentación* pueden ser equipos embarcados en aeronaves (sistemas ABAS), estaciones terrestres (sistemas GBAS) o satélites geoestacionarios que aparentemente permanecen estáticos sobre un determinado punto (sistemas SBAS). La complementariedad de estos sistemas no evita que sigan existiendo ciertas limitaciones operacionales debido a que siguen empleándose como señales primarias las procedentes de los sistemas GNSS. Esta situación plantea inquietudes a nivel internacional debido a la dependencia funcional de estos sistemas complementarios respecto a los gobiernos responsables de los actuales sistemas GNSS, los cuales tienen la capacidad para distorsionar o limitar el acceso público a su señal.

El peso de los sistemas GNSS en términos estratégicos, unido a su dependencia tanto política como tecnológica actual respecto al sistema *NAVSTAR-GPS* y al gobierno de los EEUU ha llevado a varios países (y/o regiones con un considerable peso político y económico) al desarrollo de sus propios sistemas de posicionamiento satelital que les permitirán alcanzar una independencia política, estratégica y tecnológica además de promover, de forma simultánea, una dependencia de terceros países respecto a ellos mismos. En esta tesitura están especialmente involucradas las grandes potencias emergentes. China optará en los próximos años a la ampliación de su sistema de navegación regional *Beidou* para reconvertirlo, en torno al año 2020, en su propio sistema de navegación global (*COMPASS*). Por su parte la India está valorando la posibilidad de desarrollar su propio sistema de posicionamiento global (*IRNSS*), aunque actualmente hay muchas conjeturas acerca de si lo llevará finalmente a cabo sola o intentará asociarse con otros países.

Por su parte, la *fase GNSS-2* dará comienzo previsiblemente a partir del año 2019 con la puesta en marcha de *Galileo* y *COMPASS*, sistemas que alcanzarán sus capacidades operacionales plenas (FOC) en la segunda mitad de la presente década. Se prevé que la señal emitida por los distintos sistemas GNSS sea compatible e interoperable por cualquier usuario del planeta. Esta fase estará conformada, a expensas de si el sistema *IRNSS* indio adquiere finalmente cobertura global, por el sistema *Galileo*, el *COMPASS* chino y las actualizaciones de los sistemas *NAVSTAR-GPS* y *GLONASS*, cuyos calendarios estarán sujetos seguramente a importantes modificaciones temporales.



La puesta en marcha de *Galileo* supondrá el cambio más importante al ser concebido como un sistema plenamente civil y orientado al mercado. Este cambio de filosofía operativa obligará seguramente a que el resto de sistemas GNSS opten por políticas más aperturistas. La constelación nominal de *Galileo* constará de una constelación de satélites (27) mayor que las de los otros sistemas (24). Además, sus satélites serán más avanzados y eficientes tecnológicamente lo que les permitirá emitir señales en más canales, reducir el peso y ampliar la vida útil. Desde el punto de vista tecnológico, *Galileo* aportará una serie de mejoras sobre los sistemas actuales, las cuales pueden resumirse en:

- Mejora de los niveles de cobertura en latitudes septentrionales.
- Mejora de la emisión/recepción de la señal lo que permitirá alcanzar unos mayores niveles de continuidad y disponibilidad de la señal, reduciéndose así las interferencias y las pérdidas eventuales de la señal. *Galileo* permitirá además una mejora de la recepción de la señal en condiciones poco favorables.
- Incremento de los niveles de precisiones obtenidos, como consecuencia de los incrementos de los niveles de continuidad y disponibilidad de la señal debido a la mejora tecnológica de los satélites, las mejores condiciones de recepción de la señal y la obtención de más medidas redundantes procedentes de más satélites, entre otras.
- Incremento de los niveles de integridad. *Galileo* contará con un mayor índice de redundancias en las mediciones debido a una mejora tanto cuantitativa, relacionada con el número de satélites, como cualitativa, relacionada con el propio desarrollo tecnológico de sus satélites. El sistema dispondrá de una serie de señales y servicios críticos como el de *seguridad de vida* (SoL) y el *servicio público regulado* (PRS) para los que incluirá una señal de alerta en caso de fallo de la señal, con un retardo máximo de entre seis (para SoL) y diez segundos (para PRS).
- Emisión de nuevas señales y puesta en marcha de nuevos servicios con un alto beneficio social como el de *búsqueda y rescate* (SAR) para atención en casos de emergencia. Como valor añadido este servicio permitirá que el centro operador de rescate pueda enviar una confirmación de vuelta de que la señal de posicionamiento y el mensaje de emergencia han sido recibidos.

Por lo tanto, *Galileo* ofrecerá una señal más robusta que permitirá obtener una mejora sustancial de las prestaciones del sistema. La mejora de los niveles de cobertura permitirá obtener una señal fiable y continua en áreas en las que actualmente existen riesgos de mala recepción como en cañones urbanos, zonas de vegetación densa (toldos forestales), etc. Se prevé además que *Galileo* pueda permitir, sin ayuda de ningún sistema complementario, la adquisición de señal en espacios interiores (*indoor*) en los que ahora no es posible. Sin embargo, la gran ventaja adicional de *Galileo* será su mejora de la integridad de la señal, llegando a ofrecer una responsabilidad y un servicio de garantía para el usuario final en caso de fallo en la señal emitida.

Otra de las grandes ventajas de *Galileo* respecto a los actuales sistemas GNSS es el empleo de canales independientes de los propios de transmisión de datos, permitiendo de esta forma una reducción del tiempo de adquisición de la señal para la determinación del posicionamiento inicial (TTFF). Se espera que el TTFF para *Galileo* sea de aproximadamente un segundo, un tiempo muy inferior al requerido actualmente por el sistema *NAVSTAR-GPS*, que puede llegar a ser de varios segundos e incluso minutos. Esto permitirá una mejora muy sustancial del posicionamiento en aplicaciones dinámicas, siendo posible un uso instantáneo de la señal.

Por lo tanto, la fase *GNSS-2* plantea una convivencia entre cuatro o cinco sistemas de posicionamiento global. A día de hoy, sólo uno de ellos está en fase operativa (*NAVSTAR-GPS*), otro está en fase de reestructuración y pendiente de adquirir nuevamente cobertura global (*GLONASS*), mientras que dos de ellos (*Galileo* y *COMPASS*) están en fase de desarrollo y puesta en órbita. Se espera que estos dos últimos sistemas sean operativos en torno al año 2020. Queda aún así la incógnita de lo que pasará finalmente de si el sistema de posicionamiento indio *IRNSS* tendrá finalmente una cobertura global o sólo regional. Este contexto de convivencia entre distintos sistemas GNSS en un futuro próximo plantea algunas dudas acerca de cuál debe ser la estrategia de convivencia más adecuada.

La complementariedad entre los sistemas plantea inicialmente la compatibilidad e interoperabilidad entre señales, dos conceptos que presentan ciertos matices diferenciales. La *compatibilidad* se refiere a la capacidad de estos sistemas y la de sus servicios asociados para ser empleados, independientemente o en su conjunto, sin que se produzcan ningún tipo de interferencias ni adversidades con cualquier otro



servicio. Por su parte, la *interoperabilidad* se refiere a su capacidad por proporcionar mejores prestaciones en conjunto que las que proporcionarían por sí solos. Por lo tanto, el concepto de interoperabilidad supone unos requerimientos mayores que los propios del concepto de compatibilidad. De esta forma, el objetivo es que el usuario final pueda recibir señales procedentes de todos los sistemas, obteniendo redundancias y garantizando unos niveles de prestaciones superiores a los obtenidos con la recepción de señales procedentes de un único sistema (Jacobson, 2007). La puesta en funcionamiento de *Galileo* supondrá un paso más allá, planteándose como objetivo la *intercambiabilidad* entre todos los sistemas, siendo posible el uso de las señales procedentes de cualquier satélite de cualquier sistema, lo que lleva a la integración de todos los sistemas GNSS en algo así como un único *sistema de sistemas GNSS* (Hein *et al.*, 2007).

Sin embargo, toda esta propuesta de complementariedad e interoperabilidad entre sistemas, no evita que siga produciéndose una fuerte competencia entre los distintos sistemas GNSS por ofrecer el mejor servicio. Los sistemas en fase de despliegue pretenden cubrir alguna de las deficiencias de los sistemas actuales, ofreciendo así un valor añadido. Mientras tanto, los planes de renovación de los sistemas operativos abogan por ponerse a la altura de los sistemas nacientes para evitar perder cuota de mercado. Esta competencia conlleva a un incremento exponencial del número de usuarios y en una mejora de las prestaciones obtenidas, lo que a su vez supone un refuerzo del mercado GNSS y una apuesta más decidida por parte de los gobiernos propietarios de los sistemas por mejorar sus propios sistemas.

El desarrollo de los sistemas GNSS en los próximos años dependerá de tres pilares fundamentales: (a) la propia evolución tecnológica de los sistemas, (b) el desarrollo de su mercado asociado y (c) el marco legal tanto presente como futuro. Se espera que en los próximos años el desarrollo de estos sistemas, unido a una demanda creciente tanto de usuarios, aplicaciones y nuevas necesidades supondrá una bajada tanto del precio de los servicios como de los equipos receptores. Esto favorecerá un proceso de popularización de los sistemas lo que revertirá en un incremento del mercado, de las inversiones por parte de los gobiernos responsables de los sistemas (financiación pública) y, en el caso de *Galileo*, también de las empresas interesadas en formar parte del control de estos sistemas (financiación privada).

3.2.3. Principios teóricos

El cálculo de la posición por parte de los sistemas GNSS se basa en un fundamento teórico muy simple, empleado desde hace muchos años por otros sistemas de posicionamiento. A partir de dos elementos principales de comunicación, un emisor y un receptor, es posible calcular el valor de la distancia existente entre ambos elementos asumiendo que sus tiempos están perfectamente sincronizados y que la velocidad de propagación de la señal emitida es constante. A partir de estas suposiciones, la distancia entre emisor y receptor puede ser calculada de forma trivial en función del desfase temporal de la señal desde que sale del emisor hasta que llega al receptor.

Si en este procedimiento de cálculo intervienen varios emisores, es posible determinar la posición concreta del receptor en el espacio. Si el posicionamiento se calcula sólo en planimetría, tal y como operan algunos sistemas de posicionamiento terrestres, la resolución del problema es más simple. La distancia entre un determinado emisor y receptor se estima a partir de un arco de circunferencia de posibles ubicaciones. Si en lugar de uno, empleamos dos emisores, las posibles ubicaciones del receptor sólo pueden ser dos, correspondientes a las intersecciones entre ambas circunferencias. Aunque existe una ambigüedad al haber dos posibles posiciones reales del receptor, la propia experiencia permite determinar la solución verdadera. Por ejemplo, en sistemas de localización marítimos uno de los puntos de intersección suele corresponder a tierra firme lo que permite descartarlo automáticamente. Otra posible alternativa es la de emplear un tercer emisor, cuya circunferencia concurrirá con las dos anteriores en un punto concreto que será el de ubicación real del receptor, siendo de esta forma resuelto el problema de posicionamiento planteado (Figura 3-2.a).

Este método de triangulación tan sencillo supone, en teoría, que (a) la posición de los emisores se conoce de forma exacta, (b) la sincronización de los relojes de los diferentes elementos del sistema es perfecta y (c) que la velocidad de propagación de la señal a través de un determinado medio es un valor constante conocido. En caso de que no se cumpliera alguna de las anteriores suposiciones se obtendría un error de posicionamiento, tanto por exceso como por defecto, debido a la aparición de ambigüedades espaciales.

Esta situación es la que sucede en la realidad donde son apreciables errores de sincronización de los relojes y fluctuaciones en las velocidades de propagación de la señal a su paso por la atmósfera, lo que afecta por desigual a las medidas tomadas desde los distintos emisores. Así, en condiciones reales, el posicionamiento obtenido no será un punto concreto en el espacio, sino que corresponderá a un *área de incertidumbre*, tal y como observamos en las Figuras 3-2.b y 3-2.c. La solución a este problema de ambigüedad pasa por hacer uso de la estadística y determinar la posición más probable o de menor error que, en general, suele ser considerada como la de menor error medio cuadrático (Molina *et al.*, 2000).

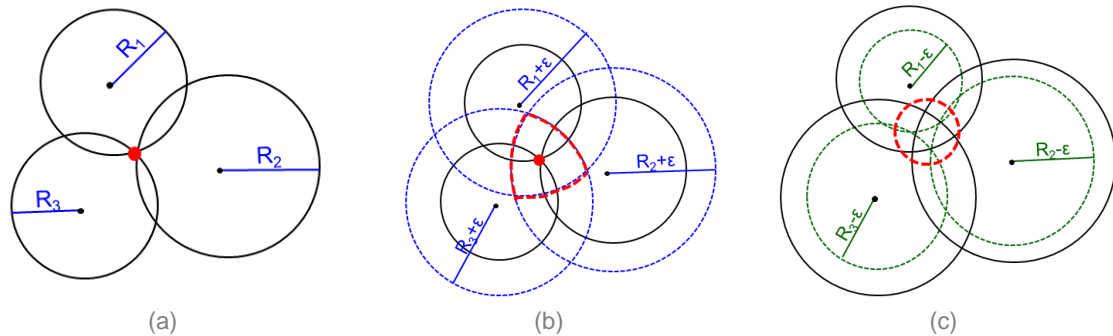


Figura 3-2: (a) Cálculo de la posición de un punto en el espacio bidimensional mediante el método de triangulación. Áreas de incertidumbre provocadas por la aparición de errores (b) por adelantamiento y (c) por retraso de la señal satelital.

Los principios básicos introducidos para el plano bidimensional son extrapolables, aunque con ciertos matices geométricos, al plano tridimensional propio de la radionavegación por satélite. En este caso, para cada satélite se obtendrá una esfera en lugar de una circunferencia, con centro en el propio satélite y radio la distancia al receptor (Figura 3-3.a). En el caso ideal, la superficie de intersección entre las dos esferas será un círculo, mientras que si trabajamos con tres satélites (esferas) el área de intersección se reducirá a dos posibles puntos. Para la determinación del posicionamiento de elementos situados sobre la superficie terrestre será suficiente trabajar con tres esferas ya que sólo uno de los puntos de intersección recaerá sobre la propia superficie terrestre, resolviéndose de esta forma cualquier posible ambigüedad.

Para el posicionamiento de vehículos aéreos o espaciales es necesario añadir un nuevo satélite que permita determinar una cuarta esfera, la cual concurre con las otras tres anteriores en un único punto (Figura 3-3.b). A partir de este cuarto satélite es posible obtener medidas redundantes que permiten eliminar los errores debidos a la falta de sincronización entre los relojes de satélites y receptores.

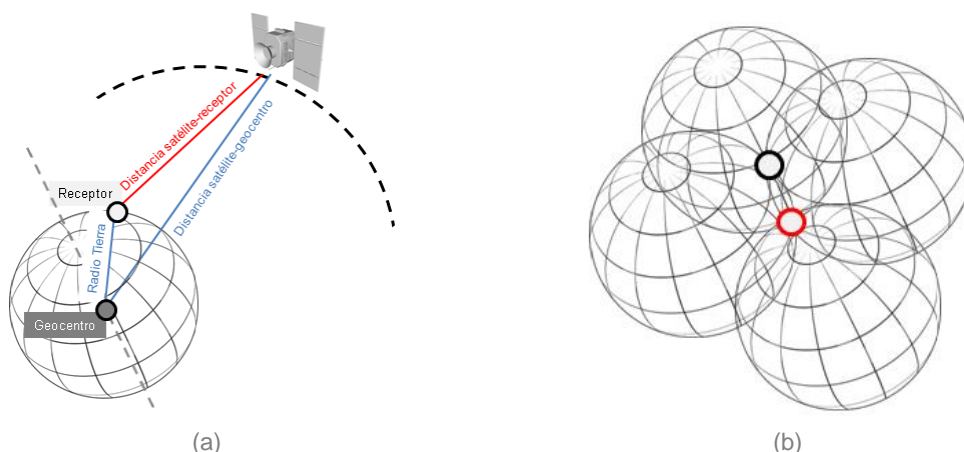


Figura 3-3: (a) Principios geométricos de posicionamiento por satélite. La distancia entre el satélite y el receptor es la incógnita a resolver en la relación geométrica presentada. (b) Cálculo de la posición de un punto en el espacio tridimensional mediante el método de triangulación. La intersección de la cuarta esfera permite resolver el posicionamiento determinando un punto único válido (punto rojo).

Para la determinación de las coordenadas espaciales de un determinado punto es necesario conocer la posición exacta de los diferentes emisores, satélites en el caso de los sistemas de posicionamiento SatNav. El procedimiento empleado por los sistemas GNSS es el de la transmisión de unas *efemérides*

por parte de los propios satélites, que son recogidas y registradas por el equipo receptor. Estas efemérides corresponden a una serie de parámetros en los que se determina la posición orbital exacta que ocupa cada satélite. La colección de efemérides de toda la constelación de satélites se completa con una cierta periodicidad temporal, que en el caso de la constelación NAVSTAR-GPS es de 12,5 minutos.

La velocidad de la señal emitida es la de propagación de la luz, la cual se considera constante en medios ideales¹⁹. Sin embargo, en la realidad no lo es debido a la complejidad de la atmósfera y a la aparición de ciertos factores de cambio o fuentes de error. Por esta razón suele emplearse un término propio para referirnos al valor de distancia obtenida a partir del retardo de la señal entre su emisión y su recepción: *pseudodistancia*.

La falta de sincronización entre los relojes del emisor y del receptor supone una nueva incógnita al sistema. La propia evolución tecnológica de los diferentes componentes de los satélites, unido a la mejora del control de los tiempos gracias al uso de relojes atómicos cada vez más precisos, permite acotar cada vez más este error de sincronización. Para que el cálculo de la distancia emisor-receptor fuera exacto, los receptores deberían contar, al igual que los satélites, con un reloj atómico. Sin embargo, esto no es posible debido al elevado coste de este tipo de relojes atómicos. Por esta razón, la mayoría de navegadores cuentan con unos relojes de cuarzo que presentan, además de un coste más bajo, unos niveles menores de precisión. Por esta razón, deben plantearse una serie de correcciones que permitan ajustar de forma constante el tiempo del receptor.

Además de la determinación de la posición, los sistemas GNSS permiten calcular parámetros de velocidad y tiempo (PVT). Un estudio más en detalle de los procesos de cálculo de cada uno de estos parámetros se presenta en los siguientes puntos.

3.2.3.1. Cálculo de la posición

Basándonos en los principios teóricos presentados anteriormente, el receptor calcula el retardo temporal entre el momento en que se emite la señal desde el satélite y el momento en que llega al receptor. En el caso de trabajar con observables de código, la técnica habitualmente empleada por los navegadores estándar, este retardo temporal se calcula en función del desplazamiento de unas determinadas secuencias de código (pseudoaleatorio) emitidas por el satélite y generadas en el receptor (Figura 3-4).

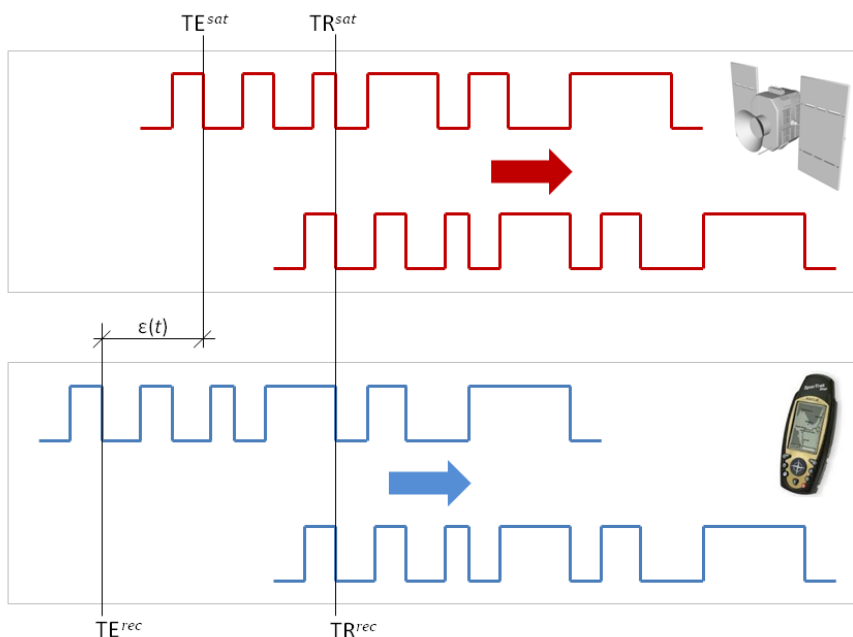


Figura 3-4: Correlación de código entre la señal del emisor y el receptor. Estimación del tiempo de retardo y error de sincronización. Fuente: Adaptada de Molina, 2003.

¹⁹ La velocidad de la luz en el vacío es de 299.338 km/s.



La relación entre los tiempos de recepción y emisión de la señal es la siguiente:

$$TR^{rec} - TE^{rec} + \varepsilon(t) = TR^{sat} - TE^{sat} \quad (3.1)$$

El retardo temporal entre el tiempo registrado por el receptor (TR^{rec}) y el emitido por el satélite (TE^{sat}) permite calcular la pseudodistancia, cuyo valor difiere del valor de distancia real debido al error de sincronización:

$$\begin{aligned} \text{Distancia real} & \quad c \cdot \Delta t = c \cdot (TR^{sat} - TE^{sat}) \\ \text{Pseudodistancia} & \quad c \cdot \Delta t = c \cdot (TR^{sat} + \varepsilon(t) - TE^{sat}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Normalmente, el *error de sincronización* o de *desviación del reloj del receptor* $\varepsilon(t)$ es la fuente de error más significativa que afecta al posicionamiento satelital²⁰. Su peso depende únicamente del receptor y su valor es el mismo para todas las medidas realizadas por un mismo receptor a cualquier satélite.

Una vez estimadas las pseudodistancias a varios satélites (mínimo de cuatro) es posible plantear un sistema de ecuaciones que, aunque es muy simple, presenta en su resolución una gran complejidad de cálculo:

$$\begin{aligned} \sqrt{(X_1 - X_R)^2 + (Y_1 - Y_R)^2 + (Z_1 - Z_R)^2} &= distancia_{sat1} = pseudodistancia_{sat1} + \varepsilon(t) \\ \sqrt{(X_2 - X_R)^2 + (Y_2 - Y_R)^2 + (Z_2 - Z_R)^2} &= distancia_{sat2} = pseudodistancia_{sat2} + \varepsilon(t) \\ \sqrt{(X_3 - X_R)^2 + (Y_3 - Y_R)^2 + (Z_3 - Z_R)^2} &= distancia_{sat3} = pseudodistancia_{sat3} + \varepsilon(t) \\ \sqrt{(X_4 - X_R)^2 + (Y_4 - Y_R)^2 + (Z_4 - Z_R)^2} &= distancia_{sat4} = pseudodistancia_{sat4} + \varepsilon(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Para reducir el tiempo de cálculo y lograr un posicionamiento instantáneo, tiende a simplificarse la resolución del anterior sistema de ecuaciones. Para ello se hace uso de una aproximación de primer orden a la solución a través de un desarrollo en serie de Taylor (Molina, 2003). La rapidez en la estimación del cálculo de posicionamiento dependerá de la capacidad computacional del receptor para la resolución del sistema de ecuaciones mientras que los niveles de precisión obtenidos dependerán de su capacidad para la alineación de los observables de código.

Aunque existen varios tipos de posicionamiento con sistemas GNSS, las clasificaciones más habituales son en función del sistema de referencia empleado y del movimiento del receptor. En el primer caso, se pueden distinguir entre el posicionamiento absoluto y el relativo. El posicionamiento absoluto permite determinar la localización de un elemento en el espacio a partir de la triangulación a cuatro satélites (Figura 3-5.a). Por su parte, el posicionamiento relativo o diferencial permite determinar la localización de un receptor, normalmente móvil, a partir de la posición de un punto fijo de coordenadas ya conocidas (Figura 3-5.b).

Asimismo, podemos distinguir tres tipos de posicionamiento en función del movimiento al que se ven sometidos los receptores durante la observación: (a) posicionamiento estático, (b) cinemático y (b) semi-cinemático. En el posicionamiento estático el receptor permanece inmóvil durante toda la observación, mientras que en el posicionamiento cinemático está en movimiento. Por último, en el posicionamiento semi-cinemático se calculan las coordenadas relativas del receptor en movimiento con respecto a un punto fijo observado de forma estática. La diferencia entre el posicionamiento semi-cinemático y el cinemático es que en este último posicionamiento el receptor permanece inmóvil durante un pequeño intervalo de tiempo sobre los puntos de medición. Una clasificación de los tipos de posicionamiento posibles con el sistema NAVSTAR-GPS es el propuesto por el *Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EEUU* en 1996 (Tabla 3-2).

²⁰ Valga de ejemplo que sólo un microsegundo de desincronización supone un error en la estimación del posicionamiento de unos 300 metros (Molina, 2003).

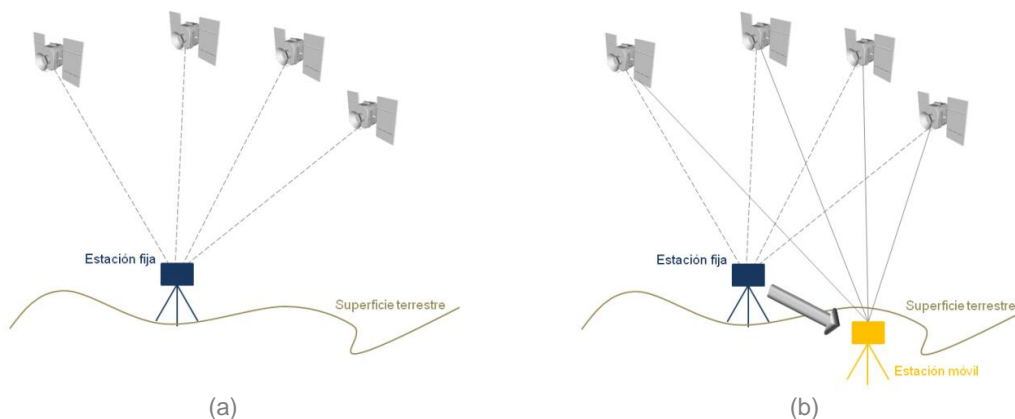


Figura 3-5: Tipos de posicionamiento en función del sistema de referencia empleado: (a) posicionamiento absoluto y (b) relativo.

Tabla 3-2: Tipos de levantamientos con sistemas NAVSTAR-GPS. Fuente: *Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EEUU, 1996.*

Tipo de levantamiento con GPS		Receptor	Tiempo	Precisiones	
Estático	Normal	Post-procesado	L1 o L1/L2	30-60 min	Alta (≤ 1 cm)
	Rápido	Post-procesado	L1 o L1/L2	5-20 min	Alta (≤ 1 cm)
Cinemático	Stop and go	Post-procesado	L1	1-2 min	Media ($\approx 1-5$ cm)
	Pseudo-cinemático	Post-procesado	L1	5-10 min con doble ocupación entre 1-4 horas	Media ($\approx 1-5$ cm)
	En tiempo real	Tiempo real	L1 o L1/L2	-	Media (≤ 10 cm)

3.2.3.2. Cálculo de la velocidad

Los sistemas de posicionamiento GNSS permiten calcular la velocidad de un determinado vehículo. La forma más intuitiva se basa en el cálculo de la *velocidad media*, midiendo simplemente la posición de dicho vehículo en dos instantes de tiempo determinados:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \cong \frac{\vec{r}(t_2) - \vec{r}(t_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (3.4)$$

Esta relación es válida si asumimos que la velocidad del vehículo es constante. Sin embargo, en muchas ocasiones se necesita obtener un valor de *velocidad instantánea* en un momento y en un lugar determinado, para lo cual se plantea la técnica de *desplazamiento Doppler*.

El *efecto Doppler* es un fenómeno físico que produce un cambio en la frecuencia de la señal observada por un receptor debido al movimiento relativo existente entre un emisor y un receptor. La relación entre ambas frecuencias puede determinarse a partir de la siguiente fórmula:

$$f_{rec} = f_{sat} \cdot \left(1 - \frac{\vec{v}_r \cdot \vec{a}}{c} \right) \quad (3.5)$$

donde \vec{v}_r representa la velocidad relativa satélite-receptor
 \vec{a} el vector unitario satélite-receptor

A partir de la medida del *efecto Doppler* a cuatro satélites, se puede determinar un sistema de ecuaciones muy similares a las obtenidas para el caso del posicionamiento y que, en este caso, permiten calcular la velocidad instantánea del receptor en un instante cualquiera.



3.2.3.3. Cálculo del tiempo

Como no existe un reloj universal que sirva de referencia temporal para toda la humanidad, se emplean como referencia los relojes u osciladores atómicos que portan los satélites GNSS. Estos relojes presentan una gran estabilidad y unos altos niveles de precisión que han sido mejorados considerablemente durante los últimos años. A día de hoy, los máseres de hidrógeno son los relojes atómicos que mayores niveles de estabilidad y precisión presentan (Tabla 3-3).

Tabla 3-3: Tipos de relojes atómicos y nivel de estabilidad. Fuente: Berrocoso-Domínguez *et al.*, 2010.

Tipo reloj atómico	Nivel de estabilidad	Tiempo para perder un segundo [años]
Cristal de cuarzo	10^{-9}	30
Rubidio	10^{-12}	$30 \cdot 10^3$
Cesio	10^{-13}	$30 \cdot 10^4$
Máser de hidrógeno	10^{-14}	$30 \cdot 10^6$

El control preciso del tiempo resulta muy complicado ya que requiere de la estimación de complejos problemas físico-matemáticos, relacionados con las irregularidades provocadas por los fenómenos de rotación y traslación de la Tierra, además de un mantenimiento y una calibración de la maquinaria propia del reloj, la cual se ve afectada por errores de deriva.

El tiempo de los satélites del sistema NAVSTAR-GPS es considerado como patrón de referencia temporal a escala mundial. Este sistema permite calcular el tiempo referido al sistema UTC, cuyo control y mantenimiento corren a cargo del *Observatorio Naval* de los EEUU (USNO), que aplica periódicamente correcciones. La precisión de cálculo del tiempo con este sistema es de entre 200 y 340 nanosegundos de función del tipo de servicio de posicionamiento.

3.2.4. Observables GNSS

Los sistemas GNSS presentan dos tipos de observables: (a) código y (b) fase (Figura 3-6). Para la medición de pseudodistancias mediante observables de código, que ya hemos introducido previamente, el receptor genera internamente una réplica de código idéntico al emitido por el satélite en el mismo instante. Una alineación entre los códigos generados por el receptor y el satélite permite medir, de una forma muy sencilla, el tiempo de desfase entre ambos. Esta es la denominada técnica de *correlación de código* (PRN). La ecuación de observación para la medición de pseudodistancias mediante observables código se expresa como:

$$R = \rho + c \cdot \Delta\delta + v \quad (3.6)$$

donde R representa la pseudodistancia medida
 ρ la distancia entre el satélite y el receptor
 $\Delta\delta$ el error de sincronización
 v el error de medición

En este método suele ser habitual trabajar con códigos binarios. En el caso del sistema NAVSTAR-GPS la señal emite tres códigos: (a) un código C/A, (b) un código P y (c) un mensaje de navegación. Este método suele ser el comúnmente empleado en receptores estándar.

Por su parte, para la medición de pseudodistancias mediante observables de fase, la onda portadora generada tanto en el satélite como el receptor es idéntica y presenta una forma senoidal. Al ser todos los ciclos de la portadora idénticos, el receptor puede medir solamente la parte fraccional de un ciclo (φ), mientras que el número entero de ciclos (N) no puede ser observado, siendo esta la incógnita planteada cuando trabajamos con observables de fase. La ecuación de observación en este tipo de medición se expresa como:

$$\lambda(\varphi+N)=\rho+c\cdot\Delta\delta+v \quad (3.7)$$

donde	φ	representa	la observación de fase en ciclos (fracción de ciclo)
	ρ		la distancia satélite receptor
	λ		la longitud de onda de la portadora de que se trate
	N		el número entero de ciclos (ambigüedad)
	$\Delta\delta$		el error de sincronización
	v		el error de la medición

El nivel de precisión obtenido según esta técnica depende de la longitud del segmento de ciclo de la onda portadora. La principal ventaja de este método es que permite alcanzar unos mayores niveles de precisión, mientras que su principal inconveniente se relaciona con la dificultad para determinar el número de ciclos completos o ambigüedades (N). Este método suele ser empleado por receptores geodésicos y de gama alta.

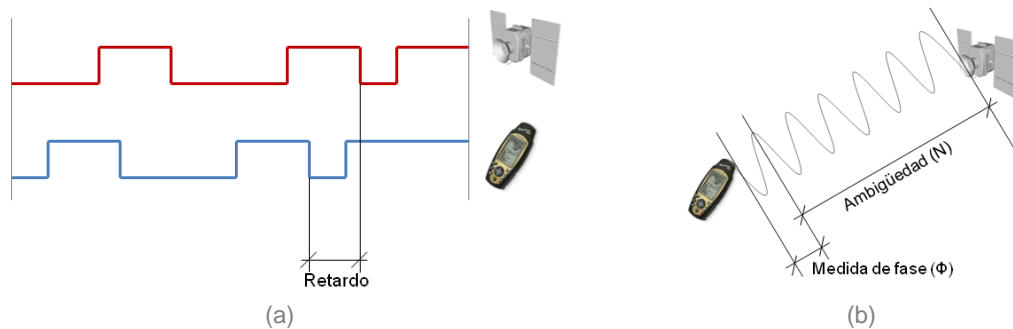


Figura 3-6: Tipos de observables GNSS: (a) código y (b) fase.

3.2.5. Arquitectura de los sistemas GNSS

Todos los sistemas GNSS presentan en origen una arquitectura funcional muy similar, la cual se ha ido asemejando más en los últimos años en un intento por lograr la compatibilidad e interoperabilidad de todos los sistemas GNSS entre sí. La estructura básica de estos sistemas permite distinguir tres segmentos de carácter ineludible: (a) segmento espacial, (b) de control y (c) de usuarios (Figura 3-7). Las principales características asociadas a cada uno de estos segmentos se muestran en los siguientes puntos.

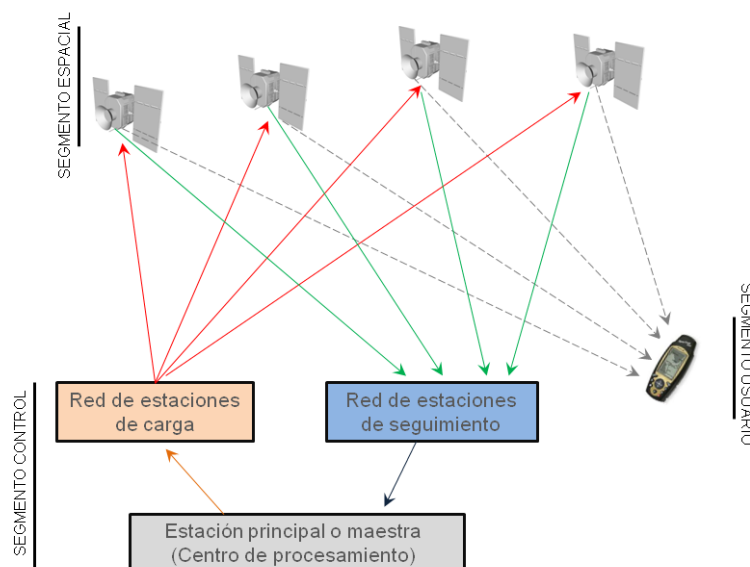


Figura 3-7: Arquitectura básica de los sistemas GNSS. Fuente: Adaptada de García-Álvarez, 2008.



3.2.5.1. Segmento espacial

El segmento espacial es el encargado de transmitir las señales codificadas en distintas frecuencias. Este segmento se compone de una constelación de satélites o *vehículos espaciales* (SV) que conforman el sistema tanto de navegación como de comunicación.

Los satélites portan una carga útil (*payload*) compuesta por el equipo de a bordo encargado de recibir, amplificar y retransmitir las señales de radiofrecuencia. Entre los elementos más característicos de los satélites destacan los grandes paneles solares (de unos siete metros cuadrados de superficie) empleados como fuente de alimentación necesaria para la estabilidad, control y ajuste de los satélites en sus órbitas respectivas. Estos paneles permiten el funcionamiento continuo del satélite aún en los pasos de sombra que se dan puntualmente durante dos épocas al año. Los satélites disponen además de un sistema de propulsión que les permite ajustar su órbita y controlar su estabilidad.

Para el control continuado de su posición y orientación triaxial, los satélites incorporan en una unidad sellada unos volantes de inercia llamados *flywheels*. Estos volantes de inercia son impulsados por motores síncronos y están dispuestos en tres direcciones perpendiculares entre sí. La aceleración o frenado de estos volantes de inercia permite corregir la orientación del satélite en cualquier momento. Estos volantes de inercia actúan como giróscopos en los que cualquier cambio de orientación aplicado al satélite genera una reacción en forma de giro espontáneo en aquellos volantes de inercia cuyo eje no coincida con el giro deseado. Este giro espontáneo es compensado de forma automática por parte de un sistema informático. Cuando alguno de los volantes de inercia alcanza el límite de rotación se activan un par de cohetes de maniobra, situados en posiciones diametralmente opuestas y en el mismo plano que los volantes de inercia, aunque orientados en sentidos contrario. Esta acción, junto a la propia deceleración de los volantes de inercia, genera pares de torsión que se anulan mutuamente, lo que permite controlar el régimen de rotación del sistema.

También relativo al control del movimiento del satélite, debe mencionarse el denominado *momentum dump*, que se refiere a la transferencia de cantidad de movimiento en el satélite. Las antenas emisoras de los satélites son direccionales y, por tanto, deben apuntar a donde se desea enviar (o recibir) la emisión, es decir, la superficie terrestre. Por esta razón los satélites deben girar en torno a sí mismos según un eje perpendicular al plano orbital, a igual velocidad y en el mismo sentido en el que orbitan. La complejidad tecnológica de los satélites es mayor teniendo en cuenta que los paneles solares deben estar constantemente en posición perpendicular al sol, lo que implica una rotación del satélite sobre el eje de emisión de las antenas.

En cuanto al flujo de comunicación, los satélites pueden recibir y guardar la información enviada desde los centros terrestres de control del sistema, además de transmitir continuamente señales en función de la información recibida. Para ello tienen una serie de antenas que operan en las *bandas L* y *S* (antena emisora y receptora) que permiten emitir e intercambiar información con los centros de control. Entre las ventajas de trabajar con la *banda L* están las relativamente grandes longitudes de onda (λ) que permiten la recepción de una señal más clara, aunque presentan como inconveniente una limitada capacidad de transmisión de datos.

El segmento espacial de los diferentes sistemas GNSS debe presentar un número suficiente de satélites de navegación que permitan garantizar una cobertura global en cualquier momento. Además, para que el servicio sea lo suficientemente robusto, el número de satélites ha de ser superior al estrictamente necesario para la transmisión de información redundante con objeto de obtener una mayor disponibilidad de señal, un posicionamiento más preciso y un funcionamiento ininterrumpido en el caso de que algún satélite deje de prestar servicio.

Los satélites, por otro lado, se ubican en distintos planos orbitales para lograr una cobertura global continua en el tiempo y en el espacio. La distribución de satélites dentro de estos planos orbitales depende del número total de satélites, aunque no tiene por qué ser uniforme. Los actuales sistemas GNSS tanto operativos como en fase de implementación proponen unas constelaciones nominales de un determinado número de satélites que se distribuyen de manera uniforme, al menos teóricamente, dentro de una serie de planos orbitales (Figura 3-8). Sin embargo, en la práctica no sucede así debido a la incorporación progresiva, en distintas fases, de satélites adicionales a la constelación nominal para la obtención de información redundante.

La arquitectura del segmento espacial de los diferentes sistemas GNSS difiere en función tanto del número como de la disposición tanto de órbitas como de satélites. El sistema *NAVSTAR-GPS* establece

seis planos orbitales sobre los cuales se dispone una constelación de 24 satélites operativos, cuatro por plano orbital. Por su parte, *GLONASS* presenta una constelación del mismo número de satélites aunque distribuidos en sólo tres planos orbitales, lo que supone un ratio de distribución de satélites por plano orbital más elevado (ocho satélites por plano orbital). El sistema *Galileo* plantea un modelo muy similar al ruso en cuanto al número de planos orbitales con la salvedad de presentar una constelación más amplia (27 satélites), obteniéndose así un ratio de satélites por plano orbital más elevado (nueve satélites por plano orbital).

En cuanto a la configuración y geometría de los planos orbitales de los diferentes sistemas GNSS existen ciertas diferencias. Los planos orbitales de los sistemas *NAVSTAR-GPS* y *Galileo* presentan unos ángulos de inclinación muy similares (55 y 56 grados respectivamente respecto a la línea del ecuador), aunque considerablemente menores que los presentados por *GLONASS* (64,8 grados). Las órbitas satélites describen trayectorias ligeramente elípticas, aunque con una serie de diferencias. El semieje mayor de la órbita seguida por el sistema *GLONASS* (25.508 km) es ligeramente menor que el descrito por *NAVSTAR-GPS* (26.560 km). *Galileo* plantea, sin embargo, una disposición en la que los satélites describirán órbitas considerablemente más alejadas (29.601 km), lo que les permitirá incrementar el campo de visión. Una representación de los planos orbitales de cada uno de estos sistemas GNSS desde dos perspectivas diferentes (plano ecuatorial y círculo polar) se muestra en la Figura 3-8 (Groves, 2008).

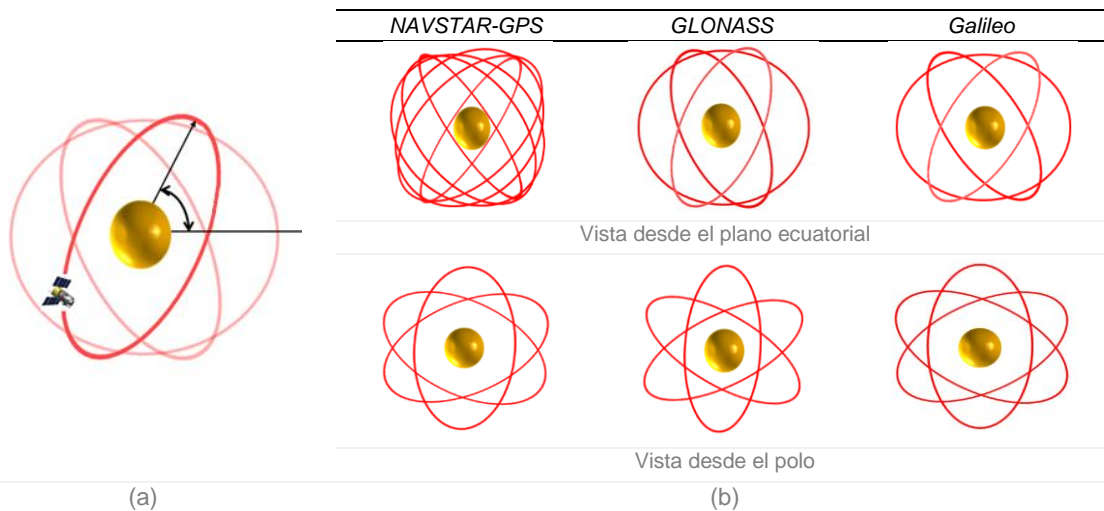


Figura 3-8: (a) Ángulo de inclinación del plano orbital respecto al plano ecuatorial. (b) Representación y perspectiva de los planos orbitales de las distintas constelaciones de satélites GNSS. Fuente: Adaptada de Groves, 2008.

Además de los satélites de navegación de las diferentes constelaciones GNSS, existe un tipo de sistemas de aumentación satelital (SBAS), que complementa a los primeros y está operativo en la *fase GNSS-1*. El segmento espacial de estos sistemas está compuesto por una serie de satélites de comunicación de órbita geoestacionaria (GEO). Estos satélites retransmiten la información con correcciones procedentes de los centros terrestres de control, permitiendo incrementar, entre otras prestaciones, los niveles de precisión e integridad de la señal.

Todos los satélites, tanto los de los propios GNSS como los de los sistemas SBAS, son diseñados con una esperanza de vida o *promedio de vida prevista*, la cual no suele coincidir con su período real de vida útil. El promedio de vida prevista equivale a un período de garantía o tiempo mínimo durante el que el satélite funciona de forma óptima. Entre las causas de fallo más comunes que limitan la vida útil de los satélites podemos destacar, entre otras, el desgaste de ciertos componentes, fallos en los paneles solares, falta de capacidad de las baterías, aparición de averías no conmutables en los sistemas electrónicos, agotamiento del combustible (Mejía-Meza, 2004).

3.2.5.2. Segmento de control

Este segmento está formado por un conjunto de estaciones en Tierra que reciben la señal procedente de los satélites, la monitorizan y la actualizan, enviando si es preciso correcciones de vuelta a los



satélites. Entre sus funciones están las de garantizar las prestaciones del sistema mediante la monitorización del segmento espacial y la de aplicar correcciones respecto a la posición orbital y temporal de los satélites.

Todos los sistemas GNSS son sistemas telemétricos de un sentido, cuya comunicación se establece desde los satélites a los centros terrestres (sentido descendente). La puesta en marcha de sistemas complementarios como los SBAS implica una comunicación espacio-tierra en un doble sentido. La implementación de una serie de antenas de comunicación permite así la transmisión de correcciones a los satélites geoestacionarios del sistema SBAS (sentido ascendente).

La estructura del segmento control se compone, en los diferentes sistemas GNSS, de una *estación de control principal* (o *maestra*) y una serie de *estaciones de monitorización*. Cada estación genera su propia información sobre el funcionamiento del sistema y, en última instancia, esta información se envía a la estación maestra de control, desde donde se retransmite la información a un satélite geoestacionario que forma parte del sistema SBAS. Como la posición de cada estación y sus coordenadas temporales se conocen con precisión al contar con relojes atómicos de gran precisión, se pueden combinar las medidas obtenidas por varias estaciones para crear un sistema de navegación inverso que permita determinar la localización espacio-temporal precisa de los satélites en cada momento. Una vez enviadas las correcciones, el satélite geoestacionario las aplica, permitiendo corregir su órbita y su mensaje de navegación.

3.2.5.3. Segmento usuario

Forman parte del segmento usuario todos los equipos que permiten captar las señales emitidas por los satélites y determinar de forma precisa valores de posición, velocidad y/o tiempo. En función del nivel de comunicación alcanzado se pueden distinguir entre los sistemas activos y los pasivos. Los *sistemas activos* son aquellos que permiten recibir y emitir señales, mientras que los *sistemas pasivos* son aquellos en los que sólo es posible recibir señales.

Los equipos han evolucionado mucho en los últimos años, pasando de captar la señal de 4-5 satélites como máximo en sus orígenes, hasta llegar a superar los 20 actualmente, permitiendo así alcanzar un mejor posicionamiento. Además de la propia evolución tecnológica se ha producido un incremento de la interoperabilidad entre los sistemas siendo posible compartir canales, lo que permite incrementar la eficiencia de transmisión de la señal.

Los componentes básicos que forman parte de este segmento son (a) el receptor y (b) la antena. Una descripción de cada uno de estos componentes se expone en los siguientes puntos:

a) Equipos receptores

Un equipo receptor se define como un sistema integrado de elementos diseñado para recibir y procesar las señales satelitales, ya sea de forma simultánea o secuencial. Los receptores suelen ser de tipo heterodino, basados en una mezcla de frecuencias que permite pasar de la frecuencia recibida en la antena a una más baja que puede ser controlada por la electrónica del receptor.

Los receptores pueden caracterizarse en función de múltiples variables como el tipo de observables de medida que permiten, su posibilidad de aplicación de correcciones diferenciales, su capacidad de comunicación con otros dispositivos a través de diferentes protocolos (*USB*, *bluetooth*, *NMEA*), etc. Dentro de los equipos receptores encontramos una serie de componentes que forman parte de los mismos. Entre estos componentes hay un reloj muy estable, una antena con preamplificador, un procesador de la señal recibida con el software correspondiente, dispositivos de almacenamiento de datos, sensores meteorológicos y una pantalla en la que se muestra la información de posicionamiento. El reloj empleado normalmente suele ser de cristal de cuarzo y presenta un alto nivel de estabilidad (del orden de 10^{-9}), aunque muy inferior a los relojes que portan los satélites.

Las tres funciones principales de los receptores son las siguientes: (a) la gestión de los datos del satélite, (b) la selección más óptima de satélites y (c) el cálculo de los parámetros de posicionamiento y de velocidad. La gestión de los datos enviados por el satélite se lleva a cabo con la opción *satellite manager* pudiendo ser distinguidos dos estados: (a.1) *INIT* y (a.2) *NAV*. El *modo INIT* permite registrar en memoria el almanaque y el estado de los satélites. El *modo NAV* permite almacenar los datos necesarios para la realización de cálculos de posicionamiento. Mediante la función *select satellite* el receptor encuentra, a



partir de una lista de satélites visibles, los cuatro satélites que presentan una geometría más óptima para la navegación. Finalmente, el receptor calcula su posición y su velocidad en función de los satélites empleados.

Los receptores pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios, siendo los más representativos los siguientes: (a) la frecuencia de la señal, (b) el nivel de codificación de la señal, (c) el tipo y modalidad de los canales de recepción, (d) el procedimiento de seguimiento de los satélites, (e) el observable medido y (f) la frecuencia de la señal.

a. En función de la frecuencia de la señal de los canales de recepción, distinguiendo entre receptores monofrecuencia y bifrecuencia:

a.1. Los *receptores monofrecuencia* presentan señal única.

a.2. Los *receptores bifrecuencia* presentan doble frecuencia de señal. La principal ventaja de estos sensores es que al trabajar con dobles frecuencias permiten determinar el retardo ionosférico, una de las fuentes de error que más limitan la precisión del sistema.

b. En función del nivel de codificación de la señal. Podemos distinguir entre los receptores codificados y los no codificados:

b.1. *Receptores no codificados*. Este tipo de receptores efectúan un tratamiento de la señal empleando procedimientos de cuadratura de la señal e interferometría. Presentan una gran precisión en el posicionamiento estático relativo al ir equipados con sistemas de doble frecuencia. Sus principales inconvenientes estriban en que no son cinemáticos, necesitan efemérides muy precisas, no descodifican el mensaje de navegación y no permiten un posicionamiento instantáneo.

b.2. *Receptores codificados*. Emplean todos los datos emitidos por los satélites y, generalmente, están equipados con sistemas de doble frecuencia. Para el procesamiento de los datos pueden emplear la técnica de la *cuenta Doppler integrada* con observables tanto en código como en fase. Estos receptores pueden ser empleados en cualquier modo de posicionamiento.

c. En función del tipo y modalidad de los canales de recepción²¹ se distinguen receptores de canal tipo cuadratura y tipo correlación:

c.1. *Receptores de canal tipo cuadratura*. Consisten básicamente en un detector o demodulador cuadrático que multiplica por sí misma la señal recibida, obteniendo un segundo armónico de la portadora que no contiene la modulación original del código.

c.2. *Receptores de canal tipo correlación*. En ellos el canal aplica un retardo para mantener la alineación o correlación entre el código recibido y el generado por el propio receptor.

d. En función del procedimiento utilizado para el seguimiento de los satélites, siendo posible distinguir entre receptores secuenciales, multicanal y multiplexares:

d.1. *Receptores secuenciales*. Son equipos de recepción que tienen un solo canal receptor que rastrea los cuatro satélites necesarios de uno en uno. Para la obtención de las medidas de posicionamiento emplea la medida real de uno de ellos y las medidas extrapoladas de los otros tres satélites.

d.2. *Receptores multicanal*. Disponen de un número variable de canales independientes, uno por satélite, los cuales realizan mediciones de forma simultánea. Son los receptores más precisos pero también los más caros.

d.3. *Receptores multiplexares*. Sólo tienen un canal físico pero pueden multiplexar la señal a los correladores sin necesidad de volver a buscar los satélites cada vez. Pueden obtener las señales de cuatro satélites en menos de un segundo. Su desventaja es que pierden potencia de señal y capacidad de enganche

e. En función del tipo de observable medido distinguimos entre receptores estándar (o navegadores) y de alta gama (o geodésicos):

²¹ Se entiende por *canal de recepción* todos los elementos necesarios tanto para el seguimiento como para la recepción de la señal satelital.



- e.1. *Receptores estándar o navegadores*. Este tipo de receptores emplean únicamente observables de código. Se caracterizan por tener un tamaño y peso reducidos lo que les permite un bajo consumo de batería. En algunas ocasiones incorporan una pequeña antena para mejorar la recepción de la señal. Suelen emplearse para navegación o, como mucho, para aplicaciones cartográficas de poca precisión. Este tipo de receptores son capaces de discriminar un 1% de la longitud de onda (para el código estándar de GPS es de 300 m), lo que supone un error de posicionamiento de unos tres metros.
- e.2. *Receptores geodésicos (o topográficos)*. Emplean únicamente observables de fase. Se emplean en campos de la ingeniería como la geodesia y la topografía, donde son necesarios niveles de precisión muy elevados, de orden centimétrico. Un receptor de este tipo muy preciso es el desarrollado por *Counselman*, denominado comercialmente MIS, que permite alcanzar niveles de precisión de orden milimétrico (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

b) Antena receptora

Su función es convertir una corriente eléctrica en radiación electromagnética y/o viceversa. La que llevan incorporada los satélites lo hace en el primer sentido, transformando corriente eléctrica en radiación electromagnética, mientras que la antena de los receptores en el segundo, transformando radiación electromagnética en corriente eléctrica.

La propia evolución de las antenas de los receptores ha permitido desarrollar distintos modelos: dipolo, dipolo curvado, cónico-espiral, helicoidal, plano, etc. La mayor parte de estos modelos suelen presentar una cobertura hemisférica omnidireccional que les permite captar, con una mayor sensibilidad, las señales satelitales, tanto las que provienen del cénit como del horizonte.

El punto en el que se efectúa el posicionamiento con el receptor coincide con el centro radioeléctrico de la antena el cual no suele coincidir con su centro físico. Esto origina un error residual por excentricidad del orden de varios milímetros denominado *ambigüedad del centro de fase de la antena*. Por esta razón, en posicionamiento relativo se recomienda respetar siempre la misma orientación para evitar dicho error. Por esta razón, las antenas suelen disponer de una señal de referencia en su carcasa exterior.

Todas las antenas de los receptores incorporan un plano terreno para evitar la incidencia de múltiples recepciones de señal, una situación que es habitual sobre todo en entornos urbanos de alta densidad (efecto *multipath*). Cuanto mayor sea este plano mayor será la protección de la antena ante reflexiones indeseadas, permitiendo minimizar la incidencia de este error.

En la parte inferior de la antena se conecta el cable a la salida de un preamplificador, que evita que la señal recibida se atenúe antes de llegar al receptor y no pueda ser leída. Este dispositivo amplifica sólo las frecuencias que se desean recibir, mientras que el resto sufren la atenuación del cable sin haber sido amplificadas. El preamplificador se alimenta habitualmente con corriente suministrada por el cable del receptor. Las especificaciones de potencia del preamplificador van a depender de la ubicación del receptor y de la antena. Tanto el cable como los circuitos del receptor introducen un retardo en la medición del tiempo.

En los últimos años han sido desarrolladas antenas múltiples que permiten la asociación de hasta cuatro antenas muy próximas ubicadas sobre un mismo plano y que, mediante una técnica similar a la empleada en la *interferometría de base muy larga* (VLBI), permiten determinar inclinaciones y giros en tres ejes, con una resolución angular del orden de unos tres arcominutos. De esta forma, se puede llegar a determinar la dinámica tridimensional de un móvil empleando un receptor GNSS integrado con una antena múltiple.

3.2.6. Fuentes de error

La señal transmitida por los satélites y recibida por los receptores está afectada por una serie de errores, que pueden ser resumidas en los siguientes puntos:

- Efectos atmosféricos. La ralentización de la señal del satélite a su paso por la ionosfera y la troposfera implica la aparición de retrasos de la señal. Los efectos atmosféricos son una de las fuentes de error que más afectan a las medidas obtenidas.

- Efecto *multipath* o *multicamino*. Este tipo de error se produce cuando la señal satelital se refleja en objetos como pueden ser edificios u obstáculos naturales antes de llegar al receptor, lo que incrementa el tiempo de viaje de la señal.
- Errores de sincronización de los relojes. Los relojes de los receptores no son tan precisos como los que llevan los satélites, lo que favorece la aparición de errores de tiempo o de falta de sincronización. Los receptores emplean normalmente relojes de cristal de cuarzo, los cuales presentan niveles de estabilidad (10^{-9}) considerablemente inferiores a los relojes de rubidio (10^{-12}), cesio (10^{-13}) o másers de hidrógeno (10^{-14}) que portan los satélites.
- Errores de órbita o de efemérides que pueden ocasionar errores en la localización del satélite.
- La visibilidad satelital. Cuantos más satélites pueda ver el receptor, más preciso será el nivel de posicionamiento obtenido. Edificios, interferencias electrónicas o la propia orografía del terreno pueden influir en una menor visibilidad satelital. Además, la cobertura de los sistemas GNSS no es uniforme, siendo habitual la presencia de ciertos sectores geográficos que presentan normalmente bajos de disponibilidad de señal.
- La geometría de los satélites. Se refiere a la posición relativa de los satélites respecto a un punto concreto de posicionamiento en un momento dado. La geometría ideal de los satélites se da cuando están localizados en ángulos amplios unos respecto a otros (Figura 3-9.a). Por el contrario, una geometría poco adecuada se da cuando los satélites están muy agrupados entre sí, próximos a formar una misma línea (Figura 3-9.b). El *factor de dilución de la precisión* (DOP) es un parámetro cuantitativo que permite evaluar la bondad de la geometría de los satélites en un momento determinado cuantificando el volumen de un prisma hipotético formado por los satélites y el receptor. Un menor valor del parámetro DOP implica un mayor volumen de prisma y, por tanto, una mejor geometría satelital²². El valor de este parámetro es el factor por el que debe ser multiplicado el error obtenido en las pseudodistancias para obtener el error final de posicionamiento. Servicios de degradación intencionada de la señal. Tanto GPS como GLONASS, ambos sistemas GNSS de origen militar, llegaron a degradar, de forma intencionada, la señal que recibían los usuarios civiles justificando motivos de seguridad nacional.
- Variaciones imprevistas de los ángulos de navegación del satélite (alabeo, cabeceo, guiñada) en su desplazamiento orbital debido, entre otros factores, a la desestabilización de sus ejes, la aparición de fuerzas gravitacionales y/o de cualquier elemento perturbador.

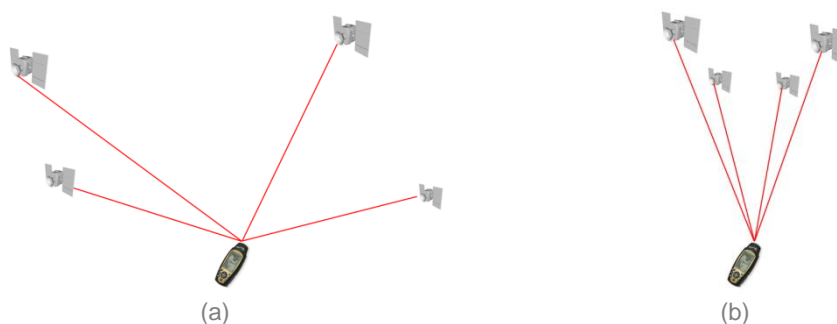


Figura 3-9: Factor de dilución de la precisión (DOP): (a) bajo DOP y buena geometría satelital, (b) alto DOP y pobre geometría satelital.

3.3. EL SISTEMA NAVSTAR-GPS

A principios de la década de 1960, varias organizaciones gubernamentales estadounidenses como la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), el *Departamento de Transporte* (DoT) y el *Departamento de Defensa* (DoD), propusieron el desarrollo de un sistema de posicionamiento satelital que presentara una cobertura global, un funcionamiento ininterrumpido y permitiera alcanzar altos niveles de precisión.

El primer sistema de navegación por satélite fue TRANSIT, que estuvo operativo desde mediados de la década de 1960 hasta el año 1996. El desarrollo de este sistema estaba enfocado a aplicaciones militares

²² La Tabla 3-10 permite estimar el nivel de bondad del valor del DOP.



de la Marina estadounidense tales como la localización de barcos y submarinos, además de la obtención de información precisa sobre lanzamientos de misiles. El posicionamiento con TRANSIT era bastante complejo, siendo necesario efectuar sucesivos ajustes y actualizaciones sobre los elementos localizados. En caso de posicionamiento dinámico, eran habituales desajustes y pérdidas de precisión. Debido a estas limitaciones, unos años más tarde, en 1969, la *Oficina del Secretario de Defensa* propuso la creación de un nuevo sistema de satélites para navegación y posicionamiento en aplicaciones militares (DNSS), cuyo objetivo era unificar esfuerzos para la puesta en marcha de un sistema de posicionamiento único, bajo el control de la *Joint Program Office (JPO)*, un departamento dependiente del *Space and Missile Center (SMC)*. Este sistema de posicionamiento satelital debía cumplir con todos los requerimientos planteados desde la industria militar. De esta forma, se pone en marcha el *Programa de Tecnología de Navegación (NTP)*, que posteriormente se renombraría como *Sistema de Posicionamiento Global NAVSTAR-GPS*.

El sistema *NAVSTAR-GPS* nace concretamente en el año 1973 y está en estado plenamente operativo desde el año 1994. Su uso civil ha sido progresivamente liberalizado con los años y cada vez son menos sus restricciones de uso. Entre otras limitaciones el sistema no ofrece señal a receptores situados a más de 18 km de altura sobre la superficie terrestre o que presentan una velocidad superior a 515 metros por segundo. La propuesta de modernización del sistema que se lleva a cabo actualmente garantiza el funcionamiento del sistema, al menos hasta el año 2030.

3.3.1. Arquitectura del sistema

Este sistema presenta una arquitectura propia muy similar a la del resto de sistemas GNSS, contando con los tres segmentos o niveles comentados anteriormente. Un estudio más en detalle para el caso de este sistema se presenta en los siguientes puntos:

3.3.1.1. Segmento especial

El segmento espacial del sistema *NAVSTAR-GPS* comprende una constelación nominal de 24 satélites operativos que se disponen en seis planos orbitales situados a una distancia de unos 20.200 km sobre la superficie terrestre. Cada uno de los planos orbitales se compone de cuatro satélites. Las órbitas descritas presentan una forma elíptica, aunque casi circular, con un semieje mayor de unos 26.560 km y un grado de inclinación de unos 55° respecto a la línea del ecuador terrestre. El período orbital del sistema es de casi medio día sidéreo (11 horas, 57 minutos y 58,3 segundos).

Con el paso del tiempo, la constelación del sistema ha ido experimentando una serie de cambios. La propuesta originalmente constaba de tres planos orbitales, con una inclinación de 63° con respecto a la línea del ecuador terrestre, sobre los que se disponían un total de 24 satélites, obteniéndose un ratio de ocho satélites por plano órbita. Posteriormente, por razones de presupuesto se planteó una reducción del número de satélites a 18 (seis satélites por órbita, además de tres de repuesto) y hasta no hace muchos años, se proyectaba distribuir los 18 satélites de servicio mencionados, en seis planos orbitales en lugar de los tres iniciales (tres satélites por órbita). Como ninguna de estas disposiciones de los satélites permitían alcanzar el grado de cobertura deseado (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1993), se optó por el modelo de constelación actual de 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales, prácticamente circulares, con una inclinación de 55° respecto al ecuador terrestre y una separación entre los mismos de unos 60° en ascensión recta (Seeber, 2003), lo que supone una distribución uniforme respecto al plano del ecuatorial. El incremento de un satélite por órbita en el proyecto de la actual constelación respecto a las anteriores permite eliminar zonas de baja cobertura, que sí existirían en las anteriores propuestas. Este modelo final también permite la disposición de satélites de repuesto, que pueden ser activados y/o desactivados en el momento oportuno.

Los satélites de repuesto permiten el reemplazamiento de cualquier satélite operativo que presente algún tipo de disfunción o malfuncionamiento. En los últimos años, la constelación del sistema ha llegado a mantener más de 30 satélites operativos, un número considerablemente superior al de la constelación nominal. Esto ha permitido mejorar la visibilidad satelital e incrementar los ratios de disponibilidad de la señal en ciertas zonas. En condiciones de plena operatividad (FOC), el sistema *NAVSTAR-GPS* permite obtener durante cualquier momento del día una cobertura global y una observación simultánea de entre cuatro y ocho satélites con una máscara de elevación sobre el horizonte superior a los 15°. Si dicha



máscara se reduce a 10°, se pueden llegar a observar hasta 10 satélites, aumentando hasta 12 cuando la máscara de elevación se reduce hasta los 5°.

La actual constelación del sistema está compuesta por diferentes tipos, clases y modelos de satélites pertenecientes a diversos bloques. Hasta el momento actual han estado (o están) operativos satélites de los siguientes bloques: I, II, IIA, IIR, IIR-M y IIF. A finales del año 2013, la constelación del sistema estaba compuesta por un total de 31 satélites operativos, siete más que los de la constelación nominal. Ocho de estos satélites pertenecen al bloque IIA, doce al IIR, siete al IIR-M y cuatro al IIF. La Tabla 3-4 resume la infraestructura espacial de los diferentes bloques de satélites del sistema, mientras que la Figura 3-10 muestra el modelo temporal de reemplazamiento de los satélites de los distintos bloques del sistema desde su puesta en marcha.

Tabla 3-4: Evolución de los bloques del sistema NAVSTAR-GPS. Datos actualizados a día 01 de noviembre de 2013. Fuente: *Centro de Navegación del Departamento de Seguridad Nacional de los EEUU, 2013.*

Bloque satelital	Período de lanzamiento	Lanzamiento			Operativos	
		Con éxito	Fallo	Planeado		
I	I	1978-1985	10	1	-	0
	II (serie inicial)	1989-1990	9	0	-	0
	IIA	1990-1997	19	0	-	8
II	IIR	1997-2004	12	1	-	12
	IIR-M	2005-2009	8	1	-	7
	IIF	2010-2014	4	0	12	4
	IIIA	2015-...	-	-	12	-
III	IIIB	-	-	-	8	-
	IIIC	-	-	-	16	-

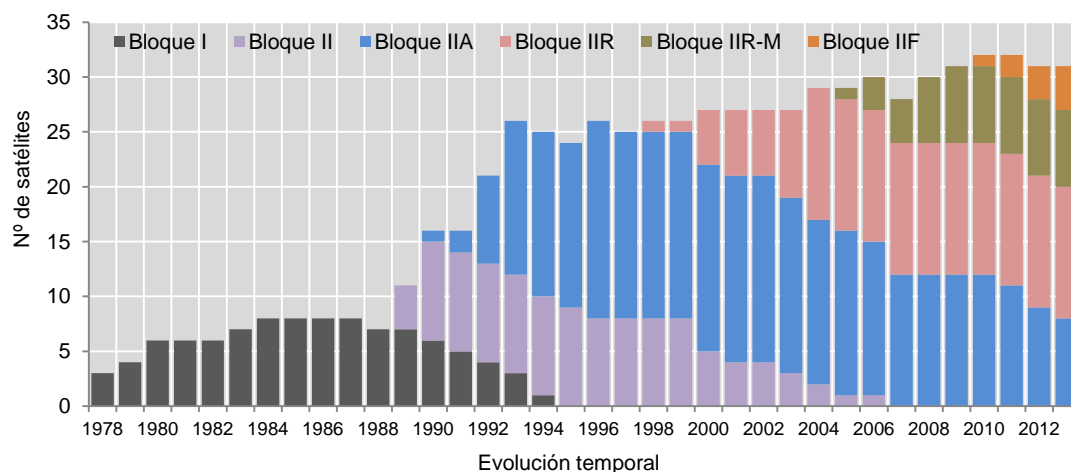


Figura 3-10: Evolución de la constelación de satélites NAVSTAR-GPS. Datos actualizados a día 01 de noviembre de 2013. Fuente: *Centro de Navegación del Departamento de Seguridad Nacional de los EEUU, 2013.*

El sistema presenta dos niveles operacionales relativos a su funcionamiento: (a) la capacidad operacional inicial y (b) la plena. La *capacidad operacional inicial* (IOC) del sistema tuvo lugar en julio de 1993, justo en el momento en el que 24 satélites de los bloques I, II y IIA operaban en conjunto y era posible estimar el posicionamiento con el servicio estándar del sistema. La IOC se declaró de forma oficial por el DoD unos meses después, en el mes de diciembre de 1993. Dos años después aproximadamente, en marzo de 1995, el sistema alcanzó su *capacidad operativa plena* (FOC), haciendo posible el uso de la señal del *servicio de posicionamiento preciso*. La FOC permitió alcanzar una visibilidad satelital de entre 6 y 11 satélites desde cualquier punto de la superficie terrestre con una geometría favorable. En estas condiciones, el tiempo máximo de observación de un determinado satélite es de 4 horas y 15 minutos suponiendo que pasa por el cenit, teniendo en cuenta una máscara de elevación sobre el horizonte



superior a los 15°. Aunque el sistema alcanzó su FOC en marzo de 1995, no se declaró oficial hasta el mes de julio de ese año.

Los satélites de los diferentes bloques presentan una clara evolución tecnológica debido a tres factores fundamentales: (a) el paso del tiempo, (b) la propia evolución tecnológica y (c) la apuesta del sistema, cada vez más decidida, por satisfacer las necesidades de los usuarios tanto militares como civiles en los últimos años. El desarrollo tecnológico de los satélites presenta una clara tendencia al incremento de su complejidad para satisfacer un mayor nivel de prestaciones e incrementar su robustez, que se expresa tanto en una transmisión más clara y fiable de la señal como en un aumento de la vida útil de los satélites.

El *tiempo de vida útil* o de garantía de un determinado satélite o bloque satelital no presenta siempre una relación lineal con su tiempo de operatividad real. Este período de garantía ha ido incrementándose de forma continua en las distintas generaciones de bloques. La vida útil de los satélites de los bloques I era de cinco años, siete y medio los de la serie inicial de bloque II y IIA, diez los de los bloques IIR y IIR-M y, finalmente, doce años los satélites del bloque IIF. La Figura 3-11 representa la diferencia entre los tiempos de vida útil de cada bloque y el tiempo de vida operativa de cada uno de los satélites. El tiempo de vida útil se representa para cada bloque en color sombreado, mientras el tiempo de vida real se representa por medio de la longitud de las barras. El color de las barras representa el estado actual de cada satélite: operativo (color verde) y no-operativo (color rojo).

El incremento del peso de los satélites de los últimos bloques (IIR-M y IIF) requiere que dichos satélites porten sistemas eléctricos más potentes, cuya energía se suministra mediante paneles solares más grandes. Esto redundó, a su vez, en un incremento de la envergadura y el peso de los propios satélites. Un ejemplo comparativo puede establecerse entre los satélites de los bloques I y IIR-M. Los satélites del bloque I eran relativamente pequeños, de unos 5,3 metros, 760 kg de masa y portaban un sistema eléctrico que tenía una potencia media de unos 0,41 kw. Por su parte, los satélites del bloque IIR-M presentan una envergadura de 11,4 metros, 2032 kg de peso y portan un sistema eléctrico de una potencia media de unos 1,14 kw. Este cambio en la fisonomía y complejidad de los satélites pertenecientes a los diferentes bloques supone, además, un incremento de sus costes asociados. Así, el precio aproximado de los satélites del bloque I era de unos 20 millones de dólares, un precio que era doblado por los satélites del bloque IIR y que triplicado por los satélites del bloque IIR-M.

Una breve revisión de los aspectos más relevantes de los sucesivos bloques de satélites que han formado parte del sistema NAVSTAR-GPS se presenta en los siguientes puntos. De esta forma, puede apreciarse la evolución tanto tecnológica como funcional que ha ido experimentando el sistema en los últimos años.

a) Bloque I

El primer bloque del sistema NAVSTAR-GPS presentaba un carácter experimental. Este bloque comprendía un total de 11 satélites, la mayoría de los cuales operaron con éxito. Sólo uno de ellos, el *Navstar I-07*, no llegó nunca a operar debido a un fallo en su lanzamiento en el año 1981. El último satélite de este bloque en ser lanzado fue el *Navstar I-11* (1985), aunque el bloque llegó a estar operativo hasta diez años después.

Los satélites del bloque I fueron lanzados entre los años 1978 y 1985, cesando su operatividad en el año 1995. Estos satélites fueron dispuestos en unos planos orbitales similares a los de los satélites del bloque II, aunque a una inclinación mayor, de unos 63° sobre el plano ecuatorial. De los 10 satélites que finalmente compusieron este bloque, cuatro portaban relojes de cristal de cuarzo, tres de rubidio y los tres restantes de cesio.

El precio de los satélites de este bloque fue de aproximadamente unos 20 millones de dólares. El análisis de los tiempos de vida real de los satélites de este bloque puso de manifiesto que siete de los diez satélites del sistema superaron su tiempo de vida útil, que era de cinco años, llegando cinco de los satélites del bloque a casi doblarla (110 meses). El satélite más longevo de este bloque fue el *Navstar I-03*, lanzado en 1978, que llegó a alcanzar los 161,3 meses de vida operativa. Por su parte, el satélite menos longevo fue el *Navstar I-01*, lanzado en el mismo año (1978), el cual sólo tuvo una actividad de 21,9 meses.

Las causas de fallo más comunes de los satélites de este bloque fueron (a) problemas en los relojes atómicos que afectaron a cinco satélites, (b) problemas en el suministro de potencia, que afectaron a dos satélites, y (c) problemas en la emisión de la señal, que afectaron a un satélite. En el caso de los satélites *Navstar I-05* y *I-06*, ambos lanzados en el año 1980, fue el gobierno estadounidense el que decidió dar

por terminada su fase operativa, el primero de ellos a los 45 meses y el segundo a los 126,8 meses de operatividad.

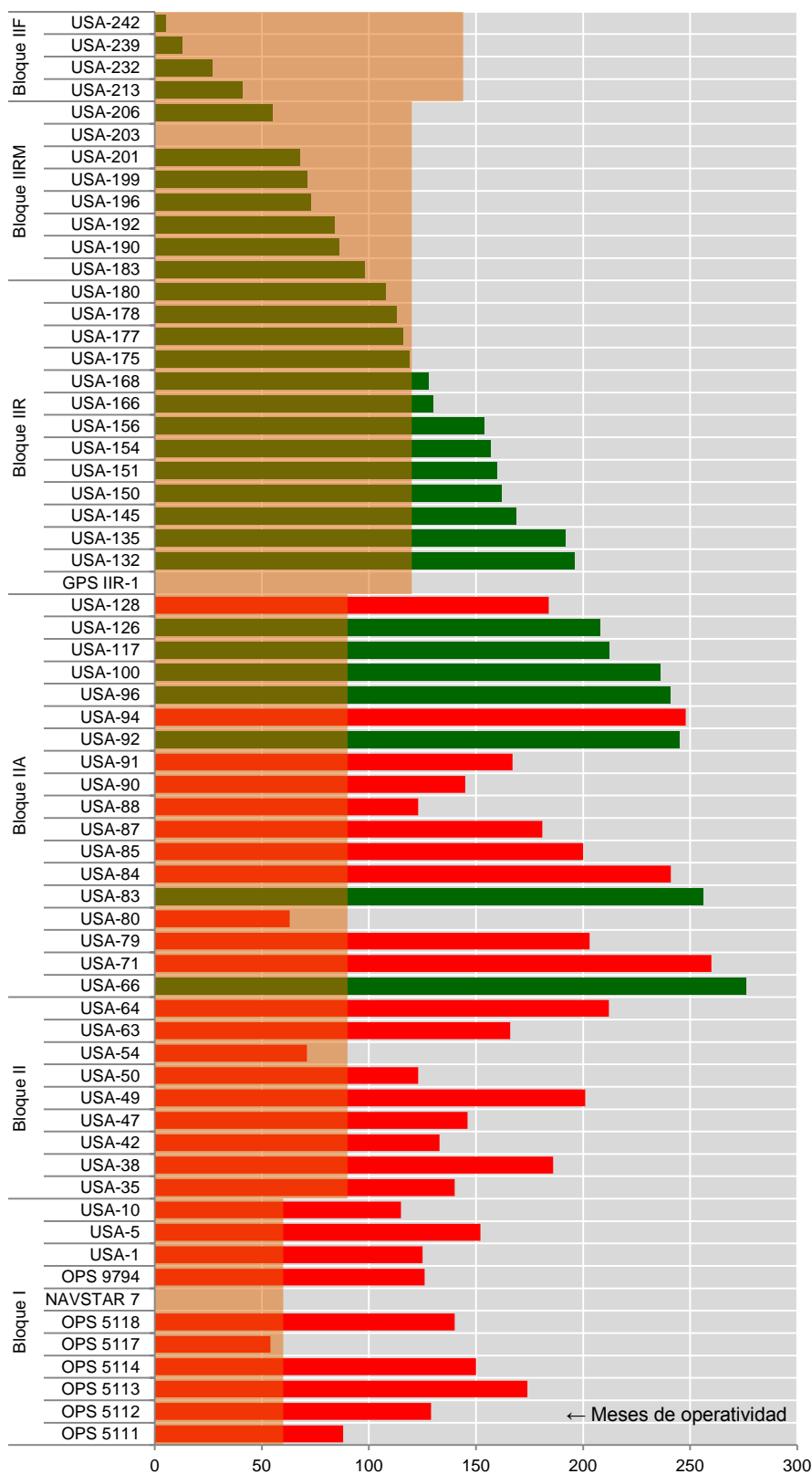


Figura 3-11: Comparación de los tiempos de vida útil y real de los satélites de la constelación NAVSTAR-GPS. Datos actualizados a día 01 de noviembre de 2013. Fuente: Observatorio Naval de los EEUU (USNO), 2013.



b) Bloque II (y sus sucesivas series: II, IIA, IIR, IIF)

Los satélites del *bloque II* fueron diseñados para completar la primera constelación del sistema y que éste alcanzara su plena capacidad operativa (FOC). El bloque II se compone de un conjunto de series evolutivas, cuya configuración es ligeramente diferente a la del bloque I, llegando a presentar una menor inclinación de los planos orbitales. Sobre los satélites de este bloque se plantearon unas mayores restricciones de uso, llegando a implantarse en ellos servicios de degradación de la señal por parte de los operadores del sistema. La señal de navegación emitida por los satélites de las sucesivas series de este bloque no proporciona ninguna información directa acerca del tipo de satélite ni de la serie a la que pertenece.

Tanto la envergadura de los satélites de este bloque como su peso fueron mucho mayores que los satélites del bloque anterior. La actual constelación del sistema *NAVSTAR-GPS* se compone de un total de 31 satélites, todos ellos pertenecientes a este bloque. Una visión más en detalle de las sucesivas series de este bloque se presenta a continuación:

b.1) Serie inicial del Bloque II

Los satélites de la *serie inicial del bloque II* presentaban una garantía de unos 7,5 años y podían permanecer en el espacio hasta 14 días de forma autónoma, sin ningún contacto con el segmento control. El lanzamiento de satélites de la serie inicial fue llevado a cabo entre los meses de febrero de 1989 y de octubre de 1990, comprendiendo el lanzamiento de un total de nueve satélites, el último de ellos operativo hasta el año 2007.

b.2) Bloque IIA

El *bloque IIA*, donde la *A* se refiere a *avanzado*, es una versión evolucionada de la serie anterior. Los satélites de este bloque estaban diseñados para una vida promedio de 7,5 años y podían estar operativos hasta un máximo de 180 días sin contacto con el segmento control. Este bloque comprendió el lanzamiento al espacio de 19 satélites entre los meses de noviembre de los años 1990 y 1997. En 2014 sólo están operativos siete satélites de este bloque.

Los satélites de este bloque eran más pesados que los del bloque anterior. Entre sus mejoras tecnológicas destacaban su capacidad de comunicación mutua, la incorporación de mayor ayuda a la navegación, además de algunas mejoras experimentales como la incorporación de retro-reflectores láser. Para una mejora de la medida de precisión del tiempo, cada uno de los satélites de esta serie portaba cuatro relojes atómicos, dos de cesio y dos de rubidio.

La aparición de una serie de problemas en los mecanismos de orientación automática de los paneles solares de estos satélites, debido a la falta de lubricación en el sistema de orientación inercial, obligó a una suspensión eventual de lanzamientos al espacio de nuevos satélites a principios de la década de 1990, lo que acabó repercutiendo en un retraso temporal de toda la misión.

b.3) Bloque IIR

Coincidiendo con el cambio de siglo, el sistema puso en marcha el *bloque IIR* (*R* de *reemplazamiento*) compuesto por satélites de nueva generación. Estos satélites podían operar en modo de navegación autónoma (*AutoNav*) durante un intervalo de tiempo de entre 14 y 180 días y podían además comunicarse entre sí, permitiendo estimar y actualizar los parámetros de navegación de cada uno de los satélites del bloque sin necesidad de estar en contacto con el segmento control.

La vida útil de los satélites de este bloque era de 10 años, considerablemente superior a los satélites de los bloques precedentes. El peso de cada satélite era de unos 2.030 kg en el momento del lanzamiento y unos 1.080 kg una vez en órbita. El lanzamiento de los satélites de este sistema tuvo lugar entre los años 1997 y 2004, comprendiendo un total de 13 satélites. El primer intento de lanzamiento, en enero de 1997, fue fallido debido a la explosión del propulsor *Delta II* a los 12 segundos de emprender el vuelo. El resto de satélites de este bloque están actualmente en estado operativo.

b.4) Bloque IIR-M

El *bloque IIR-M* es una versión mejorada del IIR. Los satélites de este bloque fueron lanzados al espacio entre los años 2005 y 2009, comprendiendo un total de ocho satélites. Todos los satélites de este bloque están actualmente operativos, excepto el Usa-203, lanzado en marzo de 2009, el cual no ha llegado a estar operativo en ningún momento.



Los satélites de este bloque incorporan dos nuevas señales: (a) una militar, que permite alcanzar una mejora de la precisión, y (b) una segunda señal civil, la L2C, la cual permite la corrección del efecto ionosférico aunque no la transmisión de datos. Se prevé además que alguno de los satélites de este bloque transmita señales en una nueva frecuencia como la L5, a pesar de los sucesivos fallos de transmisión en esta frecuencia de los satélites Usa-203 y Usa-206. Las últimas versiones de satélites de este bloque permiten alcanzar una mayor potencia de la señal, mejora del encriptado y más resistencia a las interferencias para usos militares.

Cada uno de los satélites de este bloque pesa unos 2.000 kg y tienen un coste aproximado de unos 75 millones de dólares. Tanto los satélites de este bloque como los de los anteriores (IIR-M y IIR) están equipados con tres relojes atómicos de rubidio.

b.5) Bloque IIF

Aunque estaba previsto el lanzamiento de satélites de este bloque en el año 2001, no sería hasta 2010 cuando se da por iniciada la puesta en marcha de este bloque. Este retraso se debió a la longevidad de los satélites de otros bloques que ha ido posponiendo la puesta en marcha de bloques sucesivos. En principio se estimaba que este bloque estuviera compuesto por un total de 16 satélites, aunque previsiblemente se reducirá a 12 solamente.

El promedio estimado de vida para los satélites de este bloque es de 12 años. Entre las mejoras esperadas transmitirán una nueva frecuencia civil, la L5, que permitirá alcanzar unos mayores niveles de precisión, además de satisfacer los requerimientos del sector de la aviación civil. Se espera que todos los satélites de este bloque estén equipados con máseres de hidrógeno, los cuales presentan unos niveles de estabilidad muy superiores a los relojes atómicos de rubidio y cesio.

c) Bloque III

El lanzamiento de los satélites de este bloque está previsto una vez finalizada la puesta en órbita de los satélites del *bloque IIF*. El *bloque III* estará formado por un conjunto, en principio, de entre 24 y 32 satélites, aunque esta cifra no resulte a día de hoy más que orientativa debido a la dificultad de hacer predicciones a medio plazo y a los continuos retrasos que afectan al sistema. Con la puesta en marcha de este bloque, el sistema *NAVSTAR-GPS* persigue dos objetivos principales: (a) reducir los costes públicos del sistema a través de la privatización de tareas y (b) proporcionar la suficiente flexibilidad en la arquitectura del sistema para satisfacer las necesidades y requerimientos planteados hasta el año 2030.

Los satélites de este bloque presentarán una serie de mejoras técnicas respecto a los de los bloques precedentes. Entre estas mejoras podemos destacar unos mayores niveles de precisión tanto espacial como temporal, una alta capacidad de intercambio de datos entre satélites y un incremento de la potencia de la señal recibida en todas las frecuencias, lo que permitirá evitar interferencias y contramedidas electrónicas.

La NASA ha propuesto que todos los satélites de este bloque incorporen obligatoriamente retro-reflectores láser para el seguimiento de las órbitas de los satélites independientemente de las señales de radio, permitiendo de esta forma desligar los errores de sincronización de los errores de efemérides. Esta es una característica estándar de *GLONASS*, que también aplicará *Galileo* y que llegó a ser incluida, de forma experimental, en dos satélites del bloque IIA. De la misma forma, la NASA está planteando, como novedad tecnológica y servicio adicional en los satélites de este bloque, la posibilidad de incorporar como segunda carga útil una serie de receptores DASS que permitan monitorizar y establecer comunicaciones en situaciones de riesgos y catástrofes.

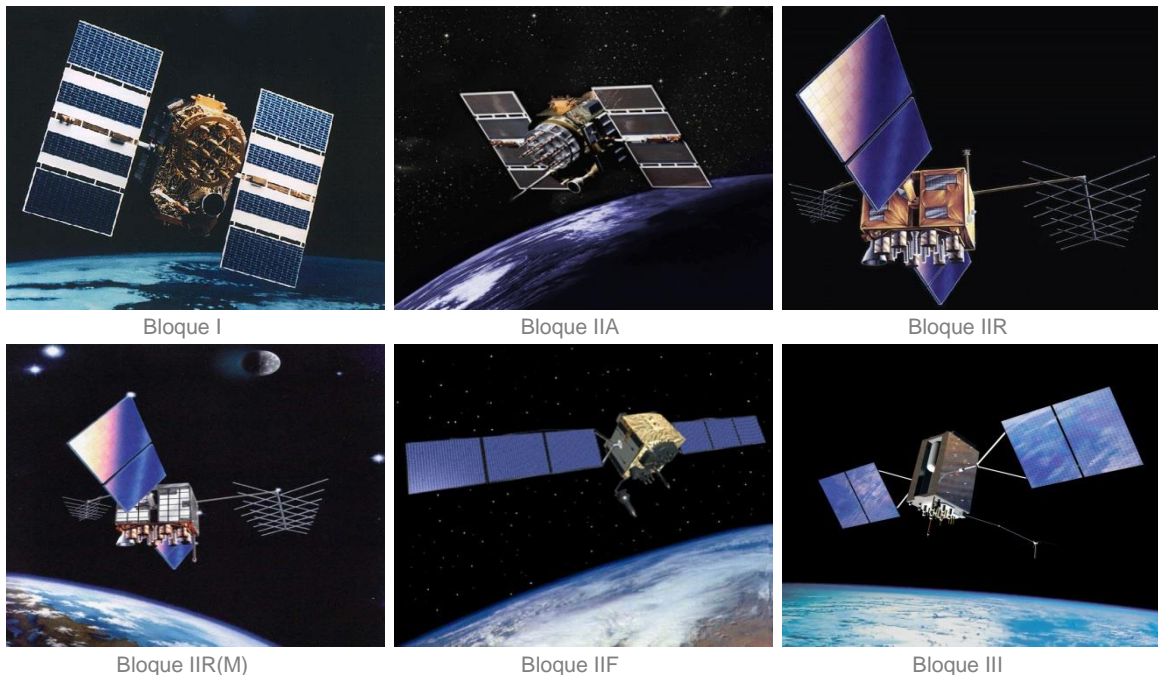


Figura 3-12: Simulación en órbita de los satélites de los respectivos bloques del sistema NAVSTAR-GPS.
Fuente: Web oficial del sistema NAVSTAR-GPS, 2014.

3.3.3.2. Segmento control

El segmento de control operacional del sistema NAVSTAR-GPS está constituido por una única estación maestra de control (MCS), seis estaciones de control o seguimiento (MS) propias del sistema y cuatro antenas en tierra (GA), cuyo equipamiento forma parte de las denominadas *estaciones de carga* (o *de subida de datos*). En los últimos años se está valorando la posibilidad de implantar una segunda estación MCS alternativa y se ha incrementado sustancialmente el número de estaciones de control (MS) añadiendo algunas de titularidad ajena al sistema.

Las *Fuerzas Aéreas de los EEUU* (USAF) son las responsables de la gestión y monitorización del segmento de control del sistema NAVSTAR-GPS encargándose, entre otras tareas, de:

- Planificar el sistema y lanzar nuevos satélites.
- Efectuar tareas de mantenimiento de los satélites.
- Medir las posiciones de los satélites y predecir sus órbitas.
- Medir y ajustar los relojes atómicos.
- Analizar las señales emitidas.
- Transmitir los datos y las correcciones a los satélites.
- Otras actividades como la aplicación de técnicas de degradación de la señal o la contratación y lanzamiento al espacio de los satélites.

Las estaciones de control poseen relojes atómicos de cesio que están sincronizados con el sistema. Tanto el tiempo como la posición de todos los satélites en vista son registradas desde el segmento control de forma continuada. Estos cálculos se efectúan con una precisión extrema, teniendo en cuenta incluso el estado de la atmósfera y su influencia en la refracción de las señales. Con estos datos, se calculan las órbitas y las correcciones temporales para los siguientes 210 días. Los resultados se envían a los satélites cada 30 días.

Un estudio más en detalle del papel de cada uno de los componentes del segmento control se expone en los siguientes apartados:



a) Estación maestra de control (MCS)

La estación maestra del sistema *NAVSTAR-GPS* es la encargada del control de los satélites y de la operatividad del sistema. En esta estación es donde, entre otras tareas, se calculan las efemérides para cada satélite del sistema. Esta estación se localizó en un principio en la base de la *Fuerza Aérea de los EEUU* en *Vanderberg* (California), aunque posteriormente se trasladó al *Consolidated Space Operations Center* (CSOC), en la base de la *Fuerza Aérea de los EEUU* en *Falcon*, en Colorado Springs (Colorado) (Figura 3-13.a).

Esta estación recopila los datos de seguimiento satelital procedentes de las estaciones de control (MS) y, a partir de ahí, calcula la órbita satelital y los parámetros de reloj empleando para ello un *filtro Kalman*. Estos resultados son entonces enviados a las antenas terrestres (GA), desde donde son reenviados nuevamente a los satélites. Por lo tanto, la estación maestra de control del sistema *NAVSTAR-GPS* es el centro neurálgico de todo el sistema *NAVSTAR-GPS*. Esta estación presenta un funcionamiento ininterrumpido durante las 24 horas del día todos los días del año.

b) Estaciones de control (MS)

Antes de la modernización del sistema *NAVSTAR-GPS*, había cinco estaciones de este tipo situadas en *Hawaii*, *Colorado Springs*, *Isla Ascensión* en el Atlántico Sur, *Diego García* en el Índico y *Kwajalein* en el Pacífico Norte (Figura 3-13). A éstas se unió años más tarde la de *Cabo Cañaveral* en Florida. La función de estas estaciones es el seguimiento pasivo de los satélites que tiene en vista para el cálculo preciso de las órbitas de los satélites. Desde estas estaciones de control son rastreados todos los satélites situados a una altura superior a los 5° sobre el horizonte.

Cada una de las estaciones de control está equipada con un reloj atómico de cesio, además de varios receptores que continuamente miden las pseudodistancias respecto a todos los satélites visibles con una frecuencia de actualización de medida de 1,5 segundos. Estas pseudodistancias son corregidas de los efectos meteorológicos e ionosféricos, y posteriormente ponderadas y ajustadas para confeccionar paquetes de datos que cada 15 minutos son transmitidos a la estación maestra de control.

La sincronización del tiempo de los satélites es una de las misiones más importantes del segmento control. Por esta razón, la estación maestra de control está sincronizada directamente con el tiempo estándar del *Observatorio Naval de los EEUU* (USNO), situado en *Washington D.C.* Desde ahí se sincronizan los relojes atómicos de los satélites con una frecuencia temporal de pocos nanosegundos para, posteriormente, ajustar las efemérides de cada satélite en función de la órbita descrita.

Las estaciones de control envían, a través del mensaje de navegación, información a la estación maestra del sistema, donde esta información se procesa. De esta forma es posible estimar y predecir las efemérides, además de los parámetros de reloj de cada uno de los satélites. Las *efemérides* se refieren a los parámetros de seguimiento, localización y órbita exactos de cada satélite. A partir de las efemérides el sistema puede estimar la posición de cualquier satélite con un error inferior a un metro en el sentido radial, siete metros en el sentido de la trayectoria y de tres metros en la dirección perpendicular a la misma.

Existe la posibilidad de estimar la posición de los satélites a partir de parámetros de efemérides que son calculadas *a posteriori* (*efemérides precisas*). Estos parámetros se obtienen mediante observación de satélites desde distintos puntos conocidos, cuyas coordenadas se determinan generalmente mediante sistemas de *interferometría de muy larga base* (VLBI) o *telemetría láser* (SLR). Las efemérides permiten obtener unos niveles de precisión superiores a 0,1 partes por millón (ppm), muy superiores a los obtenidos para las efemérides radiodifundidas, cuyos niveles de precisión están en el orden de entre las 3 y las 4 ppm.

c) Antenas terrestres (GA)

El sistema cuenta con cuatro grandes antenas de este tipo, ubicadas en el mismo lugar que las estaciones de control de *Isla Ascensión*, *Diego García*, *Kwajalein* y *Cabo Cañaveral* (Figura 3-13.a). Toda la información actualizada y corregida por la estación maestra de control se envía a los satélites a través de estas antenas terrestres, que también son empleadas para enviar y recibir información del satélite. Desde las cuatro estaciones equipadas con estas antenas, denominadas *estaciones de carga* (o de *inyección*), se transmiten de nuevo a los satélites las efemérides, el estado de los relojes y cualquier otra información calculada por la estación maestra de control. Una vez enviada, esta información se almacena en la memoria de los satélites para su posterior radiodifusión.



Los parámetros de efemérides de los satélites son enviados por las antenas a cada satélite a través de un enlace radio en la banda S que funciona en dos canales, uno ascendente (a una frecuencia de 1783,7 MHz) y otro descendente (2227,5 MHz). El proceso de envío o carga de esta información se hace cada ocho horas, lo que supone tres veces al día para cada satélite. Si una antena deja de funcionar o no lo hace en condiciones óptimas, los mensajes de navegación previamente almacenados siguen disponibles, aunque esta alternativa conlleva una degradación considerable de los niveles de precisión de posicionamiento. El tiempo máximo que los satélites del sistema pueden permanecer sin contacto con el segmento control depende del bloque al que pertenezcan: (a) entre 3 y 4 días los satélites del bloque I, (b) en torno a los 14 días los satélites de la serie inicial del bloque II, (c) en torno a los 180 días los satélites del bloque IIA y (d) más de 180 días los del bloque IIR (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

En los últimos años, el sistema NAVSTAR-GPS está llevando a cabo un proyecto de modernización de su segmento control con el que pretende reducir los costes operacionales y adoptar una serie de mejoras en su funcionamiento. Entre las acciones propuestas dentro de este plan destacamos las siguientes (Prasad y Ruggieri, 2005; Shaw *et al.*, 2000; Sandhoo *et al.*, 2000):

- Actualización y modernización del equipamiento de las estaciones y de las antenas.
- Reemplazamiento del actual sistema computacional centralizado en una única estación maestra de control y apuesta por una arquitectura descentralizada con varias estaciones maestras de control.
- Incremento de los niveles de precisión a partir de una mejora de los parámetros transmitidos en el mensaje de navegación.
- Incorporación de nuevas prestaciones y funcionalidades en los satélites de los bloques IIF y IIIA que permitan ampliar la comunicación con todas las estaciones del segmento control.

La modernización del sistema permitirá una mejor estimación del *filtro Kalman*²³, de las efemérides transmitidas, de los parámetros del reloj, además de que incrementará y mejorará el control del funcionamiento de los satélites (Creel *et al.*, 2006).

Una primera fase de modernización de este segmento se ha llevado a cabo con la incorporación reciente de una nueva red de estaciones de control, propiedad de la *Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial* (NGA) (Figura 3-13.b). En el año 2005 fueron incorporadas como estaciones de control seis nuevas estaciones, localizadas en *Washington D.C.* (EEUU), *Buenos Aires* (Argentina), *Manama* (Bahrein), *Hermitage* (Reino Unido), *Quito* (Ecuador) y *Adelaida* (Australia). Un año después fueron incorporadas otras cinco estaciones: *Fairbanks* (Alaska, EEUU), *Papeete* (Tahiti), *Pretoria* (Sudáfrica), *Osan* (Corea del Sur) y *Wellington* (Nueva Zelanda) (Figura 3-13.a).

Este incremento en el número de estaciones de control permite alcanzar mejoras en el seguimiento de la señal y una mayor redundancia de información lo que, a su vez, repercute en una estimación más precisa de los parámetros de posición y tiempo obtenidos con el sistema.

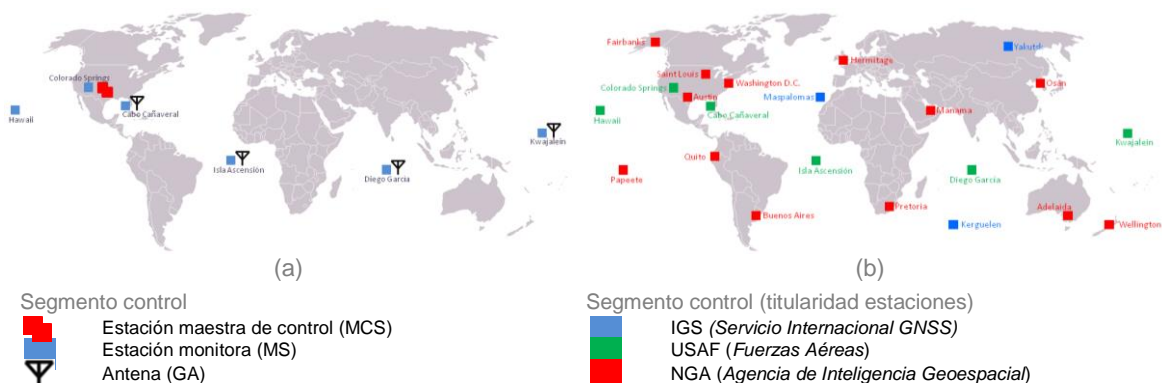


Figura 3-13: (a) Segmento control del sistema NAVSTAR-GPS: (a) Tipo de estaciones teniendo en cuenta únicamente las propias de las *Fuerzas Aéreas* de los EEUU (USAF). (b) Todas las estaciones y su titularidad. Datos del año 2006.

²³ El *filtro Kalman* se aplica para el cálculo preciso de las órbitas de los satélites.



3.3.2. Códigos y señal GPS

Las señales GPS se transmiten en dos frecuencias de radio de la misma banda (L): $L1$ y $L2$. Ambas frecuencias derivan de la *frecuencia fundamental* (f_0) que presenta una frecuencia de 10,23 MHz. La frecuencia $L1$ transporta el mensaje de navegación y las señales propias del *servicio de posicionamiento estándar* (SPS), mientras que la frecuencia $L2$ se emplea para el *servicio de posicionamiento preciso* (PPS). El uso combinado de las señales $L1$ y $L2$ permite medir los retrasos en la propagación de las señales a su paso por la atmósfera, siendo posible de esta forma determinar el efecto ionosférico (Davies y Hartmann, 1997). Ambas frecuencias modulan y transportan información que pueden ser clasificada en tres niveles: (a) onda portadora, (b) mensaje de navegación y (c) modulación de secuencias de *ruido pseudoaleatorio* (PRN).

La onda portadora permite la modulación de las secuencias binarias y la medición de la distancia entre el satélite y el receptor. Presenta una forma de onda senoidal con una frecuencia propia en cada caso. El mensaje de navegación contiene información acerca de las órbitas satelitales, la posición de los satélites, su estado funcional, la hora GPS, etc. Esta información se envía a todos los satélites desde las estaciones de control. El mensaje de navegación se dispone en forma de una secuencia binaria de bits que se emiten a una tasa de 50 bits por segundo.

Por su parte, las *secuencias de ruido pseudo-aleatorio* (PRN) modulan la onda portadora de forma que permiten aumentar el ancho de banda de la transmisión y reducir la densidad de *potencia espectral*, es decir, el nivel de potencia en cualquier frecuencia dada. La señal resultante tiene un espectro muy parecido al del ruido, de tal forma que a todos los receptores les parecerá ruido menos al receptor al que se dirige la señal. Esta técnica de modulación se conoce con el nombre de *acceso múltiple por división de código en secuencia directa* (DS-SS). Esta señal permite un acceso cifrado al mensaje de navegación, además de medir la pseudodistancia existente entre el satélite y el receptor.

El uso de un código pseudoaleatorio presenta como ventajas más claras la reducción de interferencias y la amplificación de las señales. La complejidad del código pseudoaleatorio permite asegurar que un receptor cualquiera no pueda sintonizar, por accidente, otra señal. Como cada uno de los satélites tiene su propio código PRN, cualquier receptor puede averiguar el satélite que emite la señal en cada momento y evitar que se produzcan interferencias entre la señal de diferentes satélites. Además, el uso de códigos PRN permite conformar un "sistema económico" a través de la aplicación de la denominada *teoría de la información* permitiendo una amplificación de la señal del sistema. Esto permite que las señales emitidas por satélites puedan ser captadas por pequeños receptores estándar, sin necesidad de emplear grandes antenas por muy débiles que sean estas señales. Todo esto hace que el sistema sea más fiable y robusto, al reducirse la probabilidad de fallos, ambigüedades e interferencias.

Un estudio más detallado de los diferentes niveles en que es modulada y transportada la información de las respectivas bandas de frecuencia del sistema NAVSTAR-GPS se presenta en los siguientes puntos:

3.3.2.1. Códigos C/A y P

El código C/A (*Course/Adquisition*) o S (*Standard*) es el empleado dentro del *servicio de posicionamiento estándar* (SPS) del sistema NAVSTAR-GPS. Este código es una señal modulada sobre la onda portadora $L1$ con una frecuencia nominal de 1,023 MHz, equivalente a una décima parte de la frecuencia fundamental (f_0), la cual presenta una longitud de onda efectiva de unos 300 metros. Este código se genera a partir de la combinación de dos códigos intermedios, denominados *códigos Gold*, cuya longitud es de 1.023 bits y que se expresan según la siguiente ecuación:

$$C/A = G_1(t) \cdot G_2(t) + N_i(10T) \quad (3.8)$$

en la que N_i , en períodos enteros, representa el desfase existente entre $G_1(t)$ y $G_2(t)$, siendo:

$$T = \frac{1}{10,23} \text{ MHz} \rightarrow 10T = \frac{1}{1,023} \text{ MHz} \quad (3.9)$$

Existen 1.023 valores distintos de N_i a partir de los que se pueden generar 1.023 códigos C/A diferentes. Su captura por parte de cualquier receptor codificado resulta muy sencilla debido a su gran longitud de código, permitiendo de esta forma el acceso a todo tipo de usuarios civiles.



El segundo código, denominado P (*Precise*), se modula directamente sobre la f_0 (10,23 MHz) tanto en la banda L1 como en la L2. Este código es la base del *servicio de posicionamiento preciso* (PPS) del sistema y presenta una longitud de onda efectiva de unos 30 metros. Este código se genera a partir de la combinación de dos códigos intermedios, $X_1(t)$ y $X_2(t + n_i \cdot T)$, siendo el período de X_1 equivalente a 1,5 segundos y a una longitud de 15.345.000 bits, ligeramente inferior a la propia del código X_2 . De esta forma, el código P se genera a partir de la siguiente relación:

$$P(t) = X_1(t) \cdot X_2(t + n_i \cdot T) \quad \text{donde} \quad \begin{cases} 0 < n_i < 36 \\ T = \frac{1}{10,23} \text{ MHz} \end{cases} \quad (3.10)$$

El primer factor de la relación se refiere a la longitud de $X_1(t)$, mientras el segundo representa la longitud de $X_2(t)$, 37 bits más larga que la del primero. Cada satélite tiene su propio *código offset* ($n_i \cdot T$), el cual permite distinguir el código P propio de cada uno de ellos, existiendo un total de 37 códigos distintos²⁴. El producto de los códigos intermedios proporciona la longitud final del código P, cuyo valor se expresa en el siguiente producto:

$$(1,5345 \cdot 10^7 \text{ bits}) \cdot (1,5345 \cdot 10^7 \text{ bits}) = (2,35469 \cdot 10^{14} \text{ bits}) \quad (3.11)$$

Sabiendo que la frecuencia-bit del código es de 10,23 Mbits/s, la duración completa del código P puede ser determinada a partir de la siguiente relación:

$$T = \frac{\text{Duración código}}{\text{Frecuencia - bit}} = \frac{2,35469 \cdot 10^{14}}{10,23 \cdot 10^6} = 2,30175 \cdot 10^7 \text{ s} \rightarrow 266 \text{ días} + 9 \text{ horas} + 45 \text{ min} + 55 \text{ s} \quad (3.12)$$

La mayoría de los estudios determinan la duración del código P en 267 días, equivalente a unas 37 semanas. Sin embargo, este valor no tiene mucha importancia debido a que este código se reajusta cada semana lo que supone un reinicio del cómputo temporal con esta frecuencia. Este código se divide de tal forma que cada satélite tiene asignada una única fracción de una semana de código, la cual no puede solaparse con la asignada a otro satélite. Cada elemento en la secuencia del código corresponde a un intervalo de unos 100 nanosegundos, lo que equivale a 30 metros en distancia. El período mencionado de 1,5 segundos de código P se conoce con el nombre de *cuenta Z*. Una vez transcurridas 403.199 *cuentas Z*, correspondientes a una semana, los generadores se resetean y el código P se reinicia nuevamente.

La función *cuenta Z* tiene lugar dentro de la *palabra HOW* del mensaje de navegación. Cada seis segundos la información del mensaje de navegación del satélite contiene una nueva *cuenta Z* que determina en qué punto se encuentra la transmisión del código P. Esto posibilita no tener que trabajar sobre grandes extensiones de código P puesto que, con la frecuencia de asimilación de este código por parte de un receptor codificado, su lectura podría ser muy costosa. Por lo tanto, los receptores codificados efectúan, en primer lugar, el tratamiento del código C/A, de una longitud de código de sólo 1.023 bits para posteriormente, a través de la palabra binaria HOW del mensaje de navegación, determinar con una gran precisión el desplazamiento secuencial de código P.

En caso de necesidad, el código P puede ser encriptado y convertirse en el *código Y*, resultado de la combinación del código P con un código secreto W según la técnica de *anti-spoofing* (A-S). Para la lectura del código Y se requiere de unos receptores especiales que permitan descryptar la señal.

Por lo tanto, las grandes diferencias entre el código C/A y el P son sus longitudes y niveles de precisión asociados. En cuanto a su longitud, decir que el C/A es mucho más corto, sólo 1.023 bits, lo que significa que con una frecuencia de transmisión de 1,023 MHz se repite 1.000 veces cada segundo. En cambio, el código P tiene una longitud de unos $2,35469 \cdot 10^{14}$ bits lo que significa que, con una frecuencia de transmisión diez veces superior a la anterior (10,23 MHz), tardaría en ser emitido de forma íntegra unas 37 semanas. Las características propias de cada uno de los códigos determinan sus niveles de precisiones y, a su vez, su tipo de posicionamiento. El código C/A permite alcanzar precisiones decamétricas siendo empleado por parte del *servicio de posicionamiento estándar* del sistema. Por su parte, el código P ofrece precisiones nominales métricas siendo empleado para el *servicio de posicionamiento preciso* del sistema. Un resumen de las características más relevantes de cada uno de los códigos se expone en la *Tabla 3-5*:

²⁴ Los valores de n_i pueden estar comprendidos entre 0 y 36.



Tabla 3-5: Comparación entre los códigos C/A y P del sistema NAVSTAR-GPS.

	Código C/A	Código P
Uso	Civil	Militar
Factor multiplicativo respecto a la f_0 [-]	1/10	1
Portadoras	L1	L1 y L2
Frecuencia [MHz]	1,023	10,23
Longitud onda [m]	293,1	29,31
Precisiones	Decamétricas	Métricas
Posicionamiento	SPS	PPS
TFSR	2	4
Número de chips [millones por segundo]	1,023	10,23
Longitud chips [m]	300	30
Número de bits	1.023	$2,35469 \cdot 10^{14}$
Tiempo de repetición	1 ms	266,4 días (7 por satélite)

3.3.2.2. Mensaje de navegación

Cada uno de los satélites envía, de forma constante y con una señal de frecuencia de 50 Hz (lo que supone un factor de 1/204.600 respecto a la frecuencia fundamental), un conjunto de información que comprende información sobre la órbita del satélite, correcciones horarias, medida de tiempo GPS, efemérides de los satélites y el almanaque. Esta información es recogida y registrada por los propios receptores. Toda esta información forma parte del mensaje de navegación, el cual se compone de una secuencia de 37.500 bits cuya señal es modulada sobre ambas ondas portadoras. El tiempo de recepción del mensaje de navegación de forma íntegra es de 12,5 minutos tomando como referencia una tasa de transmisión de 50 bits por segundo.

La estructura del mensaje de navegación consta de 25 *páginas* de 1.500 bits cada una de ellas. A una velocidad de transmisión de unos 50 Hz, cada página tarda en ser transmitida 30 segundos. Al haber un total de 25 páginas, todo el mensaje tarda en ser transmitido un total de 12,5 minutos. Cada página se subdivide en cinco *párrafos* de 300 bits cada uno y éstos, a su vez, en 10 *palabras* de 30 bits de longitud²⁵ (Tabla 3-6).

Tabla 3-6: Estructura del mensaje de navegación del sistema NAVSTAR-GPS.

	Número	Transferencia [bits]	Tiempo [s]
Mensaje de navegación	-	37.500	750
↓→ Páginas	25 por mensaje	1.500	30
↓→ Párrafos	5 por página	300	6
↓→ Palabras	10 por párrafo	30	0,6

Cada bit del mensaje de navegación tarda en ser transmitido 20 milisegundos, el mismo tiempo en que el código C/A se repite 20 veces. De los cinco párrafos de los que se compone cada página, los tres primeros son constantes. Sólo varían el cuarto y el quinto, que lo hacen en cada una de las 25 páginas. Cada uno de estos párrafos comienza siempre con la *palabra de telemetría* (TLM), necesaria para la sincronización del sistema. A continuación aparece la *palabra de transferencia* (HOW), cuya misión es permitir una rápida conmutación del código C/A al código P. Estas dos palabras binarias se generan normalmente en el propio satélite, mientras que las ocho palabras restantes de cada bloque se generan en el segmento control.

La *palabra de telemetría* (TLM) consta de un preámbulo de 8 bits para el modelo de sincronización, 14 bits para el mensaje telemétrico, 2 bits no informáticos y 6 bits de paridad, lo que en su conjunto hacen un

²⁵ La estructura del mensaje de navegación en español es de *Página > Párrafo > Palabra*, aunque existen diferentes denominaciones posibles para cada uno de los componentes. La denominación original es *Frame > Subframe > Word*.



total de 30 bits. Esta palabra informa del estado de la información, así como de aspectos referentes a la medida del momento tanto de rotación residual y como de inercia de los satélites. Por lo general, el segmento de control sólo emplea esta palabra para realizar un chequeo de la información que se sube al satélite. Por su parte, la *palabra HOW* proporciona la información relativa a la *cuenta Z* de ajuste del código P. Contiene 17 bits de información sobre la *cuenta Z*, 3 bits sobre la identificación del bloque de mensaje, 2 bits no informáticos, 6 bits de paridad y un bit de sincronización.

El primer párrafo se corresponde con el *primer bloque* del mensaje de navegación contiene los parámetros de corrección del reloj del satélite. Tiene una duración total de unos seis segundos y una longitud de 300 bits. Se genera en el segmento control con una frecuencia de repetición de 30 segundos. Este primer párrafo incluye la *palabra AODC* que define el tiempo de la información del bloque, y la *palabra TGD*, que permite adoptar un modelo para la corrección del retardo ionosférico para receptores de frecuencia simple.

Los párrafos segundo y tercero conforman el *segundo bloque* del mensaje de navegación, el cual se repite cada 30 segundos, tiene una duración real de 12 segundos y contiene un total de 600 bits a través de los cuales se transmiten las efemérides de los satélites. El segmento control las calcula y las transmite al satélite cada hora junto a los parámetros orbitales keplerianos y sus correspondientes correcciones. La estructura de este submensaje incluye la *palabra AODE*, que permite al usuario conocer el momento de la subida de los datos de efemérides, pudiendo así emplear esta información como un factor provisional de corrección de errores ya que las efemérides sólo son válidas durante unas pocas horas.

Aunque las órbitas de los satélites del sistema *NAVSTAR-GPS* son cuasi-circulares, las efemérides transmitidas incluyen desviaciones periódicas y no periódicas de dichas órbitas. Estas desviaciones se deben a la influencia de los campos gravitatorios generados por el Sol, la Luna y otros planetas. Teniendo en cuenta la irregularidad de la distribución de la masa terrestre, las órbitas presentan unas excentricidades generalmente menores de 0,005 y nunca superiores a 0,015.

El cuarto párrafo se corresponde con el denominado *bloque del mensaje*, tiene una duración de seis segundos y consta de 300 bits. Ofrece un modelo ionosférico para usuarios que emplean una sola frecuencia, información UTC e indicaciones de si se aplica en alguno de los satélites del sistema de algún tipo de servicio de degradación de la señal. Actualmente este bloque sólo emplea 10 de sus 25 páginas. De las 15 páginas restantes, 11 están reservadas, 3 son para repuestos y una última se mantiene para mensajes especiales. Este mismo párrafo contiene el almanaque, además de información relativa al estado de los relojes de los satélites en caso de que la constelación supere los 24 satélites, ya sean propios de la constelación *NAVSTAR-GPS* o incluso satélites de otras constelaciones que difundieran o pudieran llegar a difundir señales del sistema como, por ejemplo, los satélites *INMARSAT*.

El quinto párrafo del mensaje de navegación se corresponde con el *último bloque*. Consta de 25 conjuntos de datos que se emiten cada 30 segundos. Por esta razón, se necesitan 12,5 minutos para la recepción completa de este bloque, al cabo de los cuales se vuelve a reiniciar la emisión. Así, en 31 mensajes sucesivos se obtendrán los almanaques de los 31 satélites operativos.

Este quinto párrafo contiene el *almanaque* de datos de cada satélite. El *almanaque* nos proporciona una idea general de cada uno de los satélites, además de información de efemérides, correcciones de los relojes y de valores estimados de los retardos atmosféricos, siendo generada esta última información a partir de la combinación del primer y segundo bloque de cada satélite. El almanaque también se emplea para conocer las horas de ortos y ocasos de los satélites, así como para generar un gráfico del cielo que muestre la trayectoria de los satélites sobre la posición de una determinada estación receptora, conformando así un modelo que aunque es de baja precisión presenta una gran utilidad. Los equipos de recepción guardan el almanaque en su memoria y lo actualizan automáticamente conforme se van produciendo cambios.

Tanto los parámetros de efemérides (párrafos segundo y tercero) como los del almanaque (párrafo quinto) se obtienen a partir de las órbitas estimadas para un determinado intervalo de tiempo dependiendo la posición y velocidad de los satélites. En función de las necesidades del operador pueden emplearse diferentes técnicas de cálculo, desde una solución analítica aproximada hasta métodos de integración numérica que permiten obtener unas precisiones mayores.

Los datos del almanaque son válidos para un período temporal de varias semanas, aunque su precisión va descendiendo con el tiempo. Así, puede presentar errores de decenas de kilómetros al cabo de unos pocos días, pudiendo llegar a ser de cientos de kilómetros en pocas semanas. No obstante, si se tiene en

cuenta que el satélite tiene una velocidad aproximada de 4 km/s, el error orbital después de un mes equivaldría a la variación de un minuto de tiempo sobre la época del orto y el ocaso, razón por la cual el almanaque puede ser utilizado incluso para estimaciones de varios meses.

Un esquema general de la estructura general del mensaje de navegación se representa en la Figura 3-14:

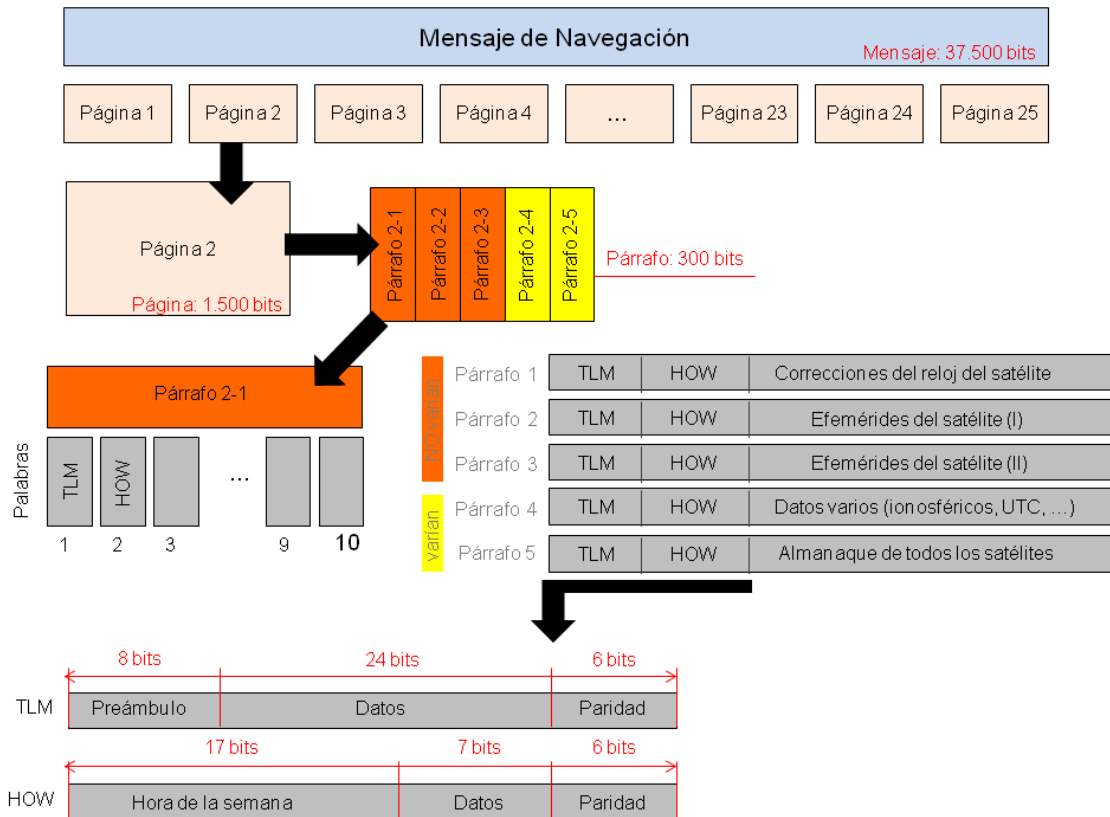


Figura 3-14: Estructura completa del mensaje de navegación del sistema NAVSTAR-GPS.

3.3.2.3. Modulación de las señales

Sobre las dos frecuencias portadoras $L1$ y $L2$ se modula el código P, mientras que el código C/A se modula únicamente sobre la frecuencia $L1$. La técnica empleada para la modulación de códigos binarios es la *modulación binaria bifase* o *por cambio de fase* (BPSK). Pueden distinguirse dos estados de onda en la portadora: (a) el estado normal y (b) el estado inverso. El *estado normal* equivale a un *0 binario* (*code-chip 0*) y es el resultado de multiplicar por +1 la amplitud de la onda portadora, lo que significa en la práctica dejarla tal cual. Por su parte, el estado *inverso*²⁶ equivale a un *1 binario* (*code-chip 1*), y es el resultado de multiplicar por -1 la amplitud de la onda portadora, lo que significa en la práctica someter la onda a un desfase de 180°.

Los códigos P y C/A están desfasados 90° entre sí, en cuadratura y fase respectivamente, lo que permite separarlos *a posteriori* y distinguir el tipo de modulación empleada. En realidad mientras una modulación es función seno, la otra modulación es función coseno. La relación entre transferencia de datos en los códigos P y C/A es 10:1. Así, por cada 10 bits enviados de código P se envía uno sólo del código C/A. De esta forma cuando se produce un cambio en un determinado código, por ejemplo en el código P, éste corresponderá al código inverso, en este caso al código C/A.

Todos los satélites del sistema NAVSTAR-GPS emplean las mismas frecuencias portadoras. Aunque lleguen a producirse interferencias de señales de los distintos satélites en un determinado receptor, es posible discriminarlas gracias a la técnica de modulación empleada de *acceso múltiple por división de código* (CDMA). La forma en la que se han generado las secuencias binarias permite recuperar los datos de cada satélite de forma individual, conociendo y empleando una clave asociada a cada uno de ellos.

²⁶ También denominado estado *contrario* o *especular*.



Así, a través de un proceso de correlación de las secuencias de bits transmitidas podemos encontrar la información emitida de forma modulada. El nivel de correlación de las señales será progresivo en función de la coincidencia de los trenes de pulsos secuenciados en intervalos de *chips*²⁷ (Molina *et al.*, 2000).

Este método permite, además de discriminar la señal de los diferentes satélites, incrementar la confidencialidad de la señal. Para que pueda recuperarse la información transmitida se necesitan reconocer los patrones de bits del emisor. Estos patrones deben presentar unos bajos niveles de correlación para facilitar la discriminación de las señales y de su procedencia.

Para aumentar el número de usuarios, el sistema necesita incrementar el número de receptores y el ancho de banda según el *teorema de Shannon* (Shannon, 1949). Como el sistema siempre está en inmerso en una fase constante de evolución tecnológica, los responsables optan por incrementar el número de emisores aumentando el número de *chips* y su período. Esto supone, a su vez, un incremento del ancho de banda (Molina *et al.*, 2000). Ésta es la única solución que permite generar un número muy elevado de secuencias con unos bajos niveles de correlación.

3.3.3. Servicios de posicionamiento

El sistema *NAVSTAR-GPS* ofrece dos servicios de posicionamiento que se diferencian en función del acceso a la señal y de su nivel de prestaciones: (a) el *servicio de posicionamiento estándar* y (b) el *servicio de posicionamiento preciso*.

El *servicio de posicionamiento estándar* (SPS) está disponible para cualquier usuario en cualquier parte del mundo y no presenta ningún tipo de restricciones de uso. Este servicio emplea el código C/A sobre la onda portadora *L1* y se compone únicamente de la señal espacial que recibe el receptor. Por tanto, en este servicio no se tienen en cuenta errores de propagación de la señal a su paso por la ionosfera, fallos en el receptor, efecto *multipath*, orografía e/o interferencias de cualquier tipo.

Como el sistema *NAVSTAR-GPS* es un sistema militar, sus responsables optaron inicialmente por dar un acceso público a la señal menos precisa, la cual permitía estimar el posicionamiento en un punto cualquiera del globo con una precisión aproximada de unos 400 metros. Sin embargo, mediante una serie de procedimientos de cálculo era posible mejorar las precisiones obtenidas con esta señal incluso en tiempo real, pudiendo llegar a niveles de precisiones del orden de los 100 metros. Mediante estos procedimientos era posible modelizar y estimar determinados errores planteando un método de posicionamiento relativo que supone una influencia semejante de dichos errores en ubicaciones próximas. De esta forma, este *servicio de posicionamiento estándar* del sistema *NAVSTAR-GPS* permitía obtener, en la práctica, unos niveles de precisión relativamente altos. Martínez-Rodilla (2005) estimó los niveles de precisiones obtenidos con la señal C/A en unos 36 metros en el sentido horizontal en el 95% de los casos.

En la *Tabla 3-7* se presentan algunos parámetros relativos a las precisiones obtenidas por el *servicio de posicionamiento estándar* (SPS) del sistema *NAVSTAR-GPS*. Los valores de la tabla fueron publicados por Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008) a partir de los obtenidos por el *Departamento estadounidense de Defensa* (DoD) en el año 2001. Los valores de precisiones expuestas sólo pueden ser considerados como valores máximos aproximados ya que en la realidad seguramente su influencia sea menor debido a la compensación y atenuación de los distintos errores entre sí.

²⁷ La duración temporal de un *bit* se subdivide en intervalos temporales iguales que se denominan *chips*.



Tabla 3-7: Estándares de precisión del *servicio de posicionamiento estándar* (SPS) del sistema NAVSTAR-GPS para un nivel de probabilidad del 95%. Fuente: Hofmann-Wellenhof et al., 2008.

Estándar de precisión	Condiciones y restricciones
Media global de precisión posicionamiento ≤ 13 metros de error horizontal ≤ 22 metros de error vertical	Basado en un intervalo de medidas de 24 horas de las cuales se extrae la media de todos los puntos [Todos los satélites a la vista ²⁸]
Peores precisiones de posicionamiento ≤ 36 metros de error horizontal ≤ 77 metros de error vertical	Basado en un intervalo de medidas de 24 horas para algún punto [Todos los satélites a la vista]
Precisión de transferencia de tiempo ≤ 40 nanosegundos de error de transferencia de tiempo	Basado en un intervalo de medidas de 24 horas de las cuales se extrae la media de todos los puntos

Conley et al. (2006) también estudiaron el nivel de precisiones alcanzadas con el *servicio de posicionamiento estándar* del sistema NAVSTAR-GPS. Los errores medios obtenidos para una red de 20 puntos fueron de 7,1 metros en horizontal y 11,4 metros en vertical para una probabilidad del 95% teniendo en cuenta un gran número de posibles configuraciones e integraciones del receptor, además de una gran variedad de condiciones ambientales. En este mismo trabajo, para un nivel de probabilidad del 99,99%, los errores tanto horizontales como verticales estaban generalmente por debajo de los 50 metros, salvo en excepciones muy contadas. Según dicho estudio, los errores más groseros podían haberse evitado en la mayor parte de las ocasiones simplemente excluyendo los valores obtenidos de los peores satélites a efectos estadísticos.

Por su parte, el *servicio de posicionamiento preciso* (PPS) está restringido únicamente a los estamentos militares, agencias del gobierno americano además de usuarios civiles autorizados, como por ejemplo gobiernos aliados. Este servicio emplea el código P (en ocasiones, el Y) sobre ambas ondas portadoras del sistema, tanto la L1 como L2 (Secretaría de Defensa, 2007). Según las especificaciones del sistema, los niveles de precisiones alcanzados son de 18 metros en el plano horizontal y de 27 metros en el vertical para el 90% de los casos (Martínez-Rodilla, 2005).

La Tabla 3-8 establece unos valores de precisión aproximados para el *servicio de posicionamiento preciso* (PPS) del sistema NAVSTAR-GPS. Estos valores son menos fiables que los asociados al servicio estándar (Kaplan, 2006) debido básicamente a que se trabaja únicamente con la señal espacial, sin aplicar ningún tipo de corrección, y al hecho de que en el cálculo de las precisiones del servicio estándar SPS (Tabla 3-7) se eliminaban los dos peores satélites, mientras que aquí no (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).

Tabla 3-8: Niveles de precisión alcanzados con el *servicio de posicionamiento preciso* (PPS) del sistema NAVSTAR-GPS. Fuente: Hofmann-Wellenhof et al., 2008.

Estándar de precisión	Nivel de precisión [%]
22 metros de error horizontal	98,2
27,7 metros de error vertical	95
200 nanosegundos de error de transferencia de tiempo	95
0,2 m/s de error de velocidad	95

Según algunos autores como Seeber (2003), los niveles de precisión alcanzados por el *servicio de posicionamiento preciso* son semejantes a los obtenidos por el *servicio de posicionamiento estándar* siempre que no se apliquen a estos últimos ningún mecanismo de degradación de la señal. Kelly (2006) estimó para una probabilidad del 95% una *precisión posicional* de entre 8 y 60 metros para los usuarios del *servicio de posicionamiento estándar* y de entre 6 y 20 metros para los del *servicio de posicionamiento preciso* unos valores considerablemente diferentes a los publicados por el *Departamento de Defensa* (DoD) en el año 2001. Sea como fuere, el *servicio de posicionamiento preciso* del sistema NAVSTAR-GPS presenta como ventajas asociadas las menores longitudes de onda del código P y el uso de

²⁸ La condición de “todos los satélites a la vista” implica un ángulo de máscara de elevación de 5° y la eliminación de los dos peores satélites de la constelación (Hofmann-Wellenhof et al., 2008).



frecuencias duales moduladas sobre las portadoras $L1$ y $L2$, lo que le permite alcanzar unos niveles de precisión mayores que el *servicio de posicionamiento estándar* sin necesidad de aplicar correcciones de ningún tipo. Según el *Cuerpo de Ingenieros de la Armada* de los EEUU (2003), el *servicio de posicionamiento preciso* permite alcanzar precisiones superiores a los 10 metros haciendo uso únicamente de la señal espacial.

El *servicio de posicionamiento preciso* presenta, además de la mejora de los niveles de precisión, una serie de ventajas sobre el *servicio de posicionamiento estándar* que hace que existan preceptos por parte de la Armada estadounidense tales como el del año 2003 de no emplear el *servicio de posicionamiento estándar* para infantería y otros estamentos militares (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). Otros argumentos a favor del *servicio de posicionamiento preciso* son la menor vulnerabilidad de la señal, su mayor robustez y su mayor disponibilidad al estar modulado el código P en dos ondas portadoras ($L1$ y $L2$), al contrario que el código C/A que sólo lo está en la portadora $L1$. Esta mayor robustez contra interferencias de la señal del código P presenta una gran importancia en aplicaciones militares.

3.3.4. Servicios de degradación de la señal

El sistema *NAVSTAR-GPS* es un sistema militar sobre el que el *Departamento de Defensa* de los EEUU (DoD) tiene la potestad de restringir la señal del sistema si así lo estima conveniente. Por esta razón el sistema ha implementado varios servicios de degradación o limitación de la señal a ciertos usuarios y/o regiones justificando motivos de seguridad nacional. En los últimos años el sistema ha propuesto una apertura al mundo civil, optando en consecuencia por la desactivación de estos servicios de degradación o restricción de la señal del sistema. Esta desactivación parece ser permanente, aunque no debe descartarse que *NAVSTAR-GPS* sea un sistema militar. Todavía a día de hoy el sistema cuenta con un servicio propio de restricción de la señal mediante el cual puede desautorizar y limitar el acceso a la misma a un cierto grupo de usuarios y/o regiones en caso de que sean considerados una amenaza para su seguridad.

El servicio más conocido de degradación de la señal del sistema *NAVSTAR-GPS* fue el denominado como *disponibilidad selectiva* (S/A). Este servicio fue aplicado por el *Departamento de Defensa* (DoD) a la señal del código C/A debido a que las precisiones alcanzadas por los usuarios civiles eran considerablemente superiores a las esperadas inicialmente, en torno a los 400 metros. Sin embargo, el desarrollo e implementación de diversas técnicas por parte de los usuarios civiles permitió incrementar sustancialmente la precisión de posicionamiento hasta unos niveles por debajo de los 100 metros. Estas altas precisiones fueron consideradas una amenaza para el *Departamento de Defensa* (DoD) que propuso la creación de un servicio de degradación de la señal que permitiera limitar los niveles de precisión alcanzados. Este servicio de *disponibilidad selectiva* (S/A) consistía simplemente en una manipulación intencionada de la información de un parámetro satelital cualquiera, introduciendo así una desviación en el posicionamiento.

La activación de este servicio tuvo lugar en marzo de 1990 y afectó solamente a los satélites del bloque II. Según el propio *Departamento de Defensa* (DoD), el servicio de *disponibilidad selectiva* (S/A) introducía al sistema, para un nivel de probabilidad del 95%, un error de velocidad de 0,3 m/s y otro de tiempo de unos 340 nanosegundos, reduciendo los niveles de precisión alcanzados a unos 100 metros en planimetría y a unos 156 metros en altimetría. Para un nivel de probabilidad del 99,99%, los niveles de precisión decrecían hasta un máximo de 300 metros en planimetría y de 500 metros en altimetría (Departamento de Defensa, 1993). Este servicio de degradación de la señal podía ser activado y/o desactivado sin previo aviso.

Para la puesta en marcha de este servicio, el *Departamento de Defensa* (DoD) manipulaba los tiempos de los relojes satelitales (δ -process) o bien, aunque con menos frecuencia, los datos de efemérides (ϵ -process). La manipulación de los relojes satelitales (δ -process) suponía la introducción intencionada de errores variables dentro de la frecuencia fundamental del propio reloj, lo que llevaba a un error de sincronización en los tiempos de los satélites y receptores. Esto conllevaba una pérdida de precisión en la medida de pseudodistancias y, por tanto, un posicionamiento menos preciso. Un ejemplo de señal degradada por el servicio de *disponibilidad selectiva* (S/A) se representa en la *Figura 3-15.a*, donde podemos apreciar la diferencia existente entre un reloj satelital afectado por este servicio de degradación de la señal.

Por su parte, el ε -process consistía en la manipulación de la información de las efemérides transmitidas en el mensaje de navegación. Un ejemplo de señal degradada según este error se representa en la Figura 3-15.b, donde se observa la evolución del error radial orbital de un satélite en dos días diferentes, en uno de los cuales está afectado por la *disponibilidad selectiva* (puntos negros), mientras que en el otro no (puntos blancos). Este error orbital, con valores estimados entre los 50 y 150 metros, generaba unos errores en las medidas de pseudodistancias del mismo orden.

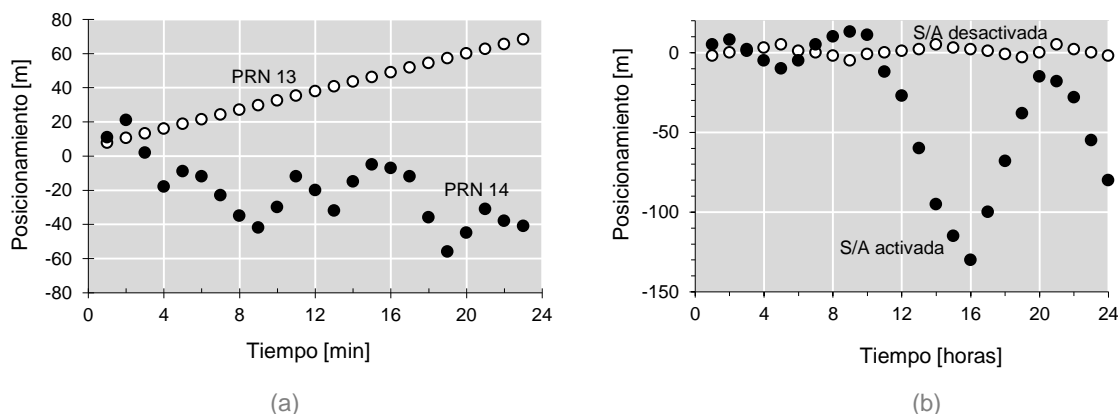


Figura 3-15: Errores debidos a la degradación de la señal del sistema NAVSTAR-GPS por *disponibilidad selectiva* (S/A): (a) Error δ -process: comportamiento del reloj del satélite PRN 13 (sin S/A) y el PRN 14 (con S/A) durante el día 177 del año 1991. (b) Error ε -process: error radial orbital del satélite PRN 21 durante el día 177 del año 1992 con S/A y durante el día 184 de 1992 sin S/A. Fuente: Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008.

Para evitar la influencia de la *disponibilidad selectiva* (S/A), los usuarios autorizados disponían de un contra-proceso, el *desencriptado*. El resto de los usuarios planteó, como solución parcial, trabajar con métodos de posicionamiento diferencial. Para ello empleaban varios receptores relativamente próximos entre sí y suponían que la influencia de los errores en estos receptores era aproximadamente la misma y que, por lo tanto, dichos errores podían ser compensados.

En la actualidad el servicio de *disponibilidad selectiva* (S/A) no tiene ningún efecto ya que ha sido desactivado en mayo del año 2000 por decisión del entonces presidente de los EEUU, *Bill Clinton*. Esta decisión ha sido corroborada unos años más tarde, en 2005, por el gobierno de *George W. Bush*, manifestando su intención de no degradar de nuevo la señal del sistema NAVSTAR-GPS. Muy similar a este servicio de *disponibilidad selectiva* (S/A), debe hacerse referencia a un servicio de limitación (y/o degradación) de la señal que está actualmente vigente: la *denegación selectiva* (SD). Este servicio permite denegar o limitar el acceso a la señal del sistema a aquellos usuarios no-autorizados en ciertas regiones por motivos de seguridad nacional (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). El código P está reservado por el *Departamento de Defensa* (DoD) para usuarios autorizados, generalmente militares, y algunos civiles como el *Servicio Nacional Geodésico* de los EEUU (NGS). El propio *Departamento de Defensa* (DoD) sigue teniendo la potestad de limitar el código P o de accionar un código de encriptamiento que restringe el acceso a todos aquellos usuarios que en un momento determinado no sean autorizados por el sistema. El encriptamiento se logra mediante el empleo de una técnica denominada *anti-spoofing* (A-S), que consiste en la suma de los códigos P y W obteniendo como resultado el *código Y*. Esta técnica limita el acceso a las señales a través de criptografía, impidiendo así que un adversario pueda generar y emitir una señal NAVSTAR-GPS que pueda llegar a confundir al receptor. La técnica *anti-spoofing* (A-S) está siendo redefinida en los últimos años a raíz de la sustitución del código Y por el código M.

3.3.5. Precisiones alcanzadas

El sistema NAVSTAR-GPS permite calcular unos valores de posicionamiento que incluyen una serie imprecisiones inherentes a cualquier proceso de instrumentación. La calidad del posicionamiento no se puede expresar en función de un único dato de precisión, sino que debe relacionarse con el contexto en el que se obtiene. De esta forma, resulta habitual la asociación a los niveles de precisión obtenidos de una serie de estimadores de fiabilidad como pueden ser en planimetría el *círculo probable de error* (CEP), el *error equivalente en distancia* (JERE), el *error medio cuadrático* (RMSE) o el *percentil 95* (R95). El nivel



de probabilidad del CEP es de un 50% mientras que el RMSE es de un 68%, equivalente al intervalo existente entre la suma y resta de la desviación típica al valor medio en modelos de distribuciones estadísticas normales. La relación entre estos estimadores se presenta en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9: Relación entre los distintos parámetros de fiabilidad más comúnmente empleados para la estimación del nivel de precisiones de posicionamiento en el plano horizontal.

↓→	CEP	RMSE	R95	2DRMSE
CEP	-	1,2	2,1	2,4
RMSE	0,83	-	1,7	2
R95	0,48	0,59	-	1,2
2DRMSE	0,42	0,5	0,83	-

Los errores de precisión en el posicionamiento dependen fundamentalmente de dos variables: (a) la geometría de los satélites de referencia y (b) el error en la medida de la pseudodistancia. La geometría de los satélites de referencia puede medirse por medio de un parámetro propio, la *dilución de la precisión* (DOP)²⁹ cuyo valor puede ser interpretado según la Tabla 3-10. Este parámetro puede, a su vez, expresado en función de las diferentes componentes geométricas: HDOP (*horizontal DOP*), VDOP (*vertical DOP*) y PDOP (*positional 3D DOP*), cuya formulación se expresa a continuación.

$$\begin{aligned}
 \text{HDOP} &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \\
 \text{VDOP} &= \sqrt{\sigma_z^2} \\
 \text{PDOP} &= \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Tabla 3-10: Valor del parámetro DOP y nivel de confianza asociado.

Valor DOP	Nivel de confianza
1	Ideal
Entre 1 y 2	Excelente
Entre 2 y 5	Bueno
Entre 5 y 10	Moderado
Entre 10 y 20	Razonable
Mayor de 20	Pobre

Por su parte, el error en la estimación de la medida de pseudodistancia puede ser de varios tipos: (a) aleatorio, (b) sistemático y (c) grosero. La característica principal de (a) los errores de tipo aleatorio es que no presentan ninguna correlación espacial o temporal. La correlación espacial se da cuando dos receptores situados en una misma posición ofrecen valores distintos, mientras que la temporal se da cuando dos medidas realizadas en momentos diferentes con un mismo receptor difieren. (b) Los errores sistemáticos afectan, espacial o temporalmente, a todas las medidas por igual. Pueden diferenciarse varios tipos de errores sistemáticos dependiendo del lugar donde se produzcan (satélites, medio de propagación o estación receptora). Por su parte, (c) los errores groseros se deben a fallos, bien de los operadores del segmento de control del sistema o bien del propio software de los receptores.

De estos tres tipos de errores en la medida de pseudodistancia, sólo pueden ser modelados y corregidos, aunque no totalmente eliminados, los de tipo sistemático. Ejemplos de este tipo de errores sistemáticos son los relativos al efecto *multipath*, los errores de sincronización, los errores ionosféricos y troposféricos, etc. Los propios satélites del sistema en su mensaje de navegación envían los parámetros necesarios para poder aplicar medidas de modelado y corrección de los errores sistemáticos. Entre los principales errores de tipo aleatorio en la medida de pseudodistancia destacan (a) el ruido en los receptores, fundamentalmente de tipo térmico, y (b) el error en el alineamiento de las secuencias PRN. Este último factor supone un error aproximado de unos 20 centímetros para las secuencias del código P y de 1,5 metros para las del código C/A (Molina *et al.*, 2000).

²⁹ En algunos estudios se refieren al parámetro DOP (*dilution of precision*) como GDOP (*geometric DOP*).



Por lo tanto, las precisiones obtenidas por el sistema NAVSTAR-GPS dependen de una serie de condicionantes como el lugar del levantamiento (nivel de cobertura del sistema, valor de DOP), tipo de posicionamiento (cinemático o estático), momento del día, modelo de receptor, etc. Un estudio publicado por Rodríguez-Franco (2014) evaluó para distintos niveles de fiabilidad las precisiones obtenidas con un receptor portátil. Para ello, en realizó un posicionamiento estático en una ubicación concreta durante más de 24 horas empleando un receptor *Garmin 12XL* al que acopló una antena activa *Trimble/Lowe*. Los resultados obtenidos mostraron unas precisiones de 9,8 metros en planimetría y 21,3 metros en altimetría para una fiabilidad de un 99,73%. Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008) evaluaron una estimación del error de posicionamiento para unas condiciones y una geometría determinada, teniendo en cuenta la influencia de las diferentes técnicas de modulación del código y la distancia de levantamiento. Por su parte, Wormley (2010) evaluó para una geometría satelital concreta, con $DOP \approx 2,5$, la influencia de las diversas fuentes de error en los distintos servicios de posicionamiento del sistema NAVSTAR-GPS. Los errores obtenidos fueron de 10,2 metros en horizontal y 12,8 metros en vertical para el *servicio de posicionamiento estándar*, y de 6,6 metros en horizontal y 8,3 metros en vertical para el *servicio de posicionamiento preciso*.

Tabla 3-11: Fuente de error y nivel de precisión asociado a los distintos servicios de posicionamiento del sistema NAVSTAR-GPS. Fuente: Wormley, 2010.

Fuente de error	SPS - L1 C/A (sin S/A)			PPS (doble frecuencia; P(Y))		
	Sistemático	Aleatorio	Total	Sistemático	Aleatorio	Total
Efemérides	2,1	0	2,1	2,1	0	2,1
Reloj satélite	2	0,7	2,1	2	0,7	2,1
Ionosfera	4	0,5	4	1	0,5	1,2
Troposfera	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7
<i>Multipath</i>	1	1	1,4	1	1	1,4
Medida receptor	0,5	0,2	0,5	0,5	0,2	0,5
UERE, RMS	5,1	1,4	1,6	3,3	1,5	3,6
UERE filtrado, RMS	5,1	0,4	1,5	3,3	0,4	3,3

Aunque los niveles medios de precisiones alcanzados presentan mucha importancia, suelen ser los valores extremos los que pueden limitar el uso de este sistema en algunas aplicaciones. Estos errores groseros pueden ser debidos a fallos en la recepción de la señal, que pueden depender tanto de la posición del usuario como del propio sistema. Varios estudios centrados en la estimación de posicionamientos cinemáticos constatan caídas de los niveles de precisiones debido a pérdidas repentinas de las señales satelitales (Zabic, 2011; Gatscha et al., 2010; Christoph et al., 2010).

En cuanto a la posición del usuario, existen una serie de ubicaciones en las que el sistema puede presentar dificultades debido básicamente a una mala visibilidad satelital y a la aparición del *efecto multipath*. Son habituales así problemas de recepción de la señal del sistema en entornos urbanos, áreas forestales con vegetación y arbolado denso o espacios interiores.

Además del usuario, el propio sistema puede presentar una mala configuración en un momento y/o lugar determinado. Así, es necesario estimar los niveles de disponibilidad y continuidad de la señal del sistema, relacionados ambos con la geometría y cobertura del sistema. Actualmente, el sistema NAVSTAR-GPS por sí mismo garantiza una continuidad de la señal de entre el 70%, para una constelación de 24 satélites, y el 99%, para una de 21 satélites. La estimación del posicionamiento requiere de una observación de un mínimo de cuatro satélites. En caso de que el número de satélites observados sea mayor pueden ser obtenidas medidas redundantes y, en consecuencia, mejoradas las precisiones. Por esta razón, el sistema NAVSTAR-GPS pone en órbita varios satélites adicionales de reserva que permiten garantizar el funcionamiento continuado del sistema en caso de que alguno de los satélites operativos deje de funcionar o lo haga incorrectamente.

La cobertura del sistema NAVSTAR-GPS presenta de por sí grandes variaciones geográficas, tal y como se observa en la Figuras 3-16, en las cuales se representan el número mínimo y máximo de satélites visibles un mismo día. La propia configuración del sistema NAVSTAR-GPS demuestra que los mayores índices de visibilidad satelital se alcanzan en el entorno del ecuador terrestre. La Figura 3-17 representa

los errores máximos de navegación obtenidos a escala mundial, tanto en la componente horizontal como vertical. Los errores máximos presentan unos niveles más moderados en las latitudes medias y mayores en las latitudes más altas. La magnitud de los errores se relaciona directamente con los niveles de visibilidad y cobertura del sistema, altos en latitudes medias y bajos en ciertos sectores ubicados a latitudes altas.

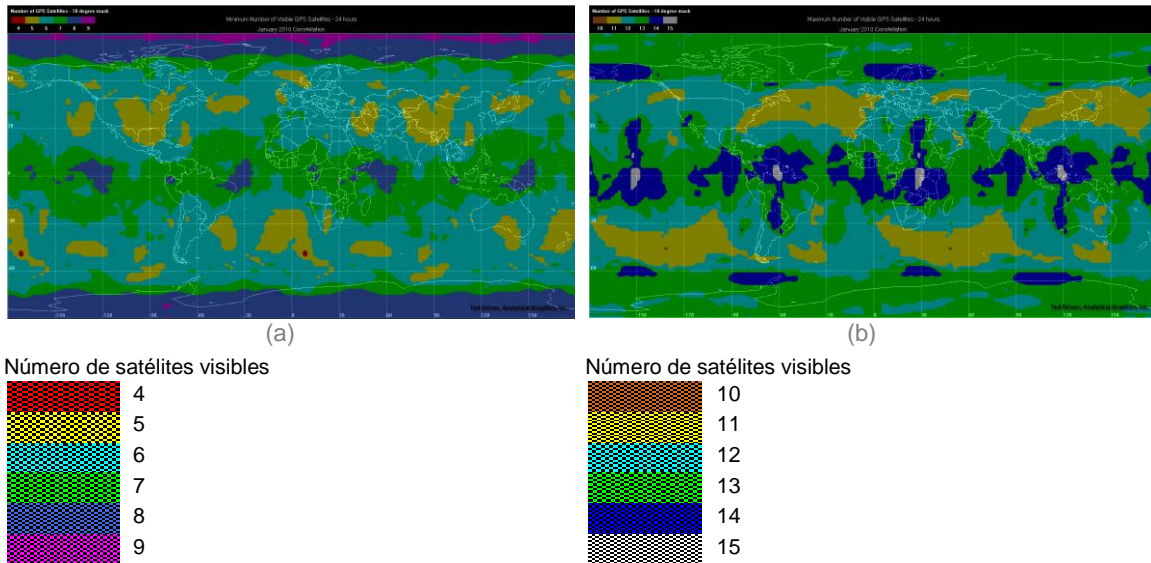


Figura 3-16: Número (a) mínimo y (b) máximo de satélites visibles del sistema NAVSTAR-GPS. Datos obtenidos el día 01 de enero de 2010 (24 horas) con una máscara de elevación del horizonte de 10°.

Fuente: *blogsAGI.com*, 2010.

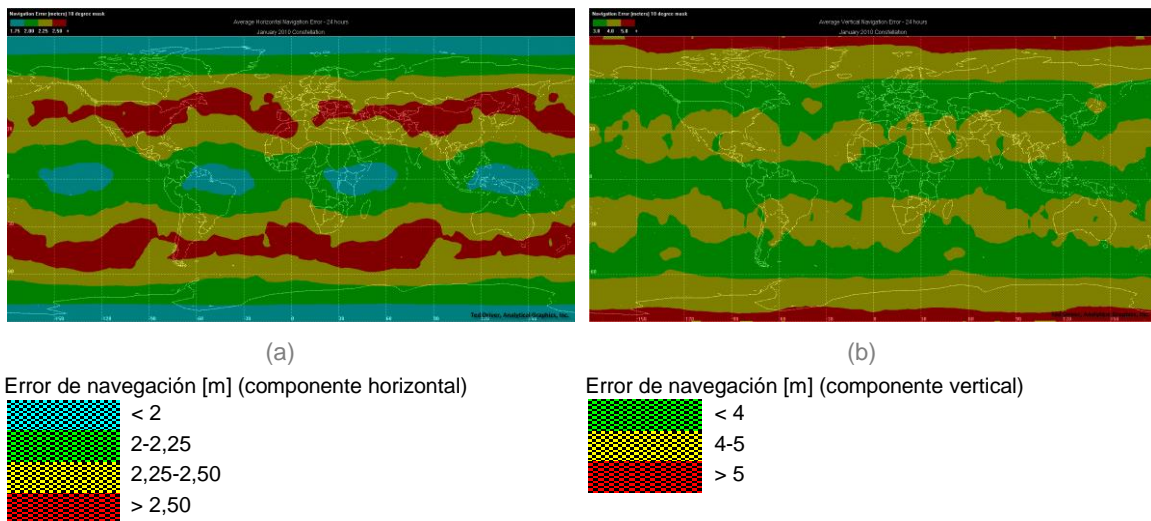


Figura 3-17: (a) Componente horizontal y (b) vertical de error de navegación del sistema NAVSTAR-GPS.

Datos obtenidos el día 01 de enero de 2010 (24 horas) con una máscara de elevación del horizonte de 10°. Fuente: *blogsAGI.com*, 2010.

3.4. SISTEMAS DE MEJORA Y AUMENTACIÓN

Los sistemas NAVSTAR-GPS y GLONASS fueron concebidos en origen como sistemas militares. Su óptima aplicación al mundo civil sólo fue posible con el paso de los años tras la caída del clima de desconfianza política entre EEUU y Rusia. La apertura de ambos sistemas y el fin de la aplicación de servicios de degradación intencionada de la señal satelital supuso un incremento de las precisiones del sistema. El acceso público a la señal permitió una estimación del posicionamiento que satisfacía los requerimientos de un gran número de aplicaciones.

Sin embargo, en ciertas aplicaciones y/o sectores de estudio estos sistemas por sí mismos no permitían cumplir los requerimientos mínimos. Uno de estos sectores es el de la aviación civil, uno de los más



exigentes por su alto nivel de responsabilidad asociada. El continuo crecimiento del tráfico mundial y las limitaciones que presentan los sistemas tradicionalmente empleados para las fases de aterrizaje, plantean la necesidad de sistemas de posicionamiento alternativos que permitan un posicionamiento constante y global. La mayoría de aplicaciones aeronáuticas, sobre todo las relativas a maniobras de aproximaciones y aterrizajes (ILS), requieren además de altos niveles no solo de precisión, sino también de disponibilidad y continuidad de la señal (Tabla 3-12).

Tabla 3-12: Requerimientos de la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI) para aproximaciones de aeronaves³⁰. Fuente: OACI, 2013.

Aproximaciones	Integridad [s]	Disponibilidad [%]	Precisión [m]
CAT I	< 6	99,9	7,6
CAT II/III	< 2	99,999	1

Hasta el momento, ninguno de los sistemas GNSS operativos cumplía por sí mismos con los requerimientos del sector. Tanto el sistema *NAVSTAR-GPS* como *GLONASS* presentan, entre otras deficiencias, unos niveles de precisiones medios con elevada incertidumbre, no ofrecen una continuidad del servicio y no disponen de un servicio de garantía ni de advertencia en caso de fallo de la aparición de fallos. Además son relativamente frecuentes en estos sistemas pérdidas puntuales de la señal. Ninguno de los sistemas GNSS operativos ofrece un servicio eficiente de *integridad* que permita conocer de forma inmediata a cualquier usuario del sistema la aparición de cualquier tipo de error en la señal emitida.

Se estima que actualmente para el sistema *NAVSTAR-GPS* el tiempo de inicio de la señal de alarma en caso de fallo varía entre unos minutos y unas horas (Groves, 2008). Los niveles de disponibilidad de este sistema son demasiado bajos, de aproximadamente un 70% para la constelación de 24 satélites y un 98% para la de 21 satélites. Además, ninguno de los sistemas GNSS actuales presenta un servicio propio que determine la calidad de la señal en cada momento.

Por tanto, ni el sistema *NAVSTAR-GPS* ni *GLONASS* pueden, por sí mismos, cumplir con los requerimientos y exigencias de la aviación civil. Por esta razón estos sistemas deben mejorar sus prestaciones para, al menos, ser una alternativa futura para su uso dentro de estos sectores. En este contexto surgen una serie de sistemas complementarios a los actuales sistemas de posicionamiento GNSS: los *sistemas de aumentación* o *de mejora*. El objetivo de estos sistemas es la mejora de las prestaciones de estos sistemas para el cumplimiento de los requerimientos y exigencias planteadas por el sector de la aviación civil.

En el año 1992 la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI) propuso los GNSS como sistemas de posicionamiento válidos para ciertas aplicaciones aeronáuticas, aunque su uso siempre debía ser complementado con sistemas de aumentación que permitieran garantizar el cumplimiento de los requisitos del sector durante todas las fases del vuelo, desde la fase de despegue hasta la de aterrizaje.

Los sistemas de aumentación permiten una mejora de todas las prestaciones de los sistemas GNSS: integridad, disponibilidad, continuidad de la señal y precisión. Para ello aplica o bien una serie de medidas directas o bien una serie de correcciones diferenciales a las medidas obtenidas con los sistemas GNSS. Entre otra información, estos sistemas transmiten información adicional acerca de diversas fuentes de error del sistema como las relativas a errores de sincronización, efemérides o al retraso ionosférico de la señal.

Las correcciones diferenciales permiten un incremento de los niveles de precisión. Por su parte, la incorporación de señales telemétricas adicionales en este tipo de sistemas incrementa el grado de cobertura en áreas urbanas y montañosas, donde muchas veces las señales GNSS se ven bloqueadas. Estas señales adicionales permiten además una mejora de la integridad del sistema (Groves, 2008) por medio de un sistema de alertas que advierten de la presencia de errores en las señales GNSS

³⁰ Las aproximaciones de *categoría I* (CAT I) permiten aterrizar con una visibilidad mínima de 2.400 pies o 1.800 en caso de que haya iluminación de la línea central y zonas de toma de la pista, además de un mínimo de techo de nubes de 200 pies (1 pie: 0,305 metros). Las aproximaciones de CAT II permiten aterrizar con una altura de decisión de 100 pies y una visibilidad de solo 1.200 pies. Las aproximaciones de CAT III pueden ser llevadas a cabo por el sistema de aterrizaje automático del aparato y permite operaciones incluso sin altitudes de decisión y una visibilidad mayor de 700 pies para CAT IIIa, o de entre 150 y 700 pies para CAT IIIb. Las instalaciones aeroportuarias para aproximaciones CAT II/III incluyen iluminación de la línea central de la pista y zona de contacto, así como otras ayudas y mejoras.



transmitidas. El incremento del nivel de integridad supone un requisito esencial para aplicaciones críticas de seguridad. Una revisión general de la técnica diferencial se presenta en el siguiente punto.

3.4.1. Sistema GPS Diferencial (DGPS)

Aunque el término genérico que debe ser aplicado es el de *sistema GNSS diferencial* (DGNSS) (Groves, 2008), suele emplearse el acrónimo de *GNSS diferencial* (DGPS) por ser el sistema de posicionamiento *NAVSTAR-GPS* el más importante y el único que está operativo actualmente y presenta una cobertura global. El principio teórico de funcionamiento de los sistemas diferenciales resulta trivial y se basa en la hipótesis de que los errores producidos por el sistema de posicionamiento afectan por igual, o al menos de forma muy similar, a los receptores situados próximos entre sí, lo que pone de manifiesto la existencia de altos niveles de correlación entre los errores obtenidos (Cea-Avión, 2005).

Para esta técnica se emplean varios receptores, uno de los cuales uno será la estación de referencia. La posición de esta estación se conoce con un nivel de precisión muy alta, siendo considerada a efectos prácticos como exenta de error. Sobre esta estación se calculan las correcciones a las medidas obtenidas del satélite en función de los niveles de diferencia existentes entre la posición medida y la real.

La estación de referencia se compone de un receptor, un microprocesador y un transmisor. El microprocesador permite el cálculo de los errores del sistema *NAVSTAR-GPS*, además de la generación de un mensaje que se envía a todos los receptores. Por su parte, el transmisor permite establecer un enlace de datos unidireccional hacia los receptores de los usuarios finales, que deberán contar un receptor diferencial que permita aplicar las correcciones en tiempo real.

La transmisión de las correcciones pueden efectuarse de múltiples formas: radio RDS, internet, vía satélite, etc. En función del área de transmisión de las correcciones diferenciales podemos referirnos a sistemas diferenciales de tipo local y de área extensa. Las correcciones en los sistemas diferenciales de tipo local (LADGPS) se emiten normalmente por radio a receptores móviles situados en las proximidades de la estación de referencia. En el caso de sistemas diferenciales de área extensa (WADGPS) las correcciones son emitidas, bien vía satélite o bien mediante una red de estaciones de radio, para áreas muy extensas como pueden ser países o continentes.

Las correcciones pueden ser aplicadas sobre la posición y sobre la medida de pseudodistancia de cada uno de los satélites visibles. Las correcciones de posición presentan el inconveniente de que tanto el usuario como la estación monitora deben emplear obligatoriamente los mismos satélites. Las correcciones aplicadas a las pseudodistancias de cada uno de los satélites visibles suponen una alternativa más flexible que la anterior, ya que el usuario puede calcular las correcciones respecto a los cuatro satélites que presentan mejor relación *señal-ruido* (S/N).

Como los satélites están en constante movimiento respecto a la Tierra, las circunstancias atmosféricas también van variando, lo que supone un cambio en la magnitud temporal de los errores. Esto hace necesario un cálculo permanente de los errores y una actualización constante de las sucesivas correcciones aplicadas. Por esta razón se envía, junto al mensaje de correcciones, información acerca del tiempo de validez de dichas correcciones, además del pronóstico esperado.

La precisión final depende de varios factores como (a) el área sobre la que el receptor de referencia opera, (b) la distancia entre los receptores fijo y móvil, y (c) la capacidad del sistema de transmisión de las correcciones. El tipo de receptor y sus características técnicas determinan el tipo de posicionamiento y observables empleados, su nivel de visibilidad satelital, su capacidad computacional para aplicar las correcciones y efectuar los cálculos, su nivel de adquisición de la señal y los tiempos de readquisición de la misma en caso de pérdidas.

Los niveles de precisiones obtenidos con sistemas diferenciales pueden estimarse entre el metro y los cinco metros, siendo ligeramente superiores en planimetría que en altimetría. Un estudio experimental llevado a cabo por el *Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía* (LAGC) de la Universidad de Cádiz (Berrocoso-Domínguez *et al.*, 2010) analiza los niveles de precisión alcanzados mediante diferentes tipos de posicionamiento diferencial empleando diferentes observables, tanto de código como de fase. Los niveles de precisión alcanzados en posicionamiento estático diferencial son de entre 0,5 y 2 centímetros en fase, y de entre 30 y 50 centímetros en código. Estos resultados ponen de manifiesto que las mejores precisiones se alcanzan con observables de fase y sistemas de posicionamiento diferencial.



Para alcanzar un alto nivel de precisiones es necesario una geometría satelital óptima que permita incrementar los niveles de disponibilidad y continuidad de la señal. Wormley (2010) comparó los errores obtenidos con posicionamiento normal y diferencial en una misma ubicación y una determinada geometría satelital ($DOP \approx 2,5$). Los niveles de error asociados al servicio estándar fueron considerablemente reducidos desde los 12,8 a los 3,9 metros en vertical y desde los 10,2 a los 3,1 metros en horizontal cuando se llevaba a cabo un posicionamiento diferencial.

Conforme aumenta la distancia entre el receptor y la estación de referencia tiende a producirse un fenómeno de degradación de la validez de las correcciones debido a la posibilidad de que el receptor y la estación no estén observando los mismos satélites. En el caso de estaciones terrestres se estima que la distancia entre el receptor y la estación de referencia debe ser inferior a los 350 km. Existe la posibilidad inversa, de que en un determinado punto pueda estar recibiendo correcciones diferenciales simultáneas desde varias estaciones de referencia que están dentro de su área de alcance. Esta redundancia de correcciones supone un efecto positivo que permite una mejora de la precisión y de los niveles de disponibilidad del sistema.

Los sistemas diferenciales requieren de unas estaciones de referencia específicas. Esta solución no siempre es viable debido al gran coste económico que supone montar una infraestructura propia sólo para obtener correcciones de posición. Por esta razón, desde hace unos años se plantean soluciones intermedias como la del programa *Eurofix*. Este programa permite una obtención de correcciones diferenciales a bajo coste aprovechando la infraestructura de la red de estaciones *Loran-C*. El programa *Eurofix* permite obtener una redundancia de observaciones diferenciales, al ser posible contar con señales de otros sistemas de posicionamiento alternativos en cualquier momento y de forma inmediata, lo que es especialmente útil en ambientes en los que la señal del sistema GNSS presenta unas malas condiciones de recepción.

Los sistemas de aumentación emplean este tipo de técnicas diferenciales. Estos sistemas suelen clasificarse en función como el sensor GNSS recibe/transmite la información externa, pudiendo diferenciarse tres grandes tipos: (a) sistemas de aumentación basados en la aeronave ABAS, (b) los basados en tierra GBAS y (c) los basados en satélite SBAS. Esta clasificación es la más extendida por ser la más empleada por el sector de la aviación civil. De estos tres sistemas, los más importantes son los dos últimos: GBAS y SBAS. Las diferencias entre ambos son su área de cobertura y (b) el medio de transmisión de las correcciones en tiempo real. Los sistemas SBAS transmiten la información a través de una red de satélites geostacionarios y su área de cobertura es aproximadamente la equivalente a un gran país o un pequeño continente. Los sistemas GBAS, por su parte, se emplean generalmente en áreas mucho menores, tal y como puede ser un aeródromo o un aeropuerto. Los sistemas GBAS transmiten las correcciones a los usuarios a través de transmisores terrestres por medio de equipos de radio VHF, llegando a proporcionar un servicio de precisión más alta que los sistemas SBAS, aunque en sectores más reducidos. Una revisión más en detalle de los diferentes sistemas de aumentación se presenta en los siguientes puntos:

3.4.2. Sistemas de aumentación basados en aeronaves (ABAS)

Los *sistemas de aumentación basados en aeronaves* (ABAS) comprenden una serie de dispositivos como sistemas inerciales, receptores eLORAN, altímetros barométricos y sistemas de monitorización de la integridad para aeronaves. Estos sistemas permiten una mejora de los niveles de integridad obtenidos hasta los mínimos exigidos por la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI). El uso de estos sistemas permite emplear la señal NAVSTAR-GPS como medio único suplementario y principal de navegación en cualquiera de las fases de vuelo.

Se distinguen dos sensores importantes dentro de este tipo de sistemas: (a) el *monitor de integridad autónoma del receptor* (RAIM) y (b) el *sensor de identificación y exclusión de fallos* (FDE). El dispositivo RAIM permite detectar errores en el cálculo de la posición a partir de la combinación de cuatro satélites sobre un conjunto de cinco o seis visibles determinando, de esta forma, cual es el satélite que peores medidas aporta y si transmite medidas erróneas. Por otro lado, la aeronave puede actuar como un "satélite" adicional gracias a que su altura de vuelo y su posición son conocidas. Por su parte, el dispositivo FDE permite descartar el satélite defectuoso para seguir, de esta forma, empleando la señal GNSS con normalidad. Este dispositivo está disponible en la mayoría de las aeronaves.



3.4.3. Sistemas de aumentación basados en tierra (GBAS)

Los *sistemas de aumentación basados en tierra* (GBAS) permiten complementar las señales de los sistemas GNSS a través de una red de receptores terrestres que transmiten correcciones diferenciales y datos de integridad en las bandas VHF y UHF. Su área de cobertura suele ser reducida y, por eso, suelen ser considerados *sistemas de aumentación de área local* (LAAS).

La infraestructura de este sistema se basa en un conjunto de *pseudolites*, o pseudo-satélites, que permiten obtener señales telemétricas adicionales. El problema asociado con el uso de medidas procedentes de pseudolites es que su señal es 20 dB más fuerte que la señal del sistema NAVSTAR-GPS, lo que puede llegar a impedir la correcta recepción de la señal GNSS. Esto se conoce como el *problema cerca-lejos* que limita el rango efectivo de los pseudolites que transmiten en código C/A. Como alternativa a este problema, algunos estudios proponen la emisión de la señal pseudolite en forma de pulsos (Elrod y Van Dierendonck, 1996).

Los sistemas GBAS se diferencian de los sistemas SBAS en que presentan un área de cobertura bastante más reducida. Sin embargo, a pesar de sus diferencias, ambos sistemas son hasta cierto punto, sistemas complementarios. Así, los sistemas GBAS pueden proporcionar correcciones a la señal telemétrica transmitida por los satélites geoestacionarios de los sistemas SBAS. Por esta razón, la principal aplicación de los sistemas GBAS se da en el control del tráfico aéreo como sistema de apoyo a aproximaciones de precisión y operaciones RNAV³¹ dentro del área de la terminal. Estos sistemas suelen contar con redes de estaciones terrestres de carácter local ubicadas dentro del propio aeropuerto.

Un tipo (y/o variación) de los sistemas GBAS son los *sistemas de aumentación regional basados en tierra* (GRAS). Estos sistemas se componen de una serie de estaciones interconectadas entre sí y desplegadas en un área muy extensa, incluso continental. Los sistemas GRAS son, en realidad, un tipo de sistemas de aumentación híbridos entre los sistemas GBAS y los SBAS (Crosby et al., 2000), ya que aunque presentan una configuración similar a los sistemas GBAS, su área de cobertura es más propia de los sistemas SBAS. Tanto los sistemas GBAS como los GRAS basan su funcionamiento en la transmisión de correcciones vía radio entre estaciones terrestres. Australia ha sido el primer gran país que ha apostado por un sistema GRAS en el que se combina una red de estaciones de referencia semejantes a las de un sistema SBAS y una red de transmisores en tierra que operan a altas frecuencias. La mayor parte de estaciones se localizan próximas tanto a aeropuertos como a aeródromos y permiten transmitir correcciones a receptores ubicados dentro de un radio aproximado de unos 350 km.

En la actualidad, los sistemas SBAS sólo permiten llevar a cabo *aproximaciones con guiado vertical* (APV) tipo I y II, de menor exigencia que las aproximaciones de tipo CAT I (Azoulai et al., 2012). Los sistemas GBAS permiten alcanzar mayores niveles de precisión en las inmediaciones de aeropuertos, en un radio de entre unos 30 y unos 50 km. Estos sistemas pueden ser utilizados como sistemas primarios de navegación en aproximaciones de todas las categorías (CAT I, II y III), e incluso en el guiado de aeronaves en aterrizajes automáticos.

Además de las altas precisiones, el empleo de este tipo de sistemas en aviación civil requiere de altos niveles de integridad de la señal recibida. Los sistemas GBAS proporcionan información de aumentación hasta un área aproximada de unos 45 km alrededor de la estación. Las precisiones de posición alcanzables son inferiores a un metro (95% de los casos) y los niveles de integridad superiores a $10^{-7}/150$ segundos (FAA, 1999).

3.4.4. Sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS)

Los *sistemas de aumentación basados en satélites* (SBAS) presentan amplios niveles de cobertura espacial del orden de grandes países o continentes. Por tanto, estos sistemas suelen coincidir con los denominados *sistemas diferenciales de área extensa* (WADGPS). Este tipo de sistemas diferenciales son los que más interés presentan ya que disponen de una arquitectura similar a la propia de los sistemas GNSS, aunque a una escala menor.

³¹ Modo de navegación que permite cualquier operación del avión en una determinada trayectoria de vuelo dentro del área de cobertura de las ayudas para la navegación de una estación terrestre y/o de los límites establecidos por los equipos autónomos, o bien de una combinación de ambas posibilidades (Martínez-Vadillo y Belda, 2003).



Estos sistemas permiten incrementar todas las prestaciones de la señal GNSS. Las precisiones obtenidas con el uso complementario de estos sistemas están dentro del intervalo entre 1 y 10 metros. En cuanto a la mejora de los niveles de integridad, estos sistemas permiten disponer de señales de alarma entre los 6 y los 30 segundos, mientras que los niveles de disponibilidad de la señal se incrementan hasta por encima del 99,97%. Esta mejora de las prestaciones se debe a una mejora de la cobertura del sistema, que se limita al área de proyección de los satélites del sistema SBAS. A pesar de todas estas mejoras de prestaciones, la continuidad del servicio sigue dependiendo del propio sistema GNSS.

Cada sistema SBAS cuenta, dentro de su segmento terrestre, con una red de varias decenas de estaciones de referencia desde las cuales se monitoriza la señal del sistema GNSS. En este contexto, debe hacerse una distinción entre la *zona de cobertura* del sistema y su *zona de servicio*. La zona de cobertura es aquella área donde es posible transmitir la señal de los satélites geoestacionarios. Por su parte, la zona de servicio real del sistema se determina por parte de las autoridades responsables las cuales designan y autorizan las operaciones que pueden ser llevadas a cabo. De esta forma, el área de cobertura de los sistemas SBAS puede llegar a ampliarse incrementando el número de estaciones de referencia. En los últimos años, el sistema estadounidense WAAS está ampliando su red de estaciones tanto por el norte como por el sur de los EEUU incorporando México y la mayor parte de Canadá, mientras que el sistema europeo EGNOS está planteando su ampliación hacia el este de Europa y el norte de África.

El segmento espacial de los sistemas SBAS está compuesto de uno o varios satélites de órbita geoestacionaria. El funcionamiento del sistema se basa en la retransmisión de datos a una estación de procesamiento central donde se evalúa la validez de las señales y se calculan las correcciones a los datos de efemérides y de reloj. Para cada satélite GNSS, el sistema SBAS estima los errores en los parámetros y aplica, a su vez, las correcciones que serán transmitidas a los satélites geoestacionarios para, poco después, retransmitirlas nuevamente a los receptores. Además de las correcciones diferenciales, pueden ser transmitidas señales telemétricas adicionales y alertas de fallo de la señal satelital.

Todos los sistemas SBAS transmiten un mismo formato de señal que permite emplear los mismos receptores GNSS. Una señal se transmite en la frecuencia portadora $L1$ con el mismo índice de *chipping* y longitud de código que el C/A, pero empleando diferentes códigos PRN y un mensaje de navegación también distinto.

El mensaje de navegación SBAS en la frecuencia $L1$ se transmite con un índice de datos medio de 250 bits por segundo. Existen diferentes tipos de mensajes, cada uno de los cuales tiene una longitud de 250 bits y una duración de un segundo. Entre otros datos, el mensaje de navegación incluye datos de posición y velocidad del satélite geoestacionario, correcciones diferenciales para las señales GNSS y parámetros del modelo ionosférico. Los mensajes de corrección son transmitidos normalmente cada 10 segundos, lo que permite una actualización constante de las correcciones diferenciales. Esta rápida actualización permite la emisión de una señal de alerta en un intervalo máximo de entre 6 y 10 segundos desde la detección de cualquier fallo de comunicación del sistema.

El uso de sistemas SBAS presenta una serie de ventajas para su uso en aplicaciones de aviación civil como la reducción de los costes de mantenimiento de las infraestructuras, la reducción del instrumental necesario y la mejora de los niveles de eficiencia económica y operativa. Estos sistemas permiten una monitorización y guiado 3D de aeronaves para aproximaciones de precisión dentro de una determinada área de servicio, lo que supone una mejora significativa respecto a los sistemas de navegación 2D existentes los cuales no pueden proveer referencias verticales precisas a los pilotos. Este tipo de sistemas permiten además una sustitución y eliminación paulatina de los costes de mantenimiento asociados a los instrumentos de navegación más antiguos empleados en aviación civil. Permiten además una reducción del instrumental de a bordo de las aeronaves, siendo requerido únicamente una antena y un pequeño receptor en cabina. De la misma forma, permiten una reducción de los estándares que rigen la separación entre aeronaves en vuelo, permitiendo alojar un mayor número de ellas en un espacio dado, sin llegar a incrementar los riesgos. Por último, estos sistemas permiten incrementar los niveles tanto de seguridad, a partir de aproximaciones de aterrizaje más segura, como de eficiencia económica, siendo posible llevar a cabo vuelos más directos que permitan reducir los niveles de consumo de combustible.

a) Arquitectura de los sistemas SBAS

Los sistemas SBAS presentan una arquitectura muy similar a la propia de los sistemas GNSS aunque a pequeña escala. Constan así de los mismos tres segmentos, aunque con ciertas peculiaridades. El segmento espacial se compone de uno o varios satélites geostacionarios (GEO) que delimitan el área de cobertura del sistema. En tierra, una red de estaciones, más o menos amplia, diseminadas por toda la zona de cobertura forman el segmento control. Estas estaciones recopilan información sobre las señales GNSS y calculan las correcciones. Estas mismas estaciones monitorizan la propia señal de los satélites SBAS, proporcionando información sobre integridad, calidad del servicio e incluso sobre la presencia de errores. Las correcciones se reenvían a las estaciones maestras y, de ahí, a los satélites geostacionarios que retransmiten los mensajes de correcciones. Por último, el segmento usuario comprende todos los equipos receptores con capacidad de poder recibir y aplicar las correcciones del sistema SBAS. Estas correcciones son enviadas como mensajes que el receptor puede aplicar de forma rápida o lenta. Las *correcciones rápidas* se aplican en errores que cambian rápidamente, principalmente los relativos a fallos de sincronización de los relojes. Estas correcciones no dependen de la posición del usuario y permiten determinar un posicionamiento instantáneo para cualquier receptor. Por su parte, las *correcciones lentas* comprenden principalmente fallos de sincronización a largo plazo, efemérides y retardo ionosférico. Estas correcciones pueden ser actualizadas cada minuto, aunque como los errores de efemérides e ionosféricos no cambian con demasiada frecuencia suelen actualizarse en un período de tiempo de entre dos y seis minutos.

Los principales sistemas SBAS y sus zonas de cobertura se representan en la Figura 3-18. Una visión más en detalle sobre estos sistemas se presenta en los puntos siguientes.

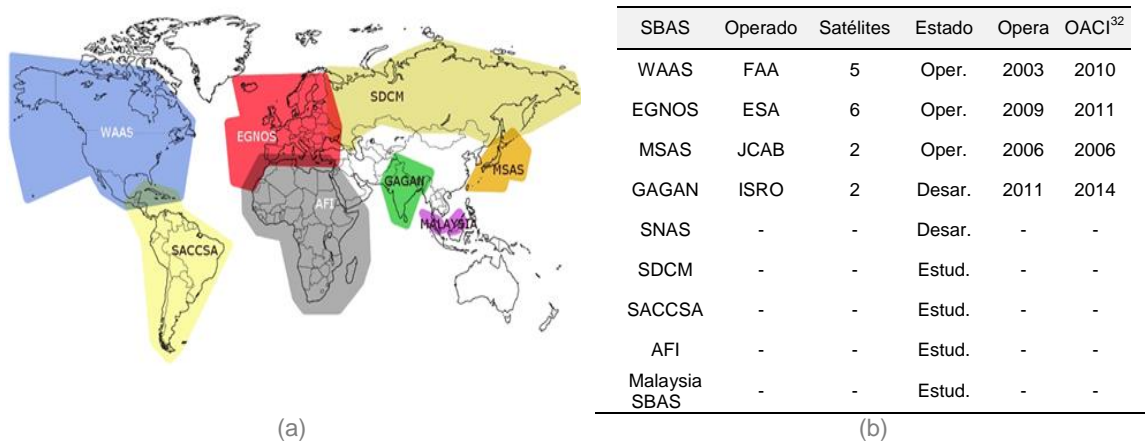


Figura 3-18: Sistemas SBAS: (a) área de cobertura y (b) principales características. Fuente: (a) *Agencia Espacial Europea* (2013) y (b) actualizada a partir de Groves, 2008.

3.4.4.1. Sistema WAAS

El sistema WAAS (*Wide Area Augmentation System*), operativo desde el año 2003, es el sistema SBAS desarrollado por el gobierno de los EEUU y operado por la *Administración Federal de Aviación de los EEUU* (FAA). Su área de cobertura es más extensa que la propia de los EEUU como país, abarcando buena parte del norte de México y la mayor parte de Canadá (CWAAS³³).

El posicionamiento con el sistema *NAVSTAR-GPS* complementado con el sistema WAAS certifica un nivel de integridad que garantiza una señal de alerta de fallo en un tiempo inferior a seis segundos. En cuanto a los niveles de precisión alcanzados, WAAS proporciona aproximadamente unos niveles de error inferiores a 7,6 metros al menos durante el 95% del tiempo, cumpliendo así con los requerimientos de la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI). El uso de la señal GNSS complementada con WAAS permite alcanzar niveles de disponibilidad del 99,999% para todo el área de servicio, lo que equivale a un tiempo total de no disponibilidad de unos cinco minutos por año. Este tiempo de no disponibilidad de la

³² Año de certificación del sistema para operaciones de aviación civil por parte de la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI).

³³ La red del sistema WAAS en Canadá se denomina CWAAS (*Canadian WAAS*).



señal es muy inferior al que se obtendría sin el sistema WAAS, del orden (máximo) de unos cuatro días por año.

Por tanto, el uso complementado de la señal NAVSTAR-GPS con la del sistema WAAS permite cumplir con los requerimientos de la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI), siendo posible su uso como sistema primario y único de navegación en ciertas aplicaciones del sector de la aviación civil.

a) Arquitectura del sistema WAAS

El segmento espacial del sistema se compone de un total de cinco satélites geoestacionarios, tres de los cuales están operativos. El segmento control está formado por tres *estaciones maestras de área amplia* (WMS), unas seis antenas para la retransmisión de datos ubicadas en estaciones de carga propias (GUS) y un conjunto de *estaciones de referencia de área amplia* (WRS). En el año 2007 el número de estaciones WRS era de 38 para toda la extensión de los EEUU. Esto supone una gran dispersión espacial de dichas estaciones (entre unos 500 y unos 1.000 km de separación entre ellas), lo que limita parcialmente los niveles de precisión obtenidos en ciertos sectores. Además de las estaciones WRS existentes en los principales estados del país hay una serie de estaciones WRS ubicadas en los estados más apartados (siete en Alaska, una en Hawái y otra en Puerto Rico), además de las situadas en los países vecinos (cinco en México y cuatro en Canadá) (FAA, 2007).

Todas las estaciones WRS cuentan, al menos, con un receptor de frecuencia dual ($L1$ y $L2$) conectado a un reloj atómico de cesio, un sensor meteorológico, un procesador, además de un equipo de red para la transmisión de datos *ethernet* a las estaciones maestras (WMS). En estas últimas estaciones se calculan las correcciones de las desviaciones recibidas, entre ellas las debidas a errores en la órbita del satélite, deriva del reloj y retrasos de la señal causados por el efecto ionosférico. Una vez calculadas las correcciones, éstas se envían a los satélites SBAS desde las estaciones de carga (GUS) con una frecuencia de cinco segundos.

3.4.4.2. Sistema EGNOS

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) es el nombre del sistema SBAS europeo, que compone la base (o primera generación) del futuro sistema de posicionamiento europeo *Galileo*. Su área de cobertura inicial es la del continente europeo, aunque existen planes para ampliarla a medio y largo plazo hacia el este de Europa, Medio Oriente y Norte de África. Existen dos programas importantes de ampliación de EGNOS a corto-medio plazo: (a) *SIRAJ* y (b) *ESESA*. El primero, *SIRAJ*, es el nombre del programa de extensión de EGNOS al Mediterráneo, Península Arábiga y regiones africanas, mientras que *ESESA* es un programa similar para Sudáfrica.

El sistema EGNOS ha sido impulsado por los Ministros de Transporte de la Unión Europea (UE), *Eurocontrol* y la *Agencia Espacial Europea* (ESA), que constituyen el *Grupo Tripartito*. En junio de 1998 este grupo firmó un acuerdo según el cual se definían las competencias de cada organización. La *Agencia Espacial Europea* (ESA) fue la encargada de contratación de las industrias que participan en la fase de desarrollo del sistema, entre las cuales estaban Aena (España), DFS (Alemania), DNA (Francia), ENAV (Italia), NATS (Reino Unido), Skyguide (Suiza), NAV-EP (Portugal), NMA (Noruega) y CNES (Francia).

La aprobación oficial del programa EGNOS se llevó a cabo en diciembre del año 1994, tardando casi una década en alcanzar un nivel avanzado de operatividad (AOC) y quince años su plena capacidad operativa (FOC).

El posicionamiento con señal NAVSTAR-GPS complementada con EGNOS proporciona unos niveles de precisión del orden de los dos metros en el plano horizontal, unos tiempos de alerta máximos de seis segundos y unos porcentajes de disponibilidad de la señal de, como mínimo, el 99%. EGNOS proporciona un servicio de navegación válido para todas las fases de vuelo (despegue, ruta y aproximación con guiado vertical), cumpliendo así con los requisitos definidos por la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI). Además, el posicionamiento con sistemas GNSS y EGNOS está validado desde el año 2011 para aplicaciones de seguridad crítica (SoL).

a) Arquitectura del sistema EGNOS

El sistema EGNOS consta de seis satélites geoestacionarios: tres *Inmarsat*, dos *Astra* y un *Artemis*. Los satélites *Inmarsat* son el 3-F2 centrado en la región Atlántica, el 4-F2 en Europa Central y el 3-F1 en

el Océano Índico. Los usuarios EGNOS pueden rastrear la señal de, al menos, dos satélites geostacionarios. EGNOS dispone de una red de 34 estaciones terrestres (RIMS) que reciben las señales de los satélites GNSS y las envían, mediante una *red de comunicación de área amplia* (EWAN), a los *centros de control de la misión* (MCC) donde se calculan las correcciones. Finalmente, las *estaciones de acceso a los satélites geostacionarios* (NLES) generan las señales y las envían de vuelta a los satélites geostacionarios.

El tiempo de la red EGNOS se denomina *ENT*, siendo la estación de referencia de tiempo para el sistema la del *Observatorio de París*. Las *correcciones ENT* se transmiten a las estaciones RIMS con una precisión de 1,5 nanosegundos. De estas estaciones se miden las pseudodistancias de los satélites GNSS y SBAS, tanto con observables de tipo código como de tipo fase. Las pseudodistancias medidas se transmiten a uno de los cuatro *centros de control* (MCC) que reciben la información de las estaciones RIMS y generan los mensajes de corrección. Estos cuatro *centros de control* (MCC) incluyen, a su vez, un *centro de control* (CCF) y uno de *procesamiento* (CPF). Sólo uno de estos *centros de control* (MCC) está activo y operacional, mientras que los otros permanecen en estado de reserva, pudiendo ser activados en caso de necesidad.

El sistema cuenta además con seis estaciones NLES que transmiten los mensajes de correcciones e integridad a los usuarios europeos. EGNOS prevé la implantar más estaciones de este tipo, algunas de las cuales serán operativas, mientras que otras serán empleadas para evaluar el funcionamiento del sistema.

Dentro del segmento control del sistema EGNOS existen además una serie de infraestructuras adicionales como las *instalaciones de cualificación específica* (ASQF) o el *sistema de evaluación del rendimiento* (PACF). Ambos son mecanismos de apoyo al sistema con distintas funciones. Las instalaciones de tipo ASQF proporcionan una plataforma para la validación y certificación de las aplicaciones EGNOS, mientras que el sistema PACF se centra en la coordinación técnica, el análisis de rendimiento y la gestión de la configuración del sistema en su conjunto.

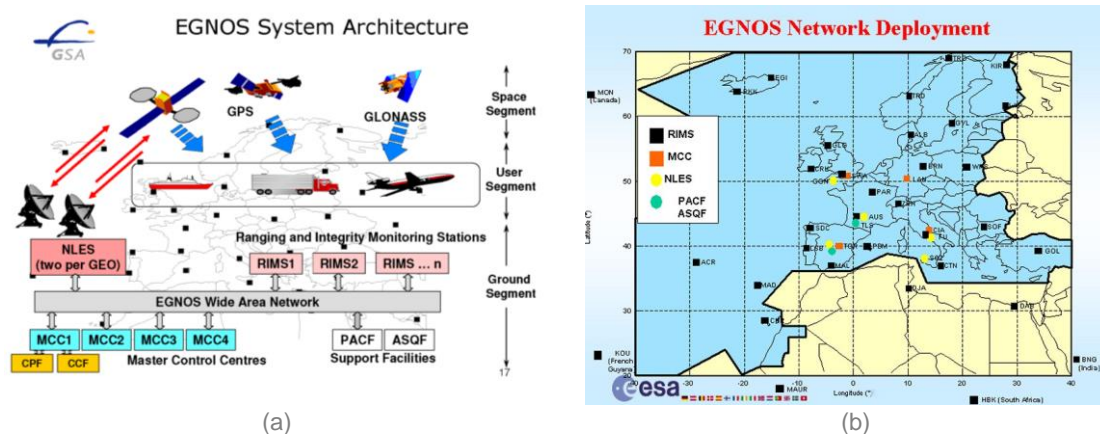


Figura 3-19: (a) (b) Infraestructura del segmento control del sistema EGNOS. Fuente: (a) Enderle, 2008; (b) Agencia Espacial Europea, 2014.

3.4.4.3. Sistema MSAS

MSAS (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) es el sistema SBAS desarrollado por Japón y operativo desde el año 2006. El segmento espacial del sistema cuenta con dos satélites geostacionarios de transporte multifuncional (MTSAT) los cuales, además de para posicionamiento, son empleados para predicción meteorológica. Un error en el lanzamiento del primer satélite (*MTSAT-1*) en el año 2000 obligó a retrasar la puesta en marcha de este sistema. En el año 2004 se lanzó el satélite *MTSAT-1R* y, un año después, el segundo (*MTSAT-2*). Los niveles de precisión alcanzados con este sistema son inferiores a los dos metros tanto en planimetría como en altimetría.

Aunque el sistema MSAS se haya basado en el WAAS presenta algunas diferencias. El sistema MSAS presenta una capacidad de comunicación superior que se emplea para tareas de vigilancia automática (ADS). Este sistema emplea el nuevo sistema de comunicación FANS, lo que le ha permitido ser validado como *servicio satelital móvil aeronáutico* (AMSS) y certificado como sistema de aumentación por la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI).



a) Arquitectura del sistema MSAS

Este sistema consta de una serie de *estaciones de vigilancia* (GMS) y cuatro *centros de control* (MCS) de tránsito en rutas aéreas. Para garantizar una determinación exacta de la órbita de sus satélites geostacionarios, el sistema cuenta con dos *estaciones de vigilancia y cronometría* (MRS) en los cuatro *centros de control*, dos ubicadas en territorio nipón y otras dos fuera, una en Hawái (EEUU) y la otra en Canberra (Australia).

En operaciones normales, los usuarios reciben hasta dos señales procedentes del sistema con diferentes códigos PRN. Cada señal se carga desde una de las estaciones de control. En caso de fallo de uno de los satélites, la *estación de control* (MCS) conmuta la señal desde el satélite que está fallando a otro. De esta forma, aún en estas condiciones anormales, cualquier usuario puede recibir dos señales del sistema MSAS. La arquitectura de este sistema garantiza, por lo tanto, una señal redundante y fiable.

El servicio del sistema MSAS podrá ampliarse en los próximos años a una buena parte de la región Asia/Pacífico si se instalan *estaciones de vigilancia* (GMS) dentro de la zona de cobertura de los satélites. Ésta es, al menos, la intención de Japón cuyo gobierno se ha propuesto compartir su sistema con sus países vecinos en pro de la instauración de un sistema de navegación aérea más fluido, seguro y fiable en todo el continente asiático.

3.4.4.4. Sistema GAGAN

GAGAN (*GPS Aided Geo Augmented Navigation*) es el sistema SBAS puesto en marcha por el gobierno indio y desarrollado por la agencia espacial de ese país (ISRO). El objetivo de GAGAN, como el de otros sistemas SBAS, es el de proporcionar un sistema de navegación para todas las fases de vuelo sobre el espacio aéreo indio y el de su entorno cercano compuesto por el océano Índico y amplias zonas de la región Asia/Pacífico.

GAGAN ofrecerá unas precisiones de posicionamiento de unos tres metros para todo el espacio aéreo indio. Estas precisiones estarán disponibles simultáneamente en 80 aeropuertos y aeródromos civiles y 200 no-civiles, un número que será incrementado hasta un total de 500 en los próximos años, según las expectativas del sistema. Según los tests llevados a cabo hasta el momento, el sistema GAGAN cumplirá con los requerimientos técnicos de la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI) y será interoperable con el resto de sistemas SBAS.

a) Arquitectura del sistema GAGAN

El segmento espacial del sistema GAGAN se compone actualmente de dos satélites, el *GSAT-8* y el *GSAT-10*, aunque pronto se enviará un tercero, el *GSAT-15*, el cual proporcionará al sistema servicios avanzados de telecomunicaciones.

Este sistema contará con unas 15 *estaciones de referencia* (INRES), tres *estaciones de carga* (INLUS) y tres *centros de control* (IMCC). Las fases de la implantación del sistema son tres: (a) la de test, (b) la experimental y (c) la operacional. En la fase de test o de *demonstración tecnológica del sistema* (TDS) se evaluará la capacidad del sistema para aproximaciones de precisión (*CAT I*) en una región limitada del espacio aéreo de la India. La *fase experimental inicial* (IEP) supone una ampliación del área anterior a todo el espacio aéreo de la India, añadiéndose al sistema las redundancias necesarias. Finalmente, durante la *fase operacional final* (FOP) el sistema alcanzaría su pleno desarrollo. En esta fase se evaluará el nivel de cumplimiento de los requerimientos de la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI) para su certificación definitiva como sistema de navegación válido en aplicaciones aeronáuticas.

La localización de la India cerca de la línea del ecuador terrestre supone una peculiaridad de GAGAN respecto al resto de los sistemas SBAS. Esta circunstancia provoca que la ionosfera tenga un efecto más importante sobre las señales *NAVSTAR-GPS* recibidas. Para la adecuada evaluación de la influencia de la ionosfera, la India ha propuesto la elaboración de un modelo ionosférico propio (*IONO-TROP regional*) basado en los datos registrados en la red de estaciones de control de varias localidades del país durante amplios períodos de tiempo. A día de hoy, el estudio de este modelo ionosférico está siendo llevado a cabo en varios aeropuertos del país (*Kozhikode*, *Hyderabad* y *Bangalore*) con resultados satisfactorios. La red de *estaciones de control para el estudio del modelo ionosférico* (TEC) es actualmente de 18, aunque se prevé la implantación de nueve estaciones más.



3.4.4.5. Otros sistemas SBAS

El *Sistema para Control y Correcciones Diferenciales (SDCM)* es el sistema SBAS que actualmente está desarrollando Rusia. Se espera que este sistema sea validado y certificado en los próximos años. Entre los objetivos de este sistema está el de ofrecer un servicio a la parte más septentrional de Rusia, empleando para ello satélites de órbita media (MEO). La principal diferencia de este sistema respecto a otros SBAS es que SDCM ha sido concebido como un sistema de aumentación válido tanto para *NAVSTAR-GPS* como para *GLONASS*, mientras que el resto de los sistemas SBAS están particularizados únicamente para el sistema *NAVSTAR-GPS*.

China está desarrollando su propio sistema de aumentación, *SNAS*, aunque apenas hay información publicada acerca de su nivel de implementación debido al hermetismo político de China. De la poca información que ha trascendido, se sabe que el sistema está en la segunda fase. La primera fase supuso la construcción de 11 estaciones cerca de Pekín, mientras que la segunda fase prevé la construcción de 12 más.

En fase de estudio están el sistema latinoamericano *SACCSA (Solución de Aumentación para Caribe, Centro y Sudamérica)*. El programa de estudio empezó en el año 2003 y está actualmente se encuentra en su tercera fase, en la cual se evalúa su posible funcionamiento y validez. Hay otros sistemas SBAS adicionales cuya implantación está siendo estudiada, siendo el más relevante por su área de cobertura, el sistema *AFI (Africa-Indian Ocean)*.

3.5. DISCUSIÓN

La apuesta por el desarrollo reciente de los sistemas GNSS se debe a que presentan una serie de ventajas comparativas sobre los sistemas de posicionamiento tradicionales. Los GNSS permiten obtener unos niveles de precisión óptimos en cualquier momento del día y/o lugar del mundo. Esto justifica su rentabilidad económica y social a pesar del enorme coste económico que supone la implementación de la infraestructura propia de sistemas de este tipo.

Un gran número de aplicaciones de la vida diaria se basan en este momento, o lo harán en un futuro muy cercano, en información geoespacial. Esto obliga al desarrollo continuo de sistemas de posicionamiento que cumplan con los requerimientos de estas aplicaciones. Existen muchos ejemplos de aplicaciones en el mundo del transporte, en cualquiera de sus modalidades. En navegación marítima es necesaria una gestión continua de los barcos durante toda su travesía. En transporte ferroviario es importante una gestión eficaz de los servicios en términos tanto de tiempo como de capacidad. En transporte por carretera presentan un gran interés, entre otras, aplicaciones de navegación de vehículos, gestión de flotas tanto de pasajeros como de mercancías, sistemas de telepeaje y sistemas de guiado automático de vehículos.

Sin embargo, las posibles aplicaciones no se limitan únicamente a sistemas de transporte. Por ejemplo, la sincronización de nodos de internet o estaciones de telecomunicaciones móviles dentro del mundo de las telecomunicaciones, el desarrollo de vehículos sin conductor para usos agrícolas, el control y seguimiento de bancos de pesca, el estudio de ciertos fenómenos terrestres y meteorológicos e incluso la puesta en marcha de servicios de búsqueda y rescate son algunos ejemplos de posibles aplicaciones que pueden ser llevadas a cabo con sistemas GNSS.

El sector de la aviación civil es uno de los que apuesta más decididamente por el desarrollo de sistemas GNSS debido, entre otras razones, al incremento constante del tráfico mundial, a las limitaciones de los métodos tradicionalmente empleados y a la necesidad de sistemas de gestión más eficientes. La aplicación de los sistemas GNSS dentro de este sector presenta una serie de ventajas como su cobertura global. Así, estos sistemas permiten un posicionamiento continuo durante todas las fases de vuelo, lo que hace posible plantear, por ejemplo, nuevas rutas aéreas o establecer un control más directo de la distancia de seguridad en vuelo.

Los requerimientos de posicionamiento más altos exigidos por la *Organización Internacional de Aviación Civil (OACI)* son los relativos a la fase de aproximación del avión al suelo. Los sistemas GNSS actualmente operativos no satisfacen por sí mismos estos requerimientos, no sólo por los errores de posicionamiento en sí, sino también por la falta de un servicio que determine la calidad de la señal o la incertidumbre de que la señal pueda dejar de funcionar en cualquier momento sin previo aviso. Por tanto,

el posicionamiento obtenido con los sistemas GNSS actuales no es lo suficientemente preciso y fiable para su uso como sistemas primarios de navegación dentro del sector de la aviación civil.

Esta situación ha obligado a plantear soluciones alternativas, siendo la más importante la aportada por los sistemas de aumentaciones. Estos sistemas permiten cubrir algunas deficiencias de los sistemas GNSS y complementarlos, ofreciendo una solución provisional de cara al cumplimiento de algunos de los requerimientos planteados por el sector de la aviación civil. El uso de sistemas de este tipo permite, por una parte, incrementar el número de medidas y de redundancias y, por otra parte, calcular una serie de correcciones diferenciales basándose para ello en la teoría de que los errores de medida obtenidos en receptores situados muy próximos entre sí presentan altos niveles de correlación.

De los tres sistemas de aumentaciones presentados, dos son los más importantes: los sistemas basados en tierra (GBAS) y los basados en satélites (SBAS). Los sistemas GBAS ofrecen soluciones a menor escala que los sistemas SBAS, centrados normalmente en áreas locales próximas a aeropuertos. La única excepción a nivel mundial es la planteada por Australia, basada en la puesta en marcha de un sistema GBAS a gran escala³⁴.

La mayoría de países y regiones han apostado por sistemas de tipo SBAS, como ocurre con EGNOS en Europa. El uso de la señal GNSS complementada con EGNOS permite una mejora sustancial de la señal primaria tanto en términos de disponibilidad, continuidad, precisión e integridad de la señal (Figura 3-20), llegando a disponer de un servicio de alarma casi instantáneo en caso de fallo en la señal. La Figura 3-21 muestra como el uso de sistemas SBAS, en este caso EGNOS en Europa, permite estimar un posicionamiento más preciso que el obtenido simplemente con la señal NAVSTAR-GPS (Quintanilla *et al.*, 2009).

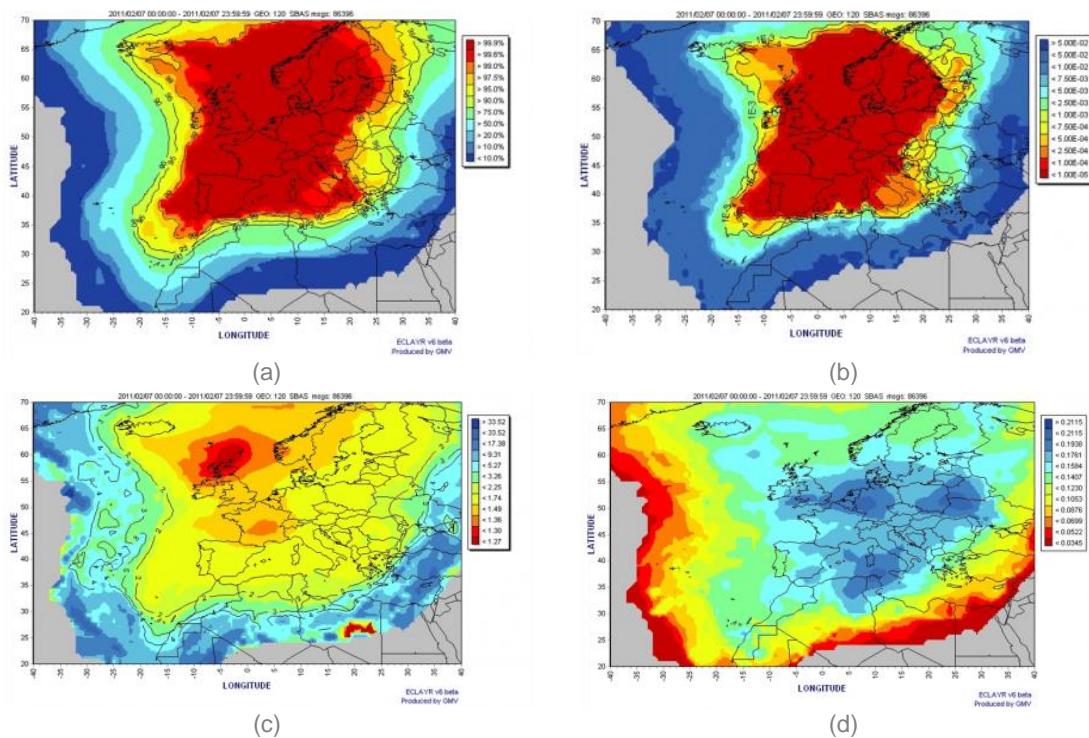


Figura 3-20: (a) Niveles de disponibilidad, (b) continuidad, (c) precisión e (d) integridad de la señal EGNOS en Europa. Datos correspondientes al día 07 de febrero de 2011. Fuente: GMV, 2011.

³⁴ Aircservice Australia GBAS Program (2014).

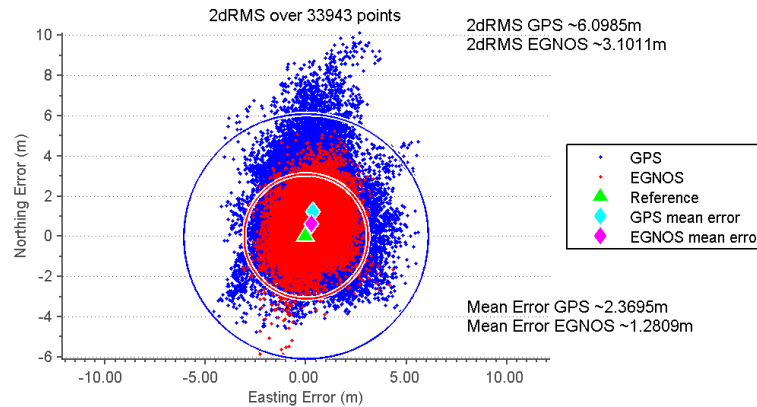


Figura 3-21: Posicionamiento obtenido a partir de la señal GPS tanto de forma única como complementada con EGNOS sobre un levantamiento de 33.943 puntos. Comparación de precisiones obtenidas. Error medio y estimador de fiabilidad (2dRMS≈95%). Fuente: *European Global Navigation Satellite Systems Agency*, 2014.

El sistema EGNOS ofrece tres niveles de servicios: (a) abierto, (b) seguridad de vida y (c) comercial. El *servicio abierto* (OS) permite alcanzar unos niveles de precisión de tres metros en el plano horizontal y de unos cuatro metros en el vertical, además de unos niveles de disponibilidad de la señal del 99% (GMV, 2011). Sin embargo, este servicio no ofrece ni garantía de la señal ni un nivel de fiabilidad asociado al posicionamiento. Por su parte, el *servicio seguridad de vida* (SoL) proporciona un mensaje de integridad que garantiza el aviso de fallo en un tiempo máximo de seis segundos. El *servicio seguridad de vida* (SoL) fue validado y certificado para su uso en aviación civil en el año 2011, gracias a la satisfacción de los niveles de integridad (Speidel *et al.*, 2013). De esta forma, permite cumplir los requerimientos para las aproximaciones de precisión de menos nivel, las de guiado vertical (APV-I), aunque se espera en los próximos años satisfaga los requerimientos de ciertas aproximaciones de más precisión (tipo CAT) (Azoulai *et al.*, 2012; Fellner *et al.*, 2010) (Tabla 3-13).

Tabla 3-13: Requerimientos de la *Organización Internacional de Aviación Civil* (OACI) para aproximaciones de vuelos en aviación civil. Fuente: OACI, 2013 y Speidel *et al.*, 2013.

Fase de vuelo	Precisión		Integridad		Probabilidad máxima de fallo		
	(2σ o 95%)		Límites alerta (4-5 σ)		Tiempo de alerta	Integridad	Continuidad
	Vert.	Horiz.	Vert.	Horiz.			
NPA, Aprox. Inicial, Salida	n/a	0,22-0,74 km	n/a	1,9 -3,7 km	10-15 s	10 ⁻⁷ /hr	10 ⁻⁴ /hr
LNAVNAV		220 m		556 m	10 s	1,2·10 ⁻⁷ /150 s	4,8·10 ⁻⁶ /15 s
LPV	20 m		50 m				
APV I			35 m				
APV II	8 m	16 m	20 m	40 m	6 s		
LPV 200			35 m				
CAT I	4m		10 m				
CAT II/III	< 2,9 m	< 6,9 m	5-3 m	< 17 m	< 2 s	< 10 ⁻⁹ /150 s	< 4·10 ⁻⁶ /15 s

El uso de EGNOS como sistema de aumentación para aplicaciones de aviación civil permite alcanzar una serie de ventajas tanto técnicas como económicas. Desde el punto de vista técnico permite un posicionamiento en cualquier punto del espacio fuera estrictamente de áreas próximas a aeropuertos, además de una mejora de la estabilidad y guiado del avión, una reducción de la probabilidad de accidentes y una revisión de los estándares de seguridad sin un aumento asociado de riesgos. Desde el punto de vista económico permite reducir los costes asociados tanto al instrumental de a bordo del avión como a la implantación y mantenimiento de las infraestructuras terrestres existentes en cada aeropuerto. Además, estos sistemas permiten plantear rutas de vuelo más directas y eficientes, lo que permite reducir el consumo de combustibles y los niveles de emisiones.



Desde un punto de vista estratégico, EGNOS supone para Europa la primera fase para la puesta en marcha de su propio sistema de posicionamiento global por satélite. Su funcionamiento permite así evaluar, en cierta forma, las probabilidades de éxito de *Galileo*. La *Agencia Espacial Europea* (ESA) dirige y desarrolla toda la infraestructura del sistema.

A pesar de las mejoras aportadas, EGNOS no ofrece una garantía de servicio y existe el riesgo de que falle la señal debido a la dependencia del sistema respecto a la señal primaria del GNSS. Esto supone un problema de gran magnitud teniendo en cuenta el gran número de aplicaciones basadas en esta información y el hecho de que tanto *NAVSTAR-GPS* como *GLONASS* son sistemas militares de titularidad ajena a Europa (McGrath, 2009).

Galileo será el primer sistema GNSS de origen civil y uso público. Será totalmente interoperable permitiendo incrementar exponencialmente el número de satélites disponibles y obtener así un posicionamiento más preciso y fiable, incluso en cañones urbanos y espacios interiores donde actualmente existen problemas de recepción de la señal. Permitirá además incrementar los niveles de cobertura en países situados a latitudes altas, en los que ahora mismo el sistema *NAVSTAR-GPS* presenta ciertas limitaciones. Además ofrecerá un servicio de garantía y servicio de integridad lo que hará posible su uso en aplicaciones críticas.

El sistema *Galileo* ofrecerá cinco servicios: (a) abierto, (b) comercial, (c) seguridad de vida, (d) público regulado y (e) el de búsqueda y rescate. Algunos de estos servicios serán de acceso público y gratuito, mientras que otros serán de pago. Estos servicios permitirán plantear nuevas posibilidades de negocio y aplicaciones lo que favorecerá la expansión comercial del sistema y el incremento de su peso estratégico.

La infraestructura del sistema es semejante a la del resto de sistemas GNSS (Tabla 3-14). El segmento espacial constará de unos 30 satélites (27 operativos y 3 de reserva) ubicados en tres planos de órbita media inclinados unos 56°. Los satélites serán distribuidos de forma equilibrada entre los distintos planos orbitales y a una distancia semejante unos de otros. Cada plano orbital contará con un total de nueve satélites operativos más uno de reserva. Los satélites estarán ubicados a una distancia de unos 23.200 km y su período orbital será de 14 horas y 22 minutos.

El segmento control contará con dos *centros principales* (GCC) y unas *estaciones de seguimiento* (TT&C) desde donde se controlarán y gestionarán los satélites. Una serie de *estaciones sensoriales* (GSSS) aportarán las medidas de control necesarias para el cálculo de la integridad y la sincronización entre los satélites y las estaciones terrestres. El intercambio de datos entre centros de control y satélites se llevará a cabo en una serie de *estaciones de subida o de carga*.

Galileo incrementará el número de satélites y permitirá una adquisición más rápida de la señal. Contará con diez señales de navegación y transmitirá en cuatro frecuencias distintas (E5a, E5b, E6 y E1), superpuestas en su mayor parte a las de los GNSS actuales para mejorar la interoperabilidad entre sistemas (Hein *et al.*, 2002). La señal del sistema serán transmitida en dobles frecuencias para la mayor parte de los servicios y sus niveles de precisiones estarán entre los cuatro y ocho metros, presentando además unos niveles de disponibilidad de la señal superiores al 99,8%.

Tabla 3-14: (a) Segmento espacial y (b) de control de los principales sistemas GNSS. Fuente: Crop, 2014.

Segmento espacial	GPS	GLONASS	Galileo	Segmento terrestre	GPS	GLONASS	Galileo
Planos orbitales	6	3	3	Centros principales	2	2	3
FOC	24	24	30	FOC	6	4	20-30
Satélites				Estaciones de control			
Actual	30	22	4	Actual	17	10	-
Altitud (km)	20.160	19.100	23.200	Estaciones de carga	3	3	9
Inclinación	55°	65°	56°	Telemetría, seguimiento y control	4	5	5
Período	12 h	11 h	14 h				

(a)

(b)

La implementación del sistema consta de dos fases: (a) IOV y (b) FOC. La fase de validación en órbita (IOV) supondrá la puesta en marcha de una parte de la infraestructura del sistema. En esta fase el sistema tendrá cuatro satélites operativos en órbita, uno de los *centros principales* de control del sistema, cinco *estaciones de carga*, dos *estaciones TT&C* y unas *veinte estaciones sensoriales*. Por su parte, la fase de plena capacidad operativa (FOC) del sistema se compondrá de dos *centros de control*, diez *estaciones de carga*, cinco *estaciones TT&C* y entre unas veinte y treinta *estaciones sensoriales*.



Previamente a estas fases, el sistema puso en órbita dos satélites experimentales: *Giove-A* en 2005 y *Giove-B* en 2008. El objetivo de esta fase era la evaluación y mitigación de los riesgos para el correcto funcionamiento del sistema.

El sistema acumula continuos retrasos. Se esperaba su plena capacidad operativa (FOC) en 2013, sin embargo ha alcanzado su capacidad operativa inicial (IOV) todavía en febrero de 2014, con cuatro años de retraso. El nuevo plazo para que el sistema alcance su plena capacidad operativa (FOC) se ha fijado para 2016.

Por lo tanto, *Galileo* aportará más y mejores ventajas. Las principales ventajas sobre EGNOS serán que permitirá evaluar la calidad de la señal, incorporará más servicios y garantizará una señal independiente y fiable. Su interoperabilidad respecto a otros sistemas supondrá una gran ventaja para los usuarios finales al incrementar el número de medidas y redundancias, lo que permitirá aumentar los niveles de disponibilidad y continuidad de la señal, además de las precisiones obtenidas.

La gran ventaja de *Galileo* es su carácter ventaja política y estratégica fundamental en un doble sentido: por una parte evitar la dependencia respecto a otros sistemas (militares y que no ofrecen garantía de continuidad de la señal) y, por otra, permitir alcanzar una posición hegemónica ampliando el dominio sobre otros países y usuarios que no disponen de sistemas GNSS propios.

CONCLUSIONES

En este capítulo hemos analizado los sistemas GNSS y los aspectos más relevantes relativos tanto a su funcionamiento como a su estado actual. Este trabajo aporta una visión general de los mismos, aunque se particulariza parte del estudio al sistema *NAVSTAR-GPS*, el cual presenta una posición estratégica por ser actualmente el único plenamente operativo a escala mundial.

Existe una evolución temporal en el desarrollo y puesta en marcha de los sistemas GNSS. En una primera fase los bloques soviético y estadounidense ponen en marcha estos sistemas para la obtención de información militar. El fin de esta fase tiene lugar con el cese del clima de desconfianza y la descomposición de la antigua Unión Soviética. En una segunda fase los respectivos sistemas proponen una cierta apertura civil y un cese de los servicios de degradación intencionada de la señal recibida por los usuarios civiles. En una tercera fase, los sistemas intentan satisfacer las necesidades de mercado y proponen soluciones transitorias como los sistemas de aumentaciones. La cuarta fase consistirá en la mejora y modernización de los sistemas existentes junto a la incorporación de nuevos sistemas (*Galileo*, *COMPASS*, *IRNSS*) planteándose como objetivo la complementariedad e interoperabilidad entre sistemas.

Actualmente nos encontramos en la tercera fase, en la cual se plantea como objetivo inmediato el cumplimiento de los requerimientos del sector civil. Entre éstos están la mejora de las precisiones, el incremento de los niveles de disponibilidad e integridad de la señal, además de la incorporación de servicios de garantía de calidad del servicio.

Este estudio ofrece una visión integral, completa y actual de los sistemas GNSS, aportando una perspectiva original y más amplia sobre otros estudios. Revisiones periódicas de los aspectos presentados deben ser llevadas a cabo con objeto de evaluar los plazos y fechas presentados.



CAP. 4

ESTRATEGIAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE POSICIONAMIENTO EN PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA



Capítulo 4

RESUMEN	143
4.1. INTRODUCCIÓN	143
4.2. ESTRATEGIAS DE POSICIONAMIENTO CON SISTEMAS GNSS	145
4.2.1. Técnicas y sistemas de aumentación aplicadas a la señal GNSS	148
4.2.2. Integración de sistemas GNSS con sensores inerciales	150
4.3. DATOS Y ZONA DE ESTUDIO	154
4.3.1. Instrumentación del vehículo para la adquisición de datos de posicionamiento.....	154
4.3.2. Datos.....	155
4.4. DISCUSIÓN.....	155
CONCLUSIONES	159



RESUMEN

Los experimentos de conducción naturalista requieren grandes cantidades de recursos en términos tanto económicos como temporales. El éxito de los mismos depende del desarrollo de una estrategia previa y la puesta en marcha de tests previos en los que se analicen las principales deficiencias del proyecto. La fase más sensible y de la que más dependen los resultados finales es la de recogida de datos en campo. La mayor parte de proyectos de conducción naturalista llevados a cabo hasta el momento coinciden en que las pérdidas de datos son frecuentes. Por esta razón es necesario un estudio previo que permita la elección más adecuada del instrumental de captura de datos en función de las características de cada experimento. En este capítulo se propone un estudio particular centrado en las posibles estrategias para la adquisición de datos de posicionamiento en este tipo de experimentos.

4.1. INTRODUCCIÓN

El registro de datos de posicionamiento presenta un gran interés en experimentos de conducción y seguridad vial desde diferentes puntos de vista. Entre estas perspectivas podemos destacar, a modo de ejemplo, diversos estudios centrados en gestión del tráfico (Obuhuma y Moturi, 2012; Owusu *et al.*, 2006; Faghri y Hamad, 2002), localización de tramos de alta siniestralidad (Zuo y Zhang, 2012; Tripathi, 2010), evaluación de patrones de conducción (Gonder *et al.*, 2007), caracterización geométrica de vías (Bassani *et al.*, 2012), desarrollo de vehículos autónomos (Nastro, 2008) y vehículos inteligentes (Borre, 2013), entre otros.

Las principales estrategias para la adquisición de datos de posicionamiento emplean normalmente sistemas GNSS y sólo, excepcionalmente, plantean otro tipo de sistemas alternativos. El posicionamiento GNSS puede ser llevado a cabo a través de la señal satelital únicamente, aplicando correcciones diferenciales obtenidas a partir de una serie de sistemas de aumentaciones o bien integrando los sistemas GNSS con otros dispositivos, como los sistemas inerciales, permitiendo de esta forma obtener una solución complementada. Entre las posibles estrategias alternativas está el uso de marcadores que permiten un posicionamiento relativo dentro de un sistema de referencia local.

Casi ninguno de estos experimentos de conducción naturalista y estudios científicos publicados hasta el momento plantea objeciones al uso de GNSS como los sistemas más adecuados para la adquisición de datos de posicionamiento. El proyecto de los *100 coches* del *Virginia Tech Transportation Institute* (VTTI), uno de los proyectos más ambiciosos, empleó receptores GPS para posicionamiento. Sin embargo, no se planteó una integración de estos receptores con los sensores inerciales del vehículo. Por su parte, otros muchos experimentos, como el *Test Site Sweden FOT*, no especifican el instrumental empleado para adquisición de datos de posicionamiento (Laporte y Espié, 2010).

Varios proyectos piloto de conducción naturalista desarrollados hasta el momento coinciden en el elevado riesgo de pérdida de datos de todo tipo (Backer-Grøndahl *et al.*, 2011) y en la necesidad de una buena planificación y ejecución de estrategias para evitar pérdidas de datos. Pilgerstorfer *et al.* (2011), a partir de su experiencia en alguno de los proyectos piloto de *DaCoTA EU Road Safety*, señalan que a pesar de una buena calibración tanto del hardware como del software de experimentación no pudieron evitar tener que resetear algunos de los dispositivos durante el transcurso del experimento. Como resultado sólo pudieron emplear el 75,5% de los datos, lo que supuso una importante pérdida tanto cuantitativa como cualitativa de información. Estos mismos autores concluyen que este tipo de estudios deberían presentar una buena estructura organizativa previa para prevenir pérdidas de datos y corregir posibles errores, siendo necesario plantear proyectos que puedan generar y mantener el registro de los datos de una forma continua en el tiempo. A una conclusión similar llegan Sagberg *et al.* (2011) que, como recomendaciones al proyecto *PROLOGUE*, inciden en la importancia de llevar a cabo proyectos piloto a pequeña escala como estrategia para reducir el riesgo de pérdidas de datos.

Laporte y Espié (2010) proponen un plan de diseño previo a la puesta en marcha de un proyecto propio de conducción naturalista para vehículos de dos ruedas: *2Besafe*. Entre los requerimientos planteados, proponen que las frecuencias mínimas de registro de los sensores empleados sean de 100 Hz excepto para la grabación del video y datos de posicionamiento. Para la captura del video proponen una



frecuencia mínima de 10 Hz mientras que para la adquisición de los datos de posicionamiento proponen una frecuencia de 1 Hz. Estas bajas frecuencias para datos de posicionamiento hacen posible el uso de receptores GPS simples, a pesar de sus bajas prestaciones. Este mismo estudio advierte del riesgo de pérdida de datos de posicionamiento debido a tres factores fundamentales: (a) paso por túneles, (b) mala visibilidad satelital y (c) fallo inicial en la adquisición de la señal satelital. Para este último punto, se propone como solución parcial un protocolo inicial de espera por parte del conductor de unos tres minutos desde que el motor es puesto en marcha, con objeto de que el receptor GPS tenga el tiempo suficiente para la adquisición de una óptima señal satelital.

Los tests llevados a cabo en diferentes países dentro del proyecto *2Besafe* conllevaron la aparición de graves fallos en la adquisición de datos de posicionamiento. En uno de los proyectos piloto, el de Reino Unido, la motocicleta portaba un simple navegador *Garmin* que permitía frecuencias de registro de datos de 5 Hz. Los porcentajes de pérdidas de la señal satelital fueron superiores a la cuarta parte del tiempo para la mayor parte de los participantes. Por esta razón, el estudio de Laporte y Espié (2011) concluye, a posteriori, en la necesidad de plantear otras estrategias alternativas para el registro de datos de posicionamiento.

Respecto a los proyectos piloto llevados a cabo dentro de *PROLOGUE*, presentado en el **CAP. 2-4**, las estrategias de adquisición de datos de posicionamiento han sido diversas. El proyecto piloto llevado a cabo en Grecia planteó el uso de un sistema comercial integrado (*E-where*) que se emplea habitualmente para gestión de flotas. El sistema empleado estaba compuesto por un simple receptor GPS y un giróscopo integrado. Tanto sus dimensiones (16x10x5 cm) como su peso (en torno a un kilogramo) eran muy reducidos (Touliou y Margaritis, 2010). Por su parte, el proyecto piloto holandés empleó un sistema GPS de gama alta que permitía un registro de datos a unas altas frecuencias (20 Hz), aunque no se especificó cuál era el modelo concreto (Christoph *et al.*, 2010). Para la reducción de datos, los grupos de trabajo responsables del proyecto plantearon una estrategia de racionalización del uso del resto de sensores del vehículo en función del sistema de adquisición de datos de posicionamiento. El registro de datos del vehículo comenzaba en el momento que la velocidad era de más de 5 km/h y dejaba de hacerlo cuando eran registradas velocidades inferiores durante más de dos minutos. A pesar de que el vehículo contaba con un sistema inercial, no se optó por la integración de los sensores GPS e INS. Los niveles de precisión obtenidos por el GPS fueron superiores a los cinco metros, aunque la señal presentó ocasionalmente unos altos índices de ruido, llegando a darse saltos en la velocidad de unos 15 km/h entre fracciones temporales de cinco centisegundos. Se produjo así un fallo en la estrategia de racionalización del uso de sensores, razón por la cual los autores aconsejan el uso de sistemas de posicionamiento alternativos. Por su parte, el proyecto piloto austriaco planteó el uso de un receptor GPS de gama alta que permitía registrar datos a unas frecuencias de unos 20 Hz, aunque tampoco fue especificado el modelo concreto (Gatscha *et al.*, 2010). Los datos de posicionamiento obtenidos fueron empleados para estimar los radios de curvatura asociados al trazado de la vía. Sin embargo, el sistema no cumplió con las exigencias en ciertas circunstancias debido a una mala recepción de la señal y a la aparición aleatoria de picos que suponían graves pérdidas de precisión tanto en los datos de posicionamiento como de velocidad del vehículo. Finalmente, el proyecto piloto israelí planteó una captura de datos de posicionamiento a frecuencias muy bajas, del orden de una simple medida cada dos minutos (Lotan *et al.*, 2010). Las bajas frecuencias supusieron además de la pérdida de precisión, la imposibilidad de geolocalizar de forma precisa la mayor parte de los incidentes. Por esta razón, el grupo de trabajo hebreo (*Or Yarok*) implementó una estrategia de interpolación de los datos de posicionamiento para el cálculo de las trayectorias de los vehículos, permitiendo de esta forma estimar aproximadamente la localización de los incidentes.

El análisis y planteamiento de estrategias óptimas para la adquisición de datos de posicionamiento presenta una gran importancia en estudios de conducción naturalista por dos razones fundamentales: (a) las altas frecuencias de muestreo y (b) el elevado riesgo de pérdida de datos. Sin embargo, a día de hoy, ningún estudio ha llevado a cabo un estudio exhaustivo del problema. En este capítulo se propone una revisión completa del problema y se presentan una serie de estrategias para la elección del método más adecuado en función de las condiciones y objetivos del experimento. La estrategia propuesta debe ser estudiada antes de la realización del experimento y debe ser evaluada en un test o proyecto piloto a pequeña escala que debe ser llevado a cabo antes del experimento.



4.2. ESTRATEGIAS DE POSICIONAMIENTO CON SISTEMAS GNSS

La estrategia más habitualmente empleada para la adquisición de datos de posicionamiento en estudios de tráfico vial es mediante el uso de sistemas de posicionamiento satelital GNSS. El más reconocido de estos sistemas es el sistema estadounidense de posicionamiento global NAVSTAR-GPS, el único que ha estado operativo de forma continuada desde su implementación y el único que presenta una cobertura global a día de hoy. El posicionamiento con sistemas GNSS permite una adquisición rápida, sencilla y barata de datos de posicionamiento. Zhao (2011) señala que la generalización de sistemas de posicionamiento GNSS en todos los ámbitos, tanto del mercado como del mundo de la investigación, se debe a la integración de sensores GPS en todo tipo de dispositivos (ordenadores, vehículos, móviles, etc.), los cuales permiten estimar un posicionamiento con buenos niveles de precisión en cualquier momento y/o lugar. Otra ventaja es que los dispositivos empleados son ligeros, portables, fáciles de usar y presentan un bajo coste asociado, permitiendo de esta forma obtener un posicionamiento sencillo, rápido y fiable.

A pesar de que los GNSS son los sistemas más empleados, su uso presenta limitaciones en determinadas circunstancias y/o ambientes de trabajo. Esto ha llevado a algunos autores a desarrollar metodologías de trabajo propias y particularizadas para una serie de aplicaciones concretas. Libby y Kantor (2010) desarrollaron un sistema propio de posicionamiento para vehículos agrícolas autónomos empleando mojones reflexivos y un sistema láser integrado que permitía determinar las distancias respecto a los elementos cercanos. Bana y Varaiya (2001) plantearon el uso de unos marcadores magnéticos situados en el lateral de vehículos que emitían unas señales pseudoaleatorias codificadas y que permitían controlar la posición de los vehículos dentro de un determinado carril de la vía.

Existe un gran número de estudios científicos centrados en diversas áreas de análisis y/o aplicaciones que emplean sistemas GNSS para la estimación del posicionamiento de vehículos. Bedrich y Gu (2004) analizan *Integrail*, un proyecto centrado en la integración de los sistemas ferroviarios de diversos países europeos (Integrail Consortium, 2008). Este proyecto se basa en un sistema telemático móvil que emplea la señal GNSS para el control y gestión del tráfico ferroviario, centrado especialmente en el tráfico de mercancías peligrosas. *Integrail* es un proyecto europeo muy ambicioso, aunque su desarrollo reciente se ha estancado debido al continuo retraso en la puesta en marcha del sistema europeo de posicionamiento global *Galileo*. Chen *et al.* (2013) desarrollaron un programa propio, *iBOAT*, que permitía detectar los niveles de fraude por parte de los taxistas de Hangzhou (China). Este sistema se basaba simplemente en una visualización en tiempo real de las rutas seguidas por 7.600 taxis de la región, comparándolas con rutas alternativas más eficientes. Diversos sistemas GPS permitieron monitorizar el posicionamiento cinemático de los vehículos en cada momento. El programa de software implementado permitió diferenciar entre rutas fraudulentas y desvíos ocasionales debidos a cortes de calles o atascos de tráfico. Tong *et al.* (2006) empleó sistemas GPS para la captura de datos de posicionamiento de vehículos en varias autopistas de Columbus, Ohio (EEUU) entre los años 2002 y 2003 con objeto de integrar estos datos posteriormente en un sistema SIG y llevar a cabo un análisis completo de las condiciones de tráfico. Esta metodología de trabajo, que aparece recogida en numerosos estudios bajo el nombre de *localización automática de vehículos (AVL)* (Portillo, 2008) o *sistemas de seguimiento de vehículos (IVTS)* (Jain y Goel, 2012), se emplea tanto por parte de las administraciones públicas para la gestión del tráfico viario, como por parte de empresas privadas para estudios de gestión de flotas de vehículos.

Varios estudios plantean el uso de GNSS en el desarrollo de sistemas de peaje en vías de alta capacidad por las ventajas que ofrecen: flexibilidad en términos de diseño, ausencia de infraestructuras externas, ahorro en personal, etc. El *Ministerio de Transporte holandés* puso en marcha en el año 2006 un proyecto (*Anders Betalen voor Mobiliteit*) en el que participaron 19 vehículos y en el que se analizó la precisión y fiabilidad de la señal GPS para su uso en sistemas de peaje (Zijderhand *et al.*, 2006). En Londres se desarrollaron varios experimentos para la evaluación de las posibilidades tecnológicas de los sistemas de peaje. Uno de ellos fue el *London Congestion Charging*, desarrollado por el TfL (*Transport for London*) en tres fases entre los años 2003 y 2007 (TfL, 2005, 2006 y 2008). El objetivo de este proyecto fue el de evaluar el nivel de prestaciones del GPS y sus posibilidades reales de aplicación en sistemas de peaje. Velaga y Pangbourne (2014) compararon diversos sistemas de peaje en carretera analizando tanto sus limitaciones tecnológicas como su nivel de aceptabilidad tanto política como pública. Este estudio demostró que los sistemas de peaje basados en GNSS eran los sistemas más eficientes y sofisticados. Nielsen y Sørensen (2008) presentaron su experiencia en el desarrollo de un sistema de este tipo (AKTA), enmarcado dentro del proyecto *Progress*. El objetivo de este proyecto fue analizar si el peaje en carretera influía y provocaba alguna variación en el comportamiento al volante de una serie de conductores. El



experimento contó con unos 500 vehículos equipados con receptores GPS y fue llevado a cabo entre los años 2001 y 2003 en Copenhague (Dinamarca).

Numerosos factores influyen sobre los resultados obtenidos en los estudios anteriores. La estimación del posicionamiento está estrechamente relacionada con las condiciones en las que se hace el levantamiento GNSS, las cuales dependen de diversos factores como el tipo de posicionamiento, tipo de receptor, momento temporal, condiciones ambientales y/o ubicación geográfica del receptor. Estos factores determinan el nivel de cobertura y disponibilidad de la señal y, en consecuencia, los niveles de precisiones obtenidos. Ochieng y Sauer (2002) observaron un aumento muy claro del nivel de visibilidad a un mínimo de cuatro satélites (del 38% al 98% del tiempo) y una reducción del número de pérdidas de señal (de 4,7 minutos a 100 segundos) entre las dos fases del experimento desarrollado por el *Imperial College* en el centro de Londres. La primera de estas fases se llevó a cabo en el año 2000, mientras la segunda en el año 2002. Esta mejora en los niveles de disponibilidad de la señal pudo deberse a una mejora tecnológica de los receptores empleados, a una mejora de la constelación del sistema NAVSTAR-GPS y a una mayor experiencia por parte del grupo investigador.

Los receptores suelen presentar problemas de recepción de señal en ciertos ambientes y condiciones como espacios interiores, túneles, debajo de capas forestales densas y en áreas altamente urbanizadas (Zhao, 2011) debido a la mala visibilidad satelital, que impide una recepción clara de la señal procedente de un mínimo de cuatro satélites simultáneamente, y al *efecto multipath*, que provoca interferencias en la señal e induce a medidas erróneas. Zhang *et al.* (2007) demostraron en varios tests de posicionamiento cinemático llevados a cabo en metrópolis como Hong Kong, Tokyo y Nueva York que la visibilidad a cuatro satélites llegaba a ser, en ocasiones, de sólo el 20% del tiempo.

En función de los niveles de precisiones obtenidos, podemos diferenciar dos tipos de receptores: (a) navegadores estándares y (b) receptores geodésicos. Los navegadores estándares permiten un posicionamiento simple y aproximado empleando observables de código. Mediante esta técnica el receptor establece una correlación entre la señal transmitida por el satélite y la generada internamente en el propio receptor como una secuencia binaria pseudoaleatoria. El nivel de precisión alcanzado por este método depende tanto de la propia habilidad electrónica del receptor como de su capacidad computacional para establecer la correlación entre observables. Los receptores comunes son capaces de alinear el código con una tolerancia de un 1% de ancho de bit, correspondiéndose este error de correlación a una pérdida de precisión espacial de aproximadamente unos tres metros para el *servicio de posicionamiento estándar* del sistema NAVSTAR-GPS.

Una alternativa más compleja es la de emplear un tipo de receptores más especializados, como los habitualmente empleados en aplicaciones topográficas y geodésicas. Con este tipo de receptores se mejora la calidad de recepción de la señal debido a una mayor capacidad computacional, un aumento del número de canales de transmisión y un acceso a la señal de un mayor número de satélites. Este tipo de receptores ofrecen unas mejores prestaciones, permitiendo emplear tanto observables de código como de fase. El posicionamiento con observables de fase permite alcanzar mayores precisiones aunque presenta como inconveniente una mayor complejidad derivada de una determinación y alineación correcta de los ciclos de la señal debido a las similitudes entre ciclos. Así, asumiendo niveles de error de alineamiento de $\pm 1\%$ se obtienen para la señal *L1*, cuya longitud de onda es de 19 cm, errores del orden de ± 1.9 mm (Chen, 2014). Una mala alineación de ciclos supone la introducción de errores de un ciclo completo (19 cm) o múltiplo(s) del mismo. La resolución de la ambigüedad del número de ciclos puede ser abordada con algunos métodos estadísticos sofisticados, siendo obtenidos niveles de error no despreciables. El principal inconveniente de los receptores geodésicos es que tanto su precio como su peso son considerablemente superiores al de los navegadores estándares.

Devlin *et al.* (2007) evaluaron los niveles de precisiones obtenidos empleando dos receptores portátiles GPS, un receptor geodésico *Trimble GeoXT* y un navegador estándar *Garmin GPSMAP 76*. Ambos receptores eran de simple frecuencia con 12 canales de transmisión. El posicionamiento fue determinado en condiciones cinemáticas y no se aplicó ningún tipo de correcciones diferenciales a las medidas obtenidas. El experimento fue llevado a cabo sobre varios tramos de la red de carreteras de Irlanda durante el mes de agosto del año 2005. En total fueron recogidas unas 50 horas de datos y unos 6.000 puntos, registrados a un ratio aproximado de un punto cada medio minuto. De estos 6.000 puntos unos 4.000, registrados durante unas 30 horas, fueron puntos obtenidos de forma cinemática. Los resultados mostraron un error medio cuadrático en planimetría de entre 3,2 y 6,9 metros para el receptor *Trimble*, mientras que el navegador *Garmin* presentó unas precisiones considerablemente inferiores, entre los 43 y los 56,9 metros. El estudio de Devlin *et al.* (2007) concluye que el nivel de prestaciones de los distintos



receptores es el principal factor que condiciona su uso. El estudio propone así que los navegadores estándares como el *Garmin* son más adecuados para usos recreativos, mientras que los receptores geodésicos como el *Trimble* son más adecuados para un uso profesional dentro del mundo de la cartografía y la ingeniería civil.

Las pérdidas repentinas de la señal GNSS conllevan caídas muy acusadas del nivel de precisiones durante el tiempo que el receptor tarda en readquirir la señal. Esto supone un problema tanto de los propios receptores como de los propios sistemas GNSS. La complejidad tecnológica de los receptores posibilita un mejor acceso a la señal de los respectivos satélites además de una mayor capacidad computacional que permitirá reducir los tiempos de readquisición de la señal. Por su parte, los actuales sistemas GNSS no garantizan la señal y están exentos de cualquier responsabilidad en caso de fallo. El experimento llevado en el centro de Londres por el *Imperial College* mostró unas mejores prestaciones en el caso de los receptores geodésicos, los cuales presentaron unos menores tiempos tanto de pérdida de la señal como de recuperación de la misma (Ochieng y Sauer, 2002). De esta forma, fueron obtenidos unos mayores niveles de disponibilidad y, en consecuencia, unas mejores precisiones. Este mismo estudio concluye además que el diseño de los receptores suele estar optimizado respecto a ciertos tipos de aplicaciones y que, por tanto, su elección debe ser en función de los objetivos de investigación planteados. Los experimentos llevados a cabo en el *London Congestion Charging* (TfL, 2005, 2006 y 2008) mostraron que el 99% de las observaciones presentaron unos niveles de precisión inferiores a los 20 metros usando únicamente la señal GPS, aunque fueron observables algunas desviaciones repentinas de varios cientos de metros.

El proyecto AKTA en Dinamarca (Nielsen y Sørensen, 2008) distinguió dos tipos de errores fundamentales en la aplicación de la señal GNSS a sistemas de peaje: (a) la no-disponibilidad de la señal debido a una pobre recepción de la misma y (b) la presencia de problemas técnicos y fallos en la configuración del propio sistema. Los resultados del experimento demostraron, tal y como se afirmaba en un estudio anterior (Nielsen y Jovicic, 2003), que la señal GPS tuvo muchos más problemas en la práctica de los esperados en principio. En torno al 90% de los trayectos presentaron faltas de información posicional siendo el 3% de los mismos imposibles de reconstruir. Los pequeños cortes de la señal (duración inferior a los cinco minutos) se debieron a pérdidas de la misma en ciertos ambientes y los posteriores tiempos de readquisición de la señal por parte del receptor (Nielsen, 2003). Los cortes más largos de la señal (de tiempo superior a cinco minutos) se debieron a problemas en la instalación de los receptores o el uso de unidades defectuosas.

Otra de las desventajas del posicionamiento con sistemas GNSS tiene lugar en condiciones de posicionamiento cinemático, en los que el vehículo está en movimiento, debido a las bajas frecuencias de actualización de los datos en que operan los receptores (Zhao, 2011). En este sentido, la experiencia del *Anders Betalen voor Mobiliteit* (Zijderhand *et al.*, 2006) demostró que el posicionamiento cinemático a velocidades más pequeñas era considerablemente mejor que el obtenido a grandes velocidades (aproximadamente un tercio mejores a 60 que a 120 km/h).

Un último inconveniente del posicionamiento GNSS es que es un sistema de navegación que requiere de información externa (no independiente), siendo este un problema al que se refieren varios estudios. En este sentido, el trabajo de Zabic (2011) concluye que el gran problema de los sistemas de peaje basados en GNSS es su dependencia tecnológica respecto a una señal que no ofrece garantías. La necesidad de información externa por parte del sistema supone un doble nivel de dependencia relativa tanto a las propias condiciones ambientales en la recepción de la señal como a la propia titularidad militar del sistema.

La incertidumbre de una eventual decisión de los EEUU por limitar o degradar su señal supone un problema fundamental, a pesar de ser una hipótesis muy remota dado el compromiso estadounidense de desactivación permanente de su servicio de degradación de la señal, la *disponibilidad selectiva* (S/A), en el año 2000. Sin embargo, existe la posibilidad que EEUU aplique, o pueda llegar a aplicar, alguna acción puntual de limitación de acceso a su señal civil tanto a un nivel global, en el momento el país sienta amenazada su seguridad nacional, como a nivel más local. El sistema cuenta con un servicio propio, la *denegación selectiva* (SD), que permite restringir el acceso a la señal a través de la transmisión de interferencias a cualquier usuario y/o región geográfica en el momento que EEUU considere amenazada su seguridad (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). Zhao (2011) se refiere a este hecho como un problema fundamental para la mayoría de ingenieros. Por su parte, Schmidt (2010) valora cómo distintos niveles de potencia de interferencias, en caso de una hipotética degradación de la señal aplicada sobre una estación



terrestre, afectaría a las precisiones obtenidas sobre una determinada área alrededor de una determinada estación.

La propia evolución del sistema *NAVSTAR-GPS* apunta a una apertura civil dadas sus grandes expectativas de negocio. Sin embargo, ninguno de los sistemas globales operativos (o que han llegado a estarlo) son sistemas civiles. Existe así una incertidumbre continua por saber si EEUU plantea, o puede llegar a plantear, una restricción de uso del sistema en algún momento. Sólo el sistema de posicionamiento europeo, *Galileo*, se plantea en origen como el único sistema GNSS plenamente civil y de uso público. El sistema de posicionamiento europeo pretende así cubrir todos los requerimientos de los sectores públicos llegando a ofrecer servicios propios de garantía y calidad de la señal, además de un servicio de integridad que advertirá de la presencia de cualquier fallo en la señal en un tiempo máximo de seis segundos.

4.2.1. Técnicas y sistemas de aumentación aplicadas a la señal GNSS

Cuando el sistema *NAVSTAR-GPS* permitió su acceso a la señal civil del sistema estimó que el nivel de precisiones obtenidas estaría en el orden de los 400 metros. Sin embargo, la aplicación de una serie de técnicas permitía reducir la influencia de ciertos errores y obtener unos niveles de precisiones por debajo de los 100 metros. Esto hizo que los responsables del sistema aplicaran durante años una serie de servicios de degradación de la señal que limitaron la precisión del sistema a niveles inferiores. Parkinson *et al.* (1996) estimaron a mediados de la década de 1990 que las precisiones obtenidas por el sistema *NAVSTAR-GPS* eran de unos 100 metros cuando los servicios de degradación de la señal estaban activados y de unos 20 metros cuando estaban desactivados.

Los primeros receptores GNSS recibían únicamente la señal satelital y estimaban el posicionamiento. Sin embargo, en un intento por mejorar las prestaciones, se han desarrollado diversos sistemas de mejora que permiten el envío de correcciones. Se han desarrollado así dos grandes grupos de receptores: (a) los diferenciales y (b) los RTK (Valero, 2009). Ambos sistemas permiten compensar los errores entre dos o más puntos si se conoce la posición exacta de, al menos, uno de ellos. Los receptores GPS diferenciales (DGPS), además de captar la señal de los satélites GPS, permiten corregir y mejorar el posicionamiento gracias al empleo simultáneo de una señal adicional que retransmite una serie de correcciones diferenciales. Por su parte, los *receptores cinemáticos en tiempo real* (RTK) son dispositivos mucho más avanzados, que además de captar la señal GPS, se comunican con otro receptor y/o emisor fijo o en movimiento, con el que establecen cálculos complejos que permiten incrementar sustancialmente el nivel de precisiones obtenidas.

Los sistemas diferenciales de posicionamiento, DGPS en el caso del sistema de posicionamiento estadounidense, permiten alcanzar unos niveles de precisiones del orden de unos pocos metros. Dutta *et al.* (2008) llevaron a cabo un experimento en el que emplearon receptores DGPS de bajo coste. Los niveles de precisiones obtenidos fueron del orden de entre los dos y los tres metros. En un estudio previo llevado a cabo en EEUU, Parkinson *et al.* (1996) establecieron que las precisiones obtenidas una vez aplicadas las correcciones del sistema WAAS eran de unos 2,2 metros. Los métodos de posicionamiento diferencial requieren obligatoriamente que la estación base y los receptores remotos apunten a los mismos satélites y presenten los mismos errores, lo que en la práctica requiere de una proximidad entre los diferentes elementos. Knoop *et al.* (2012) afirman que la precisión final en este tipo de posicionamiento depende de la cercanía del receptor a la estación de referencia mientras que Mandapat (2001) cuantifica esta distancia en un máximo aproximado de unos 19,2 km. Dutta *et al.* (2008) confirman que la mayor parte de estudios centrados en la *localización automática de vehículos* (AVL) emplean receptores diferenciales de bajo coste, los cuales permiten determinar un posicionamiento del vehículo dentro del propio carril de la vía. Bajikar *et al.* (1997) evaluaron el posicionamiento cinemático obtenido con un receptor DGPS, el modelo *Novatel RT-20*. Este receptor fue empleado para la determinación de la posición de un cierto vehículo dentro de su carril en vías de alta capacidad, tipo autovías y autopistas. Los resultados obtenidos fueron comparados con los obtenidos con un sistema de procesamiento de imágenes digitales. Los niveles de precisión alcanzados fueron muy superiores a los estimados inicialmente (20 cm) sobre todo en el posicionamiento lateral. El error medio obtenido a velocidades aproximadas de entre 25 y 65 km/h fue de 2,03 cm en la posición lateral y 3,16 en la longitudinal, con unas desviaciones estándar de 1,98 y 34,87 cm respectivamente.



Podemos diferenciar sistemas de posicionamiento diferencial en función tanto del área de corrección como del medio desde el que se envía la corrección. Los sistemas de cobertura local suelen ser sistemas terrestres de aumentación (GBAS) centrados principalmente en aplicaciones estáticas o cinemáticas dentro de un área relativamente pequeña próxima a una estación de referencia. Los sistemas de más interés para proyectos de cierta envergadura son los sistemas de aumentación de área extensa (WADGPS), coincidentes en su mayoría con sistemas SBAS, cuyas correcciones son enviadas desde satélites. Estos sistemas permiten un posicionamiento instantáneo y bastante preciso en amplios espacios a partir de una infraestructura relativamente simple.

El posicionamiento diferencial permite alcanzar una mejora de las prestaciones respecto a la señal GNSS aunque sigue existiendo el inconveniente de las bajas frecuencias de registro de la información, lo que limita su aplicabilidad en posicionamientos cinemáticos y/o aquellos que requieren de unas altas densidades de muestreo. Las frecuencias propias de registro de datos con estos sistemas suelen ser de entre uno y dos hercios, aunque algunos receptores de gama alta desarrollados en los últimos años permiten incrementarlas sustancialmente (Christoph *et al.*, 2010), existiendo por tanto una relación entre el coste del equipamiento y la mejora de las prestaciones, tal y como afirman Knoop *et al.* (2012). Por esta razón, este último estudio propone como alternativa de posicionamiento una nueva técnica intermedia entre los sistemas GPS y DGPS, el *Posicionamiento de Punto Preciso* (PPP), que permite alcanzar niveles de precisión de unos 20 cm en posicionamiento cinemático sin necesidad de adquirir caros receptores de tipo DGPS. Las principales características asociadas a esta técnica pueden ser consultadas tanto en Knoop *et al.* (2012) como en Van Bree y Tiberius (2011).

Por su parte, el *posicionamiento cinemático en tiempo real* (RTK) permite alcanzar unos muy altos niveles de precisión, del orden de pocos centímetros, empleando observables de fase. La técnica de posicionamiento RTK presenta cierta complejidad siendo necesaria una estación fija (*base*) y un conjunto de estaciones móviles (*rover*) circundantes. La estación base calcula su posición empleando la fase de la portadora, mientras que las unidades móviles comparan sus propias medidas de fase con las recibidas de la estación base mediante comunicación directa. Existen varias formas de transmitir una señal de corrección desde la estación base a las móviles siendo la más habitual en tiempo real, empleando para ello un radio-módem que opera normalmente en la banda UHF. En muchos países, ciertas frecuencias son empleadas específicamente para posicionamiento RTK. Esta técnica de posicionamiento se emplea de forma relativamente frecuente en aplicaciones que requieren unos muy altos niveles de precisión dentro del mundo de la topografía. Sin embargo, la necesidad de una estructura compleja de equipos limita su uso en aplicaciones de navegación en general. La alternativa planteada es el uso de métodos de simulación a través de *estaciones de referencia virtuales* (VRS) y *en continua actividad* (CORS) que facilitan el acceso a las correcciones a través de internet y sin necesidad de un gran despliegue de equipos. Otra alternativa, ya puesta en marcha en algunos países, es la implantación de *redes RTK*, formadas por un conjunto de receptores GNSS permanentes, repartidos por un área más o menos extensa, que generan y transmiten las correcciones diferenciales RTK. Valero (2009) hace una revisión de las principales redes RTK implementadas por las principales empresas del sector de la geodesia y la cartografía: (a) *Leica Geosystems*, que desarrolla *SmartNet* a nivel europeo, (b) *Trimble*, que desarrolla una red a nivel nacional que por ahora sólo está disponible en la Comunidad de Madrid y (c) *Topcon*, que ha implementado redes RTK de gestión y uso privado en Galicia y otras regiones de España.

Algunos estudios científicos muestran ejemplos muy específicos de posicionamiento RTK en aplicaciones cinemáticas como en sistemas de conducción automática, agricultura de precisión y control de maquinaria. Fan *et al.* (2004) emplearon receptores RTK para determinar la posición de vehículos en movimiento en el centro de Tokio (Japón) empleando un sistema propio para la transmisión de datos vía TV (ASC) y obteniendo unos resultados óptimos. Stathas *et al.* (2001) emplearon un sistema de posicionamiento RTK compuesto de una estación base y tres receptores en movimiento para evaluar su potencialidad en el cartografiado preciso de carreteras y en nuevas aplicaciones como guiado en carretera de maquinaria de pavimentación y construcción. Los niveles de precisiones alcanzados fueron superiores a 0,5 cm en el plano horizontal y a 1 cm en el plano vertical. Este estudio demostró cómo el posicionamiento RTK es el método más adecuado para este tipo de aplicaciones, permitiendo alcanzar unos niveles de precisiones muy superiores a los obtenidos con los métodos tradicionales.



4.2.2. Integración de sistemas GNSS con sensores inerciales

Existe un gran número de estudios científicos que propone como alternativa para la adquisición de datos de posicionamiento el uso integrado de receptores GNSS con una serie de sistemas de tipo *dead-reckoning* (DR) (Chiang *et al.*, 2013; Davidson *et al.*, 2009; Hide y Moore, 2005; Omerbashich, 2002). Estos sistemas DR, aunque no pueden suministrar un posicionamiento absoluto por sí mismos, sí pueden complementar la solución proporcionada por los receptores GPS. Dentro del grupo de sistemas DR podemos citar, entre otros una gran variedad de sensores como giróscopos, brújulas, odómetros, inclinómetros y/o acelerómetros (Abbott y Powell, 1999).

La mayor parte de la bibliografía científica sobre el tema se centra en la integración entre receptores GNSS y *sistemas de navegación inerciales* (GPS+INS). Las ventajas de los sistemas inerciales es que son sistemas autónomos que no necesitan ningún suministro de energía exterior, lo que los convierte en los sistemas más adecuados para aplicaciones militares (Zhao, 2011). Se componen de un conjunto, más o menos complejo de dispositivos, integrados por una *unidad de medición inercial* (IMU) y un procesador navegacional, además de toda la electrónica de apoyo. Un IMU consta, a su vez, de un conjunto de sensores inerciales, generalmente acelerómetros y giróscopos, empleados para la medición de diferentes parámetros de orientación y aceleración del vehículo.

Existen dos tipos de IMUs: (a) los de plataforma (o de tipo cardán) y (b) los de tipo *strapdown* (SINS). Los primeros emplean giróscopos para mantener los acelerómetros en una actitud fija. La plataforma se controla por un motor eléctrico, lo que junto a los cardanes, hacen de éste un sistema inercial mecánicamente complejo. Para simplificar la construcción mecánica de este tipo de IMU, se desarrollaron los sistemas *strapdown*. Este tipo de sistemas reemplazan los cardanes con un sistema electrónico que simula su presencia. En este tipo de IMU, los giróscopos y acelerómetros están rígidamente conectados a la estructura del vehículo y se mueven solidarios con él. Se montan a lo largo de ejes mutuamente ortogonales, donde los giróscopos miden cambios en ángulos y los acelerómetros fuerzas de aceleración en los tres ejes. Una comparación de las ventajas y desventajas entre ambos tipos de IMUs se presenta en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Comparación entre los diferentes tipos de sistemas IMU. Fuente: Mandapat, 2001.

IMU de tipo plataforma	IMU de tipo <i>Strapdown</i>
Ventajas	
(a) Generalmente presentan errores más bajos que los sistemas <i>strapdown</i>	(a) Son más ligeros, más simples y más baratos
(b) La anulación del giróscopo elimina errores de aceleración angular y de anisoinercia	(b) Son fácilmente configurables
(c) Pueden operar con ratios de rotación de unos 1000 ^o /s	(c) Presentan una alta fiabilidad debido a la inmovilidad de los componentes
(d) Se auto-alinean por medio de un girocompás	
(e) Pueden calibrar los sensores por medio de rotaciones de la plataforma	
(f) Errores en el girocompás no llevan a un error en la determinación de ángulos de actitud	
Desventajas	
(a) Son mecánicamente complicados	(a) Operan a ratios máximos de rotación de entre 400 ^o y 600 ^o /s
(b) Son más grandes y más caros	(b) Son difíciles de alinear
(c) Presentan un nivel de fiabilidad menor que los sistemas <i>strapdown</i>	(c) Sus sensores no pueden ser fácilmente calibrados por lo que deben permanecer estables
	(d) La rotación del sistema induce a errores del sensor
	(e) Los errores de los acelerómetros tienden a acumularse

La solución aportada por los acelerómetros y giróscopos produce sesgos que afectan a la determinación de la posición. El problema más importante de los sensores inerciales son los errores del sensor, cuyo valor medio no es 0 y tiende a incrementarse con el tiempo por el *efecto deriva*. Estos errores pueden ser modelados y reducidos por medio de algunos modelos estocásticos como el modelo auto-regresivo (AR) (Babu *et al.*, 2008; Nassar, 2005; Babu y Wang, 2004), el modelo de Gauss-Markov (GM) (El-Diasty y Pagiatakis, 2009) y el de varianza Allan (AV) (El-Sheimy, 2008; Kim *et al.*, 2004). Hou (2004) verificó estos métodos en la modelación de errores de sensores inerciales.



El uso de sistemas integrados GPS+INS en navegación y posicionamiento es complementario, tanto en lo relativo a sus potencialidades como a sus tipologías de errores (Grewal *et al.*, 2007). La integración entre ambos sistemas optimiza el funcionamiento de ambos sistemas por separado permitiendo mejorar el comportamiento dinámico y la sincronización de ambos dispositivos, además de incrementar sus niveles de fiabilidad e integridad (Caron *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2005; Sukkarieh *et al.*, 1999). Los sistemas inerciales presentan, al contrario que los sistemas de posicionamiento satelital, unas altas frecuencias de registro de datos con unos muy altos niveles de precisión asociada aunque sólo durante cortos períodos de tiempo debido al *efecto deriva* que afecta a este tipo de sensores. Sus ratios de actualización de datos son entre 10 y 100 veces superiores a los del sistema GPS, lo que los convierten en sistemas óptimos para la determinación del posicionamiento en situaciones muy dinámicas (Mandapat, 2001). Se estima que en aplicaciones de navegación de vehículos terrestres autónomos deben plantearse frecuencias del orden de unos 10 Hz para obtener un posicionamiento fiable, unos ratios fácilmente alcanzables con una solución integrada GPS+INS. Por tanto, la solución propuesta por un sistema integrado presenta unas mayores frecuencias y una mayor fiabilidad e integridad de la señal, ya que en el momento de pérdida de la señal GPS, el sistema INS puede seguir proporcionando datos de posicionamiento y orientación muy precisos durante relativamente cortos períodos de tiempo, coincidentes con los períodos de pérdida de señal GPS (Bevly *et al.*, 2006; Ryu y Gerdes, 2004).

El uso de sistemas de posicionamiento integrados GPS+INS ha sido aplicado y evaluado tanto en sistemas aéreos como terrestres. Dentro de estos últimos podemos destacar, entre otras, algunas aplicaciones concretas relacionadas con navegación autónoma (Petovello *et al.*, 2001; El-Sheimy *et al.*, 2006), control dinámico del vehículo (Ryu y Gerdes, 2004), comportamiento de neumáticos en curvas y deslizamientos (Bevly *et al.*, 2006; Ryu *et al.*, 2002), etc. La integración entre estos sistemas permite una suavización del ruido del GPS, una fusión de información redundante, una compensación de los errores de deriva del sensor inercial y una obtención de altos niveles de actualización de las señales de salida. Esta integración responde a un problema de filtrado no-lineal que requiere de un algoritmo matemático para la estimación de los parámetros de deriva de los sensores IMU. Entre estos algoritmos los más extendidos son el filtro Kalman (KF) junto a diversas variantes del mismo como el EKF (Extendend) o el UKF (Unscented), que proporcionan la corrección más probable a la estimación del posicionamiento (St-Pierre y Gingras, 2004). El EKF emplea una aproximación a la linealización analítica por medio de matrices jacobianas (Kalman y Bucy, 1961) mientras que UKF lo hace por medio de una transformada propia que requiere el cálculo de una matriz obtenida a partir de la raíz cuadrada de la covarianza de los errores (Julier y Uhlmann, 1997). Por su parte, Zhou y Hu (2010) analizaron los principales problemas en el algoritmo de integración entre ambos sistemas.

Meyer-Hilberg y Jacob (1994) analizaron un sistema de navegación y aterrizaje integrado (INLS) desarrollado por la antigua agencia aeroespacial alemana (DASA) a principios de la década de 1990. En este sistema los sensores GPS e INS se integraban por medio de un filtro Kalman. Zhao (2011) analiza en su tesis esta integración centrándose especialmente en los sensores inerciales. Varios estudios integran dispositivos GPS e INS empleando diferentes filtros (Fiorenzani *et al.*, 2008; Crassidis, 2006; Wendel *et al.*, 2006; El-Sheimy *et al.*, 2006), mientras que Rhudy *et al.* (2011) proponen un estudio en detalle sobre la sensibilidad de los diferentes filtros. La empresa *Novatel* comercializa un sistema integrado de este tipo, el BDS (*Black Diamond System*), que fusiona un sensor IMU tipo *Honeywell HG1700AG11* y un GPS diferencial del tipo *Novatel RT-2 DGPS* a través de un filtro Kalman.

Los filtros Kalman convencionales presentan varias limitaciones en su aplicación. Este tipo de filtros suprimen el efecto del ruido del sensor inercial empleando datos de posicionamiento GPS con actualizaciones, aunque dentro de una limitada banda de frecuencia. En caso de pérdida prolongada de la señal GPS, la precisión de la navegación con el IMU se degrada drásticamente con el tiempo. Este tipo de filtros sólo funcionan bien bajo ciertos modelos dinámicos predefinidos y con unos datos de entrada adecuados para estos modelos. Para Hu *et al.* (2003) el principal problema se da en la asignación de propiedades estadísticas adecuadas tanto a los modelos dinámicos como observacionales. En el caso concreto de experimentos en conducción, factores como la maniobrabilidad del vehículo y/o el nivel de medida del ruido presentan unos altos índices de dependencia ambiental siendo, por esta razón, muy difíciles de prever y de modelizar.

La integración entre sistemas GPS+INS debe ser precisa y robusta. La robustez se determina por la ausencia de *outliers* o valores extremos. Para evitar la influencia de estos *outliers*, los pesos equivalentes se aplican al filtro Kalman empleando una serie de contrañimientos cinemáticos (Yang *et al.*, 2010). De esta forma, se rechazan los valores extremos y se suprimen las contribuciones de aquellas medidas



anómalas evitando que se produzca así un incremento significativo de los errores estándar. En un estudio semejante, Balsa-Barreiro *et al.* (2012b) analizan diversas estrategias de reasignación de ponderaciones y eliminación de *outliers* para grandes conjuntos de datos procedentes de nubes de puntos láser obtenidas mediante barridos con sistemas láser aerotransportados (*LiDAR*).

Para reducir los errores de navegación y mejorar la precisión de forma significativa, el modelo físico del experimento puede proporcionar información adicional útil en determinadas circunstancias (Simon y Chia, 2002). De esta forma pueden ser aplicados una serie de constreñimientos (a) de altura, cuando es constante sobre el terreno, (b) de velocidad, cuando el vehículo se mueve en dirección constante, y (c) de brazo de palanca, cuando el vehículo cambia de dirección. Zhao (2011) evalúa la aplicación de alguno de estos constreñimientos anteriores al modelo físico. Varios estudios, como el de Abdel-Hamid (2005), analizan aspectos concretos como la influencia de las variaciones de la temperatura en sensores inerciales aplicando un algoritmo basado en ANFIS al filtro Kalman para la reducción de errores de deriva en caso de una ausencia temporal prolongada de la señal GPS. Con objeto de superar las deficiencias del filtro Kalman, algunos estudios proponen técnicas alternativas como la WMRA, un eficiente pre-filtro propuesto por Abdel-Hamid (2005), o los algoritmos propuestos por Hu *et al.* (2003), los cuales presentan resultados mucho más robustos ante repentinos cambios de movimientos del vehículo.

Desde un punto de vista físico, existen tres niveles de acoplamiento posibles entre los sensores GPS e INS: (a) flojo, (b) ajustado y (c) ultra-ajustado. En principio se propusieron los dos primeros niveles (Grewal *et al.*, 2007), y el tercero más recientemente (Sun, 2010). La diferencia entre ellos reside en que cuanto mayor sea el nivel de integración o ajuste entre los dispositivos, más información se puede conseguir aunque, como contrapunto, se incrementa la dependencia mutua entre estos sensores. Un estudio exhaustivo de los distintos niveles de acoplamiento entre estos sensores lo podemos encontrar en Grewal *et al.* (2007) y en Zhao (2011). El empleo de este tipo de sistemas integrados presenta, sin embargo, ciertos inconvenientes asociados. Uno de los más importantes es el relativo al coste del instrumental. Mandapat (2001) estableció una comparación entre dos sistemas integrados: (a) MAPS+GPS y un (b) IMU+GPS. Según este estudio, el precio orientativo del primero de ellos era de unos 130.000 \$, mientras que el segundo presentaba un coste de unos 40.000 \$.

Algunos estudios recientes analizan las principales especificaciones técnicas y costes asociados a los principales sistemas inerciales, concluyendo que existe una gran variabilidad entre los distintos sistemas (Günthner, 2008). Uno de ellos, *AEROcontrol* desarrollado por la compañía *IGI Systems*, integra giróscopos de fibra óptica a un receptor GPS. Este sistema permite alcanzar niveles de precisión muy elevados y frecuencias de muestreo de unos 256 Hz. Sin embargo, su peso es de más de 8 kg y su precio de más de 50.000 €. Los sensores inerciales del fabricante *IMAR GmbH* presentan unas dimensiones considerablemente inferiores, de un tamaño de unos 12x12x12 cm y un peso de unos 1,6 kg. El nivel de precisiones obtenidas también es inferior a las obtenidas con el sistema anterior, al igual que su coste, del orden de los 20.000 €. Una revisión de las especificaciones técnicas y costes finales de los principales sistemas inerciales se presenta en la *Tabla 4-2*, extraída de Douchamps (2014).

Los elevados costes de este tipo de sistemas integrados han llevado a muchos autores al análisis de alternativas más económicas, buscando una reducción de costes en cualquier sensor o componente del sistema. Muchos estudios desaconsejan el uso de receptores GPS de bajo coste en estos sistemas integrados, ya que las prestaciones del sistema en su conjunto presentan un alto nivel de dependencia respecto a la calidad del receptor GPS. Entre otros factores los elevados tiempos de readquisición de la señal GPS de algunos receptores, las pérdidas continuadas y/o la mala recepción de la señal suponen una clara limitación para el buen funcionamiento del sistema GPS+INS integrado debido a la degradación de precisiones de los sistemas inerciales por el efecto deriva. Mandapat (2001) advierte de este problema y propone el uso de receptores GPS que permitan un posicionamiento diferencial.

Linsong *et al.* (2002) defienden una posición contraria. El uso de un sistema integrado por un IMU de seis ejes y un GPS de bajo coste les permitió alcanzar altos niveles de precisión en posicionamiento de tractores agrícolas. Analizaron además la influencia que el GPS de bajo coste tenía comparándola con la de un receptor RTK, considerablemente más caro. Su sistema permitió reducir los errores de posicionamiento a bajas velocidades en una relación aproximadamente 1:3 e incrementar a 9 Hz la frecuencia de actualización de datos respecto al posicionamiento con un simple receptor GPS.

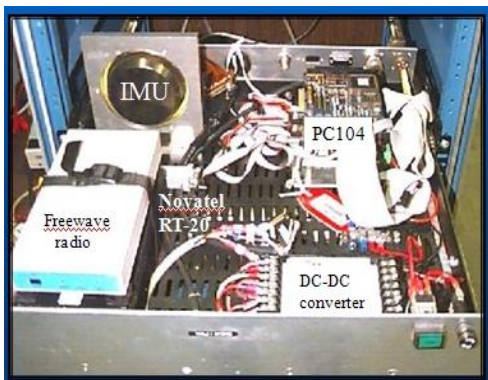
De esta forma, el componente que más se está desarrollando en pro de una rebaja de sus costes es el sistema inercial. Varios estudios muestran ejemplos de sistemas GPS+INS integrados empleando IMUs de bajo coste (Meguro *et al.*, 2012; Gao *et al.*, 2007). Mandapat (2001) enumera algunas estrategias de

simplificación tanto de la arquitectura como del precio de los IMU, tales como (a) los *sistemas micro electro-mecánicos* (MEM) de tres ejes que emplean tres giróscopos, (b) los *sistema IMU avanzados* (ATIMU) cuyo coste se estima por debajo de los 2.000 \$ y (c) los *giróscopos de fibra óptica* (FOG), con un coste inferior a los 6.000 \$.

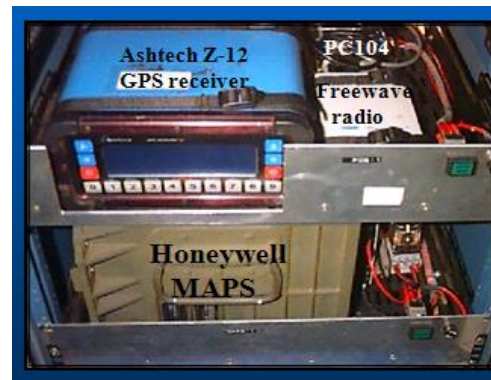
Tabla 4-2: Coste y especificaciones técnicas de algunos modelos de sistemas inerciales comercializados actualmente. Fuente: Douxchamps, 2014.

Modelo	Empresa	Giróscopo		Acelerómetro		Tecnología	GPS	Peso	Precio [\$]
		Nº	Rango [grados/s]	Nº	Rango [G]				
Spatial FOG	Advanced Navigation	3	490	3	10	FOG	Sí	860	35.000
CNS-5000	KVH	3	375	3	10	FOG/MEMS	Sí	2.360	30.250
Spatial Dual	Advanced Navigation	3	2.000	3	16	MEMS	Sí	300	10.000
OptoAHRS	Inertial Labs	3	300	3	2	Optical/MEMS	No	600	7.499
MIDG II	Microbotics	3	300	3	10	MEMS	Sí	55	6.750
MP 2028g	MicroPilot	3	150	3	2	MEMS	Sí	28	5.000
AHRS-1	Inertial Labs	3	1.000	3	6	MEMS	No	73	3.499
Spatial	Advanced Navigation	3	2.000	3	16	MEMS	Sí	25	3.000
AHRS-2	Inertial Labs	3	1.000	3	6	MEMS	No	73	2.999
VG	Inertial Labs	3	1.000	3	6	MEMS	No	70	2.699
OS3D	Inertial Labs	3	2.000	3	16	MEMS	No	12	999
OS3DM	Inertial Labs	3	2.000	3	16	MEMS	No	2	999
LPMS-B	LP Research	3	2.000	3	16	MEMS	No	13	500
LPMS-CU	LP Research	3	2.000	3	16	MEMS	No	13	400
CHIMU	Ryan Mechatronics	3	500	3	3	MEMS	No	5	299
AG-1	Icewire	3	2.000	3	6	MEMS	No	25	199

En este mismo estudio (Mandapat, 2001) se estudia la influencia del coste de los respectivos componentes del sistema sobre las precisiones finalmente obtenidas. En un primer momento se opta por fusionar en un mismo sistema integrado dos sensores de alto coste: (a) un dispositivo inercial *Honeywell H-726 Modular Azimuth Positioning System* (MAPS) y (b) un sensor de posicionamiento diferencial *Ashtech Z-12 DGPS* (Figura 4-1). Este sistema integrado permitió alcanzar unas precisiones de posicionamiento de unos 10 cm y unas frecuencias de hasta 10 Hz. Con objeto de poder establecer comparativas, el autor analizó los resultados obtenidos con dos alternativas de bajo coste. La primera estaba compuesta por un simple receptor *Novatel Beeline GPS*, y la segunda compuesta por un sistema GPS+INS integrado por un *IMU Honeywell HG1700AG11* y un *Novatel RT-20 DGPS*. Los resultados demostraron que la solución más cara presentaba un efecto deriva menor y más lento, además de mejores tiempos de readquisición de la señal GPS después de que se produjeran pérdidas de la misma. El sistema integrado de bajo coste presentó un funcionamiento óptimo, con niveles de precisiones mínimas de 20 cm y frecuencias de 12,5 Hz en condiciones ideales.



(a)



(b)



	MAPS/GPS	IMU/GPS
Precisión de la posición (CEP)	7 cm	20 cm
Precisión de la orientación	0,01°	0,05°
Precisión de la velocidad	0,001 m/s	0,005 m/s
Ratio de datos	10 Hz	15 Hz
Tiempo alineamiento (min)	8-10 min	-
Dimensiones (LxAxH) (m)	0,7x0,8x0,6	0,7x0,8x0,2
Peso (kg)	≈ 27,2 Kg	≈ 6,8 Kg
Precio (\$)	130.000	40.000

(c)

Figura 4-1: (a) Sistema integrado compuesto por un *IMU Honeywell HG1700AG11* y un receptor diferencial de posicionamiento satelital *Novatel RT-20*. (b) Sistema integrado por un sistema inercial tipo *Honeywell H-726 Modular Azimuth Positioning System (MAPS)* y un receptor GPS *Ashtech Z-12*. (c) Comparativa y características técnicas entre ambos sistemas. Fuente: Mandapat, 2001.

Existen varios estudios que relacionan la complejidad de los sistemas inerciales con su alto coste. La simplificación de su arquitectura supone, además de una reducción de los costes en sí, un intento por reducir tanto su complejidad como su propio tamaño físico. Algunos autores afirman que el gran volumen y peso de estos sistemas conllevan dificultades para lograr un buen alineamiento inicial del sistema, el cual acaba resultando lento y tedioso. Por esta razón, puede resultar difícil encontrar una buena ubicación del sistema integrado dentro del vehículo, llegando algunos experimentos a plantear una ubicación fuera del propio vehículo como la propuesta por Zhao (2011), sobre el techo del vehículo. Por su parte, Davidson *et al.* (2009) proponen un sistema integrado adaptado a las necesidades y requerimientos del mercado, teniendo en cuenta aspectos relativos al diseño, coste, tamaño y consumo energético, que ofrezca una alternativa que sea fácilmente portable e instalable dentro del propio vehículo.

4.3. DATOS Y ZONA DE ESTUDIO

En este punto revisamos cual fue la estrategia planteada por el proyecto piloto español de *PROLOGUE* para la adquisición de los datos de posicionamiento, analizando tanto el nivel de instrumentación del vehículo (**CAP. 4-3.1**) como los datos finalmente obtenidos (**CAP. 4-3.2**). El proyecto y la zona de estudio del experimento fueron presentados previamente en el **CAP. 2-5**.

4.3.1. Instrumentación del vehículo para la adquisición de datos de posicionamiento

El vehículo experimental *ARGOS* contaba con un receptor GPS diferencial y un sistema inercial para el registro de datos de velocidad (en metros por segundo) y aceleración instantáneas (en miliG), además de sus componentes internas (longitudinal, transversal y vertical). El receptor GPS empleado fue un *RASANT TGPS-2*, desarrollado e implementado por la empresa *Tecnogps*. Este receptor permitía la recepción de correcciones diferenciales a través del sistema *RASANT (Radio Aided Satellite Navigation Technique)* por medio de un enlace radio del tipo RDS (*radio data system*). El sistema *RASANT* es un estándar europeo desarrollado por el *LVANRW (Landesvermessungsamt Nordheim-Westfalen)* y la *WDR (West Deutsche Rundfunk)* que se emplea para la radiodifusión de correcciones diferenciales mediante un acceso libre y gratuito.

Las frecuencias empleadas para la transmisión de las correcciones diferenciales son las propias de dos emisoras de radio públicas: (a) *Radio Nacional de España* y (b) *Radio Cataluña*. El receptor permite decodificar las tramas RDS, extraer los datos necesarios, ajustarlos y finalmente transformarlos en tramas de tipo *RTCM SC104* compatibles para su uso posterior por parte de cualquier receptor en forma de correcciones diferenciales. Dentro de *RASANT* existen tres tipos principales de tramas: (a) las de sincronización, (b) las de variación de la emisión de datos y (c) las de correcciones. Cada dos tramas de sincronización se envían varias tramas con información para cada satélite, con datos relativos a



variaciones de emisión y de correcciones. Las tramas de sincronización determinan los datos válidos para la generación de las *tramas RTCM*.

El receptor empleado permitía escanear una tabla de frecuencias y localizar aquellas de mejor calidad para ser empleadas como correcciones finales. Entre los parámetros más importantes a tener en cuenta para la configuración del receptor está el ajuste de la velocidad de transmisión de las correcciones diferenciales RTCM respecto a las especificaciones técnicas del receptor empleado. Según el manual de especificaciones técnicas la velocidad RTCM debía ser equivalente, dentro de entornos urbanos, a 4.800 bits por segundo y la velocidad GPS del doble, de 9.600 bits por segundo. Una descripción más detallada de las características técnicas y prestaciones del modelo de receptor empleado puede consultarse en los manuales de usuario publicados por la empresa fabricante (Tecnogps, 1999).

El sistema de posicionamiento empleado permitía alcanzar unas precisiones nominales máximas de hasta un metro en tiempo real. Sin embargo, las precisiones obtenidas en la realidad estaban condicionadas por la distancia existente entre el receptor y la estación diferencial de referencia, observándose pérdidas de precisiones de entre los 0,2 y los 0,4 metros por cada 100 km de alejamiento. Un estudio en detalle sobre el posicionamiento diferencial con sistema RASANT en Cataluña fue llevado a cabo por Talaya *et al.* (1997).

El vehículo experimental contó además con un sistema adicional para el posicionamiento: un sensor láser escáner tipo *Ibeo Alasca (Automobiler Laserscanner)*. Este sensor láser permitió la determinación de distancias a partir del tiempo empleado por un haz de luz láser en su trayecto de ida y vuelta a un determinado punto, objeto o superficie. El modelo empleado permitía registrar las distancias a los tres objetos más cercanos tanto frontal como lateralmente. La tolerancia del sistema era de un máximo de seis metros. De esta forma, este sensor permitió un posicionamiento relativo del vehículo en la vía a partir de la distancia a medianeras y/o al resto de vehículos circundantes. El funcionamiento de este sensor es muy semejante al empleado por sistemas *LiDAR* para la adquisición masiva de datos topográficos a partir de sensores láser aerotransportados. Una visión teórica de cómo funcionan este tipo de sistemas telemétricos láser se presenta en Balsa-Barreiro y Lerma (2006), mientras que una revisión de las especificaciones técnicas del modelo específico empleado en nuestro experimento se presenta en Scholz *et al.* (2005).

4.3.2. Datos

No fue posible registrar datos de posicionamiento del proyecto piloto español de *PROLOGUE* debido a un error en la configuración del sensor (Valero-Mora *et al.*, 2010). Las causas de este fallo pudieron ser varias. Por una parte estaría la incompatibilidad y/o mala integración entre dispositivos electrónicos lo que podría haber llevado a un malfuncionamiento de alguno de los sensores y a la aparición de interferencias. Unido a esto, la ausencia de una estrategia de adquisición de datos de posicionamiento previa impidió una disposición óptima del instrumental en función del escenario de experimentación. Esto supuso además una apuesta errónea en la elección y disposición dentro del vehículo experimental de algunos de los dispositivos empleados. Esto explica la no integración entre los sensores GPS e INS con los que contaba el vehículo. Una solución integrada hubiera permitido alcanzar un mejor posicionamiento, tanto en términos de precisión como de fiabilidad. Una última causa sería la falta de un procedimiento periódico de calibración del instrumental, que hubiera permitido evaluar el correcto funcionamiento de todos y cada uno de los dispositivos. Este tipo de rutinas de calibración y revisión periódica del correcto funcionamiento de los dispositivos corresponden a acciones integrales para el mantenimiento y control de calidad del proceso que deben ser llevadas a cabo durante todas las fases del experimento (Balsa-Barreiro y Brocal, 2011a).

4.4. DISCUSIÓN

Cualquier estrategia para la adquisición de datos de posicionamiento en experimentos de conducción naturalista está condicionada por una serie de factores que requieren de un registro fiable y preciso de datos a altas frecuencias. La estrategia ideal será aquella que permita cumplir los objetivos de investigación optimizando los recursos disponibles (principio de eficacia y eficiencia). Además, la estrategia planteada debe adaptarse al modelo de experimentación propio de la conducción naturalista.



Por estas razones, no resulta adecuado hablar de métodos buenos o malos en general sino de que sus criterios se adaptan mejor o peor a cada una de las aplicaciones específicas. Ochieng y Sauer (2002) señalan que el diseño de los receptores GNSS suele estar normalmente optimizado con respecto a cierto tipo de aplicaciones y que, por tanto, su elección debe ser en función de unos determinados objetivos de investigación. Valero-Mora *et al.* (2013) proponen analizar la relación entre el nivel de instrumentación de los vehículos experimentales, su coste económico y la complejidad de los objetivos planteados, basándose en las experiencias de los proyectos piloto llevados a cabo en España, Grecia y Reino Unido enmarcados dentro de *PROLOGUE*. En este último estudio se analizan en detalle los diferentes componentes y dispositivos empleados en los diferentes proyectos piloto, estableciéndose tres posibles niveles de instrumentación del vehículo: (a) alto, (b) medio y (c) bajo. Para el caso de dispositivos de posicionamiento se plantea una solución única, consistente en el uso de un receptor GPS en vehículos con un *bajo nivel de instrumentación* (LIC). Sin embargo, este estudio no repara en el uso de receptores o sistemas de posicionamiento más complejos que permiten alcanzar mayores prestaciones, como los receptores RTK o los sistemas integrados GPS+INS. Este tipo de sistemas permiten alcanzar unas precisiones más altas, además de mayores frecuencias de muestreo. Siguiendo la metodología propuesta en dicho estudio, este tipo de sistemas de adquisición de datos de posicionamiento debían ser incluidos en vehículos con un *alto nivel de instrumentación* (HIC) debido a sus mayores prestaciones y sus costes más elevados.

La conducción naturalista requiere de sistemas de posicionamiento cinemáticos que permitan la adquisición de datos a muy altas frecuencias de actualización, acordes (o muy próximas) a las frecuencias de muestreo de otros dispositivos. El proyecto piloto español de *PROLOGUE* planteó unas frecuencias de adquisición de datos generales de 100 Hz para la mayor parte de parámetros cinemáticos. Sin embargo, las frecuencias para datos de *distancia recorrida* fueron de sólo 1 Hz (Balsa-Barreiro *et al.*, 2012a; Valero-Mora *et al.*, 2010).

Los receptores GPS estándares permiten una adquisición de datos de posicionamiento a frecuencias de entre 1 y 5 Hz, ligeramente inferiores a las exigidas en muchos de los experimentos (10 Hz). Numerosos estudios, como el de Zhao (2011), coinciden en los problemas de adquisición y seguimiento de la señal GPS en aplicaciones muy dinámicas con determinados receptores. Algunos receptores GPS de alta gama y, sobre todo, sistemas de integrados GPS+INS permiten el registro de datos de posicionamiento a unas altas frecuencias, gracias sobre todo a las capacidades de los sensores inerciales. Christoph *et al.* (2010) emplean un receptor GPS de alta gama con frecuencias de actualización de datos de unos 20 Hz, mientras que Mandapat (2001) estimó que las frecuencias de registro de datos de posicionamiento de los GPS+INS integrados eran ya de 10-15 Hz a principios de la década pasada, unos valores de frecuencia claramente superados por los sistemas actuales (Douxchamps, 2014).

Las precisiones nominales de los receptores GNSS de doble frecuencia son relativamente altas y suficientes para una gran parte de los experimentos de conducción naturalista llevados a cabo hasta el momento. Los sistemas de aumentaciones permiten una mejora muy sustancial de los niveles de precisiones alcanzados. Algunos de estos sistemas ofrecen soluciones locales que son fiables únicamente si el receptor y la estación de referencia se encuentran en un área relativamente próxima lo que significa una observación a los mismos satélites. De esta forma, las correcciones calculadas para la estación de referencia son válidas para los receptores cercanos. Los sistemas SBAS permiten obtener correcciones diferenciales en áreas mucho más amplias. Además de la mejora de los niveles de precisiones, estos sistemas ofrecen una mejora de la mayor parte de prestaciones de los sistemas GNSS, llegando a ofrecer servicios de alarma en caso de cese de la señal. Esto presenta una gran importancia en el planteamiento de proyectos de conducción naturalista a gran escala ya que permiten plantear mejoras o cambios en tiempo (casi) real, minimizando posibles pérdidas. Las precisiones nominales del sistema *NAVSTAR-GPS* complementado con sistemas SBAS se estiman superiores a los cinco metros.

Sin embargo algunos aspectos deben ser tenidos en cuenta. El primero es que las precisiones nominales no coinciden con las reales. Aunque muchos estudios estiman un valor de precisión nominal único, lo cierto es que existe un área de incertidumbre estadística que muestra un cierto nivel de dispersión de los datos. Las precisiones finales dependen de una serie de factores como el tipo, momento y lugar de posicionamiento, además del tipo de receptor empleado. La mayoría de estudios coinciden en que son relativamente frecuentes las pérdidas esporádicas de la señal GNSS, lo que irremediamente lleva a caídas de precisión y a la necesidad de plantear estrategias de interpolación de los datos *a posteriori* para estimar el posicionamiento. Las pérdidas se deben principalmente a la mala visibilidad satelital (a un mínimo de cuatro satélites) y al efecto *multipath*. Por esta razón son frecuentes las pérdidas de datos de



posicionamiento bajo densas capas forestales, ambientes urbanos o espacios *indoor* como túneles. El tipo de posicionamiento también presenta una gran importancia, siendo mucho más habituales las pérdidas de datos en redes de posicionamiento cinemático dada la peor visibilidad y la mayor dificultad de medición de la señal satelital a altas velocidades.

El problema de las pérdidas no se limita únicamente al momento de cese de la señal, sino también al tiempo necesario para la readquisición de la misma por parte del receptor. Este tiempo depende de una serie de especificaciones técnicas del receptor como su capacidad computacional, el número de canales disponibles o su enlace respecto a la señal satelital. Todos estos factores se relacionan, de forma directa, con una mejor estimación del posicionamiento.

Los principales proyectos de conducción naturalista llevados a cabo a nivel mundial son proyectos transfronterizos. Desde un punto de vista espacial, la actual disposición de los sistemas GNSS puede suponer una restricción para estos proyectos. Así, a pesar de que los sistemas de aumentaciones permiten obtener correcciones diferenciales dentro de áreas de coberturas muy amplias, sobre todo los sistemas SBAS, sigue existiendo una dependencia primaria respecto a la señal GNSS. De esta forma, no puede ser descartada la posibilidad de que EEUU aplique algún servicio de degradación de la señal, aunque parezca una posibilidad muy remota. Algunos estudios científicos hacen referencia a la incertidumbre de que EEUU pueda cambiar de decisión respecto a la cesión civil de su señal dado que es un sistema militar (Zhao, 2011). Un segundo condicionante espacial lo determina el área de cobertura de los sistemas de aumentaciones. A día de hoy, la aplicación de estos sistemas se centra en unos ámbitos geográficos muy concretos: WAAS en Norteamérica, EGNOS en Europa Occidental y MSAS en Japón. Cualquier experimento de conducción que transcurra fuera de estos ámbitos no puede aplicar ningún tipo de correcciones a la señal GNSS, salvo en ámbitos muy concretos dentro del área de sistemas locales de aumentación de tipo GBAS. Australia es la única excepción con la puesta en marcha de un *sistema de aumentación regional basado en tierra* (GRAS), un tipo de sistema GBAS de gran extensión. Estos condicionantes espaciales suponen un problema relevante debido a los enormes recursos necesarios para la puesta en marcha de experimentos de conducción naturalista a gran escala, en los cuales una pérdida masiva de datos de posicionamiento supondría el fracaso del experimento.

Ciertos proyectos de conducción naturalista pueden tener interés en la obtención de muy altos niveles de precisión, de orden centimétrica. Ejemplos posibles podrían ser estudios precisos sobre las trayectorias recorridas dentro de los propios carriles o el análisis de desgaste y deslizamientos de neumáticos durante la conducción. Los sistemas de posicionamiento diferenciales permiten alcanzar niveles de precisiones de entre los dos y los cinco metros, mientras que los sistemas RTK permiten un posicionamiento cinemático con niveles de precisión más elevados, de orden centimétrica. Sin embargo, este tipo de posicionamiento requiere de una estrategia óptima *a priori* y una infraestructura compleja en la que las distancias entre emisores y receptores no sean muy largas. Cada vehículo experimental debe integrar un receptor RTK y debe existir una estación de referencia fija próxima al área de estudio, conformándose de esta forma una *red RTK* que permite incrementar exponencialmente los niveles de precisiones obtenidos.

Otra alternativa posible para la estimación precisa del posicionamiento sería el empleo de sistemas integrados GPS+INS, que permiten obtener niveles de precisiones centimétricos. Estos sistemas presentan además altos niveles de fiabilidad dada la complementariedad de los componentes inerciales respecto a los sistemas GPS, los cuales permiten seguir registrando datos en el momento en que se produce una pérdida de la señal GPS. Estos sistemas integrados permiten reducir el nivel de dependencia de información exterior, lo que supone una clara ventaja respecto a los sistemas anteriores, basados únicamente en la recepción de la señal GNSS. Sin embargo, la difícil integración entre sus componentes hace de ellos unos sistemas más complejos (Zhou y Hu, 2010).

Los costes, tanto directos como indirectos, suponen un factor importante a tener en cuenta. Los costes directos se refieren al instrumental de medición, mientras que los indirectos se refieren a los de cualquier otro tipo. Una mala estrategia de posicionamiento supone así un incremento de los costes indirectos. Nielsen y Sørensen (2008) afirmaron que los bajos niveles de precisión de los receptores GNSS empleados en el proyecto AKTA en Dinamarca tuvieron mucha relevancia en el post-procesamiento de la información, lo que significó un incremento de los tiempos de trabajo y, en consecuencia, del coste económico del proyecto.

En general se puede plantear la existencia de una relación directa entre el coste del dispositivo y el nivel de precisión alcanzada. En posicionamiento GPS, los receptores (geodésicos) de gama alta proporcionan una mayor continuidad de la señal, un procesamiento más rápido del cálculo del posicionamiento y unos



menores tiempos de readquisición de la señal, lo que en definitiva supone unos mejores niveles de precisión absoluta. Sin embargo, sus costes son varias veces superiores a los propios de los navegadores estándar que determinan la posición de forma más imprecisa. El posicionamiento con sistemas RTK requiere de una infraestructura más compleja obligando a la compra de varios equipos y dispositivos móviles. En los últimos años, se están planteando otras alternativas que permitirían simplificar esta arquitectura. Entre éstas podemos destacar las *redes RTK* implementadas por algunos países o el uso de estaciones de referencia de tipo VRS y CORS, que facilitan el acceso a las correcciones a través de internet. En el caso de los sistemas integrados GPS+INS suelen presentar altos costes de adquisición, sobre todo debido al coste del componente inercial (Douxchamps, 2014). En los últimos años se están investigando estrategias de abaratamiento de unidades inerciales con la simplificación de los MEMS y el desarrollo tanto de los sistemas ATIMU como de los FOG.

La propia naturaleza del modelo de experimentación de la conducción naturalista determina el tipo de estrategia de adquisición de datos de posicionamiento más adecuada. La instrumentación empleada debe presentar un diseño ergonómico y discreto, estar plenamente integrada y mimetizada en el vehículo siendo imperceptible en la medida de lo posible. En condiciones ideales el vehículo experimental debería ser el propio vehículo del conductor, lo que permitiría estudiar el comportamiento del conductor en condiciones estrictamente normales. Esto supondría que el instrumental de experimentación estuviera completamente integrado y mimetizado en su propio vehículo. La tecnología actual impide que esto se pueda cumplir a día de hoy. Dutta *et al.* (2008) señalan que la tendencia en los propios receptores GPS es que se puedan ser plenamente integrados en los vehículos de experimentación y fácilmente encajados dentro del vehículo. Los sistemas integrados GPS+INS presentaban hasta unos hace años unas dimensiones considerables, lo que dificultaba su ubicación dentro del vehículo de experimentación. En un experimento relativamente reciente, Zhao (2011) ubicó estos dispositivos sobre el techo del propio vehículo de experimentación. Davidson *et al.* (2009) propusieron la necesidad de desarrollar sistemas integrados GPS+INS adaptados a las necesidades del mercado teniendo en cuenta aspectos relativos al diseño, coste, tamaño, consumo energético, etc. Estos mismos autores plantearon además que estos sistemas debían ser fácilmente portables e instalables dentro del propio vehículo. En los últimos años se observa una tendencia hacia la reducción del tamaño y peso de estos dispositivos, llegando a desarrollarse algunos dispositivos inerciales de pequeñas dimensiones, como los comercializados por la compañía *Cloud Cap Technology* (Günthner, 2008).

Además del propio diseño, los dispositivos empleados deberían ser los suficientemente robustos para aguantar y funcionar de forma óptima, sin fallos, durante toda la fase de experimentación, la cual puede llegar a ser de años (Bonnard y Brusque, 2008). Sin embargo, la mayoría de dispositivos requieren de calibraciones y revisiones periódicas que permitan comprobar su nivel de funcionamiento teniendo en cuenta que pueden estar afectados por fallos de incompatibilidades, interferencias, desajustes o ausencia de fuentes de alimentación (Nielsen y Sørensen, 2008). En el caso de los sistemas integrados GPS+INS, la mayor parte de los estudios coinciden en que es necesaria una calibración recurrente de los sensores inerciales, siendo este procedimiento tedioso y complejo. Por esta razón sería recomendable que los diferentes dispositivos proporcionaran al experimentador una señal de alarma en caso de malfuncionamiento o cese de operatividad.

Por tanto, la mayor parte de las estrategias de adquisición de datos de posicionamiento se basan en sistemas GNSS ya sean o bien de forma única o bien integrados con otros dispositivos, como en el caso de los sensores inerciales. Existen diferencias claras en función de la estrategia de posicionamiento planteada, aunque a día de hoy los sistemas GNSS no garantizan su correcto funcionamiento. Sin embargo, muchos de los inconvenientes planteados pueden ser resueltos en un futuro próximo con la puesta en marcha de la *fase GNSS-2*. Las estrategias de interoperabilidad entre sistemas GNSS y la puesta en marcha de un sistema plenamente civil como *Galileo*, que llegara a ofrecer un servicio integridad y uno de calidad de la señal, permitirá obtener las suficientes garantías para la estimación de un posicionamiento preciso empleando receptores estándar.

La estrategia de posicionamiento óptima será aquella que permita alcanzar un equilibrio entre la complejidad del instrumental empleado, los objetivos de investigación y el presupuesto disponible según la matriz presentada por Valero-Mora *et al.* (2013). En el caso concreto del registro de datos de posicionamiento debe evitarse tanto una sobre-instrumentación del vehículo experimental, que supondría un encarecimiento innecesario de los costes del proyecto, como una sub-instrumentación del mismo, que conllevaría a un incumplimiento de los objetivos de investigación debido a la falta de datos.



CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio es plantear una serie de estrategias de adquisición de datos *a priori* que permitan minimizar las pérdidas de datos en experimentos de conducción naturalista. Un incremento del nivel de información obtenida reduce los tiempos de (post-)procesamiento de los datos *a posteriori* e incrementa la fiabilidad de los resultados obtenidos, lo que repercute, a su vez, en un mejor cumplimiento de los objetivos de investigación y en una reducción de los costes económicos del proyecto.

En este capítulo hemos presentado diversas estrategias para la adquisición de datos de posicionamiento en experimentos de conducción naturalista. Una serie de factores técnicos como económicos condicionan la elección de las posibles estrategias para cada experimento en particular. La estrategia adecuada será la que logre un equilibrio entre estos factores.

El estudio propuesto permite cubrir un campo en el que hay una ausencia de estudios científicos previos y plantea una metodología teórica extrapolable para otros estudios de conducción naturalista.



CAP. 5

RECUPERACIÓN DE DATOS DE POSICIONAMIENTO EN PROYECTOS DE
CONDUCCIÓN NATURALISTA EMPLEANDO SISTEMAS SIG



Capítulo 5

RESUMEN	165
5.1. INTRODUCCIÓN	165
5.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS	166
5.3. METODOLOGÍA	167
5.4. RESULTADOS.....	171
5.5. FUENTES DE ERROR ASOCIADO	174
5.6. DISCUSIÓN.....	176
CONCLUSIONES	177



RESUMEN

La conducción naturalista presenta una serie de inconvenientes como su reciente aplicación experimental o su necesidad de grandes recursos. La complejidad instrumental de los vehículos experimentales provoca la aparición de pérdidas de datos con relativa frecuencia. Estas pérdidas suponen una reducción tanto cuantitativa como cualitativa del conjunto de la información disponible. Por esta razón, es necesaria la implementación de métodos para la recuperación de datos *a posteriori* que permitan incrementar tanto la capacidad de análisis de la información como el nivel de fiabilidad de los resultados obtenidos. En este capítulo se implementa un método propio para la recuperación de datos de posicionamiento empleando herramientas propias de un *Sistema de Información Geográfica* (SIG).

5.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el método de conducción naturalista se ha convertido en una importante tendencia dentro de los estudios centrados en tráfico y seguridad vial. Este método de experimentación permite observar el comportamiento habitual de un determinado conductor (o de un grupo de ellos) en condiciones reales de conducción, de forma objetiva y sin condicionantes u obstrucciones de ningún tipo.

Los estudios de conducción naturalista publicados hasta el momento han analizado diferentes objetivos de investigación, como el estudio del comportamiento al volante del conductor (Young *et al.*, 2012; Jie *et al.*, 2012; Lareshyn *et al.*, 2009), análisis y mejora de modelos de seguimiento de vehículos (Higgs, 2011; Yang y Peng, 2009), estudio del sueño y de las distracciones al volante (Barr *et al.*, 2011; Green *et al.*, 2007; Stutts *et al.*, 2005), relación entre falta de atención y aparición situaciones de riesgo de accidente o casi-accidente (Klauer *et al.*, 2006), identificación de eventos críticos (Pañeda, 2011; Thomas y van Berkum, 2009), evaluación de los sistemas de advertencia de colisión (Lee y Peng, 2005), análisis de los niveles de fijación del ojo del conductor (Olson *et al.*, 1989), relación entre distracción e interacción con dispositivos electrónicos durante la conducción (Chisholm *et al.*, 2006; Strayer y Drews, 2004), análisis de la frenada en situaciones de casi-accidente (Cheng *et al.*, 2011), entre otros muchos. Una revisión más exhaustiva de estos objetivos de investigación y de los respectivos estudios fue presentada en detalle en el **CAP. 2-2**.

El modelo de experimentación asociado a la conducción naturalista requiere de un control continuo y constante de todo el proceso de conducción, centrado en todos los elementos que forman parte del denominado *escenario de conducción* y de sus interacciones mutuas. Balsa-Barreiro *et al.* (2012a) califican al sistema de adquisición de datos de estos experimentos como de tipo *masivo* y *ciego*. Es un sistema *masivo* porque intenta registrar y parametrizar todos aquellos factores que presentan una influencia real o potencial sobre la conducción, mientras que es un sistema *ciego* porque no presenta un único objeto de análisis, sino que puede presentar múltiples (de forma simultánea), relativos a cualquiera de los elementos que forman parte del *escenario de conducción*: vehículo, infraestructuras, ambiente circundante y/o el propio conductor (Backer-Grøndahl *et al.*, 2009; McLaughlin *et al.*, 2008; Klauer *et al.*, 2006). De esta forma, aunque exista un objetivo de investigación específico, resulta habitual la monitorización de un gran número de parámetros, tanto de tipo cinemático como estático.

La observación naturalista aplicada a estudios de conducción presenta una serie de ventajas principales sobre los métodos de experimentación tradicionales. Desde un punto de vista cuantitativo permite obtener más información relativa a todos aquellos elementos que intervienen en la conducción. Desde un punto de vista cualitativo permite obtener una información de más calidad, dado que el proceso de experimentación no está condicionado, pudiendo ser observado en circunstancias reales el comportamiento al volante de un determinado conductor. Sin embargo, este modelo de experimentación presenta una serie de inconvenientes tales como su escasa tradición o la necesidad de grandes recursos tanto en términos temporales como económicos, lo que hace más complejo y costoso todo el proceso de experimentación, desde la adquisición al procesamiento y el análisis de los datos. La escasa tradición en la aplicación del método de observación naturalista dentro de estudios de conducción explica la ausencia de metodologías de trabajo generalmente aceptadas. Por su parte, la necesidad de grandes recursos hace más compleja la propuesta de implementación de estrategias para la adquisición de datos dados sus mayores requerimientos, tal y como demostramos en el **CAP. 4** para la captura de datos de posicionamiento en este tipo de experimentos.



Estos dos inconvenientes explican el hecho de que sean habituales las pérdidas de datos en experimentos de este tipo. Backer-Grøndahl et al. (2011) afirman que estos experimentos presentan un elevado riesgo de pérdida de datos de todo tipo, mientras que Sagberg *et al.* (2011) confirman que estas pérdidas son habituales aún a pesar de que sean implementadas estrategias propias para evitarlas. Un ejemplo concreto del volumen de estas pérdidas es la aportada por Pilgerstorfer *et al.* (2011) a partir de su experiencia en uno de los proyectos piloto de *DaCoTA EU Road Safety*, donde estimaron unas pérdidas aproximadas de una cuarta parte de los datos.

Este mismo estudio concluye que los grandes proyectos de conducción naturalista deberían presentar una buena estructura organizativa previa para prevenir pérdidas de datos y corregir posibles errores, siendo necesario plantear proyectos que puedan generar y mantener el registro de los datos de una forma continua en el tiempo. A una conclusión similar llegan Sagberg *et al.* (2011) que, como recomendaciones al proyecto *PROLOGUE*, inciden en la importancia de llevar a cabo proyectos piloto a pequeña escala como estrategia para reducir el riesgo de aparición de pérdidas de datos. Sin embargo, estas recomendaciones son propuestas para la fase previa al experimento y presentan un carácter muy abstracto.

Los datos de posicionamiento son unos de los más afectados por estas pérdidas. La mayor parte de los estudios de investigación en tráfico vial coinciden en el que el posicionamiento basado en sistemas GNSS suele dar más problemas en la práctica de los que inicialmente se esperan (Zabic, 2011; Gatscha *et al.*, 2010; Ericsson, 2000a), sobre todo en aplicaciones cinemáticas, siendo habituales las pérdidas de posicionamiento en el paso del vehículo por ciertos ambientes como túneles, zonas urbanas o boscosas densas, etc. (Ostini, 2012; Mekik y Arslanoglu, 2009; Julg, 1998) en los que la visibilidad satelital se reduce. Nielsen y Sørensen (2008) afirmaron que en torno al 90% de los trayectos analizados dentro del proyecto AKTA presentaron falta de datos de posicionamiento siendo el 3% de estos trayectos imposibles de reconstruir. Los pequeños cortes de la señal (duración inferior a los cinco minutos) se debieron a pérdidas de la misma en ciertos ambientes unido a los posteriores tiempos de readquisición de la señal por parte del receptor (Nielsen, 2003). Los cortes más largos de la señal (de tiempo superior a cinco minutos) se debieron a problemas en la instalación de los receptores o el uso de unidades defectuosas. El uso de sistemas integrados GPS+INS presenta una mejor ejecución de funcionamiento que los receptores GPS, aunque son posibles pérdidas debidas a cese de la señal satelital durante un tiempo prolongado, una mala integración entre los componentes del sistema o la falta de calibración y mantenimiento periódico de dichos componentes.

Las pérdidas de datos, sean esporádicas o continuas, generan vacíos (*gaps*) de información que limitan la capacidad de análisis de los datos por parte del investigador, pudiendo llevar a resultados e interpretaciones poco fiables. Por esta razón es necesaria la implementación de procedimientos *a posteriori* que permitan una recuperación parcial o total de los datos. Los grandes recursos requeridos por este tipo de experimentos incrementan el nivel de responsabilidad y la importancia de estos procedimientos. En este capítulo proponemos un método para la recuperación de datos de posicionamiento, un tipo de datos de los más afectados por pérdidas en este tipo de experimentos. El método propuesto se implementa sobre un *Sistema de Información Geográfica* (SIG) y permite dotar de coordenadas a los registros de la base de datos. Los resultados obtenidos presentan bajos niveles de error asociado.

5.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS

Los datos empleados son los obtenidos por el INTRAS en el proyecto piloto de *PROLOGUE* llevado a cabo en Valencia durante los meses de junio y julio de 2010. Participaron cinco conductores durante cuatro días cada uno de ellos. Sin embargo, este proyecto presentó numerosas deficiencias en su ejecución, siendo registrado un conjunto numeroso de pérdidas de datos de todo tipo. En el caso de datos de posicionamiento la pérdida de datos fue absoluta (**CAP. 4-3**). Una descripción general de los datos y la zona de estudio fue presentada en el **CAP. 2-5**.

El trazado del experimento presentaba dos partes. Una primera que era común a todos los conductores y una segunda que variaba cada día del experimento. El procedimiento de recuperación de datos de posicionamiento implementado en el **CAP. 5** se aplica en la primera de las partes, sobre la que se determina un tramo de vía recorrido en ambos sentidos de circulación por los cinco conductores durante los cuatro días del experimento. El trazado estudiado corresponde a un tramo de la autovía V-21 que

conecta la *autovía del Mediterráneo* con la ciudad de Valencia. La longitud aproximada de este tramo de vía es de unos 16 km. El tiempo de conducción del tramo recorrido fue de una media hora aproximada, aunque se observó una cierta variabilidad temporal sobre todo en el tramo de vuelta donde se produjeron ralentizaciones del tráfico debido a situaciones de congestión, lo que acabó dilatando el tiempo de conducción.

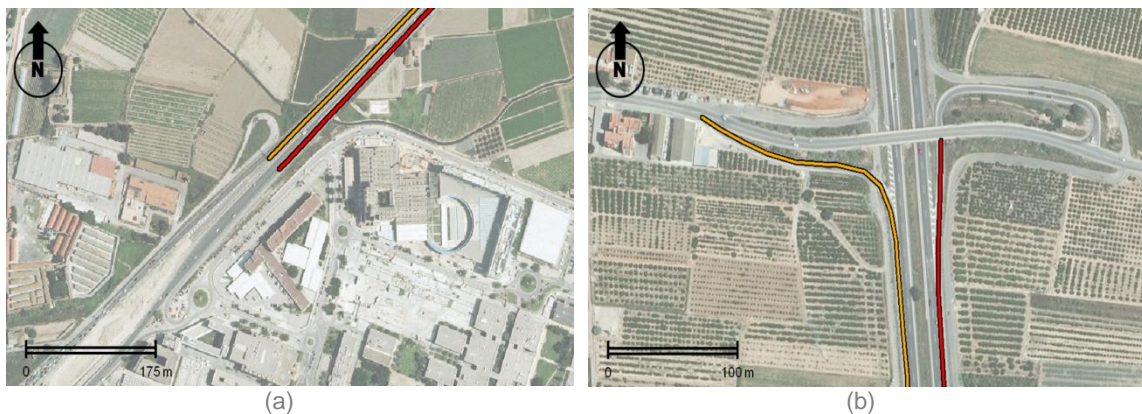
Para la implementación de nuestro método empleamos una ortoimagen de la zona de estudio además de las bases de datos alfanuméricas (tablas sin formato) y los videos capturados durante el experimento. El software empleado es el programa *ArcGis* de la casa ESRI en su versión 10.

5.3. METODOLOGÍA

El experimento llevado a cabo por el INTRAS en 2010 permitió grabar un conjunto numeroso de parámetros de conducción a unos altos niveles de frecuencia temporal. El objetivo primario del experimento era el de evaluar si el uso de dispositivos IVIS (*In-Vehicle Information Systems*) en la conducción presentaba alguna influencia sobre la misma. En total fueron registrados unos 80 parámetros, algunos de ellos cinemáticos y otros estáticos, como los referidos al accionamiento o uso de ciertos dispositivos. Las frecuencias temporales de registro de estos parámetros dependían del tipo de parámetro. La mayoría de parámetros cinemáticos fueron registrados a frecuencias temporales del orden del centisegundo (100 Hz). Entre los parámetros registrados a estas frecuencias estaban el régimen de giro del motor, las velocidades instantánea y adquirida, además de las aceleraciones longitudinal, transversal y vertical del vehículo. Sin embargo, las frecuencias a la que fueron registrados otros parámetros, como la *distancia recorrida* eran bastante más bajas, del orden del segundo.

Para la propuesta de nuestro método de georreferenciación se tiene en cuenta que una edición manual de todos los registros sería inabordable dada la gran cantidad de puntos que serían necesarios. Una digitalización precisa de un tramo de una hora de conducción en lo que la frecuencia de registro de datos fue de 1 Hz obligaría a la localización de unos 3.600 puntos, todos ellos corroborados con los datos video para ser ubicados de forma precisa en el espacio. Nuestro método para la recuperación de datos de posicionamiento presenta un procedimiento (semi) automático que permite reducir tanto la carga de edición manual como los costes temporales requeridos en la fase de digitalización de los puntos.

El trazado de vía estudiado fue recorrido por todos los conductores durante los diferentes días del experimento. Este trazado corresponde a un tramo de autovía localizado al norte de la ciudad de Valencia. Sobre esta vía y en ambos sentidos se selecciona un tramo de unos 16 km, entre la ciudad de Valencia en su límite norte y la salida número 2 de dicha vía en dirección Castellón-Barcelona, a la altura de la localidad de Puzol (Valencia). Para la delimitación de este tramo de vía estimamos dos hitos importantes de la vía claramente visibles en los videos grabados por el vehículo en el momento del experimento. En nuestro caso tomamos como referencia un pórtico en el punto más próximo a la ciudad de Valencia (extremo sur) y un viaducto en el punto más próximo a la localidad de Puzol (extremo norte). Una vista en detalle de los sectores de inicio y fin del trazado estudiado, junto a la de los hitos empleados para su delimitación en cada sentido se representa en la Figura 5.





(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 5-1. Vista en detalle de los sectores inicial y final de nuestro trazado en ambos sentidos (en rojo sentido ida S-N; en naranja sentido vuelta N-S): (a) sector sur, correspondiente al inicio del tramo de ida y final del tramo de vuelta; (b) sector norte, correspondiente al final del tramo de ida e inicio del tramo de vuelta. En las imágenes inferiores, hitos empleados para la delimitación de nuestro tramo de estudio: (c) inicio y (d) final del tramo de sentido de ida; (e) inicio y (f) final del tramo de vuelta. Fuente: *Google Earth*, 2011 y 2012.

Delimitado el tramo de vía, se procede a una digitalización del trazado a partir de un conjunto numeroso de puntos sobre una ortoimagen georeferenciada de gran precisión. Se emplea la herramienta *polilínea* del software de geoprocésamiento y se determina un trazado teórico que, en nuestro caso, asumimos como el eje central de la vía, en ambos sentidos de conducción. Empleamos como imagen de referencia una ortoimagen RGB de la Comunidad Valenciana del año 2008, propiedad del ICV (*Instituto Cartográfico Valenciano*). Esta ortoimagen presenta una resolución espacial de unos 50 cm y está definida dentro del sistema de referencia ETRS89, huso 30.

Para la digitalización precisa del trazado empleamos unos 500 puntos en cada sentido. Una imagen general de la entidad lineal obtenida, tanto en el sentido de ida como el de vuelta se representa en las Figura 5.c y Figura 5.d respectivamente. El trazado de la vía en ambos sentidos es casi idéntico debido a la regularidad y homogeneidad de los elementos de separación de la vía en ambos sentidos. La única diferencia apreciable entre ambos trazados se presenta en la parte superior coincidente con la sección final del tramo de ida (S-N) y con la inicial del tramo de vuelta (N-S). En el caso del tramo de ida se observa una salida parcial y progresiva del vehículo a través del carril de deceleración, mientras que en el tramo de vuelta se observa la incorporación plena del vehículo a la autovía. El trazado de ida (15,85 km) es ligeramente más corto que el de vuelta (15,95 km) debido a que el tramo de carril de deceleración solo se registra parcialmente, mientras que en el caso del carril de aceleración del tramo de vuelta el registro se hace de forma total.

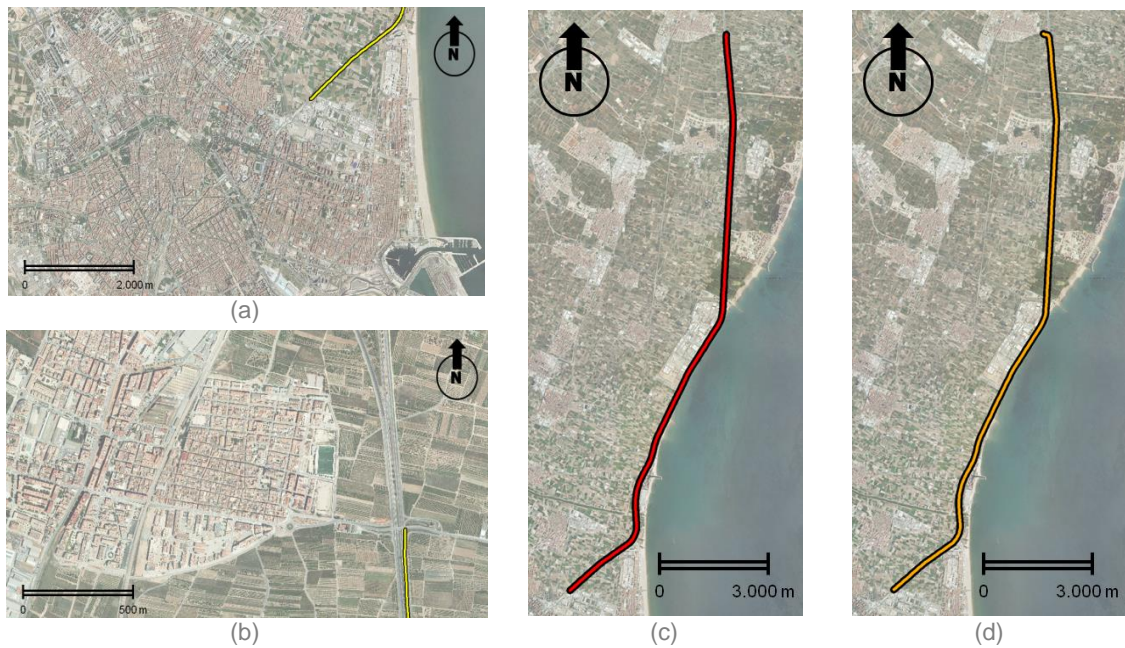


Figura 5-2. Localización de nuestro trazado de estudio (a) en su sector sur, muy próximo a la ciudad de Valencia, y (b) en su sector norte, muy próximo a la localidad de Puzol. Vista general del trazado en (a) el sentido de ida S-N, Valencia-Puzol, y (b) en el de vuelta N-S, Puzol-Valencia.

Sobre la entidad lineal que representa el trazado se localiza la información alfanumérica de los conductores que participaron en el experimento para cada uno de los días. Para ello debe determinarse sobre la base de datos alfanumérica el momento preciso (registro concreto) en el que el vehículo pasó por el punto inicial y final del recorrido.

Las cámaras de video son uno de los dispositivos que más habitualmente se emplean en este tipo de experimentos (Laureshyn *et al.*, 2009; Hughes *et al.*, 2009). En teoría, en este experimento, el vehículo portaba varias cámaras que permitía recoger imágenes desde diferentes puntos de vista (Figura 2-3 en **CAP. 2**): cámara de escenario, trasera, ocular, de cara y dos cámaras laterales (SPL-1 y SPL-2). Una serie de ejemplos concretos de las imágenes obtenidas con cada una de estas cámaras se muestran en la Figura 5-3. En un principio, cualquiera de ellas, a excepción de la trasera y de la cara, eran válidas ya que nos permitían observar, con un mejor o peor punto de vista dependiendo del momento, el tramo de vía recorrido y, de forma específica los hitos que delimitaban los puntos inicial y final de nuestro trazado.

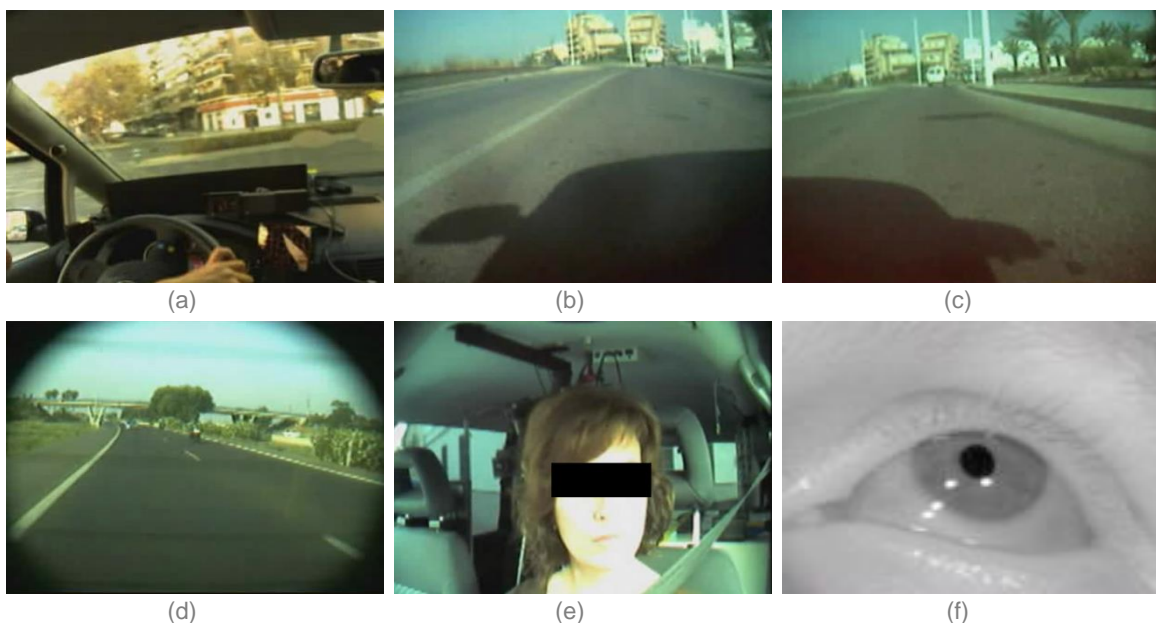


Figura 5-3. Imágenes obtenidas con las diferentes cámaras del vehículo: (a) cámara de escenario, (b) y (c) cámaras laterales SPL-1 y SPL-2, (d) trasera, (e) de cara y (f) ocular. Fuente: INTRAS, 2014.

El uso complementario de las imágenes de video, junto a algunos datos alfanuméricos referidos a determinados parámetros cinemáticos permitió un reconocimiento del paso del vehículo por los hitos que registraban el inicio y final de nuestro trazado. A través de un programa propio implementado por el equipo investigador, era posible simultanear los videos con un menú contextual interactivo en tiempo real, en el que se podían disponer algunos de los datos alfanuméricos (Figura 5-4). La activación y visualización simultánea de este menú junto con los videos permitió obtener de forma muy aproximada el momento en el que el vehículo pasaba por los puntos teóricos que marcaban el inicio y el fin de nuestro trazado.



Figura 5-4. Empleo simultáneo del menú contextual que permitía vincular datos alfanuméricos e imágenes video. Fuente: INTRAS, 2014.

Para nuestra rutina de determinación de los puntos inicial y final de trazado, el parámetro de *distancia recorrida* permite fijar el momento aproximado, mientras que los valores de *tiempo* y *velocidades*, registrados a unas mayores frecuencias temporales, permiten obtener un nivel de aproximación mucho mayor.

Una vez determinados los puntos iniciales y finales de cada uno de los conductores y días se lleva a cabo una extracción de los datos. Sin embargo, el peso de la tabla resultante sigue siendo muy elevado presentando unos 90.000 registros para un tramo recorrido en sólo 15 minutos. Dado que la frecuencia de muestreo del parámetro *distancia recorrida* fue de un segundo, optamos por hacer una reducción de los datos a esta frecuencia. Para ello generamos un nuevo campo en la tabla, *incremento de distancia recorrida* (Δd), sobre el que se estima la distancia recorrida respecto al punto que estimamos como punto de partida. Un filtrado de datos por este campo permite reducir la base de datos de forma considerable, en una relación 100:1, lo que permite una manipulación y gestión más eficiente de los datos.

El siguiente paso es la conversión de la información alfanumérica asociada a cada conductor y día a un *shape* de puntos, donde cada registro (fila de la base de datos) corresponda a un único punto. Estos puntos se localizan sobre la entidad lineal que representa el trazado. Para ello se debe convertir esta entidad lineal, de tipo *polilínea*, a un *elemento ruta*.

Para forzar la localización de los puntos sobre el elemento ruta debe incorporarse al *shape* de puntos un campo propio de identificación de ruta coincidente con el de la propia entidad lineal. Los registros se localizan sobre esta ruta, considerando como punto 0 el punto determinado como inicial. La localización de cada punto sobre la ruta depende del valor del campo de *incremento de distancia recorrida* (Δd). Por tanto, el posicionamiento espacial de cada conductor en cada momento depende únicamente de un valor de distancia recorrida y del trazado de la vía que supone un constreñimiento forzoso a la ubicación de estos puntos. Una vez localizados los puntos sobre el trazado de la vía se pueden extraer sus coordenadas planimétricas mediante una exportación de la base de datos alfanumérica asociada al *shape* de puntos.

El número de puntos del *shape* (para cada conductor y día) depende del número de registros de la base de datos y, en consecuencia, de la duración del trayecto. Como la relación entre la velocidad y el tiempo es inversamente proporcional, un mayor tiempo de viaje para un mismo recorrido supone obligatoriamente una menor velocidad media. Entre las razones que explican unas menores velocidades medias estaría el propio modo de conducción del sujeto aunque también tendrían una clara influencia las condiciones de la vía y del tráfico. En la Tabla 5-1 se observa como existe una gran variabilidad en el número de puntos registrados en cada uno de los sentidos recorridos en nuestro tramo de estudio, obteniéndose una media considerablemente más elevada en el sentido de vuelta. Esto se debe a que el experimento tuvo lugar durante las primeras horas de la mañana de días laborables, siendo habituales condiciones de tráfico

denso y retenciones en este sentido de conducción, sobre todo en las proximidades de la ciudad de Valencia:

Tabla 5-1. Estadísticos relativos al número de puntos registrados en los diferentes trayectos.

Sentido	Media	STD	Nº máximo	Nº mínimo
Ida	587,1	40,5	649	530
Vuelta	914,91	251,2	1.393	646

La disposición directa de los puntos sobre la ruta no supone, obviamente, una coincidencia exacta de nuestro punto final teórico con el que experimentalmente se obtiene a partir de los datos alfanuméricos. Esto se debe a una serie de imprecisiones y errores inherentes el proceso. Por esta razón, deben diferenciarse dos tipos de ruta: la *teórica* y la *experimental* (Balsa-Barreiro *et al.*, 2012a). La *ruta teórica* es la coincidente con el elemento lineal que ha sido digitalizado y presenta una longitud de 15,85 km para el sentido de ida y de 15,95 km para el de vuelta. Por su parte, la *ruta experimental* es la obtenida cada día en función de los datos alfanuméricos. La diferencia entre ambas rutas genera un error de longitud, ya sea por exceso o defecto (5.1). Este error se denomina *offset* y puede tener signo positivo o negativo (Figuras 5-5.b y 5-5.c).

$$\text{Offset [m]} = \text{ruta experimental [m]} - \text{ruta teórica [m]} \quad (5.1)$$

Esta diferencia de longitud entre ambas rutas, *teórica* y *experimental*, puede ser expresada de forma relativa respecto a la longitud total de la ruta empleando, para ello, la siguiente expresión:

$$\text{Error [\%]} = \frac{\text{offset [m]} \cdot 100}{\text{ruta teórica [m]}} \quad (5.2)$$

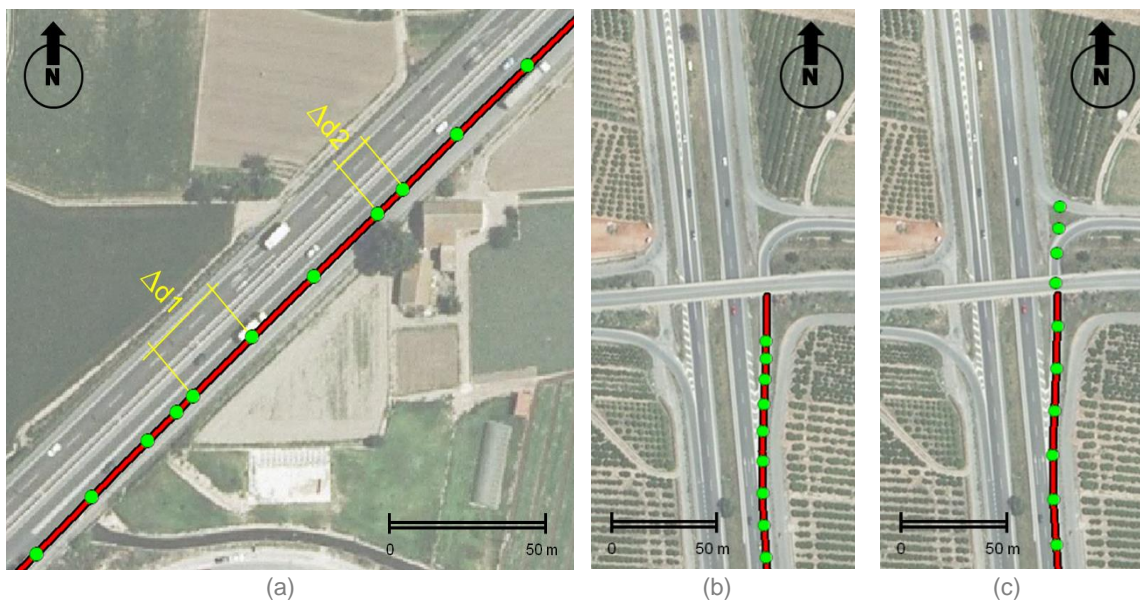


Figura 5-5. (a) La localización de los puntos sobre el trazado depende del valor del campo Δd , el cual es función de la velocidad del vehículo. Por esta razón, la distancia entre puntos es variable. La no coincidencia de la ruta experimental y teórica lleva a un *offset* (b) tanto por defecto, cuanto la ruta experimental es más corta que la teórica, (c) como por exceso, cuando la ruta experimental es más larga que la teórica.

5.4. RESULTADOS

El número total de trayectos de los que han podido recuperarse datos de posicionamiento ha sido de 27, 15 de ellos en el sentido de ida y 12 en el de vuelta. Algunos de los días no han podido recuperarse bien por ausencia total de datos relativos a los parámetros cinemáticos (información alfanumérica) o bien por ausencia de datos video. Los resultados obtenidos según el procedimiento implementado son expuestos en la Tabla 5-2.



Tabla 5-2. Resultados obtenidos en el experimento

Sentido	Fecha	Nº puntos	Offset [m]	Error [%]
Ida	29/06/2010	619	-622,89	-3,93
Ida	02/07/2010	580	-181,64	-1,15
Ida	19/07/2010	589	-167,19	-1,05
Ida	20/07/2010	530	22,25	0,14
Ida	23/07/2010	639	134,29	0,85
Ida	08/07/2010	617	154,57	0,98
Ida	16/07/2010	620	165,58	1,04
Ida	14/07/2010	552	201,36	1,27
Ida	13/07/2010	548	260,07	1,64
Ida	22/07/2010	621	303,16	1,91
Ida	09/07/2010	531	483,60	3,05
Ida	30/06/2010	598	623,06	3,93
Ida	12/07/2010	533	671,55	4,24
Ida	06/07/2010	580	682,50	4,31
Ida	21/07/2010	649	763,05	4,81
<hr/>				
Vuelta	23/07/2010	782	-662,21	-4,15
Vuelta	21/07/2010	937	-534,53	-3,35
Vuelta	20/07/2010	710	-219,09	-1,37
Vuelta	02/07/2010	646	11,08	0,07
Vuelta	22/07/2010	1.068	43,27	0,27
Vuelta	01/07/2010	684	48,63	0,30
Vuelta	29/06/2010	652	190,63	1,20
Vuelta	26/07/2010	1.393	237,05	1,49
Vuelta	19/07/2010	1.316	374,22	2,35
Vuelta	15/07/2010	1.001	679,26	4,26
Vuelta	06/07/2010	799	684,14	4,29
Vuelta	08/07/2010	991	722,12	4,53

La mayor parte de los errores obtenidos han sido por exceso (77,7%), siendo en estos casos la ruta experimental de mayor longitud que la teórica. El *offset* medio obtenido fue de 187,7 m, aunque los valores medios para la ida fueron considerablemente mejores que para la vuelta. La revisión de máximos y mínimos, tanto por exceso como por defecto, presenta resultados de un orden muy semejante en ambos sentidos siendo la diferencia relativa más relevante la del error mínimo por exceso (Tabla 5-3).

Tabla 5-3. Estadísticos relativos al parámetro de *offset*.

	Media	STD	Por exceso		Por defecto	
			Max	Min	Max	Min
ida	232.89	380.45	763.05	22.25	-622.89	-167.19
Offset [m] vuelta	131.21	452.62	722.12	11.08	-662.21	-219.09
total	187.70	408.98	763.05	11.08	-622.89	-167.19

En términos relativos, todo el conjunto de errores obtenidos está por debajo del 5% de la longitud total de la ruta teórica y casi la mitad de ellos por debajo del 1,5%. El error relativo medio obtenido fue del 1,18%, mientras que la desviación típica fue del 2,57% (Tabla 5-4). Si tenemos en cuenta los errores en módulo, el error medio fue de 2,29%, mientras que la desviación típica fue del 1,61%. Si comparamos los valores



obtenidos tanto por exceso como por defecto observamos que se obtienen máximos más acotados por defecto, al contrario de lo que sucede con los mínimos, más acotados cuando lo son por exceso.

Tabla 5-4. Estadísticos relativos al parámetro de error relativo.

		Media	STD	Por exceso		Por defecto	
				Max	Min	Max	Min
Error [%]	ida	1.47	2.40	4.81	0.14	-3.93	-1.05
	vuelta	0.82	2.84	4.53	0.07	-4.15	-1.37
	total	1.18	2.57	4.81	0.07	-4.15	-1.05

Conocidos estos errores es necesario aplicar un segundo ajuste de los datos en el que se tenga en cuenta la incidencia de los mismos. Para ello calculamos un denominado *parámetro de compensación*, el cual se refiere a la distancia por punto que debe compensada para forzar la coincidencia de longitudes entre la ruta experimental y la teórica. Su valor se calcula a partir de la expresión (5.3), mientras que su signo es contrario al del propio error, es decir, positivo para errores por defecto y negativo para errores por exceso:

$$\text{Compensación} \left[\frac{\text{m}}{\text{punto}} \right] = \frac{\text{offset [m]}}{n^{\circ} \text{ de puntos}} \quad (5.3)$$

El valor de este parámetro de compensación se aplica de manera equitativa entre todos los puntos de la ruta experimental. En la Figura 5-6 se representan de forma conjunta los datos de error relativo (eje X) y la compensación en metros (eje Y) para los distintos trayectos cuyos datos de posicionamiento han sido recuperados. Se observa así un alto nivel de correlación lineal entre los dos parámetros representados en ambos sentidos de conducción.

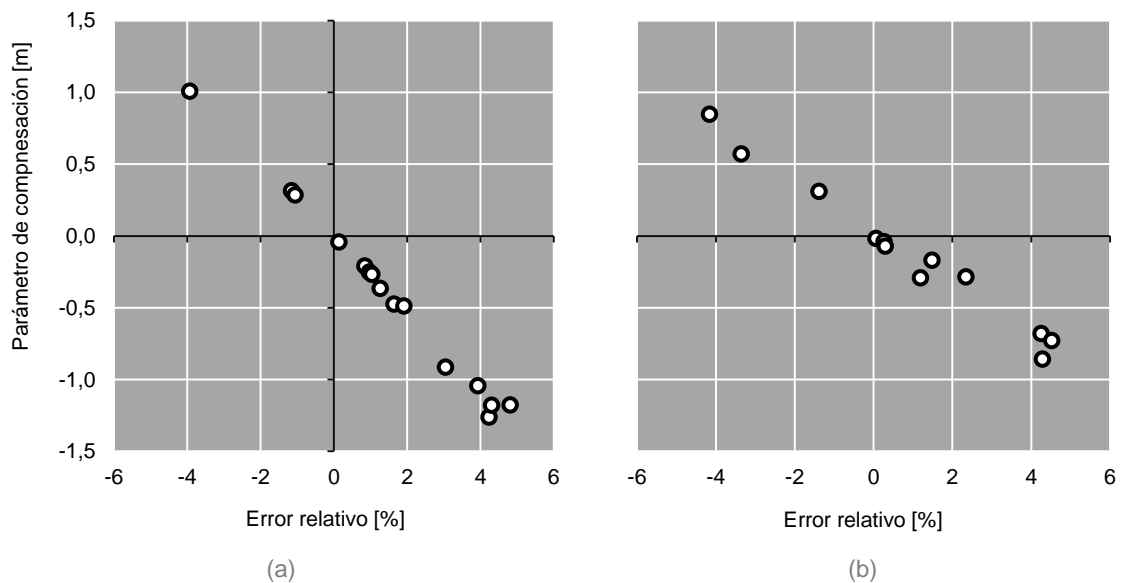


Figura 5-6. Relación entre el error relativo y el parámetro de compensación para los trayectos de (a) ida y (b) vuelta. Fuente: Balsa-Barreiro *et al.*, 2013.

La media del valor del parámetro de compensación fue de 28 cm en sentido negativo. La media obtenida para el tramo de vuelta fue considerablemente inferior al obtenido para el tramo de ida, debido a que los trayectos de vuelta presentaban una mayor densidad de puntos, factor inversamente proporcional al parámetro de compensación. El nivel de desviaciones típicas fue de un orden muy similar tanto en el sentido de ida como en el de vuelta. Las compensaciones máximas aplicadas fueron, en módulo, superiores al metro, mientras que las mínimas fueron de sólo escasos centímetros (Tabla 5-5).

Tabla 5-5. Estadísticos relativos al parámetro de compensación.

	Media	STD	Por exceso		Por defecto	
			Max	Min	Max	Min
ida	-0,40	0,64	-1,26	-0,04	1,01	0,28
Compensación [m] vuelta	-0,12	0,51	-0,86	-0,02	0,85	0,31
total	-0,28	0,60	-1,26	-0,02	1,01	0,28

5.5. FUENTES DE ERROR ASOCIADO

El método implementado presenta una serie de imprecisiones o fuentes de error debido a un conjunto de suposiciones que no son reales, pero sí necesarias para lograr una semi-automatización del proceso. Las más relevantes de estas suposiciones son las siguientes:

- La desestimación de la trayectoria real y la generalización del trazado. La ruta teórica determinada fue la misma para todos los días del experimento, lo que en realidad no era cierto. Así, sobre un único trazado se localizaron todos los puntos para los distintos conductores, lo que supone un error de generalización al no tener en cuenta la trayectoria real recorrida por cada uno de ellos. Esta generalización del trazado permitió simplificar enormemente la carga manual de edición reduciendo el número de puntos digitalizados, aunque impidió que se tuviera en cuenta la variabilidad de maniobras al volante de los distintos conductores y días, tales como adelantamientos, cambios de carril, salidas a destiempo de un determinado carril, etc.
- Problemas en la determinación de los hitos de referencia. Los videos, al igual que los datos alfanuméricos, presentaban importantes errores debido a distintas causas como la saturación de las imágenes, la ralentización, la presencia de ruido o el colapso de información por parte del sistema que impedía una grabación continua. Aparte de errores técnicos, problemas en la propia visibilidad de las imágenes debidos a efectos atmosféricos o por el paso de otros vehículos dificultaron la estimación de la posición de los hitos de referencia que delimitaban el inicio y el fin de cada trayecto (Figura 5-7).

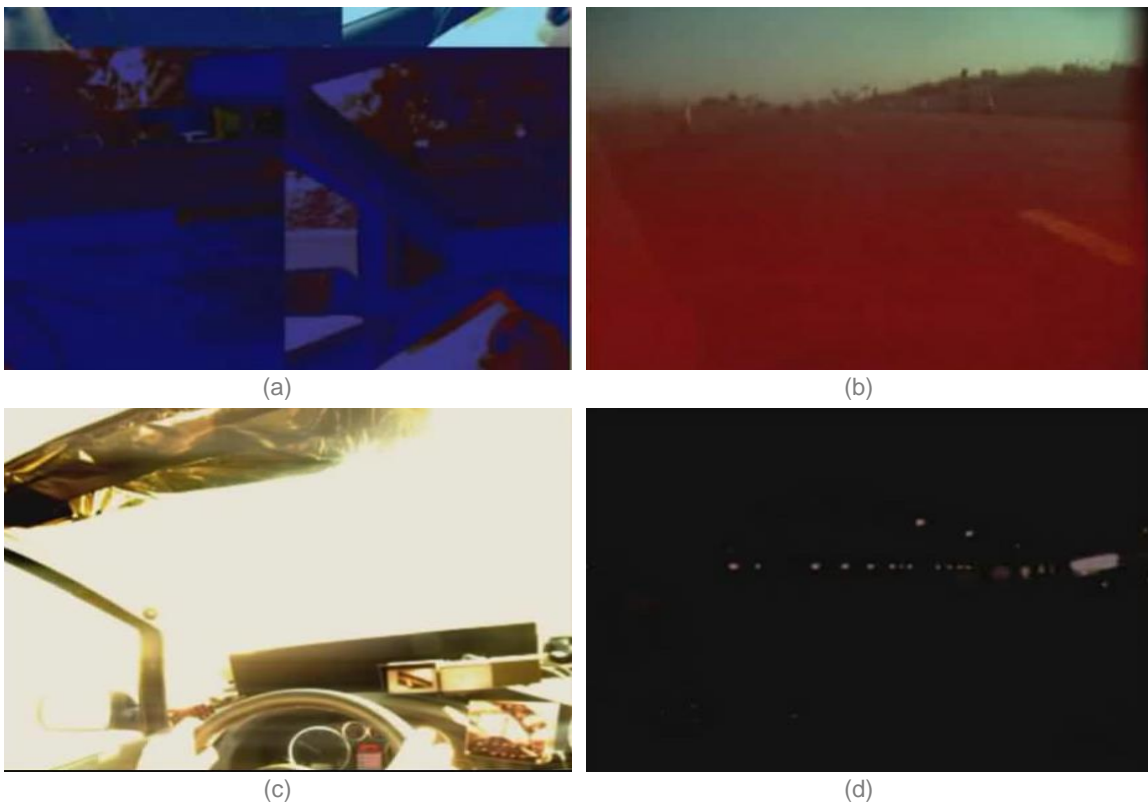


Figura 5-7. Algunos problemas aparecidos en la visualización de datos video: (a) Fallos esporádicos, (b) mala calidad de la imagen, (c) deslumbramiento y (d) falta de iluminación.



- La diferencia temporal entre el momento de captura de la ortoimagen (2008) y el momento en que se realizó el experimento, durante los meses de junio y julio del año 2010. Los videos mostraron elementos que la ortoimagen no mostraba, como un tramo en obras o algunos cambios en la señalización de la vía. Estos cambios supusieron ligeras modificaciones en el trazado de la vía y en la trayectoria real seguida por los distintos conductores.
- El error del operador en el momento de adquisición de los puntos de referencia, debido a criterios subjetivos y falta de precisión en el momento de estimar dichos puntos.

5.6. DISCUSIÓN

Los métodos de recuperación de datos como el aquí presentado son implementados para su aplicación *a posteriori* sobre los datos adquiridos en un determinado proyecto. En este capítulo se propone uno para la recuperación de datos de posicionamiento en experimentos de conducción naturalista. Se trata de un método semi-automático que presenta unos altos niveles de efectividad en su ejecución. Así, a partir de la determinación de un número muy limitado de hitos de referencia es posible recuperar el posicionamiento de un gran número de puntos aplicando una carga manual muy reducida. Los resultados obtenidos presentan una alta fiabilidad, con errores máximos de un 5% de la longitud del trazado y menores del 1,5% en la mitad de los trayectos.

El método implementado es extrapolable a cualquier tipo de estudio de conducción naturalista, permitiendo mejorar exponencialmente las posibilidades de análisis y la fiabilidad de los resultados obtenidos sin necesidad de incrementar los costes económicos del proyecto. El método implementado requiere una baja carga de edición manual y puede ser implementado en programas SIG de tipo tanto comercial como libre. Un estudio más amplio de este método se muestra en Balsa-Barreiro *et al.* (2012a y 2013).

La implementación de métodos para la recuperación de datos presenta una gran importancia en proyectos de conducción naturalista por dos factores fundamentales: (a) sus altos requerimientos de recursos y de costes asociados, además de (b) la relativamente alta frecuencia con la que se producen pérdidas de datos.

Los proyectos de conducción naturalista requieren grandes cantidades de recursos para su puesta en marcha. Un ejemplo es el *Strategic Highway Research Program (SHRP-2)*, el proyecto más importante llevado a cabo hasta el momento. Este proyecto, todavía en fase de experimentación, cuenta con la participación de unos 3.900 vehículos que han sido monitorizados durante un período de unos 28 meses. Se espera que el proyecto concluya en el año 2015 con un coste estimado de unos 232,5 millones de dólares (SHRP-2, 2014). Otro proyecto de este tipo es el de los *100 coches* desarrollado por el *Virginia Tech Transportation Institute (VTTI)*, que contó con la participación de 241 conductores durante más de un año. Sólo en este proyecto fueron grabados más de 42.300 horas de conducción y una distancia equivalente a unos dos millones de millas (Dingus *et al.*, 2006). Sin embargo, no sólo los grandes proyectos requieren grandes volúmenes de recursos, sino también los pequeños proyectos. En el proyecto piloto español de *PROLOGUE* desarrollado por el INTRAS en el año 2010 participaron solamente cinco conductores durante cuatro días. Sin embargo, el número de parámetros monitorizados fue de unos 80, muchos de ellos a frecuencias de muestreo de unos 100 Hz (Valero-Mora *et al.*, 2010). Estimando que el tiempo de conducción total para cada día del experimento fue de una hora, el número total de registros (filas de la base de datos) obtenidos fue de unos 7,2 millones. Este alto nivel de recursos requeridos por este tipo de experimentos, unido a la frecuencia con que se producen pérdidas de datos hace necesaria la implementación de métodos que permitan una recuperación rápida y fiable de los datos, ya sea de forma parcial o total.

Dependiendo del tipo de pérdidas de datos pueden ser implementadas diversas estrategias para la recuperación de los mismos. En el caso de pérdidas de corta duración, la interpolación de valores entre puntos adyacentes permite una estimación fidedigna del valor más probable. La aplicación de funciones de interpolación lineal suele ser suficiente para este tipo de casos, presentando unos resultados óptimos (Broomhead y Lowe, 1988; Shepard, 1968). El análisis de esta problemática es habitual dentro de numerosas disciplinas científicas. Kokaram *et al.* (1995) propusieron un método de interpolación para la recuperación de datos entre secuencias de imágenes. Stohl *et al.* (1995) analizaron los errores de interpolación en la estimación de trayectorias dinámicas de flujos de vientos.



Sin embargo, la recuperación de datos en pérdidas de duración prolongada no puede ser implementada de la misma forma debido a un desconocimiento absoluto del comportamiento real del fenómeno y, por tanto, de la función matemática que determina su representación espacial. En este caso, las estrategias interpolación habitualmente empleadas suelen ofrecer resultados poco fiables. El método presentado en este capítulo permite la recuperación de datos de posicionamiento en pérdidas prolongadas aplicando un número muy limitado de constreñimientos geométricos y llegando a presentar unos altos niveles de fiabilidad en los resultados obtenidos.

Los experimentos de conducción naturalista suelen emplear un conjunto numeroso de dispositivos para la adquisición de datos, sobre los que en muchas ocasiones apenas se aplican procesos de calibración de carácter periódico. En el caso de dispositivos integrados, como del tipo GPS+INS, las posibilidades de manipulación en caso de necesidad se reducen claramente. De esta forma es relativamente frecuente la aparición de episodios, eventuales o permanentes, de malfuncionamiento de algún dispositivo por diferentes causas. Varios estudios afirman que la aparición de pérdidas es inevitable en proyectos de conducción naturalista debido a la propia naturaleza de este método de experimentación. Estas pérdidas de datos suponen una reducción tanto cuantitativa como cualitativa de la información disponible (Pilgerstorfer *et al.*, 2011). Por esta razón es importante la reducción o minimización de estos episodios de pérdidas mediante estudios exhaustivos previos a la puesta en marcha del proyecto en los que se analicen en profundidad los sistemas de adquisición de datos más adecuados, además de la puesta en marcha de estrategias de calibración y mantenimiento periódico de dichos sistemas. Pilgerstorfer *et al.* (2011) afirman que todos los proyectos de conducción naturalista deberían presentar una buena estructura organizativa previa que permitieran prevenir pérdidas de datos y corregir posibles errores. A una conclusión similar llegan Sagberg *et al.* (2011) que, como recomendaciones al proyecto *PROLOGUE*, inciden en la importancia de llevar a cabo proyectos piloto a pequeña escala como estrategia para reducir el riesgo de pérdidas de datos.

Las pérdidas de datos de posicionamiento son especialmente significativas en este tipo de estudios. Existe un conjunto numeroso de proyectos que afirman que el funcionamiento de los sistemas GNSS suele presentar muchos más problemas en la realidad de los esperados en un principio. Estrategias de posicionamiento más complejas permiten reducir la frecuencia de pérdidas aunque siguen presentando ciertas contraprestaciones. Los sistemas integrados GPS+INS permiten reducir la frecuencia de aparición de pérdidas, sobre todo de las de corta duración. Sin embargo estos sistemas son considerablemente más caros y presentan un funcionamiento más complicado debido a la compleja integración entre los diferentes componentes del sistema y a la necesidad de llevar a cabo procesos de calibración continuos que permitan validar el buen funcionamiento del sistema. Por esta razón deben llevarse a cabo en los próximos años estudios más exhaustivos relativos tanto a la minimización de pérdidas como a la recuperación de datos a posteriori, no únicamente de datos de posicionamiento.

CONCLUSIONES

En este capítulo se propone un método para la recuperación de datos de posicionamiento en experimentos de conducción naturalista, el cual se implementa sobre un *Sistema de Información Geográfica (SIG)*. Se trata de un método muy efectivo en el que a través de un procedimiento semiautomático pueden ser georreferenciados grandes volúmenes de datos, permitiendo además obtener unos resultados óptimos. Métodos como el aquí presentado permiten mejorar la capacidad de análisis de los datos experimentales, además de los niveles de fiabilidad de los resultados obtenidos, sin llegar a incrementar los costes económicos asociados a un determinado proyecto. La metodología propuesta es plenamente extrapolable tanto a otros proyectos de investigación como a otros métodos similares que permitan la recuperación de datos de cualquier tipo, no sólo de posicionamiento.



CAP. 6

REPRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS EN PROYECTOS DE
CONDUCCIÓN NATURALISTA EMPLEANDO SISTEMAS SIG



Capítulo 6

RESUMEN	181
6.1. INTRODUCCIÓN	181
6.2. EMPLEO DE SIG COMO HERRAMIENTA.....	183
6.3. DATOS.....	184
6.4. METODOLOGÍA	184
6.5. RESULTADOS.....	186
6.5. DISCUSIÓN	193
CONCLUSIONES	197



RESUMEN

Los proyectos de conducción naturalista generan grandes volúmenes de datos, cuya manipulación en las posteriores fases de procesamiento resulta compleja. La mayor parte de experimentos han sido llevados a cabo por pequeños grupos de investigación y presentan unas dimensiones reducidas. Las herramientas implementadas para el procesamiento de datos suelen centrarse en aplicaciones muy concretas. Además, los programas empleados presentan una limitada capacidad operativa y suelen estar implementados en software propietario. Por estas razones, la mayor parte de estudios aplican habitualmente estrategias de reducción de datos y optan por soluciones parciales. Una metodología de trabajo alternativa es el procesamiento de este tipo de datos con *Sistemas de Información Geográfica* (SIG), los cuales superan muchos de los inconvenientes de las metodologías y herramientas habitualmente empleadas. Los sistemas SIG permiten obtener una visión global de los datos y un uso más eficiente de los mismos. Su potente interfaz gráfica y su alta capacidad operativa permiten un uso más extendido de este tipo de datos, posibilitando que la fase de análisis de los datos pueda ser llevada a cabo por parte de usuarios no expertos y favoreciendo la integración de equipos de trabajo multidisciplinares.

6.1. INTRODUCCIÓN

Las sociedades actuales presentan una tendencia creciente a la movilidad debido al incremento constante del número de vehículos, de las tasas de urbanización y a una serie de cambios sociológicos. Este nuevo modelo social conlleva a un incremento de los flujos de tráfico, lo que plantea una serie de inconvenientes asociados y la necesidad de desarrollar modelos de movilidad alternativos. Existe una amplia bibliografía científica en la que se analiza, para distintos espacios geográficos, cómo el desarrollo urbano incrementa los ratios de movilidad, lo que genera unos altos costes socio-ambientales (Travisi *et al.*, 2006; Acharya, 2005; Safonov *et al.*, 1999). Algunos estudios plantean alternativas a esta problemática a través de modelos inteligentes y sostenibles de movilidad (Bertolini y Clercq, 2003; Möller, 2003).

La investigación sobre temas de tráfico presenta un gran interés en las sociedades actuales. Se observan grandes diferencias entre países en función de su nivel de riqueza y desarrollo. Los países ricos han conseguido durante los últimos años reducir considerablemente sus ratios de siniestralidad vial gracias a una mayor investigación científica que les ha permitido poner en marcha políticas de prevención adecuadas. Por su parte, los países en desarrollo han visto incrementados exponencialmente estos ratios siniestralidad vial debido a que los cambios se han producido de forma acelerada en una situación de falta de recursos y de escasa tradición científica. La mayoría de estos países presentan redes deficientes de infraestructuras viarias y no cuentan con financiación para la puesta en marcha de políticas preventivas eficientes. Además suelen presentar, desde un punto de vista sociológico, una escasa tradición cultural para la convivencia entre los diversos sistemas de transporte, lo que ante el incremento del número de vehículos en los últimos años, ha supuesto un crecimiento exponencial de los ratios de conflictividad vial.

La siniestralidad vial conlleva asociados unos elevados costes sociales y económicos. Los costes sociales son los relativos al número de personas damnificadas (muertes y heridos), mientras que los costes económicos son, entre otros, los derivados del traslado y atención sanitaria a heridos. Los accidentes de tráfico repercuten, a su vez, en los propios flujos de tráfico al implicar una ralentización del tráfico, una mayor frecuencia de congestiones y un aumento de los índices de contaminación, tanto de tipo ambiental como acústica. Las consecuencias no sólo suponen un incremento de los costes económicos directos, sino también de los indirectos derivados de un modelo ineficiente de movilidad.

Por esta razón cada vez resulta más importante aplicar políticas de prevención que ayuden a una gestión más eficiente de los flujos de tráfico y ofrezcan una respuesta rápida y adecuada ante cualquier evento. En los últimos años, las autoridades responsables de la gestión del tráfico han incrementado el número de estudios y auditorías para la prevención de accidentes y la reducción de sus niveles de severidad (ARRB Project Team, 2009). Los estudios sobre tráfico y seguridad vial son complejos de abordar ya que requieren tener en cuenta aspectos tan diversos como la realidad geográfica, las diferencias culturales de



los conductores, las condiciones de la vía y el propio comportamiento del conductor. Por esta razón, la investigación de estos temas suele adoptar múltiples perspectivas de análisis. La mayor parte de los estudios analizan los diferentes componentes de la seguridad vial centrándose en una perspectiva de análisis específica. En los últimos años, se han llevado a cabo una serie de estudios plantean el análisis integrado de todos los componentes que intervienen de forma real o potencial en la conducción, proponiendo un enfoque multidisciplinar y global (ARRB Project Team, 2009). En este sentido, NurFazillah *et al.* (2011) plantean la adopción de un punto de vista holístico que tenga en cuenta todo el ambiente de la vía para poder entender la recurrencia de accidentes dentro de un escenario más completo.

La conducción naturalista es uno de los métodos de experimentación que permiten un estudio más exhaustivo y completo del fenómeno de la conducción. Este método permite la observación continua y sin obstrucciones de un conjunto de conductores estándar en conducciones habituales analizando no sólo al propio conductor, sino también al resto de componentes que forman parte del *escenario de la conducción*: vía, ambiente y vehículo. Este método supera así a los métodos de experimentación tradicionales al llevar a cabo una observación más exhaustiva y aumentar el número de elementos de análisis. Esto le permite plantear nuevas perspectivas de análisis y llevar a cabo estudios más completos. Amediku (2000) concluye que una serie de factores como el insomnio y la falta tanto de experiencia como de atención por parte de los conductores fueron las principales causas de accidentes en un estudio llevado a cabo en un tramo de autovía Kumasi-Accra, en Ghana. Sin embargo, su estudio no ofrece un análisis cuantitativo de la importancia real de cada uno de estos errores. El método de conducción naturalista permitirá cuantificar el peso real de estos factores mediante una observación continua de los conductores.

El gran volumen de información generada con este método de experimentación aumenta la complejidad de las fases de procesamiento, análisis e interpretación de los datos. La mayoría de los estudios llevados a cabo plantean estrategias de reducción de los datos. Val y Küfen (2013) plantean una reducción desde los datos en bruto a datos agregados. Los investigadores del experimento de los *100 coches* del *Virginia Tech Transportation Institute* (VTTI) implementaron un programa de software propio que permitió reducir el volumen de datos de los que disponían, pudiendo de esta forma determinar y visualizar situaciones concretas de análisis (Laporte, 2010). Gatscha *et al.* (2010) optaron por hacer una reducción de datos en una relación 1:5 para mejorar la capacidad de cálculo del software, pasando de resoluciones temporales de 100 Hz en la fase de recogida de datos a 20 Hz en la fase de procesamiento.

Una metodología de trabajo habitual es la detección de incidentes (Tontsch *et al.*, 2013) mediante operaciones de filtrado que permiten desagregar aquellas situaciones relevantes (*situaciones positivas*) de aquellas que no lo son (*negativas*) (Balsa-Barreiro *et al.*, 2013). Pañeda (2011) desarrolló estrategias propias de filtrado para la detección de incidentes críticos (*situaciones positivas*) en estudios de conducción naturalista. La mayoría de estos filtros se aplican en función de criterios estadísticos que permiten determinar variaciones respecto a situaciones habituales de un determinado parámetro. Jovanis *et al.* (2011) apostaron por desarrollar métodos estadísticos para la discriminación de incidentes de relevancia tales como accidentes o casi-accidentes. Gatscha *et al.* (2010) analizaron tanto los modelos de distribución de los datos como una serie de parámetros estadísticos (valores mínimo, máximo, desviación típica y media) para determinar unos umbrales de riesgo que permitieran desagregar incidentes relevantes. Una estrategia semejante fue seguida por Valero-Mora *et al.* (2010) para el análisis de los datos obtenidos en el proyecto piloto español de *PROLOGUE*.

La mayor parte de las herramientas empleadas se basan en programas estadísticos (*SPSS*, *Statgraphics*) o matemáticos (*Matlab*, *Mathematica*). Lassarre *et al.* (2008) recomiendan implementar un algoritmo de cálculo propio dentro de un software adecuado como *Matlab*, *Excel* o *SPSS* para el cálculo de indicadores relevantes. Algunos autores (y/o centros de investigación) desarrollan sus propios marcos de programación adaptados a sus requerimientos de análisis, siendo la mayor parte de los programas implementados programas de software propietario, privado y de acceso muy limitado. Gatscha *et al.* (2010) desarrollaron un software para el análisis de datos en pequeños lotes que podían ser integrados en *SPSS*. Jovanis *et al.* (2011) propusieron un sistema de análisis de datos basado en el desarrollo de modelos estructurales jerárquicos que permitía predecir las decisiones al volante de los conductores. Para ello emplearon el programa *MLwiN 2.0* (Rasbash *et al.*, 2008). Val y Küfen (2013) implementaron un software propio en *Matlab* que está siendo empleado actualmente para el procesamiento y análisis de datos del proyecto EUROFOT. Este software permite integrar los datos, previamente reducidos, en una base de datos relacional. Por su parte, Dozza (2010) implementó un software propio (*SAFER100car*) diseñado de forma específica para datos del experimento de los *100 coches* del *Virginia Tech*

Transportation Institute (VTI). Este software se basa en un programa matemático al que se acopló una interfaz gráfica propia desarrollada en *Matlab* que permitía obtener una representación optimizada de los datos.

La mayoría de estudios de conducción naturalista llevados a cabo hasta el momento ofrecen una visión limitada y reducida del conjunto de los datos. Las herramientas empleadas se basan en programas de software propietario con interfaces gráficas poco optimizadas y una limitada capacidad de procesamiento de los datos. Por esta razón deben desarrollarse e implementarse nuevas herramientas de procesamiento de los datos que permitan superar los inconvenientes anteriores, incrementando la capacidad de análisis de los datos, lo que repercutirá en un aumento de los niveles de fiabilidad de los resultados finales obtenidos.

6.2. EMPLEO DE SIG COMO HERRAMIENTA

Algunos estudios confirman una ausencia tanto de metodologías de trabajo como de herramientas adecuadas para su aplicación en estudios de tráfico y seguridad vial. Mitra (2008) afirma que la mayoría de estudios centrados en la localización de *hotspots* emplean distintos métodos estadísticos (Persaud, 1999; Hagle y Witkowski, 1988) que no se combinan con ninguna herramienta visual adicional, lo que al final las convierte en herramientas poco adecuadas para su empleo por parte de departamentos científicos e instituciones oficiales relacionadas con la gestión del tráfico vial.

Los *sistemas de información geográfica* (SIG) permiten una gestión simultánea de los datos empleando una interfaz gráfica y una alfanumérica, ambas vinculadas (Figura 6-1). La interfaz gráfica permite una representación espacial de los datos, lo que ofrece de por sí una visión clara e intuitiva de dichos datos por parte de cualquier operador. Sobre esta misma interfaz gráfica es posible editar y analizar los datos mediante una serie de operaciones de geoprocésamiento. La interfaz alfanumérica presenta una alta interoperabilidad y avanzadas capacidades de procesamiento y edición de los datos. La disposición de la información en estos sistemas se basa en la localización espacial y en su representación mediante una serie de entidades geométricas. Existe una amplia bibliografía científica relativa a la base teórica y principios de funcionamiento de los sistemas SIG (Balsa-Barreiro y Brocal, 2011a y 2011b; Balsa-Barreiro, 2008; Burrough y McDonnell, 1998).

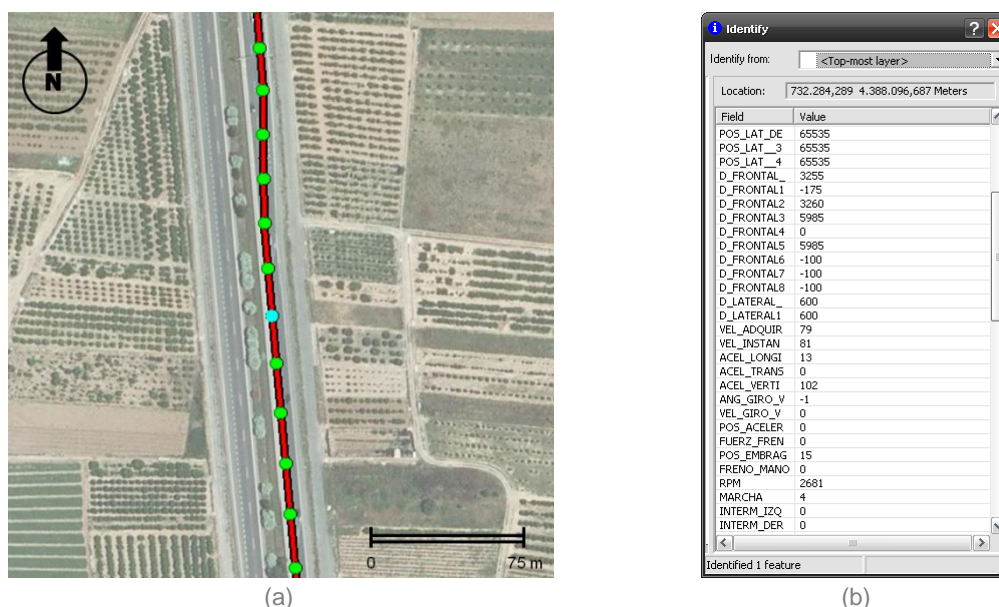


Figura 6-1: Vinculación entre (a) la información gráfica y (b) alfanumérica de uno de los puntos de registro de datos del proyecto piloto español de *PROLOGUE*.

Dentro de los estudios de tráfico, el trabajo de Mahmud *et al.* (1998) fue uno de los primeros en plantear la incorporación de la componente espacial de la información. NurFazzillah *et al.* (2011) afirmaron que la componente espacial de la información proporciona una macrovisión de los datos en su conjunto que permite integrar todo el escenario de conducción y contribuye además a una mejora en la fase de análisis de datos en estudios de gestión de tráfico. En los últimos años, algunos estudios han empleado sistemas



SIG en ciertas aplicaciones como la puesta en marcha de sistemas de control y gestión de flujos de tráfico (Malgundkar *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2009), el registro de accidentes y la identificación de puntos con alta concentración de siniestralidad (Anderson, 2007; Khan *et al.*, 2004; Steenberghen *et al.*, 2004; Hasseea, 2003; Mahmud *et al.*, 1998), la observación de niveles de contaminación acústica (Alesheikh y Omidvari, 2010), el análisis de la congestión en ambientes urbanos (Ogunbodede, 2007) y la mejora de la seguridad vial (Hu *et al.*, 2012; Pirotti *et al.*, 2010; Mitra, 2008; Amediku, 2000), entre otras. Sin embargo, la mayoría de estos estudios aplican una visión estática y se centran simplemente en una localización espacial de una serie de eventos o incidentes concretos.

El uso de sistemas SIG como herramientas permite cumplir con los requerimientos de los estudios de conducción naturalista, aunque casi ninguno de los estudios llevados a cabo emplea este tipo de sistemas SIG. Sólo el estudio de Gordon *et al.* (2009) considera esta posibilidad, aunque de forma muy abstracta y planteando únicamente una localización estática de cierto tipo de eventos de seguridad crítica en la conducción, tales como accidentes.

Los datos obtenidos en experimentos de conducción naturalista presentan una naturaleza distinta a los obtenidos mediante otros métodos de experimentación. La observación de parámetros cinemáticos, como velocidades o aceleraciones, requiere de altas frecuencias de muestreo que permitan registrar la variación espacial de estos parámetros en cortos espacios de tiempo. A pesar de que el muestreo de estos datos se hace de forma discreta, su representación sobre el espacio debe ser continua. Por esta razón es necesario implementar estrategias de representación propias para este tipo de parámetros cinemáticos, teniendo en cuenta además los grandes volúmenes de datos que deben ser procesados.

El objetivo de este capítulo es ofrecer distintas alternativas de representación cartográfica de datos de conducción naturalista a través de sistemas SIG, centrándonos especialmente en la representación de modelos continuos para datos procedentes de parámetros cinemáticos.

6.3. DATOS

Los datos empleados son los obtenidos por el INTRAS en el proyecto piloto de *PROLOGUE* llevado a cabo en Valencia durante los meses de junio y julio de 2010. Participaron cinco conductores durante cuatro días. Fueron recogidos datos de unos 80 parámetros, algunos de ellos cinemáticos como velocidades y aceleraciones, además de sus componentes intrínsecas. La *Tabla 2-5 (CAP. 2)* ofrece una revisión completa de todos los parámetros adquiridos durante este experimento.

La vía de estudio corresponde al trazado de la V-21, un tramo de autovía que une la ciudad de Valencia con la *autovía del Mediterráneo (A-7)*. El trazado de autovía consta de dos carriles en cada uno de los sentidos de circulación.

En este capítulo empleamos datos relativos a los grupos 1 (dinámica del vehículo) y 2 (interacción vehículo-conductor). Se muestran varios ejemplos de representación de estos datos en determinados tramos del trazado de ida (S-N), entre los términos municipales de Valencia y Puzol. Los ejemplos propuestos corresponden a los diferentes conductores y/o días del experimento. El software empleado es el programa *ArcGis* de la casa ESRI en su versión 10.

6.4. METODOLOGÍA

Los datos registrados por el vehículo fueron capturados a una frecuencia temporal constante. Sin embargo, los intervalos entre los sucesivos puntos de registro presentaban unos valores de distancia variables. Los valores de incrementos de distancia entre puntos (Δd) dependían de la velocidad media del vehículo en los respectivos tramos de vía. De esta forma, el vehículo experimental permitió determinar una red de puntos de registro de datos en la que la distancia entre los sucesivos puntos era irregular (*Figura 6-2.a*).

La representación de los parámetros adquiridos, sobre todo los de tipo cinemático, requiere una continuidad espacial y temporal. Por esta razón deben plantearse una metodología para que a partir de una red discreta de puntos pueda ser determinado un modelo continuo de representación de dichos datos.



La información capturada para cada día del experimento se organiza en una base de datos cuyo número de registros (filas) depende del tiempo de conducción, el cual es variable para cada conductor y/o día del experimento. Así, el tamaño de las bases de datos asociadas a cada conductor y día del experimento presentará diferencias en el número de filas, aunque no en el de columnas (mismos parámetros registrados). A partir cada uno de los registros de la base de datos se asigna una entidad puntual y se estima su posicionamiento sobre el trazado, según el procedimiento expuesto en el **CAP. 5** (Balsa-Barreiro *et al.*, 2012a). Se obtiene así una red irregular de puntos distribuida a distancias irregulares sobre el trazado estudiado.

Sobre esta red irregular de puntos se genera un modelo digital en formato ráster. Este modelo presenta una continuidad espacial y permite estimar un determinado valor en cualquier punto del trazado. El valor de entrada del modelo digital es el del parámetro cinemático estimado en cada caso, sean velocidades, aceleraciones o cualquier otro. Se emplea un procedimiento de interpolación matemática para el cálculo del modelo ráster. En nuestro caso aplicamos un método de interpolación basado en la *ponderación inversa de la distancia* (IDW) (Achilleos, 2011) estimando únicamente los valores de los dos puntos más próximos. De esta forma, el valor de un punto cualquiera del trazado depende de los valores de los puntos anterior y posterior, además de la distancia a cada uno de estos puntos. La resolución o tamaño de celda del modelo ráster calculado es de un metro (Figura 6-2.d).

A partir del modelo digital en formato ráster es posible extrapolar los valores a un modelo vectorial. Para ello se genera un *shape* de puntos equidistanciados que localizamos sobre el trazado de la vía. La distancia entre puntos es de un metro, obteniéndose un total de unos 16.000 puntos para cada sentido del trazado (Figura 6-2.b). El valor del modelo digital en cada punto se extrae mediante un procedimiento de superposición espacial entre las dos *features*, es decir, la capa de puntos y el modelo ráster.

La red de puntos equidistanciados a un metro permite subdividir el trazado en tramos. Para ello se aplica un *split* entre la red de puntos y la entidad lineal que representa el trazado. Se obtiene así un nuevo *shape* de polilíneas, compuesto por unos 16.000 tramos de vía totalmente regulares, cuya longitud es la equivalente a la distancia entre puntos. Como el número de registros en la capa de puntos equidistanciados (entidades puntuales) y tramos de vía (entidades lineales) es coincidente, se puede extrapolar la información asociada entre ambas capas. Se emplea para ello una herramienta de intersección espacial que permite transferir el valor de un determinado campo a partir de la superposición entre los elementos de dos capas de información diferentes.

Para el cálculo final de geometrías externas que expresan la magnitud de un determinado parámetro se aplica un *buffer* en función de los valores de dicho parámetro. Posteriormente se aplican, de forma eventual, una serie de operaciones gráficas de refinamiento y mejora de la geometría obtenida para garantizar la continuidad del polígono obtenido. De esta forma se obtienen una serie de modelos o perfiles continuos de representación. Un *modelo o perfil continuo* de un determinado parámetro es básicamente una representación de la variabilidad de ese parámetro a lo largo de un eje horizontal (X) correspondiente al propio trazado de la vía (Cafiso y Cerni, 2012).

En este trabajo se presentan diferentes modelos continuos de representación de algunos de los parámetros cinemáticos adquiridos durante el experimento, tal como la velocidad adquirida del vehículo, el régimen de giro del motor, la fuerza de embrague y la posición de los pedales de acelerador y embrague. Se proponen varios ejemplos de representación basados tanto en modelos vectoriales como ráster, empleando una serie de entidades geométricas (puntos, líneas y polígonos) y componentes de diseño gráfico como colores, efectos de relleno, transparencias, etc. (Balsa-Barreiro y Lois-González, 2010; Balsa-Barreiro, 2008).

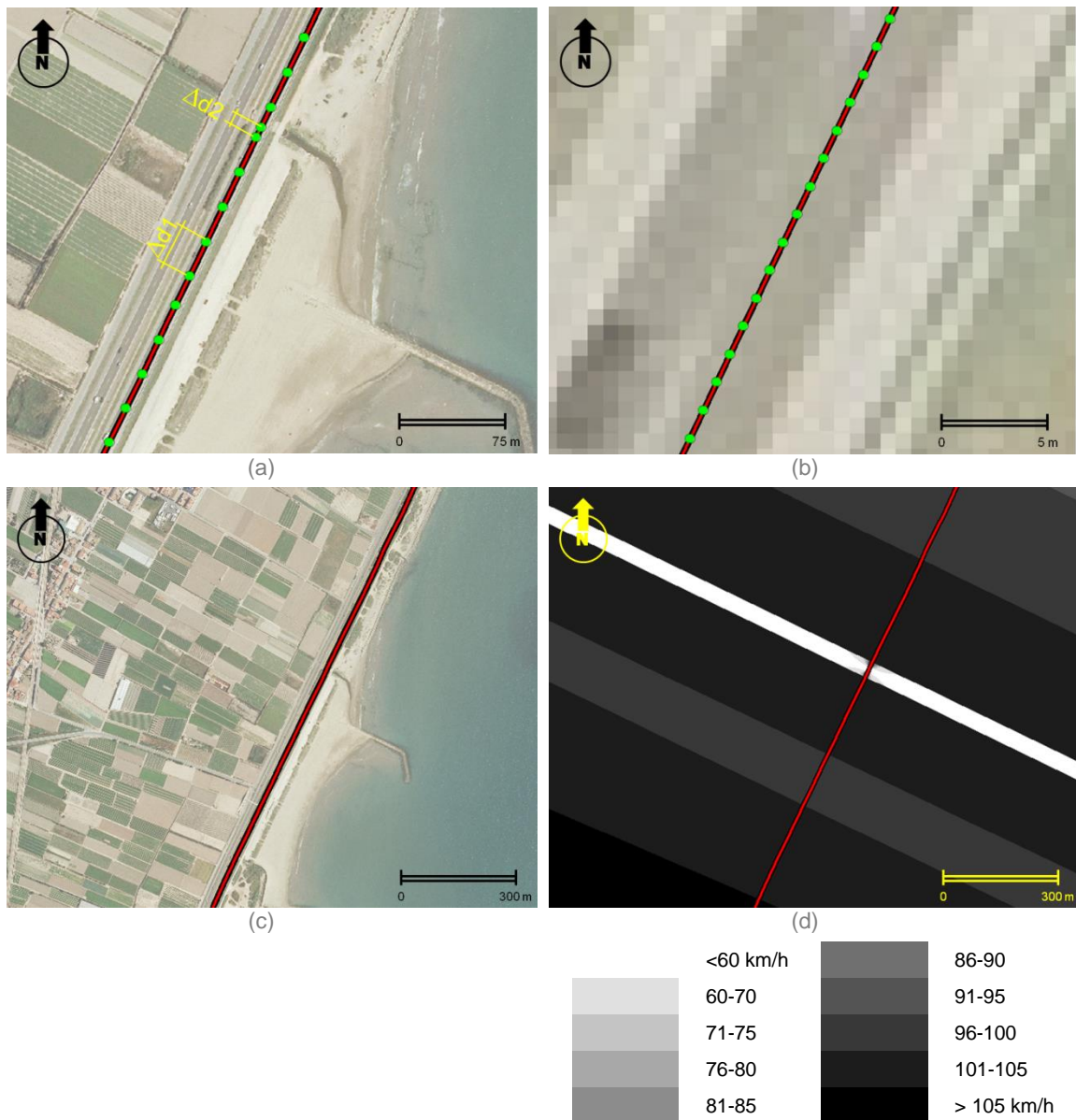


Figura 6-2: Datos obtenidos para un día concreto del experimento del proyecto piloto español de PROLOGUE: (a) *Shape* de puntos del trazado obtenido experimentalmente; (b) *Shape* de puntos del trazado con equidistancias de un metro entre ellos; (c) (d) Modelo ráster obtenido en una zona concreta de estudio a partir de la interpolación entre puntos sucesivos según el método IDW.

6.5. RESULTADOS

La primera zona de estudio se localiza aproximadamente en la mitad del trazado estudiado (Figura 6-3.a). Corresponde a un tramo de autovía que transcurre muy próximo a la línea litoral y al polígono industrial del Mediterráneo, perteneciente al municipio de Albuixech (Valencia). Este tramo presenta una longitud de unos 1,5 km y un trazado prácticamente recto en su conjunto, a excepción de una curva muy abierta localizada aproximadamente en la mitad de dicho tramo de vía (Figura 6-3.b).

La representación de la *velocidad adquirida* para los diversos conductores muestra cambios abruptos en varios puntos de este tramo de vía. En la Figura 6-4 se representa la *velocidad adquirida* de los conductores C y F durante el cuarto día de experimento. Para esta representación se emplea un elemento poligonal sobre el lado izquierdo de la vía con un fondo de color diferente para cada conductor. El empleo de atributos de color para la identificación de los respectivos conductores presenta una gran ventaja cuando se trabaja con un gran número de conductores y bases de datos muy amplias como las

habitualmente empleadas en experimentos de conducción naturalista, permitiendo establecer comparaciones de un modo rápido y efectivo.

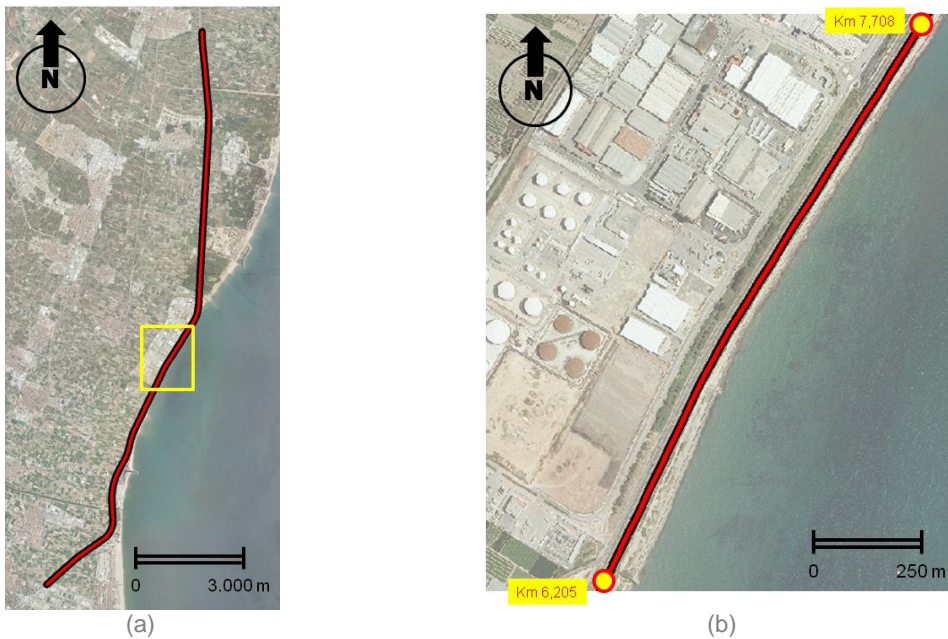


Figura 6-3: (a) Localización y (b) vista en detalle de la zona de estudio.

La magnitud del parámetro representado en cada punto del trazado se establece en función de la distancia del contorno del polígono respecto a su proyección sobre la vía. Se establece una escala gráfica determinada por dos isolíneas de referencia que representan los límites superior e inferior de *velocidad normal* para este tipo de vía. La línea azul, más próxima al trazado de la vía, representa el límite de *velocidad anormalmente reducida* (60 km/h), mientras que la línea naranja, más alejada del trazado de la vía, representa el límite de *velocidad máxima* (120 km/h).

Según lo representado en la Figura 6-4, el conductor C recorrió el tramo de vía a una velocidad muy próxima a la máxima de la vía, aunque sin llegar a superarla en ningún momento, mientras que el conductor F recorrió el mismo tramo de vía a unas velocidades mucho más modestas. De hecho, en la parte final del tramo de vía representado, su velocidad es escasamente superior a la mínima de la vía.

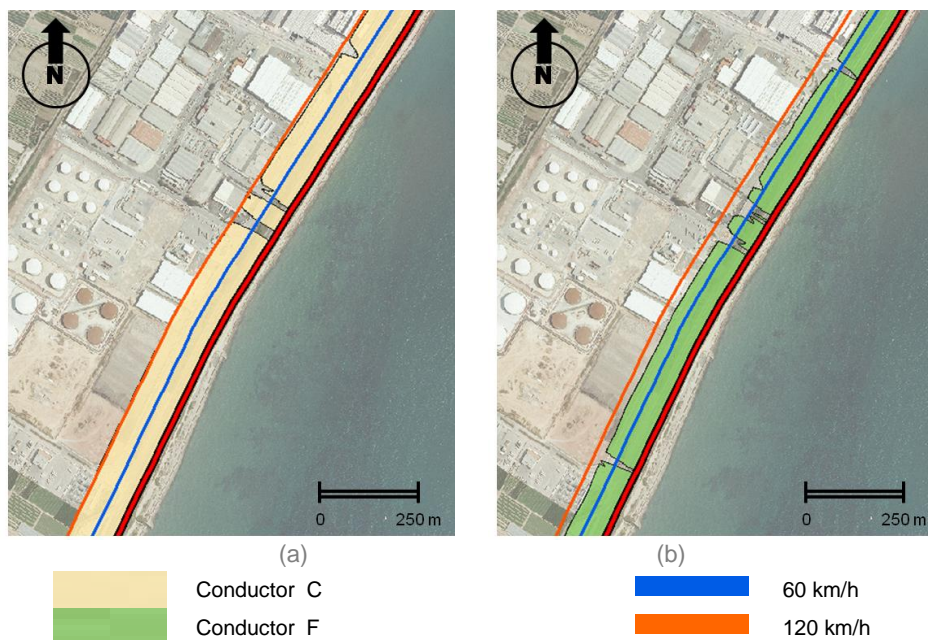


Figura 6-4: Representación del parámetro velocidad adquirida para los conductores C y F (a y b) durante el cuarto día del experimento.

En determinados sectores se observan caídas de las velocidades, en algunas ocasiones de forma abrupta. La mayor parte de estas variaciones de velocidad se producen en la parte central del tramo de vía estudiado, aunque no responden siempre a caídas de velocidades realmente producidas. La caída de velocidad del conductor C es abrupta, pasando en un solo instante de velocidades próximas a la máxima de la vía a velocidades nulas. Esto se debe a un error en el dispositivo de registro de velocidades. Las caídas de velocidades del conductor F se producen en varios puntos determinados del tramo de vía estudiado, tanto al principio como al final, observándose en el tramo central las dos más relevantes. Las caídas de velocidad en este tramo central corresponden nuevamente a errores de registro de los datos, tal y como se observa en la Figura 6-5 donde se ofrecen varias imágenes capturadas por las cámaras de video del vehículo durante el momento preciso. La revisión del menú contextual ofrece el cambio de velocidades ocurrido en el intervalo de sólo un segundo. Se observa cómo, aunque existe una deceleración del vehículo real observable en el parámetro de velocidad instantánea, el valor del velocímetro en un solo segundo de velocidades próximas a 90 km/h a 0 km/h. Las imágenes muestran como el vehículo seguía en movimiento, aunque a menor velocidad. La pérdida de velocidad en los fotogramas se refleja en el alejamiento del vehículo delantero y en una mejor definición de detalles en el pavimento de la vía en la imagen tomada con la cámara SPL en el momento posterior (Figura 6-5.f). Respecto a otras caídas de velocidad de este mismo conductor se observa una cierta progresión negativa de velocidades, lo que es indicio de una deceleración real del vehículo y no de un error de registro por parte del dispositivo de adquisición y registro de datos de velocidad.

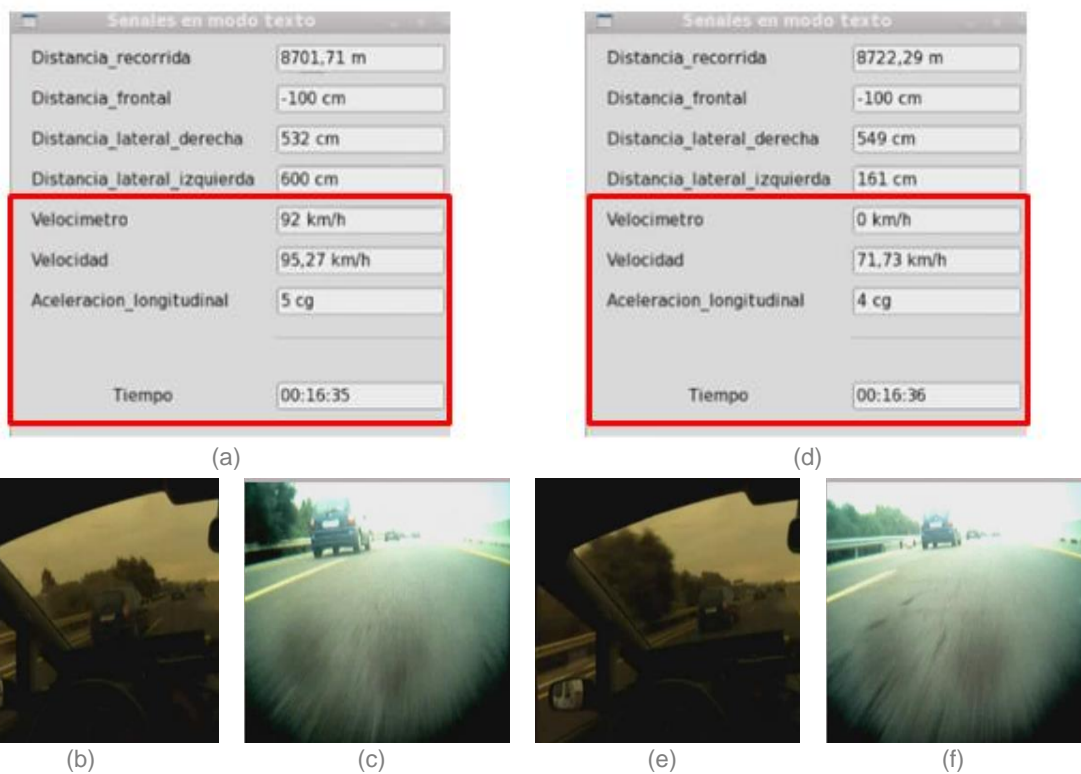


Figura 6-5: Error de medida registrada por el velocímetro en un intervalo de un sólo segundo: (a) momento anterior y (d) posterior. Imágenes video desde la cámara de escena y SPL en el momento (b) (c) anterior y (e) (f) posterior.

La segunda zona de estudio corresponde a un tramo de unos 0,6 km, localizado en la parte inicial de nuestro trayecto, entre los km 3 y 3,6 (Figura 6-6.a). El trazado en este tramo de la vía conforma una curva muy abierta hacia el Este, que se localiza inmediatamente después de la curva más pronunciada de todo el trayecto estudiado (Figura 6-6.b). Sobre esta zona de estudio analizamos los datos del parámetro de *velocidad adquirida* del conductor A durante el segundo día del experimento, ofreciéndose diversos modelos de representación de los datos (Figura 6-7). Los datos reflejan un cambio continuo de los valores de velocidad, siendo muy frecuentes las fluctuaciones extremas en tramos muy cortos. La revisión de los videos del vehículo muestra como estas fluctuaciones se deben a un fallo en el dispositivo de adquisición de los datos de velocidad.

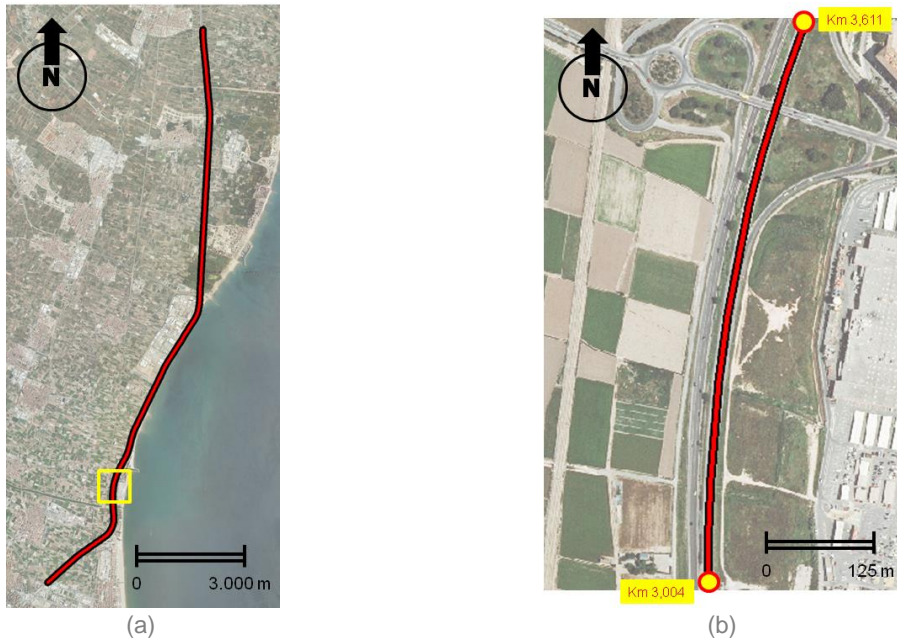


Figura 6-6: (a) Localización y (b) vista en detalle de la zona de estudio.

Las Figuras 6-7.a, 6-7.b y 6-7.c muestran una representación del parámetro *velocidad adquirida* en función de una entidad geométrica, de tipo poligonal, complementada con atributos de color a modo de relleno. La diferencia entre las respectivas figuras se basa únicamente en la componente de color empleada. La Figura 6-7.a ofrece una representación similar a la de la Figura 6-4, donde la magnitud de escala se obtiene a partir de las dos isolíneas de velocidad de referencia, la de 60 y la de 120 km/h. La Figura 6-7.b opta por una combinación de geometrías y colores. Las diferentes isolíneas de referencia se obtienen a partir de un buffer múltiple respecto a la geometría del trazado de la vía. Cada una de las isolíneas supone un incremento de 10 km/h en sentido creciente a medida que nos alejamos de la vía. La componente color se basa en una paleta discreta de 12 colores dispuesta en sentido paralelo al trazado de la vía. La gama de colores empleada va de colores fríos a cálidos a medida que aumenta la velocidad. El cambio de color se produce a partir de cada isolínea de velocidad, lo que significa que cada color cubre un intervalo de representación de 10 km/h. La Figura 6-7.c emplea unos colores muy similares a los de la figura anterior, aunque dispuestos de forma perpendicular al trazado de la vía. La paleta de colores aunque está basada en la de la Figura 6-7.b es más amplia, debido a que se opta por un modelo ráster en el que se ofrece una degradación continua de colores siendo posible obtener un número muy elevado de colores intermedios. Este modelo de representación requiere la obtención de un modelo ráster que posteriormente se enmascara o recorta dentro de la geometría del polígono de velocidades.

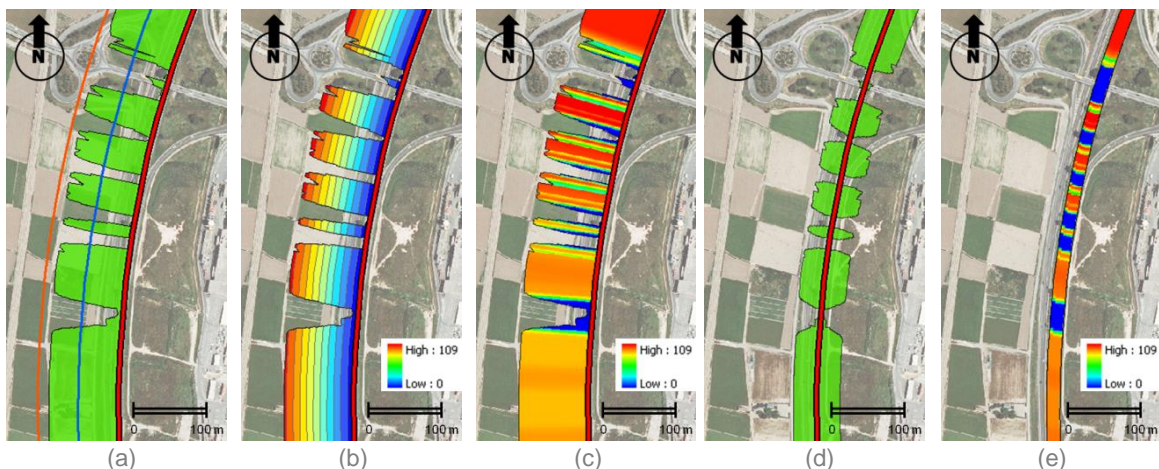


Figura 6-7: Propuestas de representación del parámetro velocidad para datos del conductor A durante el segundo día del experimento.

La Figura 6-7.d ofrece, a diferencia de las anteriores, una representación geométrica del parámetro *velocidad adquirida* a ambos lados de la vía, permitiendo de esta forma enfatizar la variabilidad espacial del parámetro representado. La Figura 6-7.e representa los valores de velocidad en función únicamente de atributos de color y descartando el uso de variables geométricas adicionales. Esta representación corresponde en realidad a un recorte del modelo ráster en función de la geometría lineal de la vía. La paleta de colores empleada es la misma que la de la Figura 6-7.c.

La tercera zona de estudio representa el tramo inicial de la vía en el que se produce la incorporación del vehículo a la autovía (Figura 6-8.a). Presenta con una longitud total de unos 1,7 km y su trazado es prácticamente recto (Figura 6-8.b).

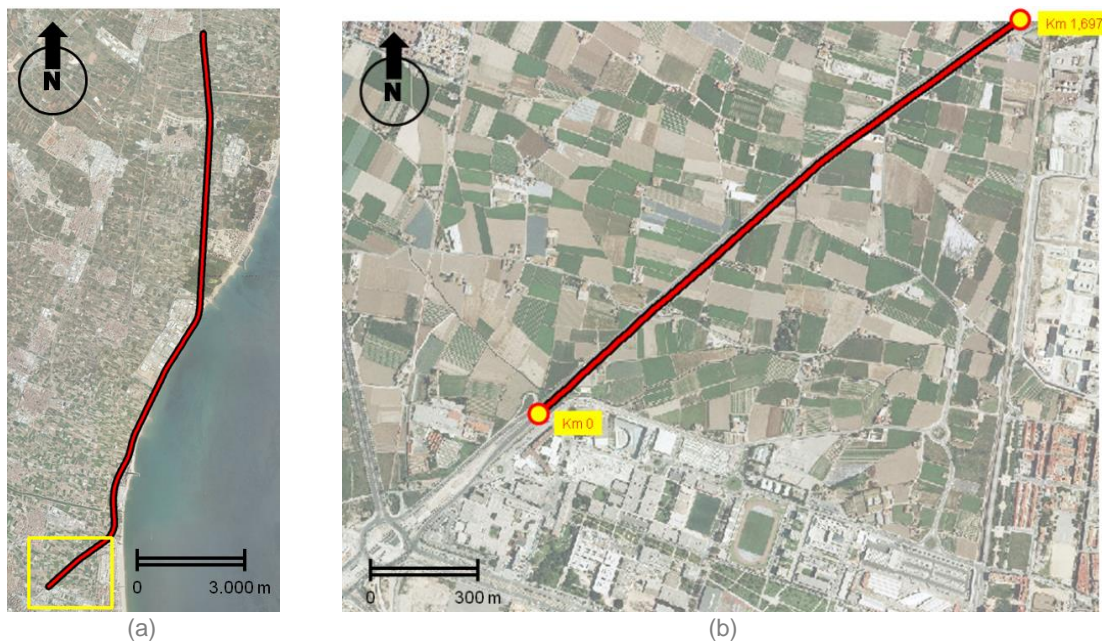
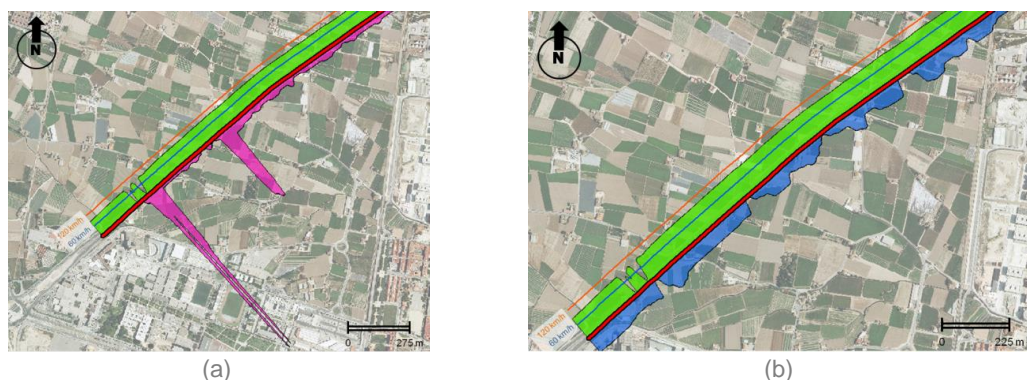


Figura 6-8: (a) Localización y (b) vista en detalle de la zona de estudio.

En la Figura 6-9 se muestran una serie de parámetros relativos al conductor A durante el segundo día del experimento. La Figura 6-9.a representa de forma simultánea dos parámetros: la velocidad del vehículo y la posición del pedal de embrague. En la Figura 6-9.b se representa la velocidad del vehículo y la posición del pedal de acelerador. La Figura 6.9.c representa de forma simultánea tres parámetros: posición de acelerador, posición de embrague y régimen de giro del motor. Por último, la Figura 6-9.d representa cuatro parámetros, los tres representados anteriormente (Figura 6-9.c), además de la posición de la palanca de marchas.

La representación conjunta de todos los parámetros anteriores presenta un gran interés en este tramo de vía en el que el conductor se incorpora a la autovía debido a la fuerte correlación entre el comportamiento de todos estos parámetros. Los sistemas SIG permiten disponer y superponer de forma simple la información procedente de varias capas vectoriales. El modelo de representación puede ser adaptado y optimizado en función de nuestras necesidades de análisis. De esta forma es posible representar los parámetros en cualquier sentido de la vía o aplicando semi-transparencias a las capas de relleno, pudiendo disponer en una sola vista un gran conjunto de información diversa.



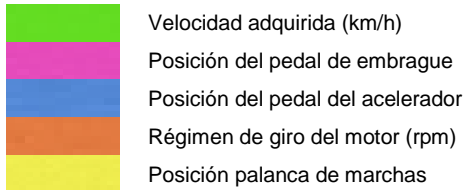
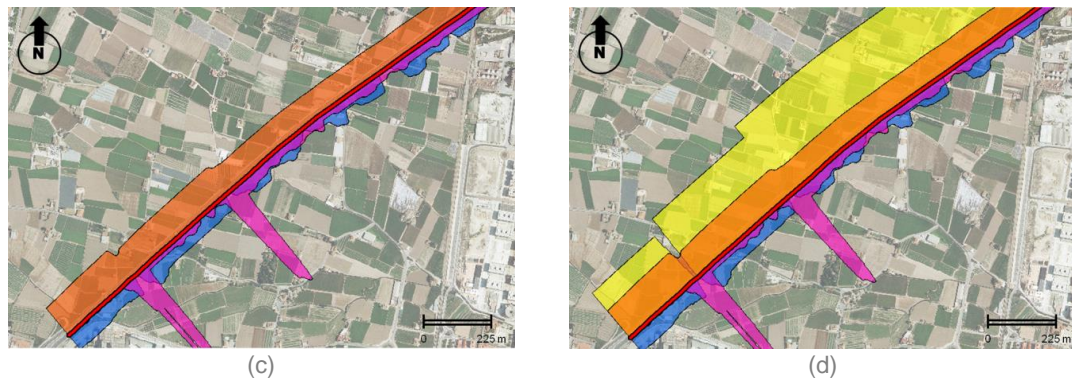


Figura 6-9: Representación de varias capas de información correspondientes a diversos parámetros relativos al conductor A durante el segundo día del experimento.

La cuarta zona de estudio se corresponde con un tramo de autovía de una longitud de 0,9 km situada en la parte final del trayecto (Figura 6-10). La particularidad de este tramo de vía es que en el momento en que se realizó el experimento se encontraba en obras. Esto supuso una ligera modificación tanto del trazado original de la vía como de su señalización. Varias señales de advertencia y reducción de velocidad fueron incorporadas.

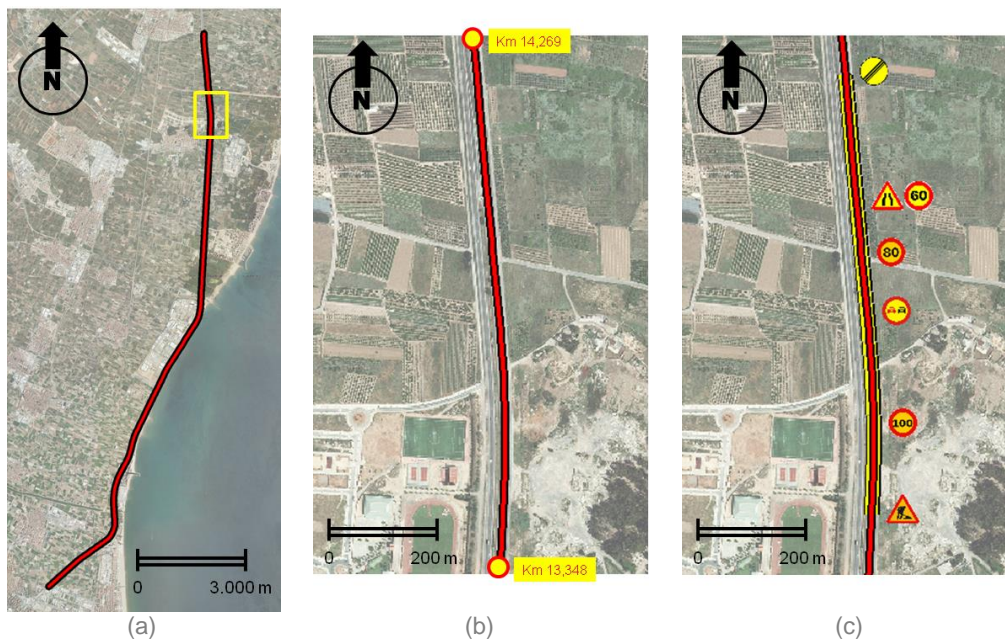


Figura 6-10: (a) Localización y (b) vista en detalle de la zona de estudio. (c) Señalización eventual por obras en este tramo de vía en el momento del experimento.

La Figura 6-11 representa las velocidades de tres conductores (B, C y F) a su paso por este tramo de vía durante los cuatro días del experimento. Cada una de las filas corresponde a un conductor mientras que cada columna hace referencia a cada uno de los días del experimento. A la derecha de la vía se representa la ubicación de la señalización temporal por obras en la vía. Las líneas de velocidades máxima y anormalmente reducida, adaptadas a la nueva señalización, son representadas a la izquierda de la vía con colores naranja y azul, respectivamente. Las velocidades de cada conductor se representan por medio de una geometría poligonal, cuyo color es diferente para cada uno de los conductores.

La interpretación de los datos representados resulta muy intuitiva. Todos los conductores sobrepasaron, durante todos los días del experimento, la velocidad máxima de la vía en el último tramo en obras, cuya velocidad máxima era de 60 km/h. Sólo el conductor C en el cuarto día redujo la velocidad del vehículo en

un momento puntual, llegando incluso a disminuir sus velocidades hasta niveles inferiores a la velocidad anormalmente reducida de la vía en ese momento.

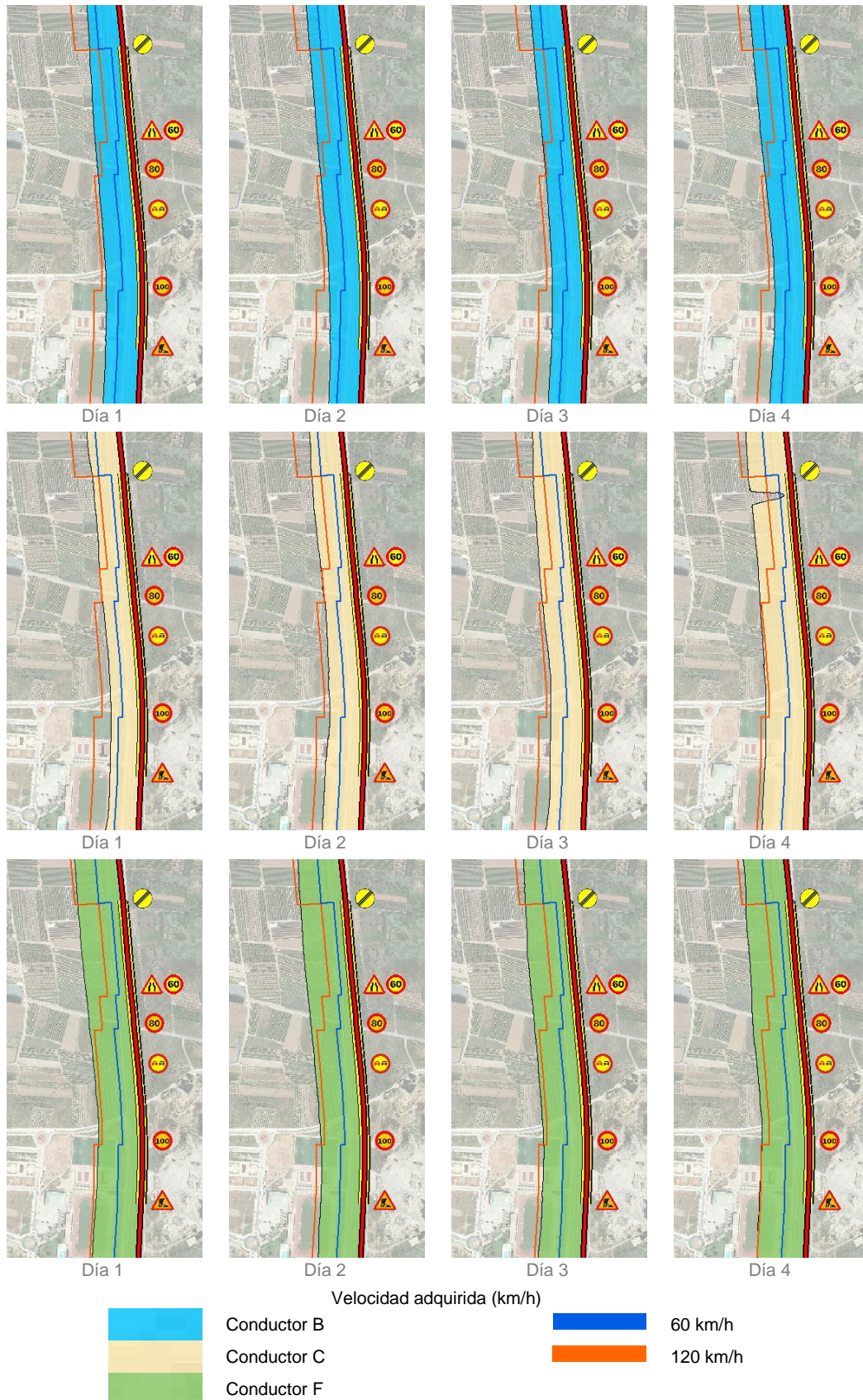


Figura 6-11: Representación del parámetro *velocidad adquirida* para los conductores B, C y F en este tramo de vía.



Aunque todos los conductores incumplieron con la velocidad máxima de la vía, el nivel de incumplimiento de los tres conductores presentó algunas diferencias. Mientras los conductores B y C incumplieron con el límite máximo de velocidad en los tramos de 80 y 60 km/h de forma casi generalizada (en tres de los cuatro días), el conductor F incumplió también en el tramo de obras precedente, el que se limitaba la velocidad a 100 km/h, llegando incluso a sobrepasar el tramo de velocidad más reducida a velocidades muy superiores a la máxima de ese tramo de vía.

6.5. DISCUSIÓN

La conducción naturalista genera grandes volúmenes de datos. Cualquier manipulación o procesamiento de estos datos supone una tarea muy compleja y costosa, tanto en términos temporales como económicos. Los resultados del procesamiento de la información son los que determinan la fiabilidad de los resultados obtenidos y, en definitiva, el éxito del experimento. Por esta razón, este tipo de experimentación requiere de metodologías y herramientas de trabajo eficientes que permitan un procesamiento óptimo de los datos.

La falta de tradición científica y el hecho de que la mayor parte de los proyectos sean estudios experimentales y presenten unas dimensiones reducidas justifican la ausencia de metodologías de trabajo generalmente aceptadas. La mayor parte de los proyectos de conducción naturalista son desarrollados por pequeños grupos de investigación que implementan sus propios programas de software particularizados para unos objetivos concretos de investigación. Estos programas ofrecen una limitada capacidad de procesamiento de la información y débiles herramientas de representación, lo que acaba dificultando posteriores procesos de análisis e interpretación de los datos. Esto supone como desventaja la falta de estandarización en el tipo de programas empleados y la imposibilidad de extrapolar el uso de estas herramientas a otros estudios y proyectos.

Una de las estrategias más habituales en este tipo de estudios es la aplicación de procedimientos de reducción del volumen de datos, sobre todo mediante dos tipos concretos: decimado y delimitación. El *decimado* del conjunto de los datos consiste en una reducción porcentual de la frecuencia de muestreo. Por su parte, la delimitación se aplica sobre una zona de interés y permite desestimar todos aquellos datos que estén fuera de dicha zona. El procedimiento de *delimitación* puede llevarse a cabo sobre zonas concretas del trazado de acuerdo a su geometría (por ejemplo tramos de curvas, cruces de vías, etc.) aunque suele ser más habitual aplicarlo a la detección de incidentes de interés. La implementación de una serie de filtros permite la detección de incidentes relevantes mediante la acotación de *situaciones positivas* de análisis y la exclusión de *situaciones negativas* (Balsa-Barreiro *et al.*, 2013).

La mayor parte de los métodos empleados ofrecen resultados poco fiables siendo habituales dos tipos de errores: (a) situaciones seleccionadas como incidentes que en realidad no lo son (*falsos positivos*) y (b) situaciones de incidentes reales que no son localizadas (*falsos negativos*) (Dozza y Pañeda, 2012). Entre las causas que dificultan el empleo de este tipo de filtros y justifican la relativamente alta presencia de errores está la imposibilidad de parametrizar el comportamiento humano y la aparición de situaciones o circunstancias de excepción, como la presencia de obras o atascos puntuales. Estos errores introducen sesgos y valores anómalos en los cálculos, lo que como resultado supone una pérdida de fiabilidad de los resultados finalmente obtenidos.

Por tanto, las metodologías habitualmente empleadas en este tipo de experimentos ofrecen soluciones parciales centradas en pequeñas aplicaciones y objetos de investigación muy específicos. Además, suelen estar implementados en software propio con una limitada capacidad computacional y carente de interfaces gráficas óptimas. Las estrategias para la detección de eventos e incidentes relevantes suelen presentar altos niveles de error, siendo frecuentes procesos de revisión manual de datos por parte del operador, lo que supone una gran inversión en términos tanto de tiempo como de dinero.

Los sistemas SIG son una alternativa para el procesamiento y representación de datos de conducción naturalista, superando muchos de los inconvenientes de los métodos tradicionales. Estos sistemas presentan una serie de potencialidades que los convierten en una excelente herramienta para la gestión y manejo de grandes volúmenes de información susceptibles de ser representados espacialmente. Pueden ser equiparados así a *sistemas gestores de bases de datos* (SGBD) por su capacidad de gestión y manipulación de la información. Sin embargo, presentan sobre estos programas un valor añadido al permitir una representación de los datos en función de su componente espacial, además de una gestión



de los mismos tanto en su parte alfanumérica como en su parte gráfica. Este tipo de sistemas tienen permiten una visión global del conjunto de los datos, presentan una alta capacidad computacional y ofrecen una interfaz gráfica muy desarrollada. En los ejemplos propuestos en este capítulo, el programa SIG empleado ha permitido interpolar valores de forma casi instantánea para una red de unos 16.000 puntos para la obtención de modelos ráster. Esta capacidad operativa suele ser considerablemente mayor que la ofrecida por programas estadísticos genéricos como *SPSS*, *Statgraphics* o *R*.

Hasta el momento actual, la aplicación de sistemas SIG en estudios de conducción naturalista apenas ha sido evaluada. La mayor parte de los trabajos sobre gestión de tráfico que emplean software SIG proponen modelos estáticos de representación, basados en la localización de cualquier tipo de evento como accidentes o tramos de vía con alta siniestralidad. Los datos de parámetros cinemáticos recogidos en experimentos de conducción naturalista requieren de modelos continuos que permita representar la variabilidad de un determinado parámetro en intervalos espacio-temporales muy cortos. En este sentido, Cafiso y Cerni (2012) afirman que la medida de velocidades en estaciones puntuales induce a estimaciones erróneas y sesgadas del fenómeno estudiado, proponiendo como alternativa la elaboración de *perfiles continuos* de velocidad.

Los SIG permiten obtener una representación cartográfica de los datos de conducción naturalista. La representación de los parámetros cinemáticos se lleva a cabo mediante modelos continuos en los que la magnitud del parámetro se representa en función de una serie de entidades geométricas de tipo lineal y una serie de atributos de color. En este capítulo hemos mostrado diferentes propuestas de representación a través de una serie de ejemplos. Las representaciones propuestas han intentado ser claras, sencillas y fácilmente interpretables por parte de cualquier operador, sin necesidad de que fuera necesariamente experto en la materia. Esto favorece la posibilidad de que más operadores potenciales puedan emplear estos datos y permite la incorporación de equipos de trabajo multidisciplinares que aporten soluciones más creativas (NurFazzillah *et al.*, 2011).

Los sistemas SIG incorporan una serie de herramientas que permiten obtener una visión global e integral del conjunto de los datos. Entre otras se puede destacar la opción de *zoom dinámico* y la superposición entre capas. El zoom dinámico permite ajustar la resolución y el volumen de datos representado, optimizando la capacidad de memoria del ordenador. La organización y superposición de la capas de información o *layers* permite una representación simultánea de distintos tipos de datos. La superposición de capas permite llevar a cabo análisis en detalle de la evolución de determinados parámetros que presentan altos niveles de correlación. Así, por ejemplo, cuando el vehículo disminuye su velocidad, debe ser registrada una reducción de la posición de la palanca de marchas, un descenso de la fuerza de aceleración y/o la aparición de una fuerza de frenada. De la misma forma, la reducción en el régimen de giro del motor se produce en el momento en el que el conductor cambia de marcha y pisa el pedal de embrague.

La Figura 6-12 muestra la diferencia entre un modelo de representación de datos en un programa software propio como el empleado por el INTRAS en el proyecto piloto *PROLOGUE* desarrollado en España (Figura 6-12.a) y la representación obtenida con un sistema SIG, donde se representan de forma simultánea cuatro capas de información (Figura 6-12.b). La detección de incidentes en el primer caso se determina en el momento en que se observan desviaciones anormales en los distintos parámetros, tanto de forma absoluta como relativa. La representación SIG ofrece una representación más clara e intuitiva los datos, donde además se tiene en cuenta la posición espacial.

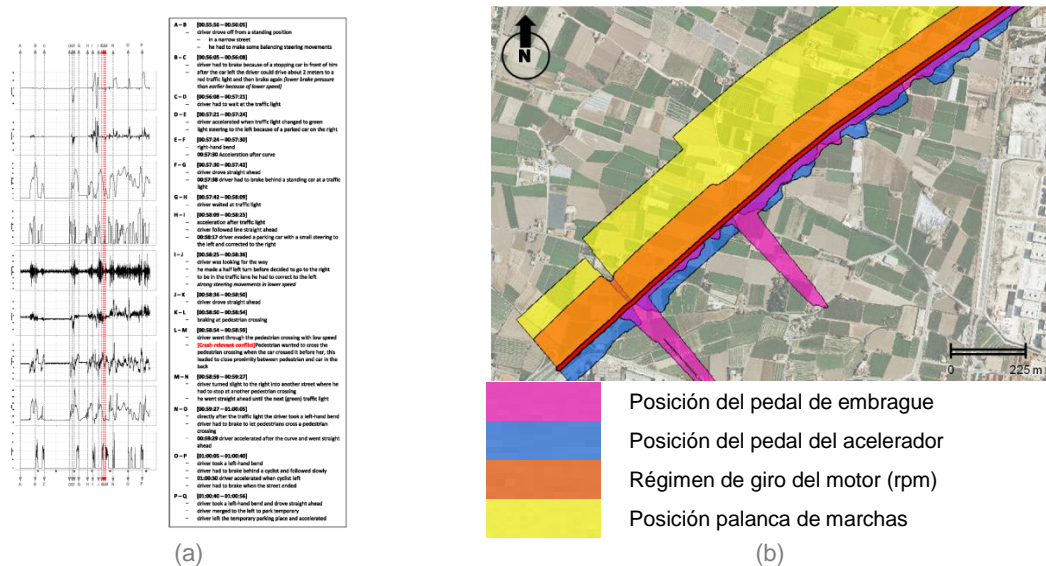


Figura 6-12: Solape de información y detección de incidentes relevantes en los datos del proyecto piloto español de PROLOGUE empleando distintas herramientas y metodologías: (a) programa de software empleado por el grupo de trabajo del INTRAS; (b) representación cartográfica con programas de software SIG. Fuente: (a) Valero-Mora et al. (2010).

Esta visión más integradora del conjunto de los datos permite a los sistemas SIG ampliar las posibilidades de análisis de dichos datos. Balsa-Barreiro *et al.* (2014) plantean el uso de estos sistemas para llevar a cabo procedimientos de control de calidad más efectivos. La representación cartográfica permite una detección rápida de errores en los datos, tanto de tipo absoluto como de tipo relativo. Los errores de tipo absoluto suelen ser fácilmente localizables mediante la estimación de valores umbrales máximos y/o mínimos. Los errores de tipo relativo son aquellos cuyos valores son anormales dentro de un contexto específico. Su detección suele ser más complicada que en el caso de los errores de tipo absoluto. Muchos de los programas habitualmente empleados presentan problemas y escasa fiabilidad en la detección de este tipo de errores. La representación cartográfica de los datos permita una estimación rápida y efectiva de los errores relativos potenciales, ofreciendo así una metodología de trabajo más eficiente que los métodos habitualmente empleados. Los sistemas SIG permiten alcanzar procedimientos más automáticos para la detección de este tipo de errores, limitando la carga de trabajo manual derivada de la revisión de grandes volúmenes de datos (Balsa-Barreiro *et al.*, 2014). Este tipo de procedimiento presenta una gran importancia en proyectos de conducción naturalista dada la relativa frecuencia con que pueden producirse pérdidas de datos y los altos costes derivados de la puesta en marcha de este tipo de estos proyectos.

En función de los aspectos comentados anteriormente, podemos resumir en una serie de puntos las ventajas de una metodología de trabajo basada en sistemas SIG respecto a las metodologías habitualmente empleadas:

- Supone una estandarización de herramientas y metodologías de trabajo evitando (o reduciendo) el uso de software propietario. De esta forma, el uso de sistemas SIG como herramienta permite cumplir con las propuestas de algunos estudios previos, como el de Valero-Mora *et al.* (2010) a raíz de su experiencia en PROLOGUE, que plantearon la necesidad de implementar un gran software para estudios de conducción naturalista que fuera desarrollado por parte de todos los centros de investigación con experiencia en proyectos de este tipo.
- Presenta una interfaz amigable de uso intuitivo que permite ser operado por parte de cualquier usuario no experto.
- Presenta unas herramientas de trabajo y unos estándares de representación que permiten mejorar y adaptar la representación de los datos en función de los requerimientos del operador.
- La gran capacidad computacional de los sistemas SIG permite la representación de grandes volúmenes de información.



- Los sistemas SIG cuentan con herramientas sencillas que permiten la selección, filtrado y/o extracción de conjuntos de datos a partir de la interfaz tanto gráfica como alfanumérica.
- La edición de la información tanto gráfica como alfanumérica es simple.
- Permite una visión integrada del conjunto de la información, siendo posible llevar a cabo eficientes controles de calidad de los datos.
- Reducción de costes. Existen programas SIG comerciales de bajo coste e incluso existen algunos programas SIG desarrollados en software libre y de acceso gratuito.
- Una mayor explotación de los datos de conducción naturalista al ser posible la manipulación y procesamiento de estos datos con herramientas estándares de bajo coste.

Por su parte, si se tiene en cuenta la perspectiva de los distintos sujetos involucrados, la representación de datos de conducción naturalista con sistemas SIG permite plantear y analizar de forma más exhaustiva una serie de objetivos de investigación:

- Grupos de investigación. Los SIG permiten llevar a cabo procedimientos de control de calidad rápidos y efectivos sobre los datos. En sentido inverso, los investigadores pueden averiguar si existe alguna circunstancia habitual en la que se produzcan pérdidas habituales de datos o si es posible plantear nuevas estrategias de captura de datos con mejores resultados.
- Operadores de tráfico. A través de la representación cartográfica es posible evaluar del grado de cumplimiento de las normas viarias por parte de un determinado conductor, analizar si la señalización viaria de una determinada vía se ajusta a la conducción real, estudiar cuales son los patrones habituales de conducción por parte de un grupo de sujetos, evaluar el grado de sostenibilidad de la conducción de un determinado sujeto, estudiar la presencia de comportamientos anómalos, etc.
- Empresas de fabricación de dispositivos electrónicos y empresas automovilísticas. La representación espacial de algunos parámetros cinemáticos en momentos en los que el conductor emplea algún dispositivo de *a bordo* permite evaluar si existe alguna tendencia habitual durante la conducción en la que los conductores tienden a manipular estos dispositivos y de qué forma lo hacen. En función de los resultados, estas empresas pueden adaptar sus dispositivos al tipo de conducción más habitual aplicando, por ejemplo, mejoras ergonómicas y haciendo más sencillo su empleo.

El empleo de sistemas SIG para la representación y procesamiento de datos de conducción naturalista presenta una serie de ventajas sobre las metodologías tradicionalmente empleadas en términos de eficacia y eficiencia. Esta metodología permite reducir el tiempo de análisis y, en consecuencia, los costes económicos asociados al proyecto. Al mismo tiempo favorece una mayor explotación de la información simplificando los procedimientos de desagregación de situaciones positivas de análisis y obteniendo unos menores niveles de error. La implementación de modelos más eficientes de control de calidad permite detectar, de una forma más rápida y fiable, posibles errores y/o pérdidas de datos. La representación cartográfica de los datos simplifica la interpretación de los datos basándose en modelos de representación más intuitivos y en la propia representación espacial de los datos, que permite analizar los niveles de correlación entre el trazado y el comportamiento del conductor al volante. Además este modelo permite obtener una visión global y una representación de los datos en su conjunto, considerablemente más amplia que la obtenida con las metodologías y herramientas tradicionalmente empleadas. Todas estas ventajas permiten incrementar la fiabilidad de los resultados obtenidos y las probabilidades de éxito del proyecto de investigación.

Finalmente, este modelo de representación requiere de información de posicionamiento. Vuelve a ser necesario plantear estrategias eficientes para la adquisición de datos en el experimento y reducir el tiempo y la frecuencia de pérdidas ocasionales de datos. En el caso de experimentos concluidos en los que hayan localizado pérdidas será necesario implementar estrategias de recuperación de datos como la propuesta en el **CAP. 5**.



CONCLUSIONES

Este capítulo presenta una metodología de trabajo para estudios de conducción naturalista basada en el uso e implementación de sistemas SIG. Estos sistemas presentan una alta capacidad operativa, un modelo de procesamiento de los datos propio que permite la edición de los datos en una interfaz gráfica y una alfanumérica. La interfaz gráfica presenta un gran desarrollo y permite una representación cartográfica de los datos a partir de su componente espacial. Se muestran algunos ejemplos concretos de representación de parámetros cinemáticos empleando perfiles o modelos continuos de representación. Los ejemplos propuestos ofrecen una visión clara e intuitiva, fácilmente interpretable por cualquier operador. Estos sistemas cuentan con una serie de herramientas que permiten obtener una visión global e integradora del conjunto de los datos, que hace posible llevar a cabo otros tipos de estudios distintos a los actuales. El empleo de sistemas SIG incrementa los niveles de eficacia y eficiencia asociados a este tipo de proyectos al permitir un incremento del porcentaje de datos analizados respecto al total de datos adquiridos durante el proceso de experimentación, considerablemente superior a los porcentajes obtenidos con las metodologías y herramientas tradicionalmente empleadas. Este capítulo propone el uso de sistemas SIG como herramienta-metodología estándar, la cual permite reducir costes y ampliar los niveles de conocimiento asociados a este tipo de proyectos al favorecer un acceso a este tipo de datos por parte de más profesionales.



CAP. 7

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS OBTENIDOS EN PROYECTOS DE CONDUCCIÓN NATURALISTA EMPLEANDO SISTEMAS SIG. ESTUDIO SOBRE PATRONES DE CONDUCCIÓN



Capítulo 7

RESUMEN	203
7.1. INTRODUCCIÓN	203
7.2. DATOS Y ZONA DE ESTUDIO	206
7.3. METODOLOGÍA	207
7.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS	207
7.5. DISCUSIÓN	223
CONCLUSIONES	226



RESUMEN

El comportamiento habitual al volante de una determinada población se define por sus *patrones de conducción*. El estudio de estos patrones presenta una gran complejidad en todas las fases de experimentación, desde la selección de muestras representativas hasta el análisis e interpretación de los datos experimentales. La mayoría de estudios llevados a cabo hasta el momento se limitan al estudio de la *velocidad* como parámetro cinemático más representativo. La falta de una metodología de trabajo ampliamente aceptada, junto a los nuevos desafíos planteados por este tipo de estudios, hace necesario el desarrollo e implementación recurrente de nuevos métodos de experimentación y nuevas metodologías de trabajo. La conducción naturalista permite obtener más datos sobre patrones de conducción y plantear un estudio más exhaustivo. En este capítulo se propone un método de trabajo propio para el estudio de patrones basado en datos de conducción naturalista, teniendo en cuenta información de varios parámetros cinemáticos relativos a la conducción. Este método permite una representación óptima y global de los datos, la cual facilita posteriores fases de análisis e interpretación de los mismos.

7.1. INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre hábitos y modelos habituales de conducción llevados a cabo sobre amplias muestras de conductores permiten extraer una serie de conclusiones acerca de las tendencias generales al volante de un determinado estrato o grupo social. Los *patrones de conducción* son modelos obtenidos a partir de la parametrización de las tendencias habituales y comportamiento al volante por parte de un grupo, más o menos extenso, de sujetos. Existen múltiples enfoques de análisis para el estudio de patrones de conducción atendiendo o bien al comportamiento al volante del propio conductor o bien a los parámetros dinámicos de su conducción. Egea-Caparrós (2001) se centra así en el primero de los puntos anteriores analizando los factores perceptivos, cognitivos y de respuesta del conductor. Delgado *et al.* (2013) elaboran un estudio en el sentido inverso, evaluando cómo la conducción influye sobre la postura física del conductor.

La mayoría de estudios actuales sobre este tema establecen una relación directa entre el comportamiento del conductor en determinadas circunstancias con la propia ejecución de la tarea de conducción. En este sentido, algunos estudios de conducción naturalista estimaron el grado de influencia que el uso de ciertos dispositivos al volante tenía sobre la conducción. Tanto Strayer y Drews (2004) como Chisholm *et al.* (2006) evaluaron, en sendos estudios, los efectos sobre la conducción del uso del móvil al volante y las diferencias encontradas entre los conductores mayores y los más jóvenes. Valero *et al.* (2010) analizaron la influencia sobre la conducción del uso de sistemas IVIS (*In-vehicle information systems*), mientras que Harvey (2011) modeló y evaluó las interacciones de los conductores con este tipo de dispositivos.

Existe un conjunto numeroso de estudios sobre patrones de conducción centrados en la evolución de los parámetros dinámicos del vehículo con objeto de analizar diferentes aspectos como el nivel de eficiencia de la actividad de la conducción, la mejora de la planificación urbana en función de los flujos de tráfico, la identificación de comportamientos anómalos en ciertos grupos de conductores, la evaluación del éxito de determinados programas de conducción, etc. Dentro del primer grupo de estudios, Bratt y Ericsson (1999) evaluaron el nivel de relación entre determinados parámetros de conducción, consumo de combustible y emisión de contaminantes por parte de una serie de vehículos y conductores. Berry (2010) evaluó cómo la agresividad al volante influye en el consumo real del vehículo. Para ello cuantificó los niveles de agresividad según tres factores basados en las características del vehículo y la velocidad de conducción. Dicho estudio concluyó que para la reducción de los niveles de consumo de combustible los conductores más agresivos deberían centrarse en reducir aceleraciones, mientras los menos agresivos deberían conducir a unas velocidades inferiores.

Ya centrados en los vehículos eléctricos, Pasaoglu *et al.* (2012) y Thiel *et al.* (2012) analizaron, en sendos experimentos llevados a cabo en varios países europeos, los patrones de conducción de varios sujetos con objeto de conocer y mejorar el funcionamiento de este tipo de vehículos. Karabasoglu y Michalek (2013) estudiaron en diferentes tipos de vía cómo los diferentes patrones de conducción influyen sobre los beneficios económicos y medioambientales de los vehículos eléctricos respecto a los convencionales. En



zonas urbanas, como el centro de la ciudad de Nueva York, los vehículos eléctricos lograron reducir el nivel de emisiones en un 60% y de costes en un 20%, mientras que en vías de alta capacidad apenas se lograron reducciones significativas. A unas conclusiones similares llegó el estudio de Fontaras *et al.* (2008), en el cual se estimó que la reducción de combustible en vehículos eléctricos era de un 40-60% respecto a los vehículos convencionales, llegando incluso a porcentajes superiores en ambientes urbanos donde los vehículos efectúan múltiples paradas y circulan a bajas velocidades. Este mismo estudio demostró además que, a velocidades superiores a los 95 km/h, los niveles de consumo de combustible son similares tanto en vehículos eléctricos como en los convencionales. El estudio de Karabasoglu y Michalek (2013) concluye además que el tipo de vía y la heterogeneidad de conductores (y su comportamiento al volante) presentaba una notable influencia sobre los niveles de reducción, tanto de costes como de emisiones, de los vehículos eléctricos sobre los convencionales. Por su parte, Sharer *et al.* (2007) demostraron que los vehículos eléctricos son mucho más sensibles a patrones de conducción agresiva que los vehículos convencionales.

Varios estudios incorporan la variable espacial y analizan las diferencias entre diversos ambientes y/o escalas geográficas. Ericsson *et al.* (2004) estudiaron los patrones de conducción y sus niveles de emisiones en diferentes ambientes y ciudades europeas dentro del proyecto *Artemis-WP 1040* llevado a cabo en Nápoles (Italia), Budapest (Hungría) y Malmö (Suecia) en el año 2002. Este estudio comprendía dos partes. En la primera se llevó a cabo una descripción de los patrones teóricos de conducción en las diferentes ciudades y tipos de vía. En la segunda parte se analizó la variabilidad de dichos patrones en función de una serie de variables tales como la presencia de cruces señalizados, características y funcionalidad de la vía, etc. Los resultados obtenidos permitieron confeccionar un modelo explicativo de cómo los patrones de conducción eran condicionados por el ambiente externo, mostrando diferencias relevantes entre las distintas ciudades y/o tipos de vía analizados.

Ericsson (2000a y 2000b) evaluó el comportamiento al volante de una serie de conductores en áreas urbanas. Para ello desarrolló un experimento de conducción naturalista en el que participaron 29 familias elegidas al azar a las que se asignaron cinco vehículos. Ambos estudios permitieron plantear varios modelos de predicción relativos al comportamiento al volante de los conductores. Uno de ellos fue un modelo inicial de predicción de la variación de velocidad del vehículo, el cual presentó un aceptable nivel de fiabilidad. El resto de los modelos de predicción presentaron, sin embargo, unos altos niveles de incertidumbre. Entre otros resultados relevantes, este estudio demostró cómo la velocidad variaba en función del diseño y función de la vía, observándose una reducción clara de velocidades en los barrios del centro financiero de las ciudades (CBD) o cómo las vías locales, aunque representaban sólo el 18% de la distancia recorrida, suponían en torno a un 30% del tiempo de conducción. Este mismo estudio puso de manifiesto además algunas tendencias observadas como que los conductores mayores, las mujeres y aquellos conductores más experimentados tendían a forzar menos el vehículo cuando aceleraban o cómo los conductores varones jóvenes con más experiencia tendieron a hacer cambios más eficientes entre la segunda y la tercera posición de la palanca de marchas.

Varios estudios sobre patrones de conducción se centran en la influencia de ciertos condicionantes sociales. Kington *et al.* (1994) evaluaron la influencia de una serie de factores socio-demográficos y relativos a la salud en conductores de más de 50 años. Marshall *et al.* (2007) estudiaron los patrones al volante de conductores de más de 70 años con o sin uso adicional de dispositivos electrónicos de posicionamiento. Hildebrand *et al.* (2000) analizaron los patrones de conducción e índices de accidentabilidad de un grupo de personas de edad avanzada y procedente del mundo rural con objeto de evaluar si este grupo debía someterse a programas especiales para la revisión de su permiso de conducción. Lotan y Toledo (2007) analizaron la conducción de jóvenes israelíes que acababan de obtener su permiso de conducción y demostraron claras diferencias en su comportamiento al volante durante el tiempo de duración del programa de aprendizaje (GDL), en cuyos tres primeros meses los conductores noveles van acompañados obligatoriamente de un adulto. Williams (2003) hace una revisión bibliográfica de los trabajos más relevantes relativos a patrones al volante de conductores jóvenes para analizar cuáles son las situaciones en las que el riesgo de accidente se incrementa. Este estudio concluyó que el riesgo se incrementaba exponencialmente en los grupos más jóvenes respecto a los de más edad en momentos de conducción nocturna en los que el conductor iba acompañado.

Algunos estudios analizan el grado de afectación sobre la conducción de una cierta discapacidad de tipo físico o psíquico. Fonda *et al.* (2001) evaluaron la influencia sobre la conducción de síntomas depresivos en conductores mayores observando si en algún momento se producía un cese o reducción de la actividad al volante. Van Landingham *et al.* (2013) plantearon un estudio similar, aunque centrado en



pacientes con glaucoma. Participaron 139 conductores de edades avanzadas diagnosticados con esta enfermedad, 81 confirmados y 58 sospechosos de padecerla. El análisis de los patrones de conducción pretendía superar las contradicciones de estudios precedentes, algunos de los cuales confirmaban un incremento de accidentes en este grupo de pacientes (Tanabe *et al.*, 2011; Rubin *et al.*, 2007), mientras otros rechazaban esta hipótesis (McGwin *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 1998). Los resultados mostraron que un 23% de los pacientes con glaucoma y un 6,9% de los sospechosos de tenerla habían experimentado ceses repentinos de su actividad al volante.

La mayor parte de estudios sobre patrones de conducción se centran en diferentes ambientes y tienen en cuenta una serie de condicionantes. Los estudios de Ericsson (1999 y 2000) y Ericsson *et al.* (2004) analizaron la variabilidad de patrones de conducción dentro de áreas urbanas. Sabback y Mann (2005) evaluaron la influencia de las condiciones climáticas en patrones de conducción de gente mayor a partir de un grupo de 40 participantes en Nueva York y en Florida. Los resultados de este estudio demostraron que el 60% de los participantes de Nueva York alteraron su conducción en invierno, mientras que el porcentaje en Florida fue de sólo el 20%. James y Goldman (1971), y posteriormente Evans y Rothery (1976), analizaron los patrones de varios conductores en sectores próximos a cruces señalizados, las denominadas *zonas de dilema*, teniendo en cuenta el tamaño de los vehículos. Fueron determinadas tres categorías de vehículos: (a) pequeños, (b) familiares y (c) camiones y autobuses. El estudio de James y Goldman (1971) analizó estos patrones en diferentes momentos del día, bajo diferentes condiciones meteorológicas y en función de una serie de aspectos tales como el sexo del conductor y de si iban o no acompañados. Los resultados mostraron diferentes patrones para las tres categorías de vehículos tanto en función de las condiciones meteorológicas (presencia o ausencia de precipitaciones) como del momento del día. Este mismo estudio demostró además cómo los conductores de los vehículos familiares que iban acompañados eran más precavidos a la hora de pasar por intersecciones.

Otros resultados obtenidos en estudios de este tipo destacan, a modo de ejemplo, grandes diferencias en los tipos de conducción en función del sexo. Las mujeres tienden a conducir menos de noche (Healey, 2001), tienden a parar más veces en un mismo trayecto (McGuckin y Murakami, 1999) y son mejores conductores que los hombres (The Guardian, 2001). El tipo de vehículo también influye en los patrones de conducción, no sólo en cuanto a las velocidades sino también al tipo y a la duración de los trayectos recorridos, tal y como demostró el proyecto sobre conducción eléctrica *CABLED* puesto en marcha en varias ciudades británicas entre los años 2009 y 2012 (The Ecologist, 2010).

Uno de los métodos de experimentación que mejor se adapta al estudio de patrones es la conducción naturalista, que permite una observación exhaustiva del comportamiento al volante de grupos de conductores en ambientes reales. Sin embargo, a los propios inconvenientes de este método de experimentación (Balsa-Barreiro *et al.*, 2012a y 2013), se añaden una serie de problemáticas relacionadas con su aplicación a este tipo de estudios como la identificación de los parámetros que deben ser medidos y su propia cuantificación. Ericsson (1996) elabora una metodología en la que explica cómo medir patrones de conducción, mientras que Bratt y Ericsson (1999) describieron patrones de conducción empleando dos únicos parámetros cinemáticos: la velocidad y la aceleración del vehículo. Este mismo estudio analiza, además, cómo influyen los tiempos de medida de tiempo y distancia en el registro de datos, encontrando diferencias significativas e irregulares en los resultados obtenidos. En cuanto a la representación, la mayor parte de los estudios optan por una representación estática y un análisis puramente estadístico de los datos, dando poca importancia a la representación espacial.

En este capítulo se lleva a cabo un estudio genérico sobre patrones de conducción empleando datos experimentales obtenidos a partir del método de conducción naturalista. La aplicación de este modelo de experimentación en este tipo de estudios presenta una tradición científica muy limitada, que se pone de manifiesto en la ausencia de metodologías de trabajo habituales y en una falta de trabajos científicos de referencia. En este capítulo se presenta una propuesta para el análisis y procesamiento de datos en este tipo de estudios basándose en una serie de herramientas de análisis y modelos de representación propios.

7.2. DATOS Y ZONA DE ESTUDIO

Los datos empleados son los obtenidos por el INTRAS en el proyecto piloto de *PROLOGUE* llevado a cabo en Valencia durante los meses de junio y julio de 2010. Participaron cinco conductores durante cuatro días cada uno de ellos. Una descripción general de los datos y la zona de estudio fue presentada en el **CAP. 2-5**.

El trazado del experimento presentaba dos partes. Una primera que era común a todos los conductores y una segunda que variaba cada día del experimento. El procedimiento de recuperación de datos de posicionamiento implementado en el **CAP. 5** fue aplicado en la primera de las partes, correspondiente a un tramo de vía recorrido en ambos sentidos de circulación por los cinco conductores durante los cuatro días del experimento. El trazado estudiado se corresponde con un tramo de la autovía V-21 que conecta la autovía del Mediterráneo con la ciudad de Valencia. La longitud aproximada de este tramo de vía es de unos 16 km. El tiempo de conducción del tramo recorrido fue de una media hora aproximada, aunque se observó una cierta variabilidad temporal, sobre todo en el tramo de vuelta, donde se produjeron ralentizaciones del tráfico debido a situaciones de congestión, lo que acabó dilatando el tiempo de conducción.

Los datos registrados muestran la incorporación y posterior salida del vehículo de la vía en los tramos inicial y final del trazado, respectivamente. El trazado estudiado es muy similar en los sentidos de ida y vuelta, observándose una ligera diferencia en el tramo final del sentido de ida y el tramo inicial del de vuelta debido a una asimetría entre los carriles de deceleración y aceleración, respectivamente (Figura 5-2 en **CAP. 5**). La vía de estudio presenta un trazado rectilíneo, pudiendo subdividirse en cuatro tramos a partir de un mismo número de curvas. La primera de ellas, situada más próxima a la ciudad de Valencia en el trayecto de ida, es la que presenta un mayor grado de curvatura (Figura 7-1).

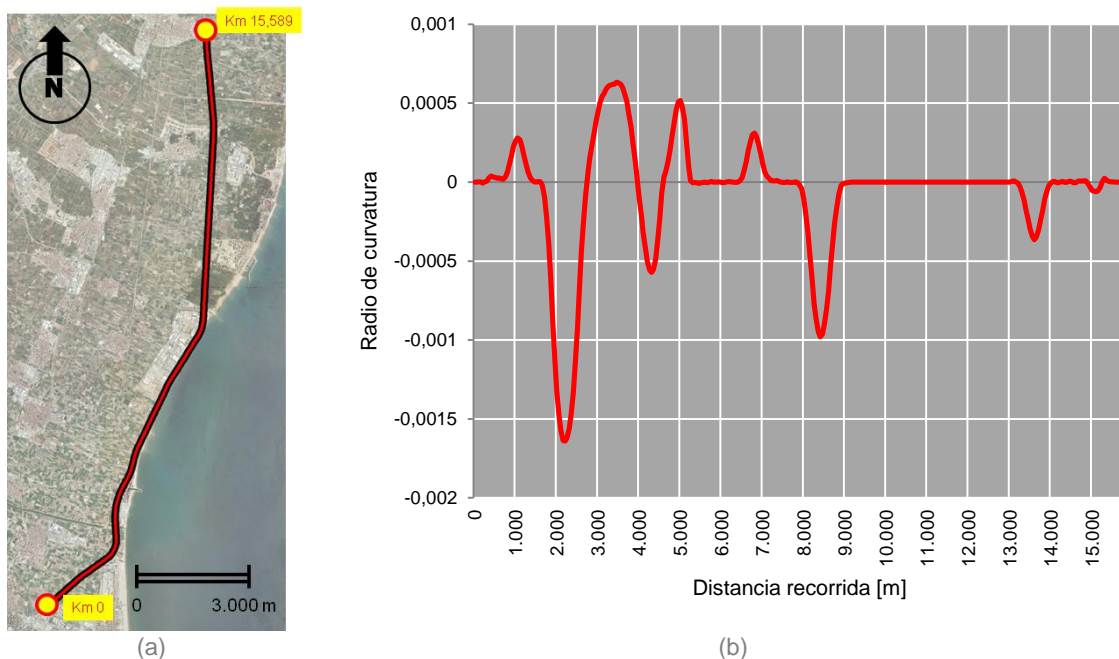


Figura 7-1: (a) Vista general del trazado de ida, Valencia-Puzol (S-N). (b) Representación gráfica de la curvatura de este trazado.

Inicialmente se cuenta con datos experimentales relativos a cinco conductores durante cuatro días. Sin embargo, de uno de los conductores fueron frecuentes una serie de errores de registro de datos. Por esta razón analizamos los datos para cuatro conductores durante los cuatro días del experimento. Los conductores son dos varones (A y B) y dos mujeres (C y F), de una edad comprendida entre los 43 y los 45 años. El grado de experiencia al volante de cada uno de ellos difiere, presentando los varones una mayor número de horas al volante. Según el cuestionario previo, los dos varones recorrían más de 15.000 km al año, siendo el conductor A el más experimentado (más de 30.000 km al año). Las dos mujeres presentaban una experiencia al volante considerablemente inferior, siendo la conductora F la menos experimentada (menos de 5.000 km al año) (Valero-Mora *et al.*, 2010).



El experimento se llevó a cabo durante los meses de junio y julio de 2010, bajo unas condiciones meteorológicas óptimas y una ausencia total de precipitaciones durante todos los días del experimento. La hora de salida para todos los vehículos era entre las 8:00 y las 9:00 a.m. El tráfico habitual a esa hora suele ser poco denso en el sentido de ida (Valencia-Puzol) y considerablemente más denso en el de vuelta (Puzol-Valencia), siendo habitual la aparición de retenciones en las inmediaciones de la ciudad de Valencia.

7.3. METODOLOGÍA

Los patrones al volante de cada uno de los conductores son analizados individualmente y comparados en su conjunto. Se emplean datos de algunos parámetros cinemáticos recogidos durante el experimento, tales como velocidades, aceleraciones y posiciones de los pedales de aceleración, embrague y freno. Se proponen dos modelos de representación de los datos, uno gráfico-estadístico y otro cartográfico, a partir de los cuales se extraen una serie de análisis e interpretaciones. Para el primer modelo de representación se emplean gráficos como histogramas o diagramas de barras, mientras que para la representación cartográfica de parámetros cinemáticos se opta por perfiles continuos. Los datos de entrada para el primer modelo de representación son los obtenidos por los conductores en ambos sentidos de circulación (ida y vuelta), mientras que para el segundo son los obtenidos únicamente en el trazado de ida. Para la confección de los gráficos se emplea software tanto genérico (*Microsoft Excel*) como estadístico (*SPSS y Statgraphics*), mientras que para la representación cartográfica se emplea el programa de software *ArcGis* de la casa *ESRI* en su versión 10.

La representación cartográfica de los datos mediante sistemas SIG permite obtener *in situ* y en formato digital una visión global del conjunto de los datos mediante el empleo de herramientas como el *zoom dinámico* y la *superposición de capas*. Estas herramientas permiten obtener una representación dinámica de los datos en la que el operador ajusta las opciones de visualización a sus propios requerimientos de análisis.

El objetivo de este capítulo es proponer una posible metodología de trabajo para este tipo de estudios y plantear la potencialidad de representación y análisis de los datos por parte de las herramientas y modelos propuestos.

7.4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

La velocidad del vehículo es el parámetro cinemático más representativo y el que mejor identifica el tipo de conducción de un determinado sujeto. La mayor parte de estudios sobre patrones de conducción hacen referencia a la velocidad media teórica como la medida más representativa, obteniendo este valor medio a partir de una simple relación entre la distancia recorrida y el tiempo empleado. Una revisión muy general de las velocidades medias de los conductores del experimento del INTRAS muestra como el conductor F fue el que alcanzó unas velocidades medias más elevadas, superiores todos los días de experimento a los 100 km/h, un umbral de velocidades superior al resto de conductores. Por contra, el conductor B fue el más lento, mientras que los conductores A y C presentaron unas velocidades medias de un orden muy semejante (Figura 7-2.a).

Desde un punto de vista estadístico, los valores medios expresan una visión simple y estática de los datos. Por esta razón el estudio de los modelos de distribuciones estadísticas de los datos presenta una gran importancia, teniendo en cuenta algunos estimadores estadísticos como los valores extremos o la desviación típica. Los valores extremos de velocidad para los respectivos conductores muestran como el conductor B, paradójicamente, fue el que condujo en algún momento a un valor más alto de velocidad máxima, mientras que el conductor F alcanzó los menores valores de velocidades mínimas.

El estimador estadístico que mejor representa el modelo de distribución estadística de los datos es la *desviación típica*. Como la práctica totalidad del trazado se corresponde con un mismo tipo de vía, se asume una homogeneidad en las condiciones de registro de los datos para los diferentes conductores y/o días del experimento. Asumiendo para el conjunto de los datos un modelo de distribución estadística de los datos de tipo *normal* o *gaussiano*, el 68,2% de los valores de velocidad estarán comprendidos dentro del intervalo definido por $V_m \pm STD_v$, siendo V_m el valor de velocidad media y STD_v el valor de desviación típica (Forbes *et al.*, 2011). La Figura 7-2.b muestra como el conductor A fue el que presentó la menor

variabilidad de velocidades durante los diferentes días del experimento, mientras que el conductor F presentó la mayor variabilidad registrada. La revisión de los datos de los diferentes días muestra cómo los mayores niveles de variabilidad se obtienen el primer día de conducción del conductor B (58 km/h de diferencia entre $V_{m\pm STDv}$) y el cuarto día del conductor F (55 km/h de diferencia entre $V_{m\pm STDv}$).

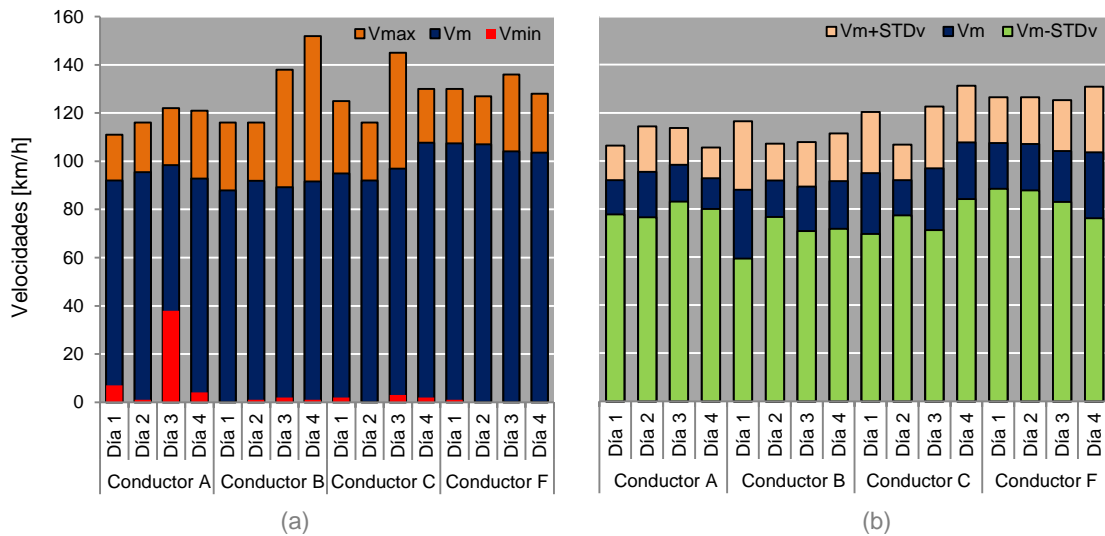


Figura 7-2: Velocidades medidas con el sensor inercial del vehículo experimental (parámetro de *velocidad instantánea*). Variabilidad de las velocidades para los distintos conductores y días del experimento. (a) Velocidades máxima, mínima y media; (b) Velocidad media \pm desviación típica ($V_{m\pm STDv}$).

La agrupación de velocidades en intervalos definidos permite obtener, de forma gráfica, patrones de conducción diferentes para los distintos conductores. La Figura 7-3 relaciona (a) una serie de intervalos de velocidades respecto a (b) los tiempos reales de conducción a esas velocidades. Dos de estos intervalos de velocidades presentan valores fuera de los límites (de velocidad) *normales* de la vía, tanto por encima (velocidades superiores a 120 km/h) como por debajo (velocidades inferiores a los 60 km/h). La revisión de esta figura muestra como el conductor F presenta un modelo de distribución de sus velocidades considerablemente diferente al de los otros tres conductores, llegando a circular durante más tiempo a velocidades más altas.

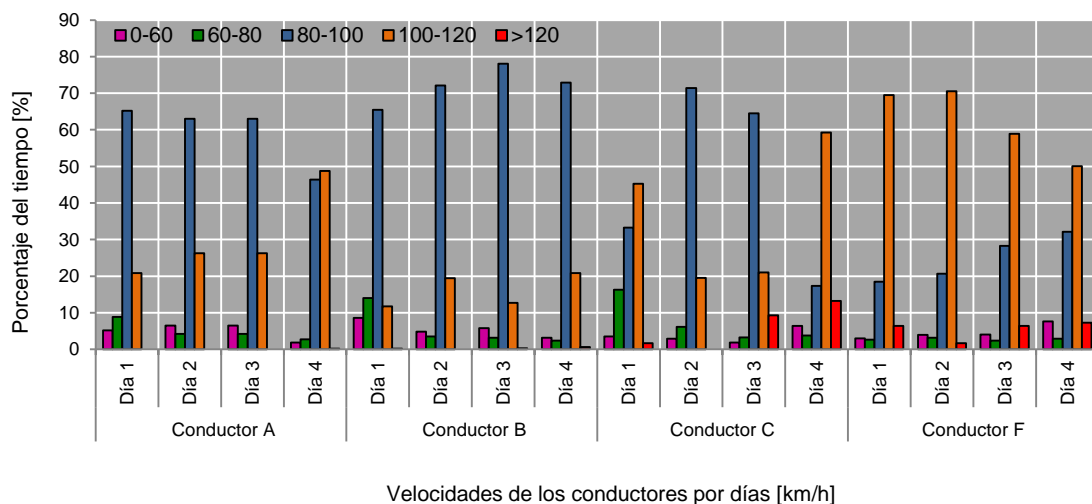


Figura 7-3: Determinación de intervalos de velocidades (instantáneas) en función de la variable temporal para cada uno de los conductores y días del experimento.

La conducción de cada sujeto durante el experimento puede ser evaluada a partir de sus velocidades diarias medias y su tendencia evolutiva durante los distintos días del experimento. El conductor F presenta una relación lineal muy marcada ($\rho \approx -0,9$) que demuestra que tendió a ir más lento cada día del experimento. Una evolución algo menos clara, aunque de signo contrario, se observa en el conductor C ($\rho \approx 0,66$), el cual tendió a incrementar su velocidad durante los diferentes días del experimento, a

excepción del primer día. Para el resto de los conductores no se observan niveles de correlación relevantes que muestren unas tendencias claras.

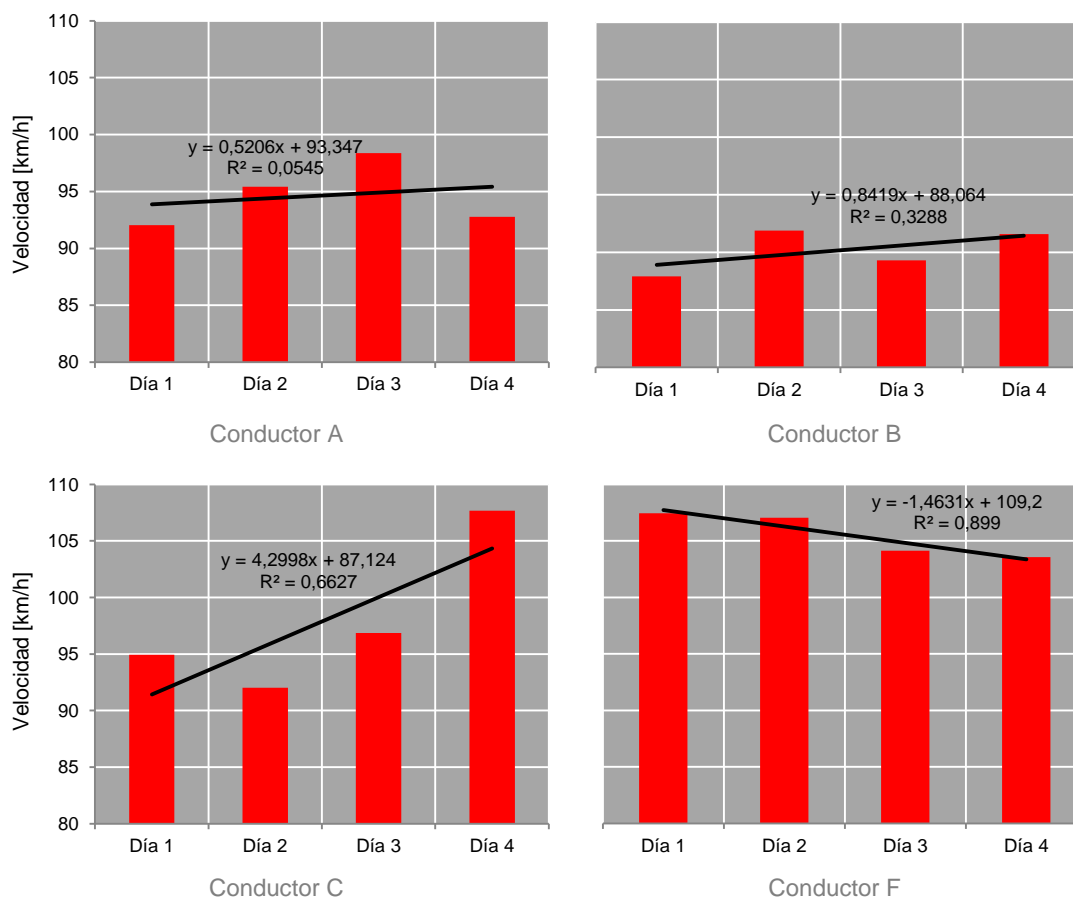


Figura 7-4: Evolución de las velocidades (instantáneas) medias de los distintos conductores y días. Análisis del grado de correlación lineal entre el parámetro velocidad y la experiencia del conductor con el vehículo experimental.

La Figura 7-4 representa las velocidades medias de cada conductor y día del experimento (*eje Y*) en función de la distancia (*eje X*). Los valores de velocidad en cada caso se estiman para tramos de vía de 50 metros. La interpretación de los patrones de velocidades de cada conductor y día resulta muy compleja. Muy a rasgos generales podemos señalar como el conductor F y el conductor A, durante el primer y segundo día, presentan un patrón de conducción más definido con tendencia a velocidades más constantes, mientras los conductores B y C presentan uno que muestra una tendencia a velocidades decrecientes. Los gráficos obtenidos muestran además la presencia de ciertas fluctuaciones anómalas debido a errores de medida del sensor.

Por su parte, la Figura 7-5 representa, para cada conductor, un perfil de las velocidades medias y su variabilidad durante los cuatro días del experimento (*eje X*) en función de la distancia recorrida (*eje Y*). La variabilidad de velocidades se estima en función de dos intervalos: (a) el determinado por la diferencia entre las velocidades máximas y mínimas en cada punto, y (b) el comprendido entre la suma y resta de la desviación típica respecto a los valores medios ($V_m \pm STD_v$). Los patrones obtenidos muestran como los conductores C y F presentan una mayor variabilidad, mientras que los conductores A y B, este último sobre todo en la segunda mitad del trayecto, presentan una menor variabilidad. Esta misma figura muestra unos altos niveles de correlación entre las líneas determinadas por la V_m y la STD_v en aquellos sectores en los que se producen más fluctuaciones. Esto se debe a que la muestra estadística empleada es demasiado reducida lo que provoca que ciertos valores anómalos tienden a condicionar, de forma determinante, el modelo de distribución y los estimadores estadísticos de centralidad obtenidos. La presencia de estos valores anómalos se debe a errores de registro del sensor y/o ciertas condiciones particulares del tráfico en algunos tramos de vía.

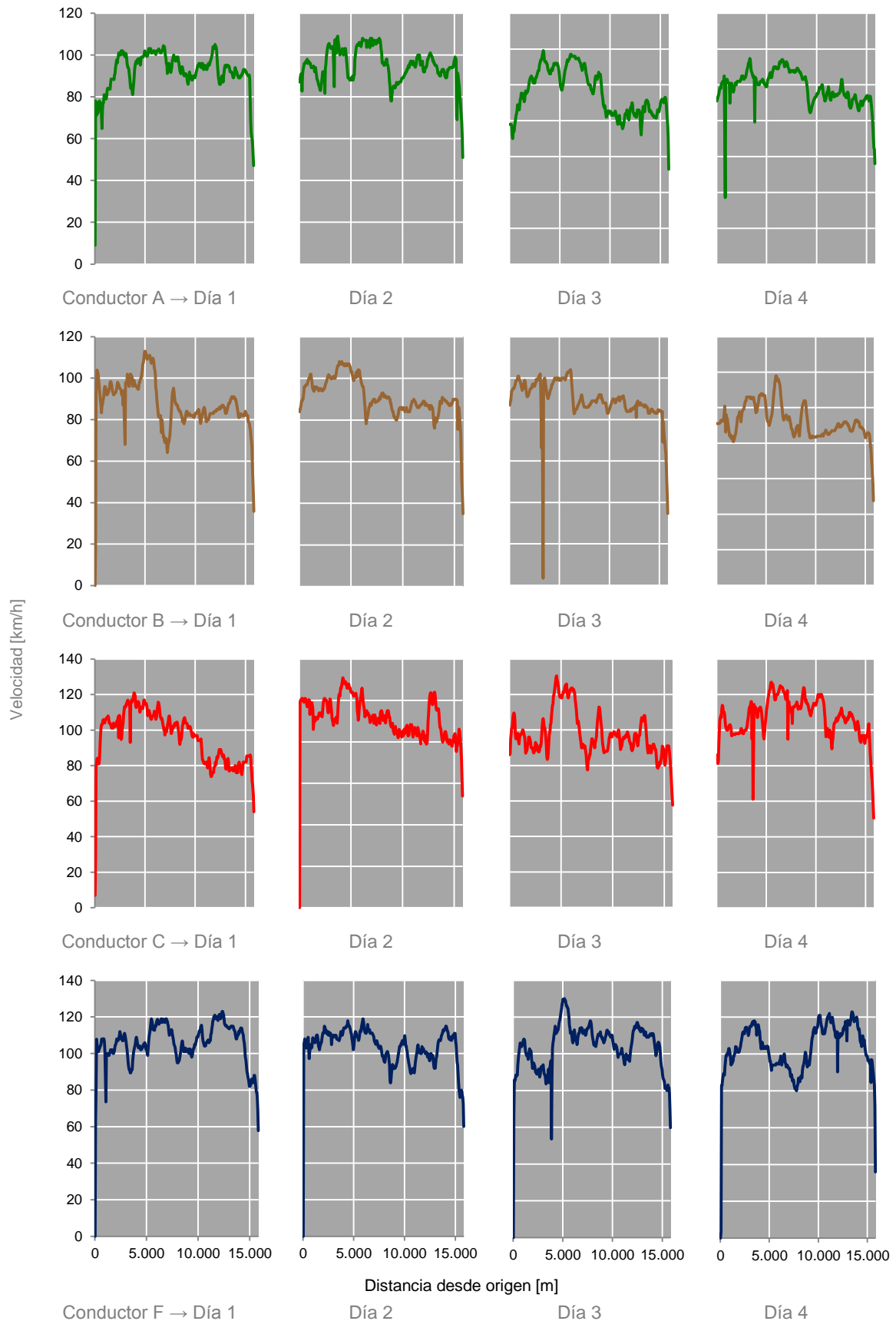


Figura 7-5: Velocidades medidas con el velocímetro del vehículo (parámetro de *velocidad adquirida*).
Análisis de las velocidades de cada uno de los conductores en los diferentes días. Representación
obtenida a partir de una malla de puntos equidistantos 50 metros entre sí.

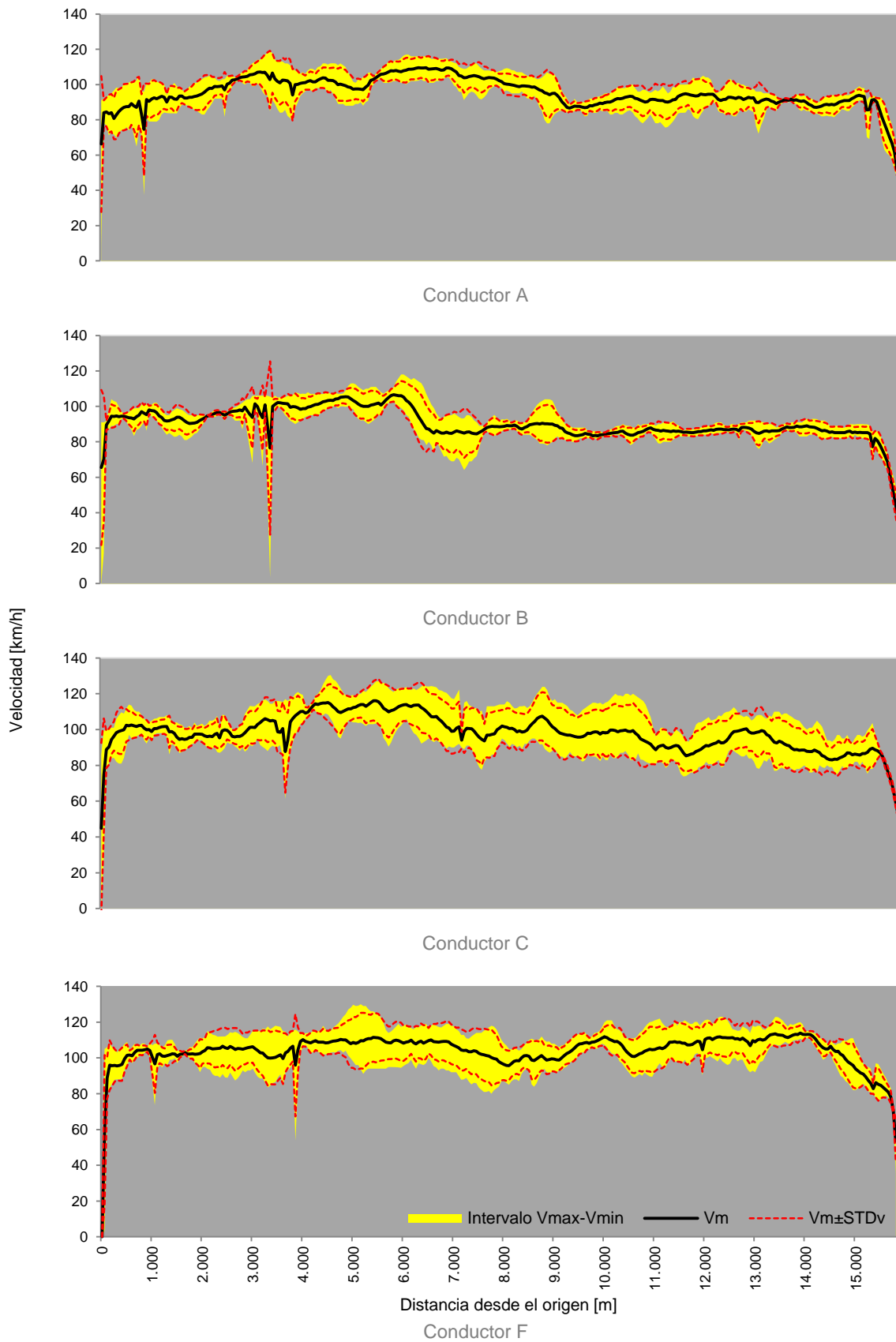


Figura 7-6: Velocidades (adquiridas) medias, máximas, mínimas y desviaciones típicas para cada conductor. Representación obtenida a partir de tramos de vía de 50 metros.

El *régimen* o *velocidad de giro del motor* es otro de los parámetros cinemáticos que proporciona información relevante para un estudio exhaustivo de los patrones de conducción. El régimen de giro del motor, habitualmente representado por n y medido en *revoluciones por minuto* (*rpm*), se refiere a la velocidad angular del cigüeñal del vehículo (Font y Dols, 2004), la cual es función del valor de *esfuerzo* que el conductor ejerce sobre el motor durante la conducción. Este valor de esfuerzo depende de una serie de factores como, entre otros, la forma en que el sujeto conduce, sus hábitos al volante, el entorno y las condiciones tanto de la vía como del propio vehículo. El peso de este último factor puede ser despreciado en nuestros datos debido a que el vehículo experimental fue el mismo para todos los conductores.

Los regímenes medios de giro del motor de los distintos conductores muestran la existencia de varios modelos de conducción (Figura 7-7.a). El conductor B alcanzó unos regímenes medios y máximos muy inferiores al resto de los conductores, presentando además unos valores muy constantes durante los cuatro días del experimento. El conductor C, por su parte, alcanzó unos valores mayores, tanto medios como máximos y mínimos. Se observa asimismo cómo los conductores A y B presentaron unos valores medios prácticamente constantes durante todos los días del experimento. La variabilidad de los regímenes de giro para los distintos conductores (Figura 7-7.b) es menor para los dos primeros. Los conductores C y F presentan unas mayores diferencias debido a la influencia que sobre la desviación típica ejercen los *outliers*, es decir, valores máximos y mínimos extremos fuera del rango normal de la serie (Balsa-Barreiro *et al.*, 2012b).

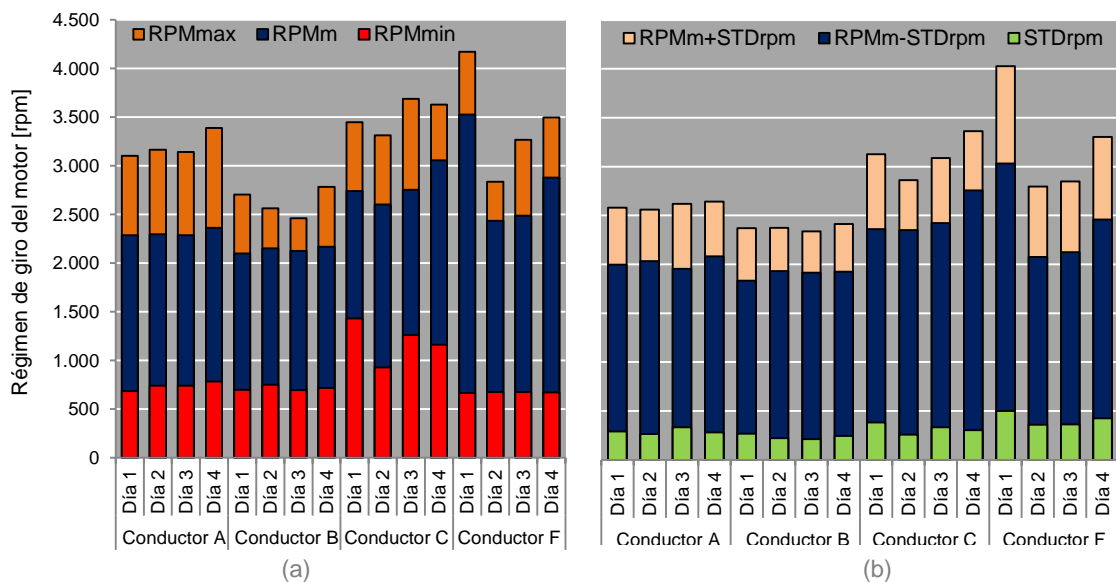


Figura 7-7: Variabilidad de los regímenes de giro del motor de los distintos conductores y días. (a) Velocidades de giro máxima, mínima y media; (b) Velocidad de giro media \pm desviación típica ($RPM_m \pm STD_{RPM}$).

La agrupación en intervalos de los regímenes de giro del motor en función de sus tiempos muestra patrones claramente diferenciados. Los conductores A y B condujeron más del 70% del tiempo a regímenes de giro del motor intermedios, del orden de las 2.000-2.500 revoluciones por minuto. Por su parte, los conductores C y D muestran distribuciones mucho más equilibradas, observándose cómo los porcentajes de tiempo con regímenes intermedios no llegan a superar el 40% del tiempo de conducción (Figura 7-8).

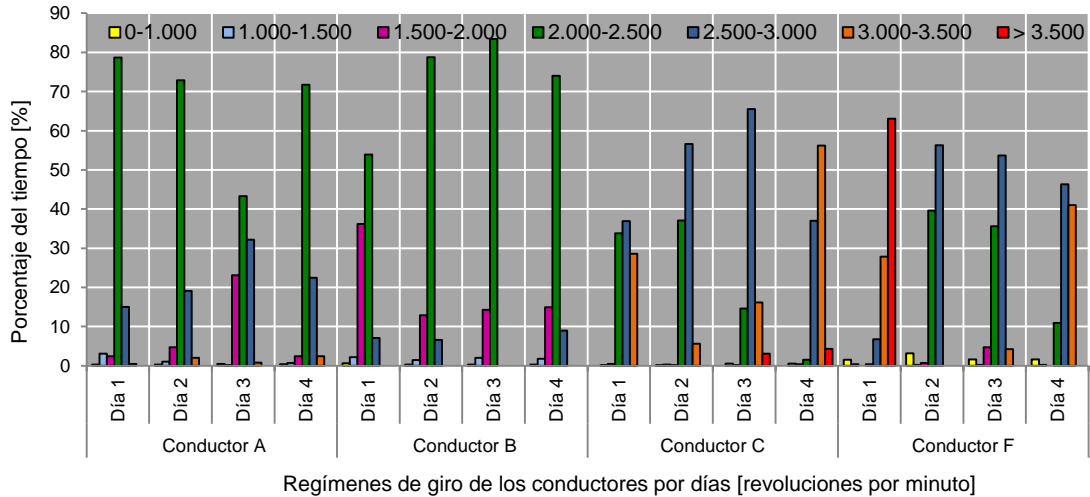


Figura 7-8: Determinación de intervalos de regímenes de giro del motor en función de la variable temporal para cada uno de los conductores y días del experimento.

Los conductores tendieron a incrementar sus regímenes de giro del motor durante los sucesivos días del experimento (Figura 7-9). Sólo el conductor F presenta una línea de tendencia en sentido decreciente para el conjunto de los días del experimento aunque, si exceptuamos el primer día, la evolución tiende a mostrar una clara tendencia ascendente. Los coeficientes de correlación obtenidos son moderados, del orden de 0,55-0,58 en todos los casos, a excepción del conductor F.

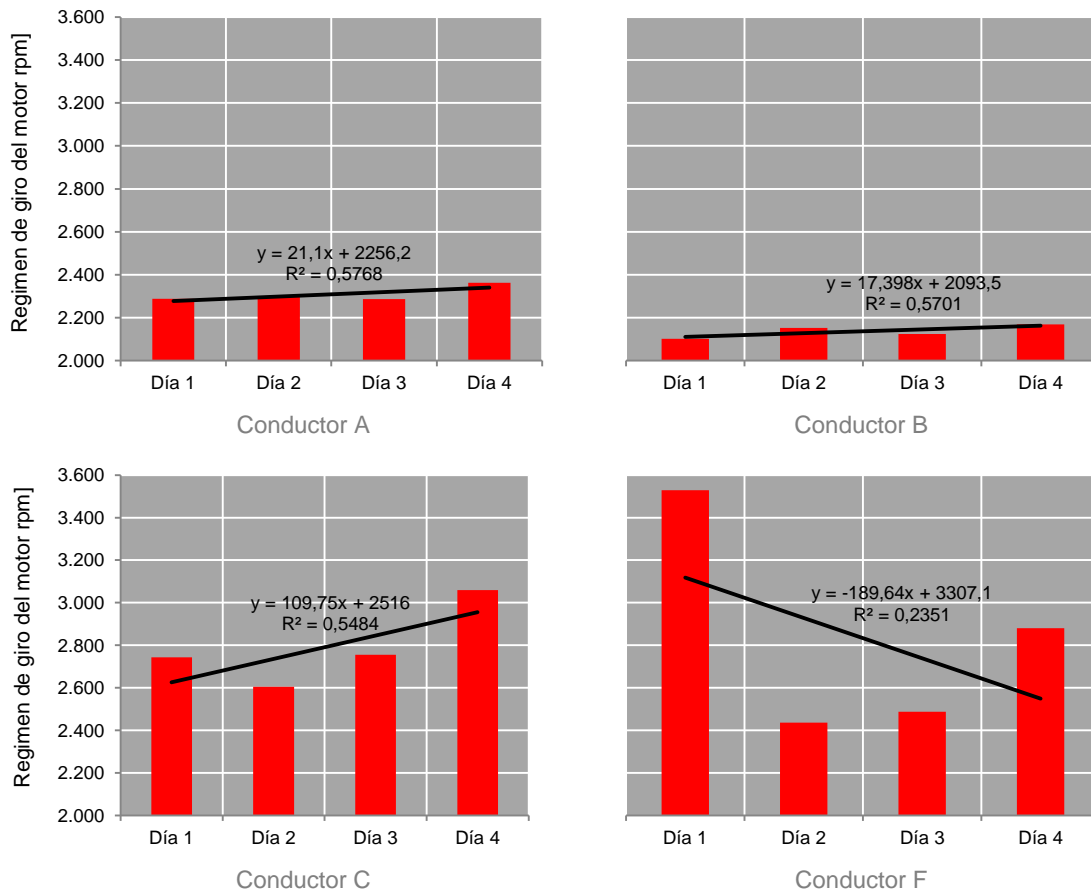


Figura 7-9: Evolución de los regímenes medios de giro del motor (en revoluciones por minuto) de los distintos conductores y días. Análisis del grado de correlación lineal entre evolución temporal y velocidades de giro del motor.

La representación cartográfica permite un análisis más exhaustivo de los datos con la incorporación de la variable espacial de la información y la posibilidad de emplear herramientas como el *zoom dinámico*, que permite un ajuste de la vista en función de las necesidades del operador. Se proponen una serie de ejemplos en dos zonas concretas del trazado, coincidentes con los tramos de inicio y final de nuestro trayecto en el sentido de ida (S-N) (Figuras 7-10 y 7-12). La delimitación de nuestro estudio a estos dos tramos se debe a las propias limitaciones físicas para la representación (y visualización) de los datos en formato analógico.

La primera zona de estudio se centra en el tramo inicial de la vía (Figura 7-10.a). Su trazado es casi rectilíneo en su conjunto y presenta una longitud aproximada de unos 2,4 km (Figura 7-10.b). En este tramo de vía se produce la incorporación de los vehículos a la autovía desde una vía de acceso. Como hitos más representativos dentro de este sector se destaca la presencia de una curva abierta justo en la parte final, a partir del km 1,9.

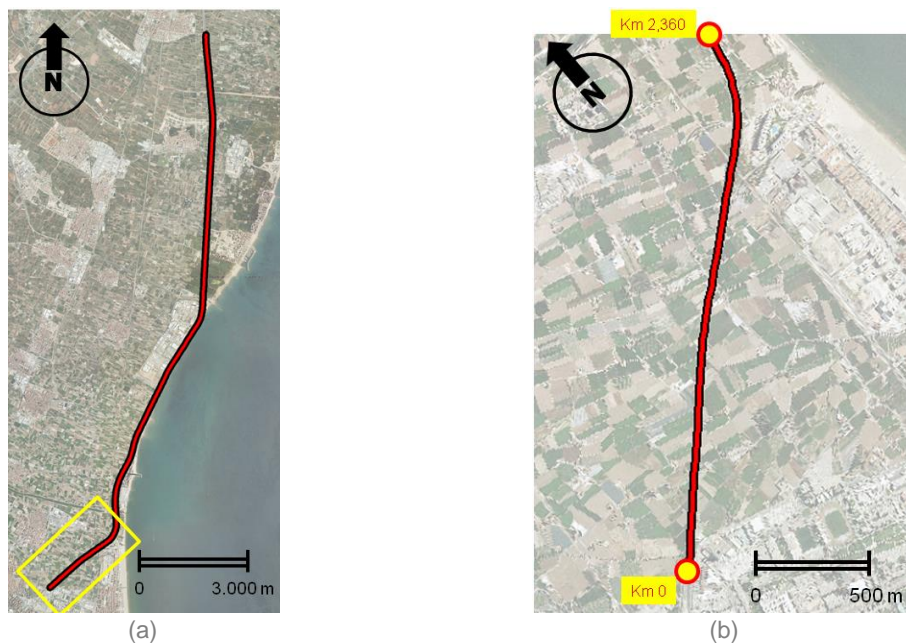


Figura 7-10: (a) Localización y (b) vista en detalle de la zona de estudio.

Esta zona de estudio corresponde teóricamente con un tramo de vía en el que el vehículo tiende a incrementar su velocidad de forma progresiva para su incorporación y posterior posicionamiento dentro de la vía. Aún siendo éste el perfil de velocidades teóricamente esperado, la localización de este tramo de vía tan próximo al límite norte de la ciudad de Valencia y el hecho de que el experimento tuviera lugar durante las primeras horas de la mañana, hace presuponer que pudieran producirse congestiones de tráfico debido, sobre todo, a aquellos vehículos que acceden a los polígonos industriales y poblaciones cercanas por motivos laborales.

La Figura 7-11 representa cartográficamente algunos de los parámetros cinemáticos asociados al primer conductor (A). El orden de las sub-figuras presenta una estructura matricial, donde cada fila hace referencia a cada uno de los días del experimento. De izquierda a derecha, los parámetros representados son (a) velocidad de giro del motor en revoluciones por minuto, (b) posición de la palanca de marchas, (c) velocidad del vehículo en cada tramo en km/h y (d) posición de los pedales de embrague, acelerador y freno.

Una revisión general de todos los parámetros representados muestra cómo, aunque *a priori* podían esperarse congestiones y atascos en la incorporación del vehículo a la autovía, apenas se registró en ningún momento una reducción acusada de la velocidad del vehículo. Esto se demuestra tanto en el perfil de velocidades como en el hecho de que el conductor no llegó a pisar en ningún momento el pedal de freno.

Existe una cierta variabilidad en los modelos de conducción representados para los respectivos días. El perfil de velocidades del primer día muestra una evolución positiva constante durante todo el trayecto, pasando de velocidades del orden de los 60 km/h al inicio a velocidades de 110 km/h en la parte final. El conductor mantiene pisado el pedal de acelerador casi de forma constante aunque se observa un perfil



fluctuante sobre todo en la primera parte del recorrido, en la que el conductor deja de pisar totalmente el acelerador en varias ocasiones. Hasta el inicio de la curva situada a 1,9 km del punto de origen, el conductor no efectúa ningún cambio de marcha, haciendo todo este trayecto en cuarta. A principios de la curva efectúa su único cambio de marchas, pasando en ese momento a una marcha más larga, la quinta. Antes de la curva se observa como el vehículo tiende a estabilizar su velocidad para, una vez dentro, incrementarla de forma progresiva. El perfil de la velocidad de giro del motor muestra cómo se va incrementado de forma progresiva y continuada el régimen de giro del motor hasta la curva, momento en el cual se efectúa el cambio de marchas y se logra descender de forma acusada el número de revoluciones del motor.

El segundo día se muestra un perfil de velocidades mucho más estable que el día anterior. Apenas se incrementa la velocidad en ningún punto e incluso se observa una clara reducción progresiva de la misma a partir de la segunda mitad del tramo recto, justo hasta el inicio de la curva. Ante la presencia de la curva, el conductor opta por levantar de forma escalonada el pie del acelerador para, una vez dentro de la misma volver a acelerar, de forma también escalonada. El conductor efectúa dos maniobras de cambio de marchas, ambas en el primer tercio de este trayecto. En la primera cambia de cuarta a quinta en una maniobra lenta, llegando a observarse una muesca en la que el coche está en punto muerto, mientras que en la segunda cambia de quinta a sexta en una maniobra mucho más rápida, aunque sólo pisando el embrague parcialmente. Estos cambios de marchas permiten reducir sustancialmente el régimen de giro del motor pudiendo ser observadas tres fases muy claras, coincidentes con los sucesivos cambios de marchas. El empleo de marchas más largas durante la conducción permite reducir considerablemente los regímenes de giro del motor y obtener, en consecuencia, un modelo de conducción más estable y eficiente, en el que se reducen de forma simultánea los niveles tanto de consumo de combustible como de emisiones contaminantes.

El perfil de velocidades del tercer día presenta un perfil muy semejante al del primer día, pasando de velocidades de unos 60 a unos 110 km/h al final del tramo estudiado. El conductor tiende a pisar el acelerador de forma fluctuante, dejando de pisarlo en repetidas ocasiones. Efectúa dos cambios de marchas, uno a mediados de la recta inicial en el que pasa de cuarta a quinta, y el segundo de quinta a sexta justo a principios de la curva. Al retrasar el cambio de marchas y mantener unas altas velocidades, el régimen de giro del motor tiende a incrementarse de forma acusada hasta el momento en que se efectúa el cambio. Esto se observa de forma clara en la primera mitad del trayecto estudiado.

El cuarto día el conductor vuelve a mostrar un perfil de velocidades muy constante llegando a efectuar dos cambios de marchas, muy próximos entre sí, dentro del primer tercio del trayecto estudiado. Varias caídas abruptas de velocidades son registradas debido a fallos eventuales en el dispositivo de medida. El perfil de aceleraciones es relativamente constante, observándose como el conductor no deja de pisar, en ningún momento, el pedal del acelerador. El régimen de giro del motor presenta niveles bajos en el momento en el que se introduce la sexta marcha, aunque presenta una tendencia a un fuerte incremento en los instantes previos al cambio de marchas inicialmente efectuado.

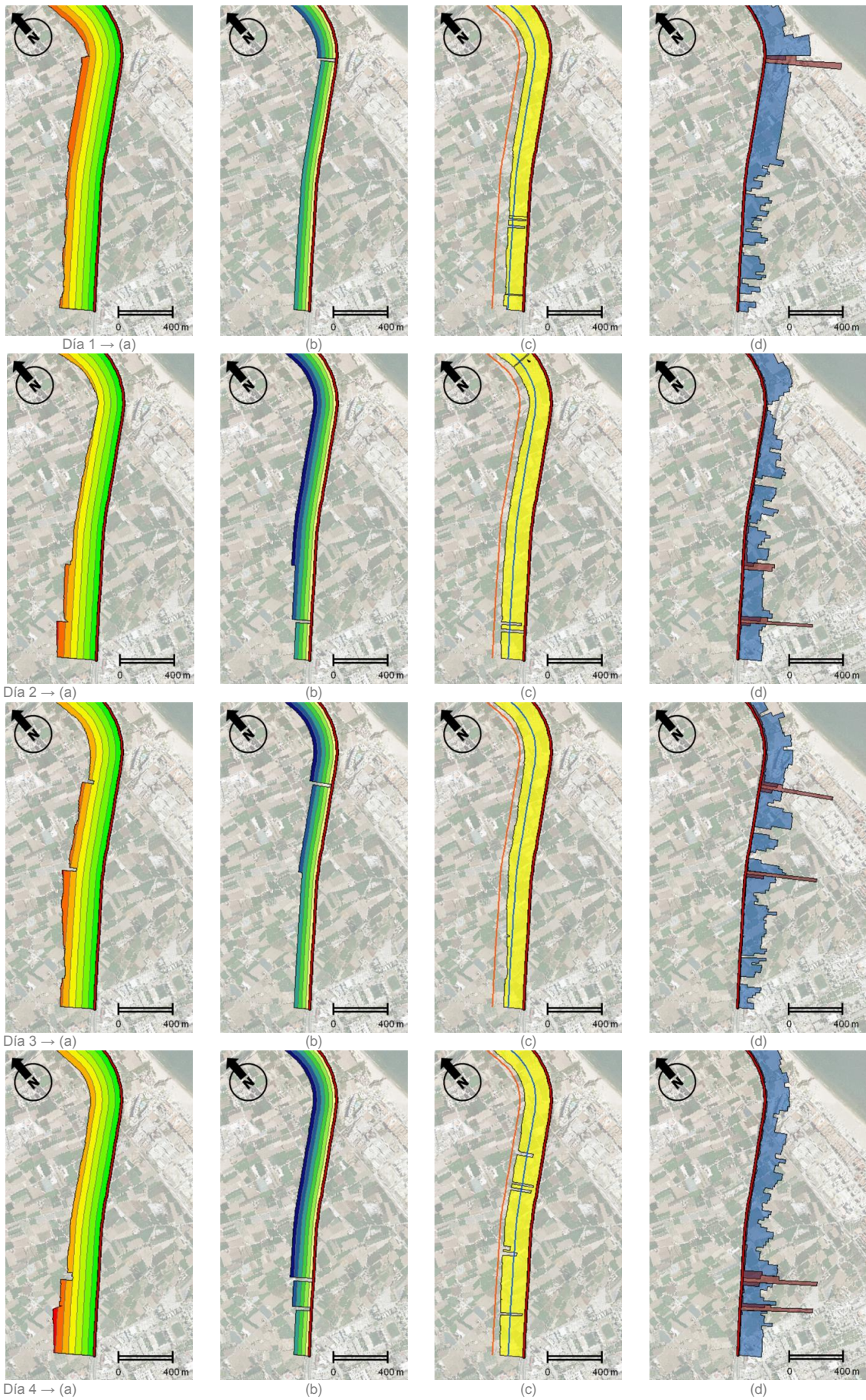


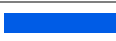

















Figura 7-11: Representación de diferentes parámetros de conducción asociados al conductor A.

Velocidad de giro del motor [rpm]	Posición palanca marchas	Velocidad [km/h]	Posición pedales de embrague, acelerador y del freno
 < 500	 Primera	 60 km/h	 Pedal embrague
 500-1.000	 Segunda	 120 km/h	 Pedal acelerador
 1.001-1.500	 Tercera		 Pedal freno
 1.501-2.000	 Cuarta		
 2.001-2.500	 Quinta		
 2.501-3.000	 Sexta		
 > 3.000			

La segunda zona de estudio se centra en el tramo final del trayecto de ida (Figura 7-12.a). Su trazado es casi rectilíneo en su conjunto y presenta una longitud aproximada de unos 1,6 km (Figura 7-12.b). En esta zona de estudio el vehículo realiza, en el último tramo, la maniobra de salida de la autovía hacia el carril de deceleración correspondiente a la salida número 2 de dicha vía, a la altura del término municipal de Puzol (Valencia). El trazado de este carril de deceleración se registra de forma parcial en los datos, con una longitud correspondiente a los últimos 300 metros, comprendidos entre los km 15,50 y 15,85.

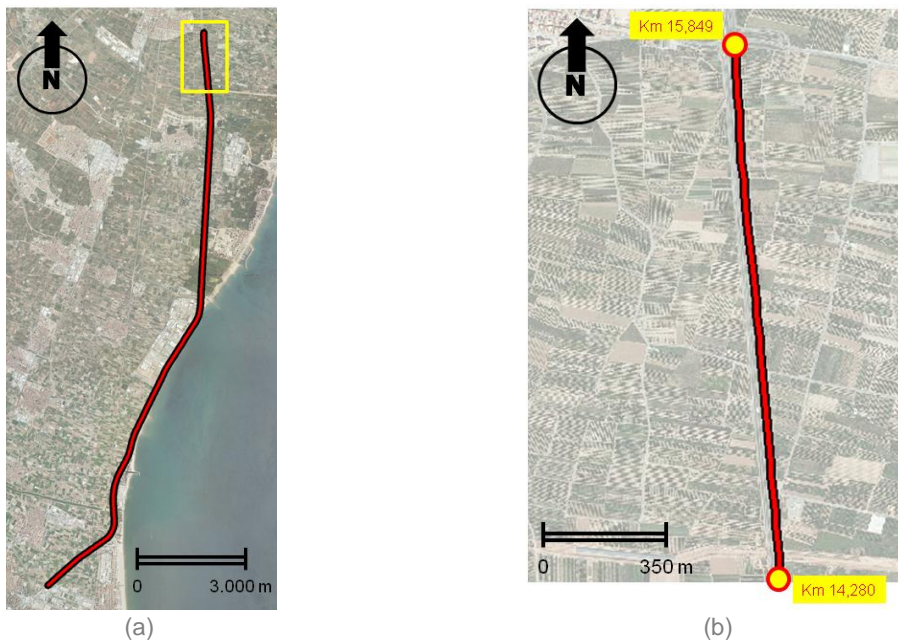


Figura 7-12: (a) Localización y (b) vista en detalle de la zona de estudio.

En este tramo de vía se espera teóricamente una deceleración gradual del vehículo pasando de velocidades propias de autovías (o vías de alta capacidad), del orden de los 120 km/h, a velocidades inferiores a los 60 km/h, debido a la proximidad de una señal de parada obligatoria previa a la incorporación del vehículo a una vía interurbana. La distancia entre esta señal de parada y nuestro último punto registrado es de unos 150 metros. Por esta razón se esperan reducciones graduales de las velocidades registradas, aunque sin llegar a valores nulos.

La Figura 7-13 muestra cómo el conductor tiende a reducir la velocidad del vehículo pisando el pedal de freno de forma continuada y aminorando las marchas en última instancia, aunque no siempre lo hace de la misma forma. El primer día el conductor redujo su velocidad de forma muy suave desde antes de la entrada al carril de deceleración. El perfil de velocidades muestra como la incorporación del vehículo al carril de deceleración se efectúa de forma muy progresiva, para lo que el conductor frena el vehículo de forma repetida y continuada justo después de haberlo acelerado. En la última frenada, el conductor reduce la posición de la palanca de marchas de sexta a cuarta, sin pasar por quinta. El perfil de reducción de los regímenes de giro del motor presenta una tendencia muy semejante al perfil de velocidades.

El segundo día el conductor efectúa la maniobra de incorporación al carril de deceleración en un momento y lugar semejante al primer día, aunque lo hace de forma más progresiva. El conductor decelera



totalmente el vehículo durante un cierto intervalo antes de proceder a frenarlo. El conductor pisa el pedal del freno en una única ocasión, en la que aprovecha además para efectuar todas las reducciones de marchas intermedias entre la sexta y la tercera. El perfil de velocidades muestra una forma convexa, ligeramente diferente a la del primer día y muy semejante al perfil de régimen de giro del motor.

El perfil de velocidades del tercer día es semejante al del día anterior, con la salvedad de que la incorporación del vehículo al carril de deceleración se produce más tarde. Por esta razón, el conductor deja de pisar el acelerador de forma abrupta para, inmediatamente después, efectuar sendas frenadas y ajustar la velocidad del vehículo al carril. El conductor reduce las marchas desde la sexta a la tercera de forma continua y escalonada, aunque menos apurada que durante el día anterior. El perfil del régimen de giro del motor presenta en el tramo final varios incrementos debido a una *peor* ejecución de los sucesivos cambios de marchas.

El cuarto día del experimento, la reducción de velocidad del vehículo se produce de forma muy progresiva debido a una incorporación prematura del vehículo al carril de deceleración. Durante esta maniobra de incorporación, el conductor deja de acelerar el vehículo de forma repentina para, transcurrido un intervalo de tiempo, pisar el pedal de freno. El conductor pisa el freno en dos ocasiones, aunque entre medias llega a acelerar ligeramente el vehículo. En el momento final efectúa los cambios de marchas, aunque en este caso opta por pasar de sexta a punto muerto, de ahí directamente a cuarta y, acto seguido, a tercera. El perfil del régimen de giro del motor muestra una disminución muy progresiva del número de revoluciones.

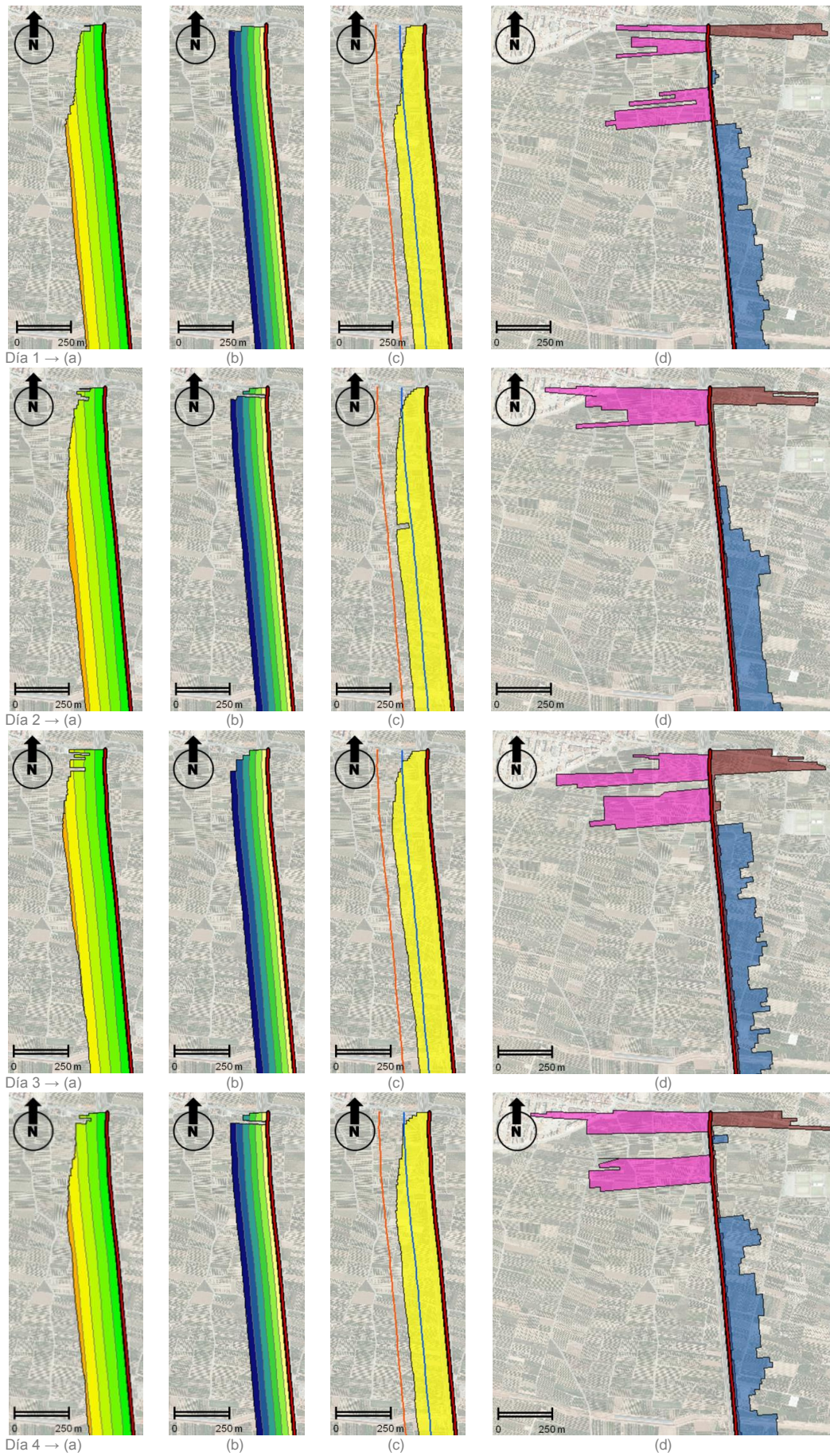


Figura 7-13: Representación de diferentes parámetros de conducción asociados al conductor A.



Velocidad de giro del motor [rpm]	Posición palanca marchas	Velocidad [km/h]	Posición pedales de embrague, acelerador y del freno
< 500	Primera	60 km/h	Pedal embrague
500-1.000	Segunda	120 km/h	Pedal acelerador
1.001-1.500	Tercera		Pedal freno
1.501-2.000	Cuarta		
2.001-2.500	Quinta		
2.501-3.000	Sexta		
> 3.000			

Las representaciones cartográficas anteriores tienen en cuenta todos los días del experimento, aunque sólo para un conductor. Los patrones de aceleración y deceleración del resto de conductores en las zonas de estudio pueden ser representados en un número de figuras más reducido, en función de los valores medios y modelos habituales de comportamiento. La *Figura 7-14* muestra las variaciones relativas de velocidades para los diferentes conductores en los tramos inicial y final del trazado estudiado. Para ello se divide el trazado estudiado en una serie de tramos iguales y se calcula la velocidad media para cada uno de estos tramos. Los valores de velocidad en cada tramo se estiman mediante un método de interpolación basado en la *ponderación inversa de la distancia* (IDW) (Achilleos, 2011).

La velocidad media en cada tramo de vía (*i*) se comparan con la del tramo anterior (*i-1*), obteniéndose una variación relativa de velocidades entre tramos sucesivos. Esta variación de velocidades se clasifica en tres niveles: (a) positivo, cuando el incremento de velocidades es superior al 2%, (b) negativo, cuando el incremento de velocidades es superior al -2%, y (c) nulo o constante, cuando el incremento de velocidades está entre el -2 y el 2%.

Se observa, en los primeros metros, un patrón de aceleración inicial común a todos los conductores, previo a una estabilización posterior de la velocidad. Al contrario de lo que podía esperarse, no se observa ninguna reducción importante de la velocidad del vehículo al inicio de la curva ni un incremento marcado en la mitad de la misma, cuando el conductor cuenta con una clara visibilidad de salida. Sin embargo, existen bastantes diferencias entre los distintos conductores debido a unas condiciones particulares de la vía y del tráfico para cada uno de los días y de los conductores. Al ser una muestra muy pequeña, de sólo cuatro días, los patrones presentan en varios tramos irregularidades como ocurre para los conductores A y C, cuya conducción estuvo condicionada por un tráfico denso en tramos intermedios durante alguno de los días del experimento.

En el tramo de vía final, se observa un patrón común de deceleración del vehículo mucho más definido que en el caso anterior. Todos los conductores efectúan una misma secuencia de acciones en el siguiente orden: (a) deceleración inicial, (b) adecuación de la velocidad y (c) deceleración final. Sin embargo, existen diferencias entre los respectivos conductores respecto al momento y la duración en la que llevan a cabo estas acciones. La fase de deceleración inicial consta habitualmente de una doble etapa de reducción que, en ocasiones, tiende a una única etapa continua. Tres de los conductores presentan una doble etapa de deceleración inicial, mientras que uno de ellos presenta una única etapa. La fase de adecuación de la velocidad es muy similar en todos los conductores y comprende un aumento inicial de la velocidad y una estabilización posterior de la misma. Finalmente, la fase de deceleración final tiene lugar entre los últimos 150 y 300 metros de vía y supone una reducción continua de la velocidad del vehículo. El conductor F efectúa una maniobra de deceleración final del vehículo considerablemente más acusada que el resto de conductores.

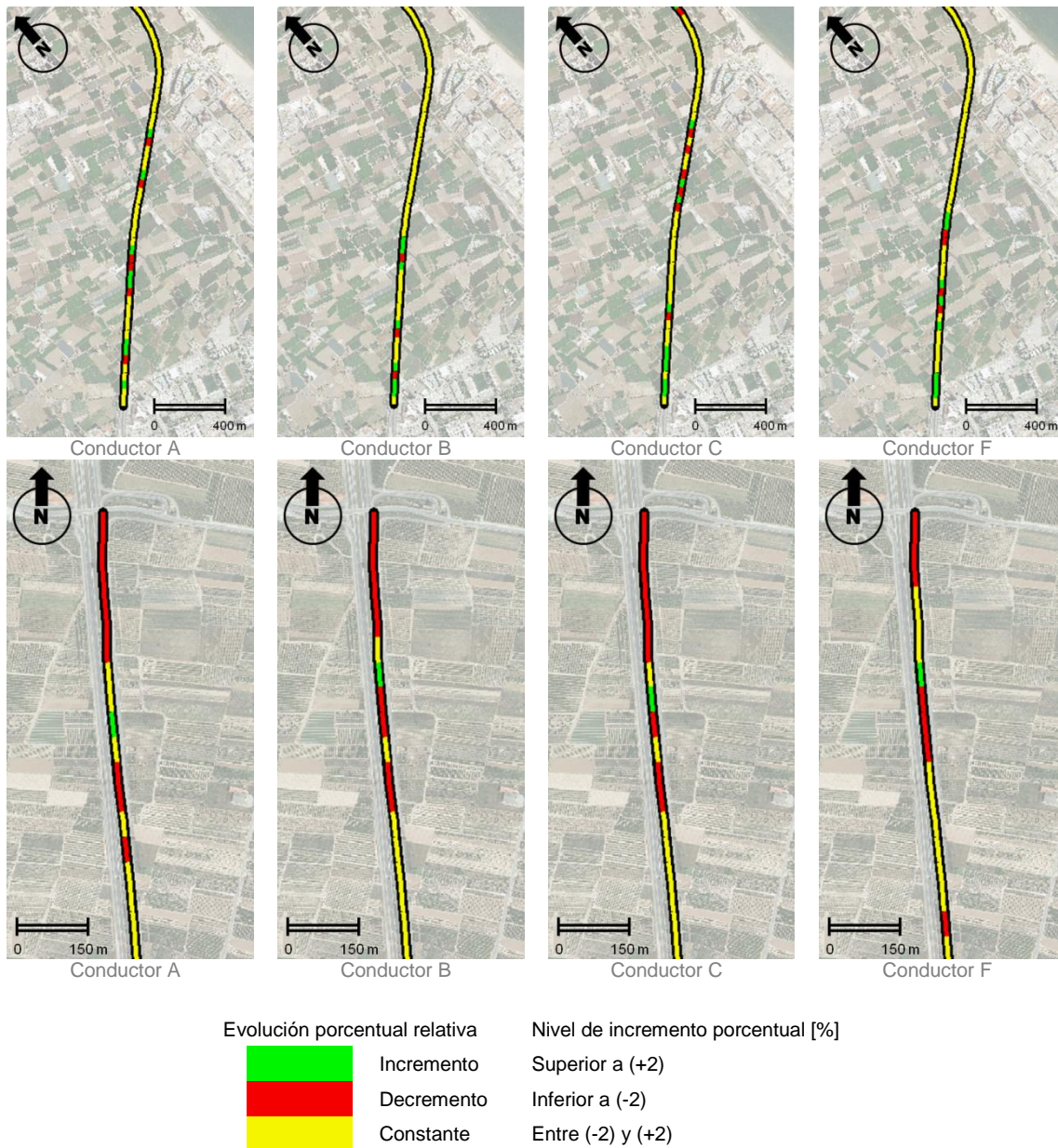


Figura 7-14: Incremento de velocidades medias para los diferentes conductores en los tramos inicial (Figura 7-10) y final del trazado (Figura 7-12). Representación obtenida a partir de tramos de vía de 50 metros.

Una visión más exhaustiva de los patrones de conducción se obtiene a partir de las velocidades extremas. La Figura 7-15 representa, para todos los conductores y días del experimento, los tramos de vía en los que se registraron velocidades extremas, fuera del rango de valores de velocidades normales de la vía tanto por exceso (velocidades superiores a 120 km/h, la máxima de la vía) como por defecto (velocidades inferiores a 60 km/h o anormalmente reducidas).

Sólo dos de los conductores, el C y F, llegaron a superar en algún momento las velocidades máximas de la vía, ambos conductores durante tres de los cuatro días del experimento. El conductor C tendió a hacerlo en un mismo tramo de vía. Por su parte el conductor F sobrepasó la velocidad en diferentes sectores, aunque la mayor parte de las ocasiones lo hizo en zonas puntuales localizadas en la segunda parte del trazado estudiado.

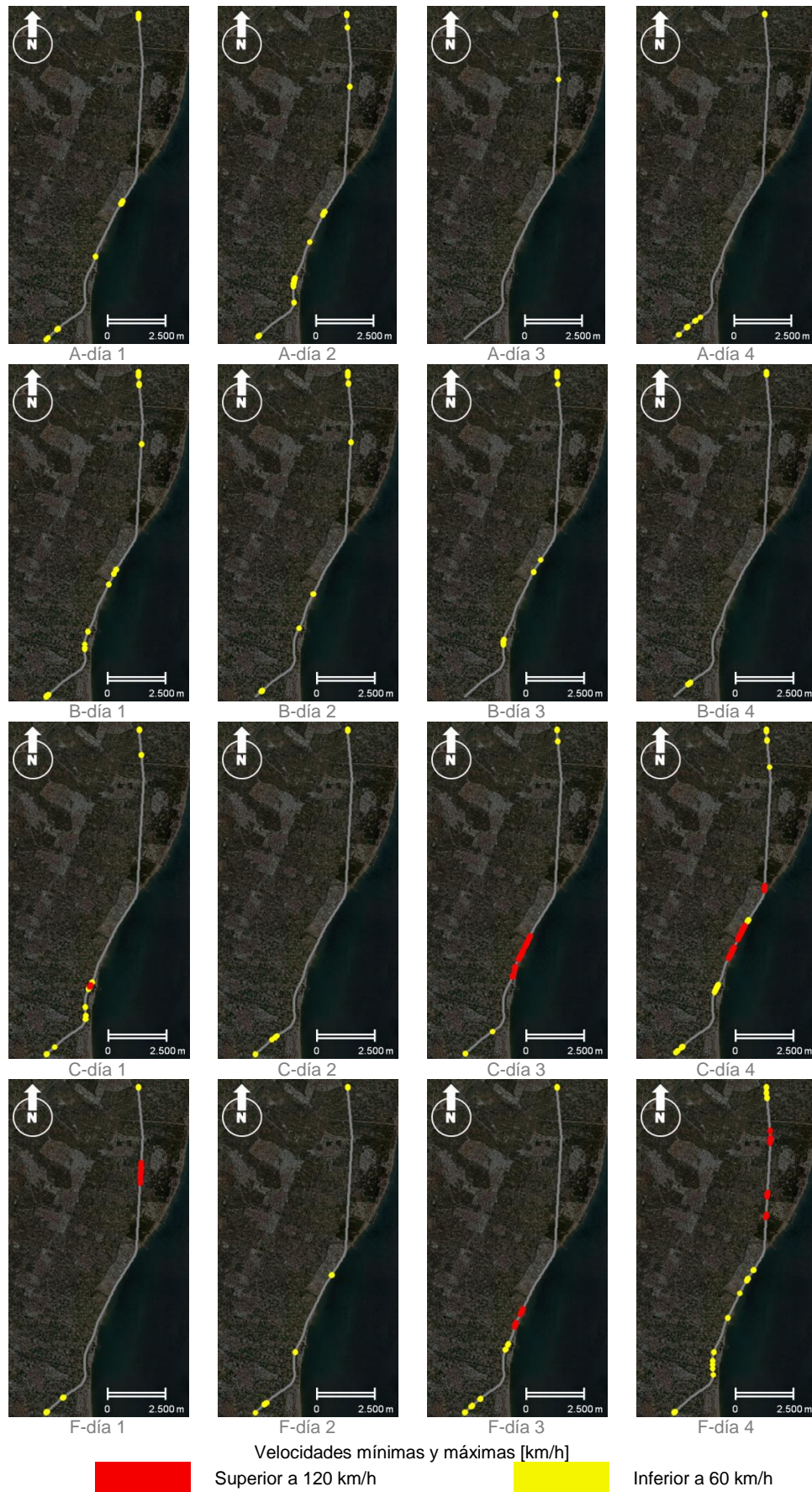


Figura 7-15: Velocidades extremas para los distintos conductores y días del experimento. Representación obtenida a partir de tramos de vía de un metro.



En cuanto a los tramos en los que se registran velocidades *anormalmente reducidas*, no existe un patrón de comportamiento claro si exceptuamos los tramos finales e iniciales en los que el vehículo sale o se incorpora a la autovía. Los conductores A y B tienden a reducir su velocidad a menos de 60 km/h en un tramo de vía previo a la última curva del trazado estudiado. En ciertos momentos, los distintos conductores presentan varios problemas de incorporación inicial del vehículo a la vía, tal como se observa durante el cuarto día del conductor A y el tercer día del conductor F. En ciertos tramos, las condiciones puntuales de tráfico obligaron a los conductores a reducir sus velocidades de forma acusada, tal y como se observa en algunos tramos de vía intermedios recorridos por los conductores C y F.

7.5. DISCUSIÓN

El estudio de los patrones de conducción presenta una gran complejidad debido a la existencia de un gran número de factores, elementos y variables que influyen sobre la conducción, ya sea de forma real o potencial. La obtención de unos patrones generales de conducción claramente definidos para una determinada población requiere de la puesta en marcha de procesos de experimentación amplios, además del procesamiento, análisis e interpretación de grandes volúmenes de datos.

Una gran parte de los estudios científicos publicados sobre el tema se basan en procesos de experimentación inadecuados y metodologías de análisis poco eficientes. Los datos de estos estudios se obtienen habitualmente en experimentos llevados a cabo en ambientes simulados, o bien a partir de las respuestas subjetivas de los conductores a una serie de cuestionarios. Sin embargo, los datos obtenidos con estos métodos de experimentación no pueden ser fácilmente extrapolables a condiciones reales de conducción, lo que da lugar a resultados sesgados. Desde el punto de vista de las metodologías de trabajo implementadas, la mayor parte de estudios previos aportan una perspectiva estática de los datos y basan sus estrategias de análisis en el cálculo de una serie de estimadores estadísticos de carácter general. Por estas razones, algunos estudios publicados sobre patrones de conducción presentan resultados poco satisfactorios. Ericsson (2000a) reconoció en su trabajo que no pudo extraer unos modelos de predicción fiables que justificaran las hipótesis planteadas. Van Landingham *et al.* (2013) plantearon un experimento que permitiera ofrecer una respuesta a si los pacientes con glaucoma estaban capacitados para conducir, pudiendo de esta forma validar y/o rechazar un gran número de estudios precedentes que presentaban unos resultados contrapuestos.

El método de conducción naturalista es el método de experimentación más adecuado para este tipo de estudios ya que permite analizar el comportamiento al volante de grandes grupos de conductores en condiciones reales de conducción. Este método de experimentación permite obtener modelos de datos más completos y fiables gracias a una monitorización continua en el tiempo de una serie de parámetros cinemáticos (Cafiso y Cerni, 2012). Además, el proceso de captura de la información no se limita al registro de datos alfanuméricos, sino que se cuenta con imágenes video que permiten obtener una visión más completa de los patrones de conducción.

En este capítulo se propone una metodología propia para el análisis de patrones de conducción a partir de datos obtenidos mediante conducción naturalista. Se presentan dos modelos de representación de los datos: (a) gráfico-estadística y (b) cartográfica. La mayor parte de estudios previos proponen un simple análisis numérico y estadístico de los datos que se limita al cálculo de una serie de estimadores estadísticos básicos como el valor medio. Este modelo de análisis de los datos es el que más frecuentemente se emplea y permite obtener una interpretación global de los datos. Sin embargo, el análisis de patrones de conducción a partir de parámetros de centralidad puede llevar a una interpretación sesgada de estos datos al no tener en cuenta la variabilidad de los mismos. Por esta razón, los estudios estadísticos requieren de la estimación de una serie de parámetros de dispersión que determinen, de alguna forma, el modelo distribución de nuestros datos. Los valores en determinados percentiles o intervalos, además del valor de desviación típica, son algunos de los parámetros de dispersión más representativos.

Los programas empleados para la obtención de una representación gráfico-estadística de los datos son programas genéricos como *Microsoft Excel* o algún software matemático y estadístico como *Matlab*, *SPSS* o *Statgraphics*. Sin embargo, estos programas suelen presentar una limitada capacidad operativa, sobre todo en lo relativo a la representación de los datos. El número máximo de puntos de datos representables en *Microsoft Excel* es de 32.000 en gráficos 2D y de 4.000 en gráficos 3D. Esto supone un

problema importante en experimentos de conducción naturalista, en los que se suelen manejarse bases de datos muy amplias.

Previo a la realización de cualquier análisis estadístico es necesario evaluar el tipo de muestra y el modelo de distribución de los datos. El modelo más ampliamente extendido, la *distribución normal*, presenta una forma de *campana de Gauss* en la que el 68,2% de los datos están dentro del intervalo determinado por la media y la desviación típica en ambos sentidos ($\mu \pm \sigma$). (Forbes *et al.*, 2011). Sin embargo, no todas las distribuciones de datos encajan en este modelo, lo que limita el uso y validez de ciertos parámetros estadísticos empleados en distribuciones normales.

Los datos obtenidos en el proyecto piloto español de *PROLOGUE* requieren de un análisis específico. El primer aspecto importante es que la muestra empleada, de sólo cuatro conductores y cuatro días, es demasiado pequeña y escasamente representativa desde un punto de vista estadístico, lo que limita la fiabilidad de los resultados obtenidos. El segundo aspecto importante es que, a pesar de que prácticamente la totalidad del trazado corresponde a un mismo tipo de vía, existe una falta de normalidad de la distribución estadística de los datos. En las Figuras 7-16.a y 7-16.b se representa, en un diagrama de barras, la distribución de las velocidades de los conductores A y F durante el primer día del experimento. Ambos diagramas presentan una clara asimetría negativa (desplazamiento a la derecha) y unos altos niveles de *kurtosis* que se reflejan en un modelo de distribución con una forma muy pronunciada (puntiaguda) debido a la concentración de valores en el intervalo de velocidades que va entre los 90 y los 100 km/h. Este modelo de distribución de los datos se denomina *leptocúrtico*. El gráfico de *probabilidad normal* expuesto en las Figuras 7-16.c y 7-16.d confirma, de una forma clara, la anomalía estadística de la distribución de estos datos de velocidades en su conjunto, observándose la presencia de dos amplias colas de datos que difieren claramente de la línea diagonal que determina la distribución normal de los datos.

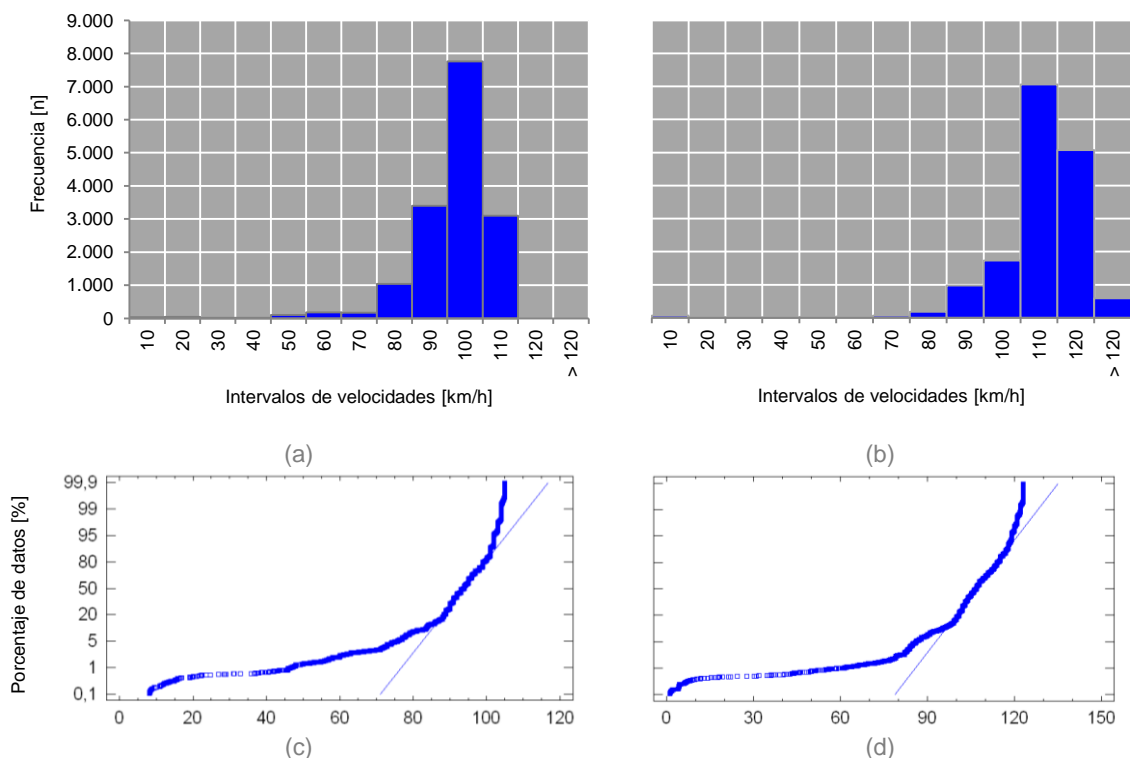


Figura 7-16: Histogramas y gráficos de probabilidad normal para el primer día de conducción de los conductores A (gráficos a y c) y F (gráficos b y d). Representación obtenida a partir de tramos de vía de un metro.

La falta de normalidad de estos datos se debe a la presencia de ciertos tramos de vía en los que el vehículo reduce exageradamente su velocidad. Los motivos de estas pérdidas de velocidad son la aparición puntual de retenciones del tráfico y/o la circulación del vehículo en tramos de vía que no son estrictamente de alta capacidad, como los carriles de aceleración o deceleración. Una alternativa para la obtención de muestras normales sería la de establecer una división de datos en tramos de vía (o sectores en el caso de gráficos) en los que las condiciones sean similares entre sí. Una segunda alternativa para la



normalización de los datos de la muestra sería la de aplicar estrategias propias de normalización. Balsa-Barreiro *et al.* (2012b) evaluaron el modelo de distribución de los datos de densidades obtenidas con un sensor láser aerotransportado (*LiDAR*) y plantearon la eliminación de los valores extremos u *outliers* que, de alguna forma, rompían la normalidad de la muestra. Sin embargo, este mismo estudio advierte que esta estrategia de eliminación de la información no es la más adecuada. Por esta razón, estos mismos autores llevaron a cabo un estudio posterior (Balsa-Barreiro y Lerma, 2014a) en el que plantearon la necesidad de operar con parámetros estadísticos diferentes en distribuciones anormales de datos desde un punto de vista estadístico. Para ello implementaron una serie de funciones polinómicas de ajuste respecto a los modelos de distribución de los datos, a partir de las cuales propusieron una estrategia de ponderación que incrementaba los pesos de los sectores centrales, mejor ajustados al modelo de distribución normal, y minimizaba los pesos de los sectores extremos.

La representación cartográfica de los datos obtenida con *Sistemas de Información Geográfica* (SIG) es la alternativa propuesta en este capítulo. Los SIG presentan una alta capacidad operativa y cuentan con una serie de herramientas óptimas para la obtención de una visión global de los datos. Estos sistemas permiten representar los grandes volúmenes de datos obtenidos en proyectos de conducción naturalista, además de una mayor y mejor explotación de dichos datos permitiendo así obtener mejores modelos de predicción y resultados más fiables.

La representación de parámetros cinemáticos mediante perfiles continuos facilita una visión intuitiva y global de los datos, permitiendo analizar en detalle la variabilidad existente en el comportamiento al volante de los distintos conductores. Además, este modelo de representación permite tener en cuenta el trazado recorrido y su influencia sobre los datos debido a la propia geometría de la vía y/o a otros factores. De esta forma, resulta simple la validación de ciertas hipótesis y conclusiones de algunos estudios, como el de Cafiso y Cerni (2012), en el que se afirma que la velocidad de un determinado conductor no depende únicamente del tramo de vía inminente (*visión* de la vía), sino también del trayecto ya recorrido (*efecto memoria*). Por tanto, la representación cartográfica de los datos permite evaluar más exhaustivamente los datos experimentales constatando, de una forma rápida y clara, la presencia de distintos patrones y sub-patrones de conducción en determinados tramos de vía.

El procesamiento de los datos de conducción naturalista mediante sistemas SIG permite una detección efectiva de valores extremos y/u *outliers* mediante un simple proceso de revisión visual. De esta forma, es posible eliminar estos valores y establecer tramos de vía y grupos de datos en los que el vehículo presenta un comportamiento similar, permitiendo de esta forma determinar subconjuntos de datos que siguen modelos de distribución normal. Esto presenta una gran importancia en experimentos de conducción naturalista en los que son frecuentes errores de registro de datos, que limitan o condicionan el proceso de análisis estadístico. Por esta razón, se recomienda la implementación de estrategias eficientes de control de calidad que permitan detectar errores en este tipo de experimentos (Balsa-Barreiro *et al.*, 2014).

Respecto a los parámetros analizados, la mayor parte de estudios sobre patrones de conducción se centran de forma exclusiva en el parámetro velocidad. Sin embargo, este capítulo propone el estudio de este parámetro complementado con otros como el régimen de giro del motor y la posición de los pedales de embrague, acelerador y freno. El estudio conjunto de estos parámetros permite evaluar, de una forma más exhaustiva y en detalle, los modelos de conducción y actitudes al volante de los distintos conductores.

El parámetro velocidad permite estimar, entre otros aspectos, el grado de cumplimiento de las normas de circulación, e incluso el nivel de agresividad al volante por parte de un determinado conductor. El régimen de giro del motor permite estimar, de forma parcial, el tipo general de conducción, el nivel de esfuerzo que sufre el motor, el grado de eficiencia energética del motor e incluso permite evaluar si el conductor efectúa la maniobra de cambio de marchas de una forma óptima. Una conducción en la que el régimen de giro del motor presenta unos bajos niveles de revoluciones por minuto y una variación progresiva en el momento del cambio de marchas, indica un modelo de conducción sostenible y eficiente, en términos tanto de consumo de combustible como de emisión de contaminantes. Por su parte, altos regímenes de giro del motor, unido a abruptas y frecuentes variaciones en el momento de realizar los cambios de marchas, son claros indicadores de un modelo de conducción poco sostenible, *forzado* e ineficiente.

El estudio propuesto presenta varios inconvenientes, relativos tanto a nuestros datos como a los resultados obtenidos. Respecto a los datos, nuestro experimento no se trató de un experimento de conducción naturalista *puro*, sino que hubo ciertos condicionantes como el hecho de que el conductor



recibiera una serie de instrucciones previas por parte del equipo investigador, que el vehículo no fuera el del propio conductor y que los dispositivos de adquisición de datos fueran claramente perceptibles, etc. Respecto a los resultados obtenidos, la muestra de datos era demasiado reducida (sólo cuatro conductores durante cuatro días), lo que limitó la fiabilidad del análisis estadístico.

El proceso de interpretación de los datos presenta diferentes perspectivas de análisis. La obtención de unos determinados patrones de conducción puede estimarse en función del recorrido de la matriz expuesta en la Figura 7-17:

- Recorrido en filas. Permite evaluar la conducción de un mismo sujeto en diferentes días, observando si existe una evolución en su comportamiento.
- Recorrido en columnas. Permite comparar la conducción de diferentes sujetos durante el mismo día de experimento. Este tipo de análisis permite evaluar el nivel de adaptación del conductor al vehículo, la existencia de predisposiciones y de errores de conducción habituales, e incluso si el planteamiento del estudio por parte del experimentador ha sido el adecuado.
- Recorrido en filas y columnas. Permite evaluar el comportamiento al volante de un *conductor tipo* respecto a una determinada población. De esta forma es posible implementar modelos predictivos *a priori* que permitan estimar el comportamiento habitual al volante de una determinada población.

días→						
	conductores↓	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	... A _i
		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	... B _i
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	... C _i
		D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	... D _i
	
		n ₁	n ₂	n ₃	n ₄	... n _i

Figura 7-17: Matriz teórica para el estudio de patrones de conducción.

Los estudios de patrones de conducción tienen cada vez más importancia dentro del mundo de tráfico y la seguridad vial. Entre otras posibilidades, este tipo de estudios permiten diseñar nuevas vías o modelos urbanos, planificar estrategias de tráfico urbano más eficientes, plantear restricciones a ciertos grupos de conductores, evaluar la implantación de una determinada normativa o programa de conducción, etc. Por tanto, este tipo de estudios permiten alcanzar una mejora desde las perspectivas de trabajo de los diferentes sectores relativos al mundo del tráfico: administraciones públicas, empresas del sector del automóvil, aseguradoras, etc. En este sentido, Rajagopal (2013) incide en que conocer los patrones de conducción conllevará a una mejora de la industria automovilística del futuro, permitiendo desarrollar coches más ajustados a las necesidades reales de los conductores. Un estudio más exhaustivo sobre la aplicación de sistemas SIG para el análisis de patrones de conducción se muestra en Balsa-Barreiro *et al.* (2012c).

CONCLUSIONES

Este capítulo propone una metodología de trabajo propia para el estudio de patrones a partir de datos de conducción naturalista. Se presentan dos modelos de representación de los datos: gráfico-estadístico y cartográfica. El primer modelo se determina a partir de la distribución estadística de los datos y aporta una visión general, aunque muy sintética, de los datos de los distintos conductores. Por su parte, el modelo de representación cartográfica permite incorporar la variable geográfica de los datos. Se presentan dos ejemplos concretos en los tramos inicial y final del trazado para uno de los conductores. Este método de representación permite un estudio más exhaustivo y una mayor explotación de los datos respecto a los métodos precedentes, lo que permite estimar unos modelos de predicción más fiables y ahondar en un mayor (y mejor) conocimiento de los modos de conducción.



CAP. 8

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES



Capítulo 8

8.1. DISCUSIÓN	231
8.1. CONCLUSIONES	237
8.1. FINAL CONCLUSIONS.....	240



8.1. DISCUSIÓN

Durante el último siglo se han producido grandes cambios socioeconómicos que han determinado el modelo de sociedades actuales. Desde un punto de vista poblacional, se ha producido una explosión demográfica en términos cuantitativos debido a los grandes avances médicos que han permitido alcanzar unos mejores niveles de cobertura sanitaria, una reducción de las tasas de mortalidad y un incremento generalizado de la esperanza de vida. Desde un punto de vista socio-económico, se ha producido una tendencia muy marcada a la *terciarización* de la base económica de todos los países, dentro de un contexto general de globalización económica. En consecuencia, se ha producido una redistribución de la población mundial hacia áreas urbanas a partir de procesos masivos de éxodo rural. Sin embargo, la forma en que se produce este fenómeno migratorio presenta notables diferencias entre los países ricos y pobres, observándose principalmente una tendencia mucho más reciente y acelerada en los países menos desarrollados.

La concentración de la población en áreas urbanas genera una serie de problemas de movilidad derivados de la incapacidad de absorción y saturación de los flujos de tráfico. Esta tendencia fue muy marcada en los países ricos durante el siglo XX y lo es ahora en los países en desarrollo, con la diferencia de que en estos últimos se observa un modelo acelerado. Por esta razón se requiere el diseño de redes de infraestructuras y planes de gestión de la movilidad, además de la puesta en marcha de medios de transporte que permitan cubrir las necesidades sociales de una forma más eficiente y con un menor impacto. Los países más desarrollados han hecho frente a este problema proponiendo modelos urbanos equilibrados y apostando por medios de transporte público, reduciendo el peso del coche privado y favoreciendo una nueva conciencia social en cuanto a los nuevos medios de transporte. Por su parte, en los países menos desarrollados la problemática ha sido más acusada debido al crecimiento acelerado de sus ciudades, la falta de conciencia social y medioambiental de sus habitantes y la ausencia tanto de infraestructuras adecuadas como de recursos económicos para la puesta en marcha de nuevas infraestructuras.

La propia tradición científica determina el éxito de las medidas y políticas sobre movilidad puestas en marcha por parte de las instituciones responsables. Los estudios sobre movilidad se han convertido en uno de los temas de investigación más recurridos dentro de las sociedades actuales. Su estudio presenta una amplia perspectiva de análisis, siendo habitualmente propuestos diversos enfoques como la gestión de flujos de tráfico, el diseño de redes de transporte, la reducción de emisiones contaminantes, etc. De todos estos temas, uno de los más que más importancia presenta es el relativo a la seguridad vial.

La siniestralidad en carretera supone un gran coste social tanto en número de muertes como de heridos de todo tipo. Además de este gran coste social, existe un coste económico que puede ser cuantificado de forma directa e indirecta. Los costes directos se refieren a la atención sanitaria a los heridos, mientras los indirectos se refieren a cómo las retenciones de los flujos de tráfico provocan retrasos sobre el desarrollo de ciertas actividades económicas. Existen algunos estudios sobre la estimación de los costes asociados a la siniestralidad vial, como el publicado por la *Dirección General de Tráfico* en el año 2011, en el que se valoraban entre el 0,56 y el 1,04% del PIB español (DGT, 2011). Toda esta casuística explica que tanto las administraciones e instituciones públicas responsables como ciertas empresas privadas (aseguradoras, empresas automovilísticas, etc.) hayan invertido recursos en favor de la investigación e innovación de aspectos relativos a la mejora de la seguridad vial.

Los estudios sobre seguridad vial proponen estrategias para la reducción de la siniestralidad y la mejora de los niveles de eficiencia en la gestión de flujos de tráfico. Los verdaderos motivos que explican la mayor parte de siniestros en carretera están determinados por la componente humana de la conducción. El estudio del comportamiento al volante de un grupo de conductores permite extraer una serie de tendencias que *modelizan*, en cierta medida, la componente humana de la conducción. Para ello deben plantearse proyectos en los que participen muestras amplias de conductores que resulten representativas de una determinada población.

La mayor parte de estudios sobre conducción presentan claros inconvenientes desde el punto de vista del método de experimentación empleado, basado principalmente en las reacciones de los conductores en ambientes simulados o bien en sus propias respuestas a una serie de cuestionarios. Los principales inconvenientes a estos métodos son que los estudios desarrollados en simuladores no responden a condiciones reales de conducción mientras que los basados en cuestionarios presentan una importante componente subjetiva. En ambos casos, los resultados obtenidos no pueden ser fácilmente extrapolables



a la realidad, lo que añade una clara incertidumbre sobre muchos de los resultados obtenidos en estos estudios.

El método de conducción naturalista es uno de los más adecuados para estudios de tráfico y seguridad vial. Este método consiste en la observación de una serie de conductores en condiciones reales de conducción. Los estudios de conducción naturalista permiten obtener más información y de mejor calidad que los métodos de experimentación habitualmente empleados. Sin embargo, este método presenta una serie de inconvenientes adicionales como la dificultad en la monitorización (y *parametrización*) de ciertas actitudes al volante, además del requerimiento de grandes recursos tanto en la fase de captura como en la fase de procesamiento de los datos.

Durante la fase de captura de datos, los vehículos experimentales se equipan con un conjunto numeroso de sensores que permiten la adquisición masiva de datos a altas frecuencias temporales. Si tenemos en cuenta que el tamaño de la muestra de conductores monitorizados debe ser amplio para obtener una mejor representación de la población real, el volumen de datos finalmente obtenido se incrementa exponencialmente. Esto supone la generación de grandes volúmenes de datos, difíciles de manipular y gestionar en las posteriores fases de análisis de dichos datos (Sandu-Popa *et al.*, 2008). Una idea aproximada del volumen de datos generado la ofrece el proyecto piloto español de *PROLOGUE*, en el que sólo participaron cinco conductores durante cuatro días recorriendo un trayecto de unos 15 km en ambos sentidos de circulación. El número de registros o filas de la base de datos obtenida fue de unos 7,2 millones y de unos 576 millones si tenemos en cuenta el conjunto de parámetros registrados (filas x columnas).

Los estudios de este tipo desarrollados hasta el momento no son *estrictamente* naturalistas lo que limita, en cierta forma, la validez de los resultados obtenidos. Un experimento de conducción *puramente* naturalista requiere que el vehículo experimental sea el del propio conductor. En el proyecto piloto español de *PROLOGUE*, como en la gran mayoría de proyectos de este tipo llevados a cabo, se empleó un mismo vehículo experimental para todos los conductores. Además, este vehículo presentaba una gran aparatosidad instrumental (Figura 8-1), lo que pudo condicionar el comportamiento al volante de los respectivos conductores. Se espera que en los próximos años el tamaño de los dispositivos de adquisición de datos empleados en este tipo de experimentos pueda ser reducido hasta el punto de que puedan llegar algún día a ser completamente mimetizados dentro del equipamiento del propio vehículo.

La experiencia del proyecto piloto español de *PROLOGUE* demostró además otros aspectos que contradecían un método de experimentación *puro* como que parte del trazado recorrido estuviera parcialmente determinado o el hecho de que los investigadores proporcionaran a los conductores una serie de instrucciones previas apuntando algunas anotaciones y determinando un tiempo máximo de duración del trial (Valero-Mora *et al.*, 2010).



Figura 8-1: Interior del vehículo ARGOS empleado en el proyecto piloto español de *PROLOGUE*: (a) parte trasera y (b) salpicadero del vehículo. Fuente: Valero-Mora *et al.* (2010).

El nivel de instrumentación del vehículo experimental y tipo de dispositivos empleados presenta una gran importancia en proyectos de conducción naturalista. Algunos de estos dispositivos, como los sensores de seguimiento ocular o los sistemas inerciales, presentan habitualmente unos altos costes que vienen determinados en función de sus características y especificaciones técnicas. Existen algunos estudios centrados en el planteamiento de estrategias de instrumentación de vehículos experimentales. Un ejemplo recurrente es la integración de sensores inerciales y sistemas GNSS para la captura de datos de



posicionamiento y actitud del vehículo (Caron *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2005; Sukkarieh *et al.*, 1999). Los vehículos empleados en aplicaciones de *cartografiado móvil* (MMS) presentan ciertas similitudes con el tipo los vehículos experimentales empleados en conducción naturalista. Este tipo de vehículos requieren una captura precisa de datos de posicionamiento y acoplan ciertos sensores de alto coste. Sin embargo, los tiempos de adquisición de datos son menores y pueden ser distribuidos en diferentes intervalos temporales. Además, la intervención de operadores e investigadores para la calibración y mantenimiento del sensor puede darse en cualquier momento, a diferencia de lo que ocurre en los experimentos de conducción naturalista.

La puesta en marcha de proyectos de conducción naturalista requiere de estudios exhaustivos acerca tanto de los dispositivos como de las posibles estrategias para la adquisición de los datos. Estos proyectos presentan varios condicionantes propios como la captura de datos a altas frecuencias, los largos tiempos de exposición, la robustez del sensor y la *no-interacción* de la actividad investigadora con los conductores. Cualquier estudio de conducción naturalista debe plantear un nivel de instrumentación óptima de acuerdo a sus objetivos de investigación planteados. Una *sub-captura* de información conlleva al incumplimiento de los objetivos de investigación, mientras que una *sobre-captura* (de información) aumenta la dificultad del procesamiento y análisis de los datos. Ambos estadios suelen conllevar a una pérdida de fiabilidad de los resultados obtenidos, además de un incremento de los recursos (económicos) necesarios.

Valero-Mora *et al.* (2013) proponen tres grandes niveles de instrumentación de los vehículos empleados en experimentos de conducción naturalista en función de los objetivos de investigación planteados: bajo, medio y alto. Sin embargo, este estudio ofrece una perspectiva muy general y no plantea tipos y/o modelos concretos de dispositivos más óptimos en cada uno de los niveles. El proyecto piloto español de *PROLOGUE* presentó numerosas deficiencias en la instrumentación del vehículo lo que se puso de manifiesto en la ausencia de una estrategia de calibración o en el hecho de que algunos dispositivos no llegaron a funcionar correctamente. Ejemplos concretos de estas deficiencias fue el mal posicionamiento de algunas cámaras o las pérdidas eventuales y permanentes de algunos datos, como los datos de posicionamiento. La propuesta de estrategias para la adquisición de datos debe minimizar la frecuencia y duración de los episodios de pérdidas, evitar incompatibilidades y aumentar la complementariedad en el funcionamiento de los diferentes sensores.

Los principales proyectos de conducción naturalista puestos en marcha hasta el día de hoy son proyectos a gran escala llevados a cabo en diferentes espacios geográficos. Los principales proyectos de este tipo son el *SHRP-2* y el estudio de los *100 coches* en EEUU, además de *PROLOGUE* y, previsiblemente, *UDRIVE* en Europa (Eenink *et al.*, 2014). Todos estos proyectos requieren de grandes recursos económicos y su desarrollo se lleva a cabo durante amplios períodos de experimentación que llegan a superar, en alguno de estos proyectos, los cinco años. Estos proyectos presentan una serie de objetivos de investigación muy genéricos como la modelización del comportamiento de los conductores o la detección de eventos críticos para la seguridad. Sin embargo, se espera que los datos obtenidos en estos proyectos puedan ser analizados y explotados de forma mucho más exhaustiva en los próximos años desde nuevas perspectivas de análisis.

A pesar de la importancia de estos proyectos a gran escala, deben llevarse a cabo proyectos similares a menor escala y/o centrados en otros ámbitos geográficos. Regan *et al.* (2012) justifican la puesta en marcha de un proyecto propio a gran escala en Australia destacando, entre estos motivos, la imposibilidad de extrapolar a su realidad geográfica muchos de los resultados obtenidos en grandes estudios presentados anteriormente. Además, deben llevarse a cabo proyectos de este tipo a niveles de escala menor, centrándose en determinados grupos de conductores en función, por ejemplo, de las edades, recursos económicos y/o estado físico de los participantes. Respecto a los objetivos de investigación, la mayor parte de proyectos se han centrado principalmente en el estudio del comportamiento al volante de un grupo de conductores. Sin embargo, en los próximos años los posibles enfoques de investigación de este tipo de proyectos serán ampliados, pudiendo ser planteada su aplicación en temas como la optimización de la señalización viaria, la inspección del estado de las carreteras o el estudio de la geometría de la vía, entre otros temas. Este tipo de estudios requieren de la implementación de programas que permitan una detección lineal de las marcas de señalización viaria de la vía, como de los límites de su pavimento (Bassani *et al.*, 2012). La ventaja de la conducción naturalista respecto al *cartografiado móvil* (MMS) es que permite ampliar la red de carreteras estudiada al llevar a cabo una observación y monitorización constante y continuada en el tiempo en función, además, de la propia elección aleatoria de vías por parte de los conductores. La Figura 8-2 muestra algunas imágenes



capturadas con las cámaras del vehículo ARGOS, en las que se observan deficiencias en ciertos tramos de la vía estudiada relativas tanto a un mal estado de conservación del pavimento como a una mala (o inadecuada) visibilidad de la señalización horizontal de la vía.

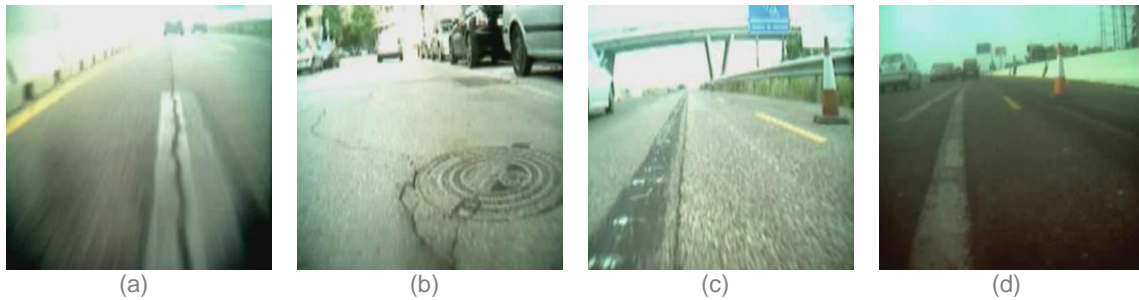


Figura 8-2: Deficiencias del propio trazado estudiado detectadas mediante las cámaras laterales del vehículo experimental ARGOS en el proyecto piloto español de PROLOGUE, relativas tanto al pavimentado (a y b) como a la señalización horizontal de la vía (c y d).

La revisión de los principales proyectos de conducción naturalista llevados a cabo hasta el momento reflejan dos problemas principales: las pérdidas de datos durante la fase de captura de datos y los bajos niveles de aprovechamiento de la información durante la fase de análisis de dichos datos. Las pérdidas de datos son frecuentes a pesar del esfuerzo por implementar estrategias con el fin de evitarlas (Backer-Grøndahl *et al.*, 2011; Sagberg *et al.*, 2011). Las causas de aparición de estos episodios de pérdidas se deben a la propia complejidad instrumental del vehículo experimental y a los altos tiempos de exposición, que provocan la aparición de fallos técnicos en los dispositivos. Estas pérdidas suponen una reducción del volumen de datos obtenidos, lo que genera un problema grave que reduce tanto las posibilidades de análisis como la fiabilidad de los resultados finalmente obtenidos.

La fase de análisis de datos de conducción naturalista presenta una gran complejidad. Por esta razón, los procedimientos de análisis suelen limitarse a tramos de vía o eventos muy concretos. Los grandes volúmenes de datos obtenidos requieren de estrategias de filtrado o detección de incidentes que presenten altos niveles de fiabilidad y bajos niveles de carga manual. Sin embargo, la mayor parte de estudios previos presentan metodologías de detección de incidentes poco fiables (Dozza y Pañeda, 2012). La revisión de los datos video es lenta y multiplica los tiempos de análisis de datos por varios enteros respecto al tiempo de experimentación. Valero-Mora *et al.* (2010) estimaron que el tiempo de revisión de los videos en el proyecto piloto español de PROLOGUE fue del orden del doble del tiempo requerido por la captura de datos.

El método de conducción naturalista presenta todavía una escasa tradición científica, lo que justifica la ausencia de metodologías de trabajo óptimas y claramente aceptadas. La mayor parte de estudios se basan en programas de software comercial implementado y desarrollado para aplicaciones muy concretas, los cuales ofrecen una limitada capacidad de análisis de los datos. Este estudio plantea una metodología de trabajo basada en el uso de *Sistemas de Información Geográfica* (SIG) como herramienta más adecuada para el análisis y representación de datos de conducción naturalista.

El uso de sistemas SIG requiere obligatoriamente que los datos obtenidos cuenten con información asociada de posicionamiento. Para ello es importante la implementación de estrategias de adquisición de datos de posicionamiento que estén particularizadas para experimentos de conducción naturalista. La estrategia más habitual para la obtención de estos datos es mediante los sistemas GNSS (Berrocoso-Domínguez, 2012), los cuales ofrecen un servicio de posicionamiento de tipo gratuito. Estos sistemas permiten alcanzar unos niveles de precisión relativamente altos en cualquier momento del día (funcionamiento ininterrumpido) y en cualquier posición del globo terrestre (cobertura global). El sistema más extendido de este tipo y el único que presenta actualmente unos niveles de cobertura global es el sistema NAVSTAR-GPS, propiedad del gobierno estadounidense. El funcionamiento de este sistema, aunque está basado en unos principios teóricos muy simples, presenta una configuración y una infraestructura de cierta complejidad.

El posicionamiento con sistemas GNSS presenta ciertos inconvenientes tales como la falta de integridad o la pérdida de la señal en determinados ambientes como centros urbanos, zonas boscosas o espacios *indoor*, tales como túneles o garajes. El posicionamiento obtenido a partir de la señal satelital presenta ciertas deficiencias que pueden ser parcialmente superadas con el uso de sistemas diferenciales (DGNS) o el uso simultáneo de dispositivos complementarios, como los sensores inerciales. Por esta



razón es importante la implementación de estrategias de posicionamiento que se adecúen a las condiciones particulares de cada experimento. La estrategia óptima es aquella que mejor se adapta a las especificaciones tanto técnicas (niveles de precisión, frecuencias de registro de datos, etc.) como económicas del proyecto. El objetivo final de estas estrategias es la reducción tanto de la frecuencia como de la duración de episodios de malfuncionamiento de los dispositivos de adquisición de datos durante la fase de captura de la información.

La mayor parte de proyectos de conducción naturalista llevados a cabo presentan ciertos episodios de pérdidas de datos, siendo los datos referidos al posicionamiento unos de los más frecuentemente afectados. Los enormes recursos necesarios para la puesta en marcha de estos proyectos hace necesaria la implementación de procedimientos que permitan la recuperación de este tipo de datos en caso de pérdidas prolongadas en el tiempo. En este trabajo se propone un procedimiento semiautomático que permite la georreferenciación de todos los puntos de trazado a partir de la detección de dos simples puntos, uno inicial y el otro final. Este método se basa en la interpolación de los datos en función del incremento de los valores de *distancia recorrida* entre los sucesivos puntos de registro de datos. Estos valores de incremento de distancia entre puntos dependen de la velocidad del vehículo en cada momento para cada uno de los conductores y/o días del experimento (Balsa-Barreiro *et al.*, 2013).

El método implementado permite alcanzar unos resultados óptimos con bajos niveles de error asociado. La implementación de métodos para la recuperación de datos permite además incrementar los niveles de aprovechamiento de los datos registrados e incluso plantear nuevos estudios dentro de los proyectos ya llevados a cabo. De esta forma, se obtienen unos mayores ratios de eficiencia de los recursos invertidos y un aumento de los niveles de fiabilidad de los resultados obtenidos.

El método implementado sólo permite la recuperación de datos de posicionamiento en su componente planimétrica. La información relativa a la componente altimétrica puede ser estimada a partir de la generación de un *modelo digital del terreno* (MDT) de la zona de estudio. Las nubes de puntos obtenidas mediante barrido láser (*LiDAR*) permiten generar *MDTs* de forma eficiente, pudiendo ser obtenidos niveles de precisión del orden de los 15 cm, muy superiores a los obtenidos mediante las técnicas clásicas (Balsa-Barreiro, 2012a y 2012b; Balsa-Barreiro y Lerma, 2006). En el caso de España, el *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea* (PNOA) dispone, de forma gratuita y pública, de datos *LiDAR* recientes de la mayor parte del territorio español. El procesamiento de estos datos con programas SIG permite obtener información de la componente altimétrica de los puntos, pudiendo ser estimada de esta forma la geometría transversal de la vía. La estimación de las alturas en relación a los parámetros cinemáticos del vehículo permite analizar el comportamiento del conductor en función de la los niveles de curvatura y peralte de la vía.

Los sistemas SIG cuentan con dos interfaces de trabajo, una alfanumérica y otra gráfica. La vinculación entre ambas interfaces permite procesar y editar datos desde cualquiera de ellas. En el momento de editar los datos, las opciones de geoprocésamiento interno del sistema permiten recalculas las relaciones topológicas entre los elementos en la interfaz gráfica. Esta interfaz es la que mayor peso presenta en este tipo de sistemas permitiendo una representación de la información en función de la componente espacial de los datos. Por su parte, la interfaz alfanumérica ofrece un modelo de gestión de los datos similar a otros *sistemas gestores de bases de datos* (SGBD) (Balsa-Barreiro, 2008).

Entre las principales ventajas de los sistemas SIG sobre otras herramientas de trabajo está su propio modelo de representación de los datos. Los SIG permiten obtener una representación cartográfica de los datos a partir de una serie de entidades geométricas simples: puntos, líneas y polígonos. En el caso de datos de conducción naturalista, es posible la obtención de perfiles continuos de representación de los parámetros cinemáticos tomando como eje el propio trazado de la vía. La alta capacidad operativa de estos sistemas permite obtener una representación global de los datos que facilita el análisis e interpretación de dichos datos. El modelo de representación cartográfica permite obtener una visión intuitiva de los datos, disponiendo la información de cada conductor sobre cada punto del trazado. Este tipo de sistemas favorece la participación de equipos multidisciplinares dada la sencillez representativa y la facilidad de uso de ciertas herramientas. Además, su alta capacidad operativa permite llevar a cabo una manipulación y procesamiento de los grandes volúmenes de datos obtenidos en proyectos de conducción naturalista.

Los sistemas SIG permiten obtener una visión integral del conjunto de nuestros datos, la cual puede ser ajustada a las necesidades del operador a través de ciertas herramientas. Esta visión de los datos permite

adoptar otros enfoques de investigación, siendo incluso posible plantear nuevos estudios que todavía no han sido planteados en proyectos de conducción naturalista.

El estudio de patrones de conducción permite determinar las tendencias habituales de conducción por parte de un determinado grupo de conductores. Este tipo de estudios presentan un gran interés, aunque apenas han sido planteados estudios de este tipo a partir de datos de conducción naturalista. El empleo de metodologías de trabajo basadas en sistemas SIG permite obtener una visualización rápida y efectiva de los datos en su conjunto. La representación cartográfica presenta una serie de ventajas sobre la representación gráfico-estadístico de los datos, permitiendo llevar a cabo análisis más exhaustivos de los modelos de conducción de los participantes en tramos de vías concretos. La organización de la información asociada a cada conductor y/o día en capas de información permite la obtención de un modelo de representación más claro que favorece una mejor interpretación de los datos, incrementando de esta forma la fiabilidad de los resultados finalmente obtenidos.

El conjunto de ventajas de los sistemas SIG sobre otras herramientas, permite plantear una nueva metodología para el control de calidad de datos obtenidos en proyectos de conducción naturalista (Balsa-Barreiro *et al.*, 2014). Este modelo de representación favorece una detección rápida y eficiente de posibles errores, tanto absolutos como relativos, dentro del conjunto de los datos obtenidos. La principal ventaja de esta metodología se da fundamentalmente en la detección de *errores relativos*, permitiendo recortar exponencialmente los tiempos y la carga manual respecto a las metodologías de trabajo habitualmente empleadas.

La Figura 8-4 muestra la representación de varios parámetros cinemáticos asociados a la conducción de uno de los participantes del proyecto piloto español de *PROLOGUE*. El tramo de vía estudiado se representa en la Figura 8-3. La revisión de los datos de velocidad (Figura 8-4.c) muestran tres reducciones abruptas y casi continuadas en un sector intermedio del tramo de vía estudiado. Cada una de dichas reducciones presenta una magnitud y una duración temporal distinta. Sin embargo, la representación de otros parámetros cinemáticos no muestra ninguna variación en el régimen de giro del motor (Figura 8-4.a) ni de la posición del pedal de freno, que no llega a ser pisado en ningún momento (Figura 8-4.d). De esta forma, las reducciones de velocidades registradas por el vehículo son, en realidad, fallos debidos al malfuncionamiento del dispositivo de adquisición de datos de velocidad. La visualización de los videos del vehículo en este tramo permite complementar este análisis y confirmar este error.

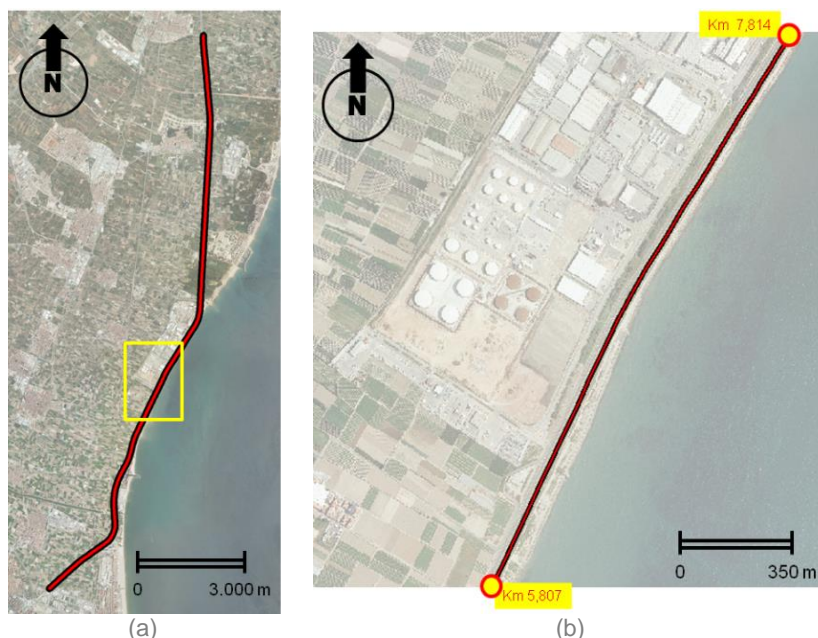


Figura 8-3: (a) Localización y (b) vista en detalle de la zona de estudio.

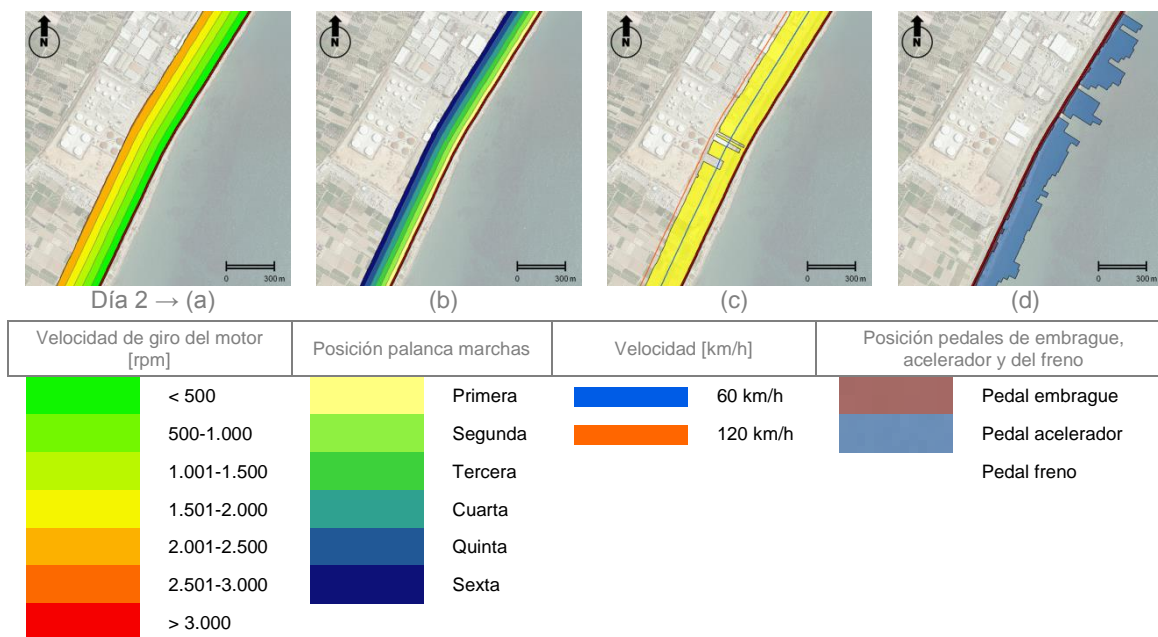


Figura 8-4: Representación de diferentes parámetros de conducción asociados al conductor A. Fuente: (Balsa-Barreiro *et al.*, 2014).

La metodología y resultados expuestos en este trabajo muestran la validez de la hipótesis planteada inicialmente acerca de la importancia de los modelos de información geográfica (y cartográfica) dentro de la conducción naturalista en cualquiera de las fases de trabajo planteadas: (I) la fase de adquisición de datos, con la implementación de estrategias propias para la adquisición de datos de posicionamiento a partir de sistemas GNSS y (II) la fase de procesamiento de los datos, con el uso de las herramientas implementadas en los programas SIG.

8.2. CONCLUSIONES

Una recapitulación de los principales resultados obtenidos en este proyecto de tesis, junto a posibles líneas de investigación futuras, se muestran a continuación para los respectivos capítulos:

Capítulo 1: Contextualización. Los modelos de gestión de las infraestructuras de transporte y flujos de tráfico aplicados por cada gobierno ponen de manifiesto una gran variabilidad geográfica. En este capítulo se representan una serie de parámetros de siniestralidad tanto a nivel europeo como español, teniendo en cuenta una perspectiva de análisis de la información tanto estática como dinámica desde un punto de vista temporal. Así, se analizan una serie de índices en los años más recientes, además de su evolución durante un intervalo de tiempo más o menos prolongado. Se observan ciertos patrones en la distribución de estos índices de siniestralidad que muestran cómo los países o regiones más ricas tienden a presentar unos índices de siniestralidad vial más bajos. Los motivos a esto se deben a que estos países (o regiones) cuentan con unas mejores infraestructuras e invierten más recursos en programas tanto de educación vial como de prevención de accidentes, lo que permite a sus habitantes alcanzar una mayor cultura al volante. Además, su mayor tradición científica en estudios sobre temas de tráfico y seguridad vial les ha permitido poner en marcha una serie de políticas y normativas adecuadas.

En los próximos años, estudios más exhaustivos acerca de la variabilidad en la distribución espacial de todos los parámetros significativos de gestión de tráfico a diferentes escalas de análisis deben ser llevados a cabo. Además, deben ser estimados los niveles de correlación entre la variabilidad geográfica en la distribución de los parámetros de siniestralidad y una serie de factores socioeconómicos asociados.

Capítulo 2: La conducción naturalista. La siniestralidad vial conlleva unos altos costes tanto sociales como económicos. La investigación acerca de temas de tráfico y seguridad vial permite reducir los niveles de siniestralidad. Por esta razón es necesario un estudio exhaustivo y continuado de los motivos reales que explican la aparición de accidentes.



Los métodos tradicionales de investigación en temas de tráfico presentan ciertas deficiencias. Una de ellas es su falta de rigor que se demuestra en la subjetividad del propio conductor en el momento en que contesta a cuestionarios, tanto en los que se realizan antes como después de un determinado incidente. Esta falta de rigor es habitual también en los partes policiales de reconstrucción de accidentes, en los que suelen estar presentes muchas incógnitas y donde el agente basa su atestado en las opiniones de los propios implicados y/o algunos testigos. Por otra parte, los estudios en simulador responden a condiciones no reales de conducción en las que el propio investigador determina el tiempo y las condiciones de experimentación. En consecuencia, los resultados obtenidos en estos tipos de estudios no pueden ser fácilmente extrapolables a condiciones reales de conducción.

Este método de experimentación permite una monitorización continua e inobstrusiva del comportamiento al volante de un grupo de conductores en condiciones reales. Sin embargo, a pesar de superar muchos de los inconvenientes de los métodos de investigación anteriores, presenta una serie de inconvenientes propios. Entre ellos los grandes recursos necesarios debido no sólo al alto coste del instrumental de medida, sino también a los tiempos prolongados de experimentación (de años en muchos casos) y a la monitorización de grupos más o menos numerosos de conductores, llegando a ser de cientos en algunos proyectos.

Los proyectos de este tipo llevados a cabo no son *puramente* naturalistas por una serie de factores como el que los dispositivos y sensores deben estar integrados en el vehículo y ser imperceptibles e inaudibles para el conductor. Además el vehículo experimental debe ser el propio del conductor y el experimentador no debe intervenir en ningún momento sobre la conducción de los participantes.

Entre las líneas de investigación futuras dentro de este tema, deben ser planteados estudios comparativos en función de sus resultados empleando distintos métodos de experimentación. Además, deben plantearse estudios de conducción naturalista sobre diferentes muestras de conductores en función de su condición física y/o socioeconómica, teniendo en cuenta además diferentes ambientes geográficos y escalas de análisis.

Capítulo 3: Sistemas GNSS. Los GNSS son los sistemas más habitualmente empleados para la adquisición de datos de posicionamiento. Estos sistemas permiten una buena estimación del posicionamiento en cualquier parte del globo y momento del día de una forma gratuita y sencilla. Sin embargo, siguen existiendo ciertos inconvenientes para el uso masivo de esta tecnología como que los niveles de precisiones no son suficientes para ciertas aplicaciones o que una correcta recepción de la señal está limitada en ciertos ambientes.

El uso de sistemas de aumentaciones permite una mejora de las prestaciones obtenidas con los sistemas GNSS cumpliendo, de esta forma, con los requerimientos de ciertas aplicaciones civiles. Entre estos sistemas los más conocidos son los sistemas basados en satélites (SBAS) los cuales permiten una mejora de prestaciones en regiones muy extensas. Sin embargo, a pesar de todas las mejoras aportadas por estos sistemas, siguen existiendo ciertos inconvenientes importantes como la dependencia respecto a los sistemas GNSS y la ausencia de un servicio tanto de garantía de la señal como de responsabilidad en caso de fallo.

Actualmente el desarrollo de estos sistemas se encuentra en una etapa de transición en la que se ponen en marcha una serie de soluciones *provisionales* a los sistemas GNSS operativos desde la *fase GNSS-1*, NAVSTAR-GPS y GLONASS, ambos sistemas de origen militar. El futuro de estos sistemas pasa por una nueva concepción de los mismos, apostando por una modernización tecnológica y una apertura política de los sistemas GNSS ya existentes, además de la puesta en marcha de un nuevo sistema GNSS de origen plenamente civil. El gran desafío de la *fase GNSS-2* es el llegar a plantear un *sistema global de sistemas GNSS* (algo así como GNSSS), donde la interoperabilidad entre todos los sistemas GNSS permitirá a cualquier usuario alcanzar una estimación del posicionamiento a partir de satélites de diferentes sistemas simultáneamente, lo que incrementará el número de redundancias y permitirá una gran mejora de las prestaciones.

El sistema GNSS europeo, *Galileo*, será el primero de origen plenamente civil, el cual estará orientado por y para el mercado. Este sistema transmitirá señales en nuevas frecuencias, contará con cuatro niveles de servicios y presentará algunas mejoras sobre los sistemas actuales, incluyendo un servicio de integridad y garantía de la señal en caso de fallo, estimando un tiempo máximo de alarma de unos seis segundos.



Todas estas mejoras permitirán a este sistema satisfacer los requerimientos de nuevas aplicaciones, sobre todo dentro del campo de la aviación civil.

En los próximos años, será necesario llevar a cabo actualizaciones y revisiones periódicas acerca del estado de los sistemas GNSS actualmente operativos y los pendientes de ser puestos en marcha, además de las tecnologías complementarias o soluciones transitorias como las aportadas por los sistemas de aumentaciones, teniendo en cuenta las modificaciones periódicas e incidencias.

Capítulo 4: Estrategias de adquisición de datos de posicionamiento en proyectos de conducción naturalista. En este capítulo se plantean posibles estrategias para la adquisición de datos de posicionamiento en experimentos de conducción naturalista. Los experimentos de este tipo requieren de la obtención de datos de posicionamiento a altas frecuencias temporales y de forma ininterrumpida en el tiempo. Las alternativas planteadas se basan principalmente en sistemas GNSS complementados con una serie de técnicas adicionales. El uso de receptores de gama alta permite una mejora de la recepción de la señal satelital y una minimización de los tiempos de readquisición de la misma, lo que permite reducir los episodios y/o duración de las pérdidas de datos. El posicionamiento diferencial permite obtener una clara mejora de las prestaciones respecto a la señal satelital. Para este tipo de posicionamiento pueden emplearse distintos sistemas, aunque los más extendidos son los basados en satélites (SBAS), los cuales presentan unas amplias coberturas. Otra alternativa para la adquisición de datos de posicionamiento es el uso de sistemas integrados y complementados de tipo GPS+INS, en los cuales los sistemas inerciales permiten obtener información de posicionamiento en momentos de pérdida de la señal satelital.

Las estrategias propuestas presentan una serie de ventajas e inconvenientes asociados cada uno de ellos. Todas estas estrategias se basan, en mayor o menor medida, en sistemas GNSS, los cuales no ofrecen a día de hoy un servicio de garantía de su señal, al menos hasta la puesta en marcha de *Galileo*. En los próximos años, la interoperabilidad entre todos los sistemas GNSS durante la *fase GNSS-2* supondrá un incremento del número de satélites en vista y de la medida de redundancias, siendo posible alcanzar unas mejores prestaciones por parte de estos sistemas. Con el uso de sistemas integrados es posible reducir la dependencia respecto a la señal satelital gracias a los sensores inerciales, los cuales permiten estimar el posicionamiento de una forma autónoma. Sin embargo, presentan como inconvenientes su alto coste, su compleja integración con sensores GPS, además del *efecto deriva* de los sensores inerciales que explica la tendencia a errores crecientes en función del tiempo.

La estrategia más adecuada para la adquisición de datos de posicionamiento en este tipo de experimentos depende de los objetivos de investigación, las especificaciones técnicas y las condiciones económicas del proyecto. En los próximos años, deben ser llevados a cabo estudios exhaustivos que permitan una optimización de los recursos y una reducción tanto del número como de la duración de los episodios de pérdidas de datos. Además, deben ser llevados a cabo estudios que permitan cuantificar los costes reales de cada una de las estrategias teniendo en cuenta una serie de sensores concretos.

Capítulo 5: Recuperación de datos de posicionamiento en proyectos de conducción naturalista empleando sistemas SIG. Las pérdidas de datos son relativamente frecuentes en experimentos de conducción naturalista, pudiendo llegar a suponer volúmenes muy significativos de datos. En este capítulo se propone un método para la recuperación de datos de posicionamiento en proyectos de conducción naturalista empleando herramientas implementadas en sistemas SIG. El método propuesto permite la recuperación de datos de posicionamiento en episodios de pérdidas prolongadas. Este procedimiento presenta una baja carga manual de trabajo limitada a la identificación de eventos en la parte inicial y final de trayecto estudiado. Este procedimiento presenta unos altos niveles de fiabilidad y su metodología es exportable a otros proyectos similares.

La metodología propuesta permite incrementar la explotación de recursos en los proyectos ya llevados a cabo aumentando el volumen de datos disponible. Esto permite llevar a cabo, por una parte, estudios más exhaustivos como, por otra parte, plantear posibles nuevos estudios a partir de datos antes inexistentes. De esta forma se incrementa el nivel de eficiencia en el uso de recursos económicos asignados a estos proyectos.

En próximos estudios debe ser evaluada la fiabilidad en la estimación de los datos de posicionamiento en puntos intermedios del trazado, no limitada únicamente a los puntos inicial y final del trazado. Además



deben ser llevados a cabo nuevos procedimientos similares al presentado en este capítulo, aunque no sólo limitados a la recuperación de datos de posicionamiento. Estos procedimientos permitirán aumentar los niveles de eficiencia de los recursos requeridos tanto en los grandes proyectos que ya han sido llevados a cabo como aquellos proyectos que puedan ser desarrollados en un futuro próximo.

Capítulo 6: Representación de datos obtenidos en proyectos de conducción naturalista empleando sistemas SIG. La dificultad en la gestión de los grandes volúmenes de datos obtenidos en este tipo de proyectos se pone de manifiesto durante la fase de procesamiento de la información. Así, la mayor parte de estudios publicados sobre el tema se centran en el análisis de un cierto tipo de eventos cuyo número puede llegar a ser muy reducido aún a pesar de que los volúmenes de datos obtenidos son enormes. Para ello suelen emplearse una serie de estrategias de filtrado que permiten una discriminación entre ciertas situaciones de análisis y el resto de la información. Sin embargo, estas estrategias suelen ser poco efectivas debido a las limitaciones gráficas y operativas de los sistemas habitualmente empleados para el análisis y procesamiento de estos datos.

La práctica totalidad de proyectos de conducción naturalista llevados a cabo emplean herramientas de procesamiento de datos poco eficientes con unas interfaces para la representación de la información poco optimizadas. Esto limita el análisis de la información y hace más complicada la fase de interpretación de los datos por parte del operador.

Los sistemas SIG permiten obtener una representación continua de parámetros cinemáticos a lo largo del eje de la vía siendo posible representar, de esta forma, la variabilidad de los datos en función de sus componentes espacial y temporal. Estos sistemas disponen además de herramientas que permiten una organización de la información en capas y favorecen una mayor eficiencia en el análisis de los datos. De esta forma, la representación SIG permite una mayor explotación de los datos, haciendo posible incluso plantear nuevos enfoques de análisis como los relativos a metodologías de control de calidad para este tipo de datos. En este capítulo se proponen posibles modelos de representación de datos de conducción naturalista en función de una serie de atributos de forma y de color.

En los próximos años, estudios más exhaustivos acerca de nuevas metodologías de representación de este tipo de datos y posibles nuevos enfoques de análisis deben ser planteados.

Capítulo 7: Análisis e interpretación de datos obtenidos en proyectos de conducción naturalista empleando sistemas SIG. Estudio sobre patrones de conducción. La conducción naturalista hace posible obtener más información de los conductores mientras que los sistemas SIG permiten una óptima representación de este tipo de datos. En este capítulo se presenta una propuesta metodológica para el análisis e interpretación de datos de conducción naturalista. Los sistemas SIG permiten llevar a cabo un estudio dinámico de la información, al contrario de los métodos de representación habitualmente empleados (gráficos-estadísticos), los cuales ofrecen una representación estática de la misma empleando una serie de estimadores estadísticos. Los modelos de representación cartográfica en ciertos tramos de vía permiten llevar a cabo un análisis exhaustivo de la conducción real (y su evolución espacio-temporal) de los diferentes conductores durante los distintos días del experimento. La metodología propuesta es innovadora y puede ser extrapolable a otros proyectos de este tipo.

En los próximos años, deben ser llevados a cabo estudios exhaustivos sobre la identificación de los distintos patrones de conducción presentes en cada región, además de la evaluación de posibles metodologías de representación, análisis e interpretación de estos tipos de datos.

8.3. FINAL CONCLUSIONS

Studies on transport infrastructures and road traffic require new research methods to perform a more comprehensive analysis considering new factors that interference in the driving performance (Chapter 1). The method of *naturalistic driving* developed in the recent years is one of the most suitable for these research topics. This method allows to observe the driving performance of a group of drivers in real conditions continuously and unobtrusively. This observation method presents several advantages over the traditional (and most frequent used) methods, possibiliting an improved capture data process from a perspective quantitative and qualitative (Chapter 2).



However, this research method presents several drawbacks as the great resources required or the low-exploitation of the data, among others. In order to obtain comprehensive studies and reliable results large samples of drivers should be monitored at (very) high sampling temporal frequencies. The data capture continuously at these high frequencies, besides the complex instrumentation of the experimental car, implies the relative frequency of data losses episodes during mainly the phase of data acquisition.

As this is a relatively new experimental method, there is not common and clearly accepted work methodology for the processing of the data collected. Most of the previous studies performed have limited the analysis to relevant research events (or incidents) in certain road sections.

This thesis proposes a new methodology for the processing of naturalistic driving data based on the use of *Geographic Information Systems* (GIS). GIS software offers tools for the recovery, representation and interpretation of these type of data. Chapter 5 discusses a method to estimate the positioning data from large data (positioning) losses. The procedure depends on the *distance increments* and speed of the car in each point of the route. From these data the planimetric position can be estimated with relatively high levels of accuracy. Chapter 6 presents (cartographic) representation models for naturalistic data, which offer a clear, intuitive and comprehensive view. This representation model of the data simplify the analysis and interpretation process for any user (not only expert). In this way, studies more exhaustives with more reliable results and with more analysis perspectives can be raised. Chapter 7 propose a new methodology research focused on *driving patterns*.

The GIS methodology requires positioning data. For this reason, episodes of (positioning) data losses during the phase of capturing data must be avoided (or at least, minimized). Optimal strategies to capture these data must be proposed. GNSS systems lead to a effective positionig and are commonly used (Chapter 3). However, the particular conditions of naturalistic driving experiments require some complex strategies which are based on differential GNSS or some complementary devices (Chapter 4). These strategies offer higher levels of accuracies, although have some problems in certain circumstances. The choice of the optimal strategy for each experiment or project will depend on the particular conditions of each trial, requeriments and project budget.

The methodology proposed in this work lead to reduce data losses with respect to its number and duration during (I) the experimental phase, with the implementation of a strategy for capturing positioning data, and (II) the phase of data processing, with the implementation of a procedured to recover positioning data. Furthermore, the proposed methodology lead to manage naturalistic driving data better, proposes a higher level of exploitation of the data and, even develops new areas of research.

This work methodology presents a greater efficiency of use of the resources at any phase of the project: capturing, analysis and interpretation of the data. This methodology also increases the reliability of the results obtained with respect to the previous methodologies. Hence, the raised initial hypothesis can be confirmed due to the higher levels of efficiency of the proposed methodology regard to the traditional ones.



Referencias

- Abbott, E y Powell, JD (1999): "Land vehicle navigation using GPS". *Proceedings of the IEEE* 87(1), pp. 145-162.
- Abdel-Hamid, W (2005): "Accuracy enhancement of integrated MEMS-IMU/GPS system for land vehicular navigation applications". PhD Thesis. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary (Canadá).
- Acharya, SR (2005): "Motorization and urban mobility in developing countries exploring policy options through dynamic simulation". *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 6, pp. 4113-4128.
- Achilleos, GA (2011): "The inverse distance weighted interpolation method and error propagation mechanism - Creating a DEM from an analogue topographical map". *Journal of Spatial Science* 56(2), pp. 283-304.
- Af Wählberg, AE (2007): "Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback". *International Journal of Industrial Ergonomics* 37(4), pp. 333-343.
- Airservice Australia GBAS Program (2014): <http://www.airservicesaustralia.com/projects/ground-based-augmentation-system-gbas/gbas-implementation-program/> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Alesheikh, A y Omidvari, M (2010): "The application of GIS in Urban traffic noise pollution (case study: Tehran district 1)". *International Journal of Occupational Hygiene* 2(1), pp. 87-92.
- Alm, H y Nilsson, L (1994): "Changes in driver behaviour as a function of hands-free mobile telephones". *Accident Analysis and Prevention* 26, pp. 441-451.
- Amediku, D (2000): "Application of Geographic Information System (GIS) to road safety auditing as an option to road accident management". PhD Thesis. Department of Science and Technology, Kwame Nkrumah University, Kumasi (Ghana).
- Anderson, T (2007): "Comparison of spatial methods for measuring road accident 'hotspots': a case study of London," *Journal of Maps* 2007, pp. 55-63.
- Antin, J; Lee, S; Hankey, J y Dingus, T (2011): "Design of the in-vehicle driving behaviour and crash risk study". Washington DC (EEUU): Transportation Research Board.
- ARRB Project Team (2009): "Guide to road safety part 6: road safety audit". Report AGRS06-09. Disponible online en <https://www.onlinepublications.austroroads.com.au/items/AGRS06-09> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Azoulai, L; Neri, P; Milner, C; Macabiau, C y Walter, T (2012): "SBAS errors modelling for Category I autoland". En *Proc. 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville-TN (EEUU), septiembre 2012, pp. 1334-1337.
- Babu R; Wang, J y Rao, G (2008): "Algorithms for prediction of INS estimated Doppler in ultra-tight integration". En *Proc. International Symposium on GPS/GNSS*, Yokohama (Japón), 25-28 de noviembre, pp. 300-307.
- Babu, R y Wang, J (2004): "Improving the quality of IMU-derived Doppler estimates for ultra-tight GPS/INS integration". En *Proc. European Navigation conference*, Rotterdam (Holanda), 16-19 de mayo, pp. 1-8.
- Backer-Grøndahl, A; Lotan, T y Van Schagen, I (2011): "Summary and integration of a series of naturalistic driving field trials". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D3.7. TØI Institute of Transport Economics, Oslo (Noruega).
- Backer-Grøndahl, A; Phillips, R; Sagberg, F; Touliou, K y Gatscha, M (2009): "Topics and applications of previous and current naturalistic driving studies". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D1.1. TØI Institute of Transport Economics, Oslo (Noruega).
- Bajikar, S; Gorjestani, A; Simpkins, P y Donath M (1997): "Evaluation of in-vehicle GPS-based lane position sensing for preventing road departure". En *Proc. IEEE conference on Intelligent Transportation Systems*, Oak Ridge-TN (EEUU), 9-12 noviembre, pp. 397-402.
- Balsa-Barreiro, J y Lerma, JL (2006): "La tecnología LIDAR: una visión general". *Topografía y cartografía: Revista del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía* 23(135), pp. 28-33.
- Balsa-Barreiro, J (2008): "Análise para a implementación dun SIX co fin da xestión de servizos en calquera nivel da Administración. Particularización e aplicacións de mellora para o caso da Dirección Xeral de Turismo-Turgalicia (Consellería de Innovación e Industria)". Santiago de Compostela (España): Escola Galega de Administración Pública (EGAP). Monografía nº9, 291 pp.
- Balsa-Barreiro, J y Lois-González, RC (2010): "Particularidades y estado actual de la cartografía turística oficial en Galicia". *Cuadernos de Turismo* 26, pp. 25-46.
- Balsa-Barreiro, J y Brocal, R (2011a): "Aplicación de metodoloxías de la ingeniería industrial y geográfica a los modelos de gestión de las administraciones públicas". *Revista Centroamericana de Administración Pública* 60-61, pp. 135-169.
- Balsa-Barreiro, J y Brocal, R (2011b): "Los sistemas GMAO y SIG como herramientas para la gestión integrada en la administración local". Nueva York: United Nations Public Administration Network (UNPAN). 255 pp. Disponible online en <http://unpan1.un.org/intradoc/groups/public/documents/icap/unpan046326.pdf> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Balsa-Barreiro, J (2012a): "Conferencia sobre la tecnología LIDAR y la ingeniería". *Papeles de la Ingeniería (Boletín del Instituto de Ingeniería de España)* 68, pp. 4.
- Balsa-Barreiro, J (2012b): "La tecnología LIDAR y sus posibles aplicaciones técnicas al mundo de la ingeniería". En Comité de Tecnologías para la Defensa del Instituto de la Ingeniería de España, sede del Instituto de Ingeniería de España, Madrid (España), 27 de junio. Disponible online en http://www.iies.es/Conferencia-La-tecnologia-LIDAR-y-sus-posibles-aplicaciones-tecnicas-al-mundo-de-la-ingenieria_a2352.html (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).



- Balsa-Barreiro, J; Pareja-Montoro, I; Tontsch, A y Sánchez-García, M (2012a): "Preprocessing of data for recovery of positioning data in naturalistic driving trial". En *Proc. European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, Valencia (España), 14 y 15 de junio, pp. 235-245.
- Balsa-Barreiro, J; Avariento, JP y Lerma, JL (2012b): "Airborne light detection and ranging (LiDAR) point density analysis". *Scientific Research and Essays* 7(33), pp. 3010-3019.
- Balsa-Barreiro, J; Tontsch, A; Valero-Mora, PM y Pareja-Montoro, I (2012c): "Análisis de patrones de conducción en experimentos de conducción naturalística a través de la representación GIS". En *Proc. Expo-Urbano*, Sao Paulo (Brasil), 21-23 de noviembre.
- Balsa-Barreiro, J; Valero-Mora, PM; Pareja-Montoro, I y Sánchez-García, M (2013): "Geo-referencing naturalistic driving data using a novel method based on vehicle speed". *IET Intelligent Transport Systems* 7(2), pp. 190-197.
- Balsa-Barreiro, J y Lerma, JL (2014a): "A new methodology to estimate the discrete-return point density on airborne LiDAR surveys". *International Journal of Remote Sensing*, 35(4), pp. 1496-1510.
- Balsa-Barreiro, J y Lerma, JL (2014b): "Empirical study of variation in lidar point density over different land covers". *International Journal of Remote Sensing* 35(9), pp. 3372-3383.
- Balsa-Barreiro, J; Valero-Mora, PM; Pareja-Montoro, I y Sánchez-García, M (2014): "Quality control procedure for naturalistic driving data using geographic information systems". En *Proc. European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, Vienna (Austria), 5-6 de junio. Disponible online en <http://conference2014.humanist-vce.eu/Proceedings/Balsa.pdf> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Bana, SV y Varaiya, P (2001): "Space division multiple access SDMA for robust ad hoc vehicle communication networks". En *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Oakland-CA (EEUU), pp. 962-967.
- Banco Mundial (2011): "Motorization, Demand & City Development". Worldbank.org. Disponible online en <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTTRANSPORT/EXTURBANTRANSPORT/0..contentMDK:20249477~menuPK:610224~pagePK:148956~piPK:216618~theSitePK:341449,00.html> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Banco Mundial (BM), desarrollo urbano (2014): <http://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Banister, D; Stead, D; Steen, P; Akerman, J; Dreborg, K; Nijkamp, P y Schleicher-Tappeser, R (2000): "European transport policy and sustainable mobility". London (Inglaterra): Ed. Spon Press.
- Barr, LC; Yang, CD y Ranney, TA (2003): "An exploratory analysis of truck driver distraction using naturalistic driving data". En *Proc. Transportation Research Board 2003 Annual Meeting*, Washington-DC (EEUU).
- Barr, LC; Yang, CD; Hanowski, RJ y Olson, R (2005): "Assessment of driver fatigue, distraction, and performance in a naturalistic setting". *Journal of the Transportation Research Board* 1937, pp. 51-60.
- Barr, LC; Yang, CD; Hanowski, RJ y Olson, R (2011): "An assessment of driver drowsiness, distraction, and performance in a naturalistic setting". Washington-DC (EEUU): Federal Motor Carrier Safety Administration, US Department of Transportation.
- Bassani, M; Lingua, A; Piras, M; De Agostino, M; Marinelli, G y Petrini, G (2012): "Alignment data collection of highways using mobile mapping and image analysis techniques". En *Proc. Transportation Research Board 91st Annual Meeting*, Washington-DC (EEUU), 22-26 de enero, 14 pp.
- Bedrich, S y Gu, X (2004): "GNSS-based sensor fusion for safety-critical applications in rail traffic". *Galileo and EGNOS Information Catalogue*, pp. 8.
- Berrocso-Domínguez, M (2012): "Los sistemas GNSS. La última revolución geodésica". En *Encuentro sobre tecnologías de posicionamiento espacial: del GPS al Galileo*, Instituto de Estadística y Cartografía, Sevilla (España), 23 y 24 de octubre.
- Berrocso-Domínguez, M; Sánchez, A; Pérez, A; Jigena, B; Fernández, JA y Páez, R (2010): "Sistemas GNSS: Funcionamiento, posicionamiento y precisión". Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía, Departamento de Matemáticas, Universidad de Cádiz.
- Berry, IM (2010): "The effects of driving style and vehicle performance on the real-world fuel consumption of U.S. light-duty vehicles". Master Degree Thesis. *Massachusetts Institute of Technology*, Massachusetts-MA (EEUU).
- Bertolini, L y Clercq, FI (2003): "Urban development without more mobility by car? Lessons from Amsterdam, a multimodal urban region". *Environment and Planning* 35(4), pp. 575-589.
- Beusen, B; Broekx, S; Denys, T; Beckx, C; Degraeuwe, B; Gijbers, M; Scheepers, K; Govaerts, L; Torfs, R y Panis, LI (2009): "Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course". *Transportation Research Part D* 14, pp. 514-520.
- Bevly, DM; Ryu, J y Gerdes, JC (2006): "Integrating INS sensors with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, roll, and tire cornering stiffness". *IEEE Transport Intelligent Transportation Systems* 7(4), pp. 483-493.
- Blanchard, RA; Myers, AM y Porter, MM (2010): "Correspondence between self-reported and objective measures of driving exposure and patterns in older drivers". *Accident Analysis and Prevention* 42, pp. 523-529.
- BlogsAGI.com (2010): <http://blogs.agi.com/navigationAccuracy> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Bonnard, A y Brusque, C (2008): "Naturalistic driving observations to investigate distraction exposure and IVIS patterns of use: interests and constraints of the approach". En *Proc. European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, Lyon (Francia), 3-4 de abril, pp. 43-52.



- Borre, K (2013): "Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and Intelligent Transportation Systems (ITS)". Danish GPS Center, Aalborg University (Dinamarca). Disponible online en http://www1.sogei.it/doc/workshop-gnss/23aprile2013/KB_ITS_presentation.pdf (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Brandstaetter, C. et al. (2012): "Annual Statistical Report". Proyecto DaCoTA. Deliverable D3.9.
- Bratt, H y Ericsson, E (1999): "Measuring vehicle driving patterns. Estimating the influence of different measuring intervals". En *Proc. 2nd KFB research conference*, Lund (Suecia), 7-8 de junio, pp. 9-20,
- Brookhuis, KA; De Vries, G y De Waard, D (1991): "The effects of mobile telephoning on driving performance". *Accident Analysis and Prevention* 23, pp. 309-316.
- Broomhead, DS y Lowe, D (1988): "Multi-variable functional interpolation and adaptive networks". *Complex Systems* 2, pp. 321-355.
- Burns, PC; Parkes, A; Burton, S; Smith, RK y Burch, D. (2002): "How dangerous is driving with a mobile phone? Benchmarking the impairment to alcohol". Crowthorne (Inglaterra): Transport Research Laboratory. Technical Report TRL 547.
- Burrough, PA y McDonnell, RA (1998): "Principles of Geographical Information Systems". Oxford (Inglaterra): Oxford University Press. 352 pp.
- Cafiso, S y Cerni, G (2012): "New approach to defining continuous speed profile models for two-lane rural roads". *Journal of the Transportation Research Board* 2309(1), pp. 157-167.
- Caird, JK; Scialfa, C; Ho, G y Smiley, A (2004): "The effects of cellular telephones on driving behaviour and accident risk: results of a meta-analysis". Calgary-AB (Canadá): Foundation for Traffic Safety.
- Caron, F; Duflos, E; Pomorski, D et al. (2006): "GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: Introduction of contextual aspects". *Information Fusion* 7(2), pp. 221-230.
- Cea-Avión, J (2005): "Precisión del sistema GPS". *La Página de Jesús Cea Avión* (18 de febrero de 2005). Disponible online en <http://www.jcea.es/artic/gps-precision.htm> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Central Intelligence Agency (CIA) World Factbook (2010): <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Centro de Navegación del Departamento de Seguridad Nacional de los EEUU (2013): <http://www.navcen.uscg.gov> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Comisión Europea (2001): "Libro Blanco de Transportes. La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad". Bruselas (Bélgica): Comisión Europea. Doc. COM (2001)-370. 124 pp.
- Comisión Europea (CE), (2013): "Road safety vademecum. Road safety trends, statistics and challenges in the EU 2011-2012". European Commission, DG for Mobility and Transport. 16 pp. Disponible online en http://ec.europa.eu/transport/road_safety/pdf/vademecum_2013.pdf (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Community Road Accident Database (CARE), (2010): <http://ec.europa.eu/idabc/en/document/2281/5926.html> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Conley, R; Cosentino, R; Kaplan, ED; Hegarty, CJ; Leva, J; de Haag, M et al. (2006): "Performance of stand-alone GPS". En Kaplan, ED y Hegarty, CJ (eds.): "Understanding GPS: Principles and applications". Boston-MA (EEUU): Artech House. 2nd edición, pp. 301-378
- Consiglio, W; Driscoll, P; Witte, M y Berg, WP (2003): "Effect of cellular telephone conversations and other potential interface on reaction time in a braking response". *Accident Analysis and Prevention* 15, pp. 495-500.
- Crassidis, JL (2006): "Sigma-point Kalman filtering for integrated GPS and inertial navigation". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System* 42(2), pp. 750-756.
- Creel, T; Dorsey, AJ; Mendicki, PJ; Little, J; Mach, RG y Renfro, BA (2006): "New, improved GPS. The legacy accuracy improvement initiative". *GPS World* 3, pp. 20-31.
- Crosby, GK; Kraus, DK; Ely, WS; Cashin, TP; McPherson KW; Bean, KW; Stewart, JM y Elrod, BD (2000): "A ground-based regional augmentation system (GRAS): the australian proposal". En *Proc. 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS)*, 19-22 de septiembre, Salt Lake City-UT (EEUU), pp. 713-721.
- Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EEUU (1996): "Navstar Global Positioning System: Surveying". Washington-DC (EEUU): Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Doc. 20314-1000, Engineer Manual EM 1110-1-1003.
- Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EEUU (2003): "Navstar Global Positioning System: Surveying". Washington-DC (EEUU): Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Doc. 20314-1000 CECW-EE, Engineer Manual EM 1110-1-1003.
- Chapman, S; Haddad, S y Sindhusake, D (1997): "Do work-place smoking bans cause smokers to smoke 'harder'? Results from a naturalistic observational study". *Addiction* 92, pp. 607-610.
- Chen, C; Zhang, D; Castro, PS; Li, N; Sun, L; Li, S y Wang, Z. (2013): "iBOAT: isolation-based online anomalous trajectory detection". En *Proceedings of IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 14(2), pp. 806-818.
- Chen, W (2014): "Geo-positioning, GPS, DGPS, and positioning accuracy". *Wayback Machine* (15 de enero de 2009). Disponible online en <http://web.archive.org/web/20091122194051/http://www.precisionag.org/PDF/ch2.pdf> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Cheng, B; Lin, Q; Song, T; Cui, Y; Wang, L y Kuzumaki, S (2011): "Analysis of driver brake operation in near-crash situation using naturalistic driving data". *International Journal of Automotive Engineering* 2 (4), pp.87-94.
- Chiang, KW; Duong, TT y Liao, JK (2013): "The performance analysis of a real-time integrated INS/GPS vehicle navigation system with abnormal GPS measurement elimination". *Sensors* 13(8), pp. 10599-10622.



- Chisholm, S; Caird, JK; Teteris, E; Lockhart, J y Smiley, A (2006): "Novice and experienced driver performance with cell phones". En *Proc. 50th Annual International Conference on Human Factors and Ergonomics Meeting*, California-CA (EEUU), octubre, pp. 2354-2358.
- Christoph, M; van Nes, N; Pauwelussen, J; Mansvelders, R; van der Horst, R y Hoedemaeker, M (2010): "In-vehicle and site-based observations of vehicles and cyclists: a small-scale ND field trial in the Netherlands". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D3.4. TNO, Soesterberg (Holanda).
- Crop, O (2014): "The European Satellite Navigation Programmes EGNOS and Galileo". *Amgroupes* (17 de marzo de 2014). Disponible online en http://www.amgroupes.fr/admin/compte_rendus/754_compte_rendu.pdf (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- DaCoTA EU Road Safety Project (2014): <http://www.dacota-project.eu> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Davidson, P; Hautamki, J; Collin, J y Takala, J (2009): "Improved vehicle positioning in urban environment through integration of GPS and low-cost inertial sensors". En *Proc. European Navigation Conference on Global Navigation Satellite Systems (ENC-GNSS)*, Nápoles (Italia), 3-6 de mayo.
- Davies, K y Hartmann, GK (1997): "Studying the ionosphere with the global positioning system". *Radio Science* 84, pp. 1695-1703.
- Delgado, AC; Maradei, MF y Castellanos, JM (2013): "Influencia de los patrones posturales en la conducción y la antropometría en la carga biomecánica del raquis". *Iconofacto* 9(12), pp. 38-55.
- Departamento de Defensa de los EEUU (DoD), (1993): <http://www.defense.gov> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Departamento de Seguridad Nacional de los EEUU (DHS), (2013): <http://www.dhs.gov> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Devlin GJ; McDonnell, K y Ward, S (2007): "Dynamic non DGPS positional accuracy performance between recreational and professional GPS receivers". *Journal of Location Based Services* 1(1), pp. 77-85.
- Dingus, TA; Klauer, SG; Neale, VL; Petersen, A.; Lee, SE; Sudweeks, J; Pérez, MA; Hankey, J; Ramsey, D; Gupta, S; Bucher, C; Doerzaph, ZR; Jermeland, J y Knippling, RR (2006): "The 100-car naturalistic driving study, phase II: results of the 100-car field experiment". Washington-DC (EEUU): NHTSA. Report DOT HS 809 593.
- Dirección General de Tráfico (DGT), estadísticas e indicadores (2011): <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Douxchamps, D (2014): "A small list of IMU/INS/INU". Damien Douxchamps' website (04 de julio de 2014). Disponible online en <http://damien.douxchamps.net/research/imu/> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Dozza, M (2010): "SAFER100Car: a toolkit to analyze data from the 100 Car Naturalistic Driving Study". En *Proc. 2nd International Symposium on Naturalistic Driving Research*, Blacksburg-VA (EEUU), 31 de agosto – 2 de septiembre.
- Dozza, M. y Pañeda, N. (2012): "Recognizing safety critical events from naturalistic driving data". *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 48, pp. 505-515.
- Dragutinovic, N y Twisk, D (2005): "Use of mobile phones while driving – Effects on road safety: a literature review". La Haya (Holanda): SWOV Institute for Road Safety Research. Report R-2005-12.
- Dutta, V; Bera, R; Dhar, S; Chakravorty, J y Bagehel, N (2008): "Automated Vehicle Location (AVL) Using Global Positioning System (GPS)". En *Proc. National Conference on Emerging trends and advances in Electrical Engineering and Renewable Energy (NCEEERE)*, Sikkim (India), 22-24 de diciembre.
- Eby, DW; Silverstein, NM; Molnar, LJ, LeBlanc, D y Adler, G (2012): "Driving behaviors in early stage dementia: A study using in-vehicle technology". *Accident Analysis and Prevention* 49, pp. 330-337.
- Eenink, R; Barnard, Y; Baumann, M; Augros, X y Utesch, F (2014): "UDRIVE: the European naturalistic driving study". En *Proc. Transport Research Arena (TRA) meeting*, París (Francia), 16 de abril.
- Egea-Caparrós, A (2001): "El comportamiento humano en conducción: factores perceptivos, cognitivos y de respuesta". Apuntes de Psicología Cognitiva Aplicada. Universidad de Murcia (España). Disponible online en <http://www.um.es/docencia/agustinr/pca/textos/cogniconduc.pdf> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- El-Diasty, M y Pagiatakis, S (2009): "A rigorous temperature-dependent stochastic modelling and testing for MEMS-based inertial sensor errors". *Sensors* 9(11), pp. 8473-8489.
- Elrod, BD y Van Dierendonck, AJ (1996): "Pseudolites". En Parkinson, BW; Spilker, JJ; Axelrad, P y Enge, P (eds.): "Global positioning system: theory and applications", pp- 51-79. Washington-DC (EEUU): American Institute of Astronautics.
- El-Sheimy, N (2008): "The potential of partial IMUs for land vehicle navigation". *Inside GNSS* 3(3), pp. 16-25.
- El-Sheimy, N; Shin, E y Niu, X (2006): "Kalman Filter face-off: extended vs. unscented Kalman filters for integrated GPS and MEMS inertial". *Inside GNSS* 1(2), pp. 48-54.
- Encuesta Nacional de Discapacidad, Instituto Nacional de Estadística (INE), (2011): <http://www.ine.es/prensa/np753.pdf> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Engerde, W (2008): "The European GNSS Programmes Galileo and EGNOS". En *Proc. International Symposium on Global Navigation Satellite Systems*, Berlín (Alemania), 11-14 de noviembre.
- Ericsson, E (1996): "How to measure driving patterns: a study of methodology". Bulletin 137. Department of Traffic Planning, Lund Institute of Technology, Lund University (Suecia).
- Ericsson, E (1999): "Variability in urban driving patterns". En *Proc. 8th International Symposium of Transport and Air Pollution*, Graz (Austria).
- Ericsson, E (2000a): "Driving pattern in urban areas - descriptive analysis and initial prediction model". Bulletin 185. Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology, Lund University (Suecia).



- Ericsson, E (2000b): "Variability in urban driving patterns". *Transportation Research Part D* 5, pp. 337-354.
- Ericsson, E (2001): "Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors". *Transportation Research Part D* 6, pp. 325-345.
- Ericsson, E; Mocsári, T; Rapone, M y Brundell-Freij, K. (2004): "Variability in driving patterns over street environments in three european cities". Technical report. Department of Technology and Society, Lund Institute of Technology, Lund University (Suecia).
- Esbjörnsson, M; Juhlin, O y Weilenmann, A (2007): "Drivers using mobile phones in traffic: an ethnographic study of interactional adaptation". *International Journal of Human-Computer Interaction* 22(1-2), pp. 37-58.
- European Agency Spatial (ESA), (2014): <http://www.esa.int/ESA> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- European Global Navigation Satellite Systems Agency (2014): <http://www.gsa.europa.eu> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- European naturalistic Driving Study (UDRIVE), (2014): <http://www.udrive.eu> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Eurostat (2014): <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Evans, L y Rothery, R (1976): "Comments on effects of vehicle type and age on driver behaviour at signalized intersections". *Ergonomics* 19, pp. 559-570.
- Federal Aviation Administration (FAA), (1999): "FAA Advisory Circular 120-28D. Criteria for approval of Category III weather minima for takeoff, landing and rollout". Washington-DC (EEUU): Federal Aviation Administration.
- Faghri, A y Hamad, K (2002): "Application of GPS in traffic management systems". *GPS Solutions* 5(3), pp. 52-60.
- Fan, C; Kubo, N; Nishikawa, K; Sasano, K; Tanaka, T; Hasegawa, H y Namie, H (2004): "Vehicle positioning by network-based RTK-GPS using area correction parameter (FKP) via TV wave in Japan". En *Proc. 2004 National Technical Meeting of the Institute of Navigation*, San Diego-CA (EEUU), 26 enero, pp. 475-482.
- Federal Aviation Administration (FAA), (2007): <http://www.faa.gov> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Fellner, A; Banaszek, K y Tróminski, P (2010): "The Implementation of the EGNOS System to APV-I Precision Approach Operations". *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 4(1), pp. 41-46.
- Fiorenzani, T; Manes, C; Oriolo, G y Peliti, P (2008): "Comparative study of unscented Kalman filter and extended Kalman filter for position/attitude estimation in unmanned aerial vehicles". Roma (Italia): IASI. Research Report n. 08-08.
- Fonda, SJ; Wallace, RB y Herzog, AR (2001): "Changes in driving patterns and worsening depressive symptoms among older adults". *Journal of Gerontology: Social Sciences* 56B(6), pp. 343-351.
- Font, J y Dols, JF (2004): "Tratado sobre automóviles: Tecnología del automóvil". Valencia (España): Ed. Universidad Politécnica de Valencia.
- Fontaras, G; Pistikopoulos, P y Samaras, Z (2008): "Experimental evaluation of hybrid vehicle fuel economy and pollutant emissions over real-world simulation driving cycles". *Atmospheric Environment* 42, pp. 4023-4035.
- Forbes, C; Evans, M; Hastings, N y Peacock, B (2011): "Statistical Distributions". Hoboken-NJ (EEUU): John Wiley and Sons. Fourth edition.
- Gao, J; Petovello, MG y Cannon ME (2007): "GPS/Low-cost IMU/Onboard vehicle sensors integrated land vehicle positioning system". *EURASIP Journal on Embedded Systems* 2007(ID 62616), 14 pp. doi:10.1155/2007/62616
- García, MI; López, P; Rodríguez, S; Nieto, M; Arribas, J; Pedraza, JL y Pérez, A (2008): "Renovación del sistema móvil ARGOS. Diseño detallado del Sistema de Diálogo y Almacenamiento". Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid (España).
- García-Álvarez, DA (2008): "Sistemas GNSS (Global Navigation Satellite Systems)". Proyecto Final de Carrera. Grupo de sistemas de radiocomunicaciones y comunicaciones ópticas, Departamento de Ingeniería Informática, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid (España).
- Gatscha, M; Brandstätter, C y Pripfl, J (2010): "Video-based feedback for learner and novice drivers: a small-scale ND field trial in Austria". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D3.3. Test and Training International, Teesdorf bei Baden, Austria.
- GMV (2011): "EGNOS Performances". ESA Navipedia. Disponible online en http://www.navipedia.net/index.php?title=EGNOS_Performances&oldid=11504 (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Gonder, J; Markel, T; Simpson, A y Thornton, M (2007): "Using GPS travel data to assess the real world driving energy of Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)". En *Proc. Transportation Research Board (TRB) 86th Annual Meeting*, Washington-DC (EEUU), 21-25 de enero.
- Google Earth (2011 y 2012): <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Gordon, T; Green, P; Kostyniuk, L; Barnes, M; Blankespoor, A; Bogard, S. y Blower, D (2009): "A multivariate analysis of crash and naturalistic event data in relation to highway factors using the GIS framework". En *Proc. 4th SHRP-2 Safety Research Symposium*, Washington-DC (EEUU), 23 de julio.
- Green, PE; Wada, T; Oberholtzer, J; Green, PA; Schweitzer, J y Eoh, H (2007): "How do distracted and normal driving differ: An analysis of the ACAS naturalistic driving data". Transportation Research Institute (UMTRI), University of Michigan (EEUU).
- Grewal MS; Weill, LR y Andrews, AP (2007): "Global positioning systems, inertial navigation, and integration". Hoboken-NJ (EEUU): Ed. John Wiley and Sons. 416 pp.



- Groenewoud, C; Schoen, E; Malone, K; Jonkers, E; Hoedemaeker, M y Hogema, J (2010): "Methodological and organizational issues and requirements for ND studies". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D2.2. TNO, Soesterberg (Holanda).
- Groves, PD (2008): "Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems". Boston-MA (EEUU): Artech House. 518 pp.
- Günthner, W (2008): "Enhancing cognitive assistance systems with inertial measurement units". *Studies in Computational Intelligence* 105, pp.1-5.
- Hancock, PA; Lesch, MF y Simmons, L (2003): "The distraction effects of phone use during a crucial driving maneuver". *Accident Analysis and Prevention* 35, pp. 501-514.
- Hanowski, RJ; Hickman, J; Fumero, MC; Olson, RL y Dingus, TA (2007): "The sleep of commercial vehicle drivers under the 2003 hours-of- service regulations". *Accident Analysis and Prevention* 39, pp. 1140-1145.
- Hanowski, RJ; Olson, RL; Hickman, J y Dingus, TA (2006): "The 100-car naturalistic driving study: A descriptive analysis of light vehicle-heavy vehicle interactions from the light vehicle driver's perspective". Washington-DC (EEUU): NHTSA. Report No. FMCSA- RRR-06-004.
- Hanowski, RJ; Pérez, MA y Dingus, TA (2005): "Driver distraction in long-haul truck drivers". *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 8, pp. 441-458.
- Hanowski, RJ; Wierwille, WW y Dingus, TA (2003): "An on-road study to investigate fatigue in local/short haul trucking". *Accident Analysis and Prevention* 35, pp. 153-160.
- Harvey, C (2011): "Modelling and evaluating drivers interactions with in-vehicle information systems (IVIS)". PhD Thesis. Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton (Inglaterra).
- Hasseea, R (2003): "A GIS based accident system for reducing road accidents". En *Proc. Conference of the European Transport*, Strasbourg (Francia), pp. 1-24.
- Healey, JR (2001, 31 de Julio): "Small SUVs catch on, especially with women". *USA Today*. Disponible online en <http://usatoday30.usatoday.com/money/autos/2001-07-31-suv.htm> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Hein, GW; Godet, J; Issler, JL; Martin, JC; Erhard, P; Lucas-Rodríguez, R y Pratt, T (2002): "Status of Galileo frequency and signal design". En *Proc. Institute of Navigation ION-GPS*, Portland-OR (EEUU), septiembre.
- Hein, GW; Irsigler, M; Ávila-Rodríguez, JA; Wallner, S; Pany, T; Eissfeller, B y Hartl, P (2007): "Envisioning a future GNSS system of systems – part 3". *Inside GNSS* 2(4), pp. 64-73.
- Hickman, JS; Knipling, RR; Olson, RL; Fumero, M; Hanowski, RJ y Blanco, M (2005): "Phase 1 - Preliminary Analysis of Data Collected In The Drowsy Driver Warning System Field Operational Test: Task 5, Phase I Data Analysis". Washington-DC (EEUU): NHTSA.
- Hide, CD y Moore, T (2005): "GPS and low cost INS integration for positioning in the urban environment". En *Proc. Institute of Navigation ION-GPS*, Long Beach-CA (EEUU), 13-16 de septiembre, pp. 1007-1015.
- Higgs, BJ (2011): "Application of naturalistic truck driving data to analyze and improve car following models". PhD master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia-VA (EEUU).
- Higle, JL y Witkowski, JM (1988): "Bayesian identification of hazardous locations". *Transportation Research Record* 1185, pp. 24-36.
- Hildebrand, ED; Myrick, B y Creed, T (2000): "The rural elderly: driving patterns and accident involvement". En *Proc. 35th Annual Conference of the Canadian Transportation Research Forum*, Charlottetown-PEI (Canadá), 4-7 de junio, pp. 175-191.
- Hofmann-Wellenhof, B; Lichtenegger, H y Wasle, E (2008): "GNSS Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo and more". New York (EEUU) - Viena (Austria): Springer.
- Hofmann-Wellenhof, B; Lichtenegger, H. y Collins, J (1993): "Global Positioning System. Theory and practice". New York-NY (EEUU): Springer-Verlag.
- Horrey, WJ y Wickens, CD (2006): "Examining the impact of cell phone conversations on driving using meta-analytic techniques". *Human Factors* 48, pp. 196-205.
- Hou, H. (2004): "Modeling inertial sensors errors using Allan variance". Department of Geomatics Engineering, University of Calgary (Canadá).
- Hu, C; Chen, W; Chen, Y y Liu, D. (2003): "Adaptive Kalman filtering for vehicle navigation". *Journal of Global Positioning Systems* 2(1), pp. 42-47.
- Hu, J; Zhong, G; Cheng, Z y Wang, D (2012): "GIS-based road safety evaluation model for cyclist in campus of Higher Education Mega Center". En *Proc. 15th Conference IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems*, Anchorage-AK (EEUU), 16-19 de septiembre, pp. 1127-1131.
- Hu, PS; Trumble, DA; Foley, DJ; Eberhard, JW y Wallace, RB (1998): "Crash risks of older drivers: a panel data analysis". *Accident Analysis and Prevention* 30(5), pp. 569-581.
- Hughes, C; Glavin, M; Jones, E y Denny, P (2009): "Wide-angle camera technology for automotive applications: a review". *IET Intelligent Transport Systems* 3(1), pp.19-31.
- Huth, V; Lancelle, V; Gabel, C; Bonnard, A y Brusque, C (2012): "Exploring mobile phone usage and its context with naturalistic driving observations". En *Proc. Human Factors and Ergonomics Society Europe (HFES) Europe Chapter Conference*, Toulouse (Francia), 10-12 de octubre, pp. 319-334.
- Integrail Consortium (2008): <http://www.integrail.eu> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Jacobson, L (2007): "GNSS markets and applications (GNSS technology and applications)". Norwood (EEUU) - London (Inglaterra): Artech House.
- James, JE y Goldman, M (1971): "Driving patterns for different-sized vehicles". *Ergonomics* 14(3), pp. 363-369.



- Jiang, YL; Yang, ZZ y Chen, Y (2009): "Developing a road traffic control system with GIS". *Proceedings of the ICE-Transport* 162(4), pp. 189-194.
- Jie, L; van Zuylen, HJ; Chen, YS y Lu, R (2012): "Comparison of driver behaviour and saturation flow in China and the Netherlands". *IET Intelligent Transport Systems* 6(3), pp. 318-327.
- Jiménez-Herrero, LM *et al.* (2008): "Sostenibilidad en España 2008". Madrid: Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE).
- Jovanis, PP; Aguero-Valverde, J; Wu, K y Shankar, V (2011): "Naturalistic driving event data analysis: omitted variable bias and multilevel modeling approaches". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2236, pp. 49-57.
- Julg, T (1998): "GNSS accuracies under multipath propagation conditions". En *Proc. Int. IEEE Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, Sun City (South Africa), 2-4 de septiembre, pp. 709-713.
- Julier, S y Uhlmann, J (1997): "A new extension of the Kalman filtering to non linear systems". *SPIE Proceedings Series* 3068, pp. 182-193.
- Kalman, RE y Bucy, RS (1961): "New results in linear filtering and prediction theory". *Journal of Basic Engineering* 83(3), pp. 95-108.
- Kamal, J y Goel, R (2012): "GPS based low cost intelligent vehicle tracking system (IVTS)". *International Proceedings of Computer Science and Information Technology* 26, pp. 93-97.
- Kaplan, ED (1996): "Understanding GPS principles and applications". Boston-MA (EEUU): Artech House.
- Karabasoglu O y Michalek, J (2013): "Influence of driving patterns on life cycle cost and emissions of hybrid and plug-in electric vehicle powertrains". *Energy Policy* 60, pp. 445-461.
- Karlsson, IM; Rämä, P; Alonso, M; Engelbrektsson, P; Franzen, S; Henar, M; Kulmala, R; May, A; Morris, A; Mascolo, JE; Schröder, U y Welsh, W. (2009): "TeleFOT Deliverable D2.2.1". Testing and Evaluation Strategy, Brussels (Bélgica).
- Kelly, J (2006): "PPS vs SPS: Why military applications require PPS?". *GPS World* 17(1), pp. 28-35.
- Khan, MA; Salim, A y Garib, AM (2004): "A GIS based traffic accident data collection, referencing and analysis framework for Abu Dhabi". En *Proc. 11th Congress CODATU: towards more attractive urban transportation*, Bucarest (Rumanía), pp. 292-302.
- Kim, H; Lee, JG y Park, CG (2004): "Performance improvement of GPS/INS integrated system using Allan Variance analysis". En *International Symposium on GNSS/GPS*, Sydney (Australia), 6-8 de diciembre.
- Kington, R; Reuben, D; Rogowski, J y Lillard, L (1994): "Sociodemographic and health factors in driving patterns after 50 years of age". *American Journal of Public Health* 84(8), pp. 1327-1329.
- Klauer, SG; Dingus, TA; Neale, VL; Sudweeks, JD y Ramsey, DJ (2006): "The impact of driver inattention on near-crash/crash risk: an analysis using the 100-car naturalistic driving study data". Blacksburg-VA (EEUU): Virginia Tech Transportation Institute.
- Knoop, VL; Buist, PJ; Tiberius, CM y van Arem, B (2012): "Automated lane identification using precise point positioning: An affordable and accurate GPS technique". En *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems*, Anchorage-AK (EEUU), 16-19 de septiembre, pp 939-944.
- Kokaram, AC; Morris, RD; Fitzgerald, WJ; Rayner, PW (1995): "Interpolation of missing data in image sequences". *IEEE Transactions on Image Processing* 4(11), pp. 1509-1519.
- Koppel, S; Charlton, J; Kopinathan, C; Taranto, D (2011): "Are child occupants a significant source of driving distraction?". *Accident Analysis and Prevention* 43, pp. 1236-1244.
- Laporte, S (2010): "Literature review of naturalistic driving studies". Proyecto 2-BE-SAFE (2-wheeler behaviour and safety). Deliverable 4.2.1. París (Francia).
- Laporte, S y Espié, S (2010): "Design of a naturalistic riding study-implementation plan". Proyecto 2-BE-SAFE (2-wheeler behaviour and safety). Deliverable 5.2.2. París (Francia).
- Laporte, S y Espié, S (2011): "Naturalistic riding study: data collection and analysis". Proyecto 2-BE-SAFE (2-wheeler behaviour and safety). Deliverable 6.2. París (Francia).
- Lassarre, S; Dozza, M; Jamson, S; Lai, F; Saad, F; Vadeby, A; Victor, T; Brower, R; Carsten, O; Disilvestro, A; Feenstra, P; Hogema, J; Lenard, J; Minett, C; Morris, A; van Noort, M; Schrijver, J y Taddei, A (2008): "FESTA Support Action. Data analysis and modelling". Proyecto Field Operational Test Support Action (FESTA). Deliverable D2.4.
- Laureshyn, A; Ardo, H; Svensson, A y Jonsson, T (2009): "Application of automated video analysis for behavioural studies: concept and experience". *IET Intelligent Transport Systems* 3(3), pp. 345-357.
- Lee, K y Peng, H (2005): "Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms". *Vehicle System Dynamics* 43(10), pp. 735-751.
- Lee, SE; Olsen, EB y Wierwille, WW (2004): "A comprehensive examination of naturalistic lane changes". Washington-DC (EEUU): National Highway Traffic Safety Administration. Final Report. DOT HS 809 702.
- Lee, SE; Simons-Morton, BG; Klauer, SG; Quimet, MC y Dingus, TA (2011): "Naturalistic assessment of novice teenage crash experience". *Accident Analysis and Prevention* 43, pp. 1472-1479.
- Libby, J y Kantor, G (2010): "Accurate GPS-free positioning of utility vehicles for specialty agriculture". En *ASABE Annual International Meeting*, Pittsburgh-PA (EEUU), 20-23 de junio, 14 pp.
- Linsong, G; Yong, H; Qin, Z. y Shufeng, H (2002): "Real-time tractor position estimation system using a Kalman filter". *Transactions of the CSEA* 18, pp. 96-100.
- Liu, B y Lee, Y (2005): "Effects of car-phone use and aggressive disposition during critical driving maneuvers". *Transportation Research Part F* 8(4/5), pp. 369-382.



- Lotan, T y Toledo, T (2005): "Evaluating the safety implications and benefits of an in-vehicle data recorder to young drivers". En *Proc. 3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, Iowa City-IA (EEUU), 27-30 de junio, pp. 448-455.
- Lotan, T y Toledo, T (2007): "Driving patterns of young drivers within a Graduated Driver Licensing system". En *Proc. 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington-DC (EEUU), 21-25 de enero, 16 pp.
- Lotan, T; Albert, G; Ben-Bassat, T; Ganor, D; Grimberg, E; Musicant, O; Hakkert, S y Toledo, T (2010): "Potential benefits of in-vehicle systems for understanding driver behaviour; a series of small-scale ND studies in Israel". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D3.2. Or Yarok, Hod Hasharon (Israel).
- Luo, G y Peli, E (2011): "Recording and automated analysis of naturalistic bioptic driving". *Ophthalmic and Physiological Optics* 31, pp. 318-325
- Mahmud, AR; Sohadi, RU y Mansor, S (1998): "A GIS support system for road safety analysis and management". *Pertanika Journal of Science and Technology* 6(1), pp. 81-93.
- Malgundkar T; Rao, M y Mantha, SS (2012): "GIS driven urban traffic analysis based on ontology". *International Journal of Managing Information Technology* 4(1), pp. 15-23.
- Mandapat, RE (2001): "Development and evaluation of positioning systems for autonomous vehicle navigation". PhD Thesis. University of Florida-FL (EEUU).
- Marshall, SC; Wilson, KG; Molnar, FJ; Man-Son-Hing, M; Stiell, I y Porter, MM (2007): "Measurement of driving patterns of older adults using data logging devices with and without global positioning system capability." *Traffic Injury Prevention* 8(3), pp. 260-266.
- Martínez-Rodilla, M (2005): "Navigation signal timing and ranging Global Positioning System". Apuntes de Redes 2004/2005. Departamento de Informática, Universidad de Valencia (España).
- Martínez-Vadillo, JF y Belda, R (2000): "Navegación: sistemas y equipos, maniobras y procedimientos". Madrid (España): Servicios y Estudios para la Navegación Aérea y la Seguridad Aeronáutica (SENASA).
- McGehee, DV; Raby, M; Carney, C; Lee, JD y Reyes, ML (2007): "Extending parental mentoring using an event-triggered video intervention in rural teen drivers". *Journal of Safety Research* 38, pp. 215-227.
- McGrath, TM (2009): "What happens if the stars go out? US Army dependence on the Global Positioning System". Fort Leavenworth-KS (EEUU): US Army Command and General Staff College.
- McGuckin, N y Murakami, E (1999): "Understanding trip-chaining behavior. A comparison of travel by men and women". *Journal of the Transportation Research Board* 1693, pp. 79-85.
- McGwin, G; Mays, A; Joiner, W; Decarlo, DK; McNeal, S y Owsley, C (2004): "Is glaucoma associated with motor vehicle collision involvement and driving avoidance?". *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 45, pp. 3934-3939.
- McLaughlin, SB; Hankey, JM y Dingus, TA (2008): "A method for evaluating avoidance systems using naturalistic driving data". *Accident Analysis and Prevention* 40, pp. 8-16.
- McLaughlin, SB; Hankey, JM y Dingus, TA (2009): "Driver measurement: Methods and applications". In *Proc. 8th International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics*, San Diego-CA (EEUU), 19-24 de julio, pp. 404-413.
- Meguro, J; Kojima, Y; Suzuki, N y Teramoto, E. (2012): "Positioning technique based on vehicle trajectory using GPS raw data and low-cost IMU". *International Journal of Automotive Engineering* 3(2), pp. 75-80.
- Mejía-Meza, SR (2004): "Los geoposicionadores y el datum WGS-84 en la ingeniería civil". Tesis de Grado. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, México.
- Mekik, C y Arslanoglu, M (2009): "Investigation on accuracies of real time kinematic GPS for GIS applications". *Remote Sensing* 1(1), pp. 22-35.
- Meyer-Hilberg, J y Jacob, T (1994): "High accuracy navigation and landing system using GPS/IMU system integration". *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 9(7), pp. 11-17.
- Mitra, S (2008): "*Enhancing road traffic safety: a GIS based methodology to identify potential areas of improvement*". San Luis Obispo-CA (EEUU): California Polytechnic State University.
- Molina, FJ (2003): "GPS: Global Positioning System". Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Sevilla (España).
- Molina, FJ; Gómez, AA y Leal, MA (2000): "Nociones sobre GPS (Global Positioning System)". Sevilla (España): Ed. Mosaico.
- Möller, R (2003): "Personenmobilität, Stadtverkehr und nachhaltige Entwicklung in Santiago de Cali, Kolumbien". PhD Thesis. Fachbereich Berufsbildungs-, Sozial- und Rechtswissenschaften, Universität Kassel (Alemania).
- Myers, AM; Trang, A y Crizzle, AM (2011): "Naturalistic study of winter driving practices by older men and women: Examination of weather, road conditions, trip purposes, and comfort". *Canadian Journal on Aging* 30, pp. 577-589.
- Nassar, S (2005): "Accurate INS/DGS positioning using INS data de-noising and autoregressive (AR) modeling of inertial sensor errors". *Geomatica* 59(3), pp. 283-294.
- Nastro, L (2008): "Position and orientation data requirements for precise autonomous vehicle navigation". En *Proc. 21st ISPRS Congress*, Beijing (China), 3-11 de julio, 37(1), pp. 1237-1242.
- National Geospatial Agency (NGA), (2014): <https://www.nga.mil> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), (1997): <http://www.nhtsa.gov> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Nielsen, OA (2003): "Behavioural responses to pricing schemes. Results based on the Danish AKTA experiment". *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations* 8(4), pp. 233-251.



- Nielsen, OA y Jovicic, G (2003): "The AKTA road pricing experiment in Copenhagen". En *Proc. 10th International Conference on Travel Behaviour Research*, Lucerne (Suiza), 10-15 de agosto, 32 pp.
- Nielsen, OA y Sørensen, MV (2008): "The AKTA road pricing experiment in Copenhagen". En Jensen-Butler, C; Sloth, B; Larsen, MM y Nielsen, OA (eds.): "Road pricing, the economy and the environment", pp. 93-109. Berlín (Alemania): Springer.
- NurFazzillah, MN; Mahmud, AR y Ahmad, N (2011): "Value-adding safety audit with GIS". *Geospatial World* (septiembre de 2011). Disponible online en <http://www.geospatialworld.net/Paper/Application/ArticleView.aspx?aid=1612> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Observatorio Naval de los EEUU (USNO), (2013): <http://www.usno.navy.mil> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Obuhuma, JI y Moturi, CA (2012): "Use of GPS with road mapping for traffic analysis". *International Journal of Scientific and Technology Research* 1(10), pp. 120-128
- Ochieng, WY y Sauer, K (2002): "Urban road transport navigation: performance of the Global Positioning System after Selective Availability". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 10, pp. 171-187.
- Ogunbodede, EF (2007): "Assessment of traffic congestions in Akure (Nigeria) using GIS approach: Lessons and challenges for urban sustenance". En *Proc. Conf. on Whole Life Urban Sustainability*, Glasgow (Escocia), pp. 1-25.
- Olson, PL; Battle, DS y Aoiki, T (1989): "Driver eye fixations under different operating conditions". Transportation Research Institute (UMTRI), University of Michigan (EEUU).
- Olson, RL; Hanowski, RJ; Hickman, JS y Bocanegra, J (2009): "Driver distraction in commercial vehicle operations". Washington-DC (EEUU): DOT, Federal Motor Carrier Safety Administration. (Report No. FMCSA-RRR-09-042).
- Omerbashich, M. (2002): "Integrated INS/GPS navigation from a popular perspective". *Journal of Air Transportation* 7(1), pp. 103-118.
- Organización Internacional de Aviación Civil (OACI), (2013): <http://www.icao.int> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Organización Mundial de la Salud (OMS), (2009): "Global status report on road safety. Time for action". Department of Violence and Injury Prevention and Disability (VIP), World Health Organization (WHO), Geneva (Suiza).
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), (2010): <http://stats.oecd.org> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Ostini, L (2012): "Analysis and quality assessment of GNSS-derived parameter time series". PhD thesis, University of Bern (Suiza).
- Owusu, J; Afukaar, F y Prah, BK (2006): "Urban traffic speed management: The use of GPS/GIS". En *Proc. XXIII International FIG Congress: Shaping the change*, Munich (Alemania), 8-13 de octubre, 11 pp.
- Pañeda, N (2011): "Recognizing safety-critical events from naturalistic driving data". Master's Thesis. Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg (Suecia).
- Parkinson BW; Spilker, JJ; Axelrad, P y Enge P (eds.) (1996): "Global Positioning System: Theory and applications". *Progress in Astronautics and Aeronautics* 163. Washington-DC (EEUU): American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Pasaoglu, G; Fiorello, D; Martino, A; Scarcella, G; Zubaryeva, A y Thiel, C (2012): "Driving and parking patterns of European car drivers – a mobility survey". *JRC Scientific and Policy Reports*. Brussels (Bélgica): European Commission.
- Patten, CD; Kircher, A; Ostlund, J y Nilsson, L (2004): "Using mobile telephones: cognitive workload and attention resource allocation". *Accident Analysis and Prevention* 36(3), pp. 341-350.
- Persaud, BN. (1999): "Empirical Bayes procedure for ranking sites for safety investigation by potential for safety improvement". *Transportation Research Record* 1665, pp. 7-12.
- Petovello, M; Cannon, ME y Lachapelle, G (2001): "Development and testing of a real-time GPS/INS reference system for autonomous automobile navigation". *Proceedings of Institute of Navigation ION GPS*, Salt Lake City-UT (EEUU), 11-14 de septiembre.
- Pilgerstorfer, M; Runda, K; Brandstätter, C; Christoph, M; Hakkert, S; Ishaq, R; Toledo, T y Gatscha, M (2011): "Small scale naturalistic driving pilot". Proyecto DaCoTa. Deliverable D6.3. Kuratorium für Verkehrssicherheit (KfV), Viena (Austria).
- Pirotti, F; Guarneri, A y Vettore, A (2010): "Road safety analysis using web-based collaborative GIS". En *Proc. ISPRS archives*, Como (Italia), vol. 38, 5 pp.
- Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), (2014): <http://www.ign.es/PNOA> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Política Europea de Transporte (2000): http://ec.europa.eu/transport/index_en.htm (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Portillo, D. (2008): "Automated vehicle location using Global Positioning Systems for first responders". Institute for Information Technology Applications, Defense Technical Information Center.
- Prasad, R y Ruggieri, M (2005): "Applied satellite navigation using GPS, Galileo, and augmentation systems". Boston-MA (EEUU): Artech House.
- Prato, CG; Toledo, T; Lotan, T y Taubman-Ben-Ari, O. (2010): "Modeling the behavior of novice young drivers during the first year after licensure". *Accident Analysis and Prevention* 42(2), pp. 480-486.
- Proyecto 2Besafe (2014): <http://www.2besafe.eu> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).



- Proyecto CABLED (2014): (a) <http://cabled.org.uk>; (b) <http://www.coventry.ac.uk/research/grand-challenge-initiatives/low-carbon-vehicles/case-studies/cabled/>; (c) <http://www.birminghamsciencecity.co.uk/case-studies/collaborative-projects/cabled/> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Quintanilla, I; Irimia, J; Berné, JL y Fortuny, P (2009): "GPS vs EGNOS. Análisis comparativo de precisiones con diferentes receptores". En *Setmana Geomàtica Internacional*, 3-5 de marzo.
- Rajagopal, B (2013): "Real-time Insights on driving patterns from big data. The next frontier for competitive advantage for automakers". En *Data Science Central*, 29 de enero.
- Rasbash, J; Steele, F; Browne, W y Prosser, B (2008): "A user's guide to MLwiN: version 2.10". *Centre of Multilevel Modelling*, University of London (Inglaterra).
- Real Automóvil Club de España (RACE), (2013): <http://www.race.es> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Redelmeier, DA. y Tibshirani, RJ (1997): "Association between cellular-telephone calls and motor vehicle collisions". *New England Journal of Medicine* 336, pp. 453-458.
- Regan, M; Williamson, AM; Grzebieta, R y Tao, L (2012): "Naturalistic driving studies: Literature review and planning for the Australian Naturalistic Driving Study". En *Proc. Australasian College of road safety conference. A safe system: Expanding the reach*, Sydney (Australia), 9-10 de agosto.
- Rhudy, M; Gu, Y; Gross, J y Napolitano, MR (2011): "Sensitivity analysis of EKF and UKF in GPS/INS sensor fusion". *AIAA Journal of Aerospace Information Systems* 10(3), pp. 131-143.
- Rodríguez-Franco, A (2014): "Test que predice la precisión de un receptor portátil". Página GPS española. Disponible online en <http://www.elgps.com/documentos/consejos/PrecisionGarmin.html> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Rubin, GS; Es, NG; Bandeen-Roche, K; Keyl, PM; Freeman, EE y West, SK (2007): "A prospective, population-based study of the role of visual impairment in motor vehicle crashes among older drivers: the SEE study". *Investigative Ophthalmology and Visual Science* 48, pp. 1483-1491.
- Ryu, J y Gerdes, JC (2004): "Integrating inertial sensors with GPS for vehicle dynamics control". *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 126(2), pp. 243-254.
- Ryu, J; Rossetter, EJ y Gerdes, JC (2002): "Vehicle sideslips and roll parameter estimation using GPS". En *6th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*, Hiroshima (Japón), 8 pp.
- Sabback, F y Mann, WC (2005): "The influence of climate and road conditions on driving patterns in the elderly population". *Physical and Occupational Therapy in Geriatrics* 23(2/3), pp. 63-74.
- Safonov, P; Favrel, V y Hecq, W (1999): "Environmental impacts of mobility and urban development : A case study of the Brussels-Capital region". En *Proc. International Symposium on Ecosystem Health, Session "Transportation Corridors and Ecosystem Health"*, Sacramento-CA (EEUU), 16 de agosto, 16 pp.
- Sagberg, F; Eenink, R; Hoedemaeker, M; Lotan, T; van Nes, N; Smokers, R; Welsh, R y Winkelbauer, M (2011): "Recommendations for a large-scale European naturalistic driving observation study". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D4.1. TØI Institute of Transport Economics. Oslo (Noruega).
- Sandhu, K; Turner, D y Shaw, M (2000): "Modernization of the Global Positioning System". En *Proceedings of Institute of Navigation ION GPS*, Salt Lake City-UT (EEUU), 19-22 de septiembre, pp. 2175-2183.
- Sandu-Popa, I; Zeitouni, K; Ehrlich, J; Dupin, F; Saint-Pierre, G y Glaser, S (2008): "On using in-vehicle sensor data for naturalistic driving analysis". En *Proc. 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual Meeting*, Nueva York-NY (EEUU), 12 pp.
- Sayer, JR; Mefford, ML; Shirkey, K y Lantz, J (2005): "Driver distraction: Naturalistic observation of secondary behaviors with the use of driver assistance systems". En *3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, Rockport-ME (EEUU), 27-30 de junio, pp. 456-463.
- Schmidt, G (2010): "INS/GPS Technology Trends". Massachusetts-MA (EEUU): Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- Scholz, J; Willhoef, V; Schulz, R y Kluge, T (2005): "Ibeo Alasca user manual". Hamburgo (Alemania): IBEO Automobile Sensor GmbH.
- Secretaría de Defensa (2007): "Global Positioning System. Precise positioning service performance standard". Assistant Secretary of Defense, Departamento de Defensa de los EEUU, Washington-DC (EEUU).
- Seeber, G (2003): "Satellite geodesy". Berlín (Alemania) - New York (EEUU): Walter de Gruyter. 2nd edition.
- Servicio Nacional Geodésico de los EEUU (NGS), (2014): <http://www.ngs.noaa.gov> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Shannon, CE (1949): "Communications in the presence of noise". *Proc. Institute of Radio Engineers* 37(1), pp. 10-21.
- Sharer, P; Leydier, R y Rousseau, A: "Impact of drive cycle aggressiveness and speed on HEVs fuel consumption sensitivity". Lemont-IL (EEUU): Argonne National Laboratory (ANL).
- Shaw, M; Sandhu, K y Turner, D (2000): "Modernization of the Global Positioning System". *GPS World* 11(9), pp. 36-44.
- Shepard, DS (1968): "A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data". En *Proc. 23rd National Conference, Association for Computing Machinery*. Princeton-NJ (EEUU), pp. 517-524.
- Silverstein, NM; Eby, DW; Molnar, LJ; LeBlanc, DJ y Adler, G (2009): "Monitoring drivers with dementia: An instrumented vehicle study". *Alzheimer's & Dementia: The Journal of the Alzheimer's Association* 5(4), pp. 140.
- Simon, D y Chia, TL (2002): "Kalman filtering with state equality constraints". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 38(1), pp. 128-136.
- Speidel, J; Tossaint, M; Wallner, S y Ávila-Rodríguez (2013): "Integrity for aviation. Comparing future concepts". *Inside GNSS* 8(4), pp. 54-64



- Stathas, D; Karabelas, J; Liapakis, C; Psarianos, B y Kontaratos, M. (2001): "Dynamic vehicle positioning and orientation techniques for inspecting road surface or guiding construction machines". En *Proc. International conference: New technology for a new century*, Seoul (Korea), 6-11 de mayo.
- Steenberghen, T; Dufays, T; Thomas, I y Flahaut, B (2004). "Intra-urban location and clustering of road accidents using GIS: a Belgian example". *International Journal of Geographical Information Science* 18(2), pp. 169-181.
- Steptoe A., Wardle J. (1999), Mood and Drinking: A Naturalistic Diary Study of Alcohol, Coffee and Tea, *Psychopharmacology* No. 141, p. 315-321.
- Stohl, A; Wotawa, G; Seibert, P y Kromp-Kolb, H (1995): "Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories". *Journal of Applied Meteorology* 34, pp. 2149-2165.
- St-Pierre, M y Gingras, D (2004): "Comparison between the unscented Kalman filter and the extended Kalman filter for the position estimation module of an integrated navigation information system". En *IEEE Intelligent Vehicles symposium*, 14-17 de junio, Parma (Italia), pp. 831-835.
- Strategic Highway Research Program (SHRP-2), (2014): <http://www.trb.org/StrategicHighwayResearchProgram2SHRP2/Blank2.aspx> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Strayer, DL y Drews, FA (2004): "Profiles in driver distraction: effects of cell phone conversation on younger and older drivers". *Human Factors* 46(4), pp.640-649.
- Strayer, DL y Johnston, WA (2001): "Driven to distraction: dual-Task studies of simulated driving and conversing on a cellular telephone". *Psychological Science* 12(6), pp. 462-466.
- Stutts, J; Feaganes, J; Reinfurt, D; Rodgman, E; Hamlett, C; Gish, K y Staplin, L (2005): "Driver's exposure to distractions in their natural driving environment". *Accident Analysis and Prevention* 37, pp.1093-1101.
- Sukkarieh, S; Nebot, EM y Durrant-Whyte, HF (1999): "A high integrity IMU/GS navigation loop for autonomous land vehicle applications". *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15(3), pp. 572-578.
- Sun, D (2010). "Ultra-tight GPS/reduced IMU for land vehicle navigation". PhD Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary (Canadá).
- Talaya, J; Mesa, J; Segarra, J y Colomina, I (1997): "El sistema DGPS RASANT en Cataluña". *Revista del Instituto de Navegación de España* 1 pp. 78-87.
- Tanabe, S; Yuki, K; Ozeki, N; Shiba, D; Abe, T; Kouyama, K y Tsubota, K (2011): "The association between primary open-angle glaucoma and motor vehicle collisions". *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 52(7), pp. 4177-4181.
- Tecnogps (1999): "Manual de usuario del TGPS-RASANT. TGPS 2". Tecnología GPS, SA. 9 pp. Disponible online en http://www.tecnogps.com/manual_rasant32.pdf (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- TfL (2005): "London Congestion Charging Technology Trials Stage 1 Report". London (Inglaterra): Transport for London.
- TfL (2006a): "London Congestion Charging Technology Trials Stage 2 Final Report". London (Inglaterra): Transport for London.
- TfL (2006b): "Distance-based Charging. Report in Transport for London (TfL) GPS OBU Trial". London (Inglaterra): Transport for London.
- TfL (2008): "London Congestion Charging Technology Trials Stage 3 Final Report". Transport for London.
- The Ecologist (2010, 18 de junio): "Electric cars can fit with current driving patterns". *The Ecologist*. Disponible online en http://www.theecologist.org/News/news_round_up/514356/electric_cars_can_fit_with_current_driving_patterns.html (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- The Guardian (2001, 10 de octubre): "Women are better drivers". *Theguardian.com*. Disponible online en <http://www.theguardian.com/money/2001/oct/10/motorinsurance.insurance> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Thiel, C; Alemanno, A; Scarcella, G; Zubaryeva, A y Pasaoglu, G (2012): "Attitude of European car drivers towards electric vehicles: a survey". *JRC Scientific and Policy Reports*, European Commission, Brussels (Bélgica).
- Thomas, T y van Berkum EC (2009): "Detection of incidents and events in urban networks". *IET Intelligent Transport Systems* 3(2), pp.198-205.
- Toledo, T and Zohar, D (2007): "Modeling duration of lane changes". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1999, pp. 71-78.
- Toledo, T; Musicant, O y Lotan, T (2008). "In-vehicle data recorders for monitoring and feedback on drivers' behavior". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 16, pp. 320-331.
- Tong, D; Merry, CJ y Coifman, B. (2006): "Traffic information deriving using GPS probe vehicle data integrated with GIS". En *Proc. GIS-T 2006 Symposium*, Columbus-OH (EEUU), 27-29 de marzo, pp. 27-29.
- Tontsch, A; Valero-Mora, PM y Pareja-Montoro, I. (2013): "Identifying critical incidents in naturalistic driving data: experiences from a promoting real life observation for gaining understanding of road user behaviour in europe small-scale field trial". *IET Intelligent Transport Systems* 7(2), pp. 198-202.
- Touliou, K y Margaritis, D (2010): "Small scale field trial in Greece: focus on assessment of FCW and LDW". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D3.6. CERTH/HIT, Thessaloniki (Grecia).
- Transportation Research Board (TRB), (2013): <http://www.trb.org> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Travisi, C; Camagni, R y Nijkamp, P (2006): "Analysis of environmental costs of mobility due to urban sprawl. A modelling study on Italian cities". Discussion Paper No. 2006-042/3. Tinbergen Institute, Amsterdam (Holanda).



- Tripathi, J (2010): "Algorithm for detection of hot spots of traffic through analysis of GPS data". PhD Thesis. Department of Engineering in Computer Science and Engineering, Thapar University, Patiala (India).
- Uchida, N; Kawakoshi, M; Tagawa, T y Mochida, T (2010): "An investigation of factors contributing to major crash types in Japan based on naturalistic driving data". *International Association of Traffic and Safety Sciences (IATSS) Research* 34, pp. 22-30.
- United Nations (UN), *Population Division*, (2013): <http://www.un.org/en/development/desa/population> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- United States Coast Guard Navigation Center (NAVCEN), (2013): <http://www.navcen.uscg.gov/> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Urrey, J (2004): "The 'system' of automobility". *Theory, Culture and Society* 21(4-5), pp. 25-39.
- Val, C y Küfen, J (2013): "Data processing framework supporting large scale driving data analysis". En *Matlab virtual conference*. Disponible online en <https://www.mathworks.com/company/events/conferences/matlab-virtual-conference/2013/proceedings/data-processing-framework-supporting-large-scale-driving-data-analysis.pdf> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Valero, C (2009): "Avances en las tecnologías GPS: las redes RTK". *Vida rural* 293, pp. 44-48.
- Valero-Mora, PM; Tontsch, A; Pareja-Montoro, I y Sánchez-García, M (2010): "Using a highly instrumented car for naturalistic driving research: a small-scale study in Spain". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D3.5. Instituto de Tráfico y Seguridad Vial (INTRAS), Universidad de Valencia (España).
- Valero-Mora, PM; Tontsch, A; Welsh, R; Morris, A; Reed, S; Toulou, K y Margaritis, D (2013): "Is naturalistic driving research possible with highly instrumented cars? Lessons learnt in three research centres". *Accident Analysis and Prevention* 58, pp. 187-194
- Van Bree, R y Tiberius, C (2011): "Real-time single-frequency precise point positioning: accuracy assessment". *GPS Solutions* 16(2), pp. 259-266.
- Van Landingham, SW; Hochberg, C; Massof, RW; Chan, E; Friedman, DS y Ramulu, PY (2013): "Driving patterns in older adults with glaucoma". *BMC Ophthalmology* 13(4). doi: 10.1186/1471-2415-13-4
- Van Schagen, I; Welsh, R; Backer-Grøndahl, A; Hoedemaeker, M; Lotan, T; Morris, A; Sagberg, F y Winkelbauer, M (2011): "Towards a large-scale European Naturalistic Driving study: main findings of PROLOGUE". Proyecto PROLOGUE. Deliverable D4.2: SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam (Holanda).
- Velaga, NR y Pangbourne, K (2014): "Achieving genuinely dynamic road user charging: Issues with a GNSS-based approach". *Journal of Transport Geography* 34, pp. 243-253.
- Virginia Tech Transportation Institute (VTTI), (2014): <https://www.vtti.vt.edu> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Wang, Y; Mehler, B; Reimer, B; Lammers, V; D'Ambrosio, LA y Coughlin, JF (2010): "The validity of driving simulation for assessing differences between in-vehicle informational interfaces: a comparison with field testing". *Ergonomics* 53(3), pp. 404-420.
- Web oficial del sistema NAVSTAR-GPS (2014): <http://www.gps.gov> (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Wendel, J; Metzger, J; Monenikes, R; Maier, A y Trommer, F (2006): "A performance comparison of tightly coupled GPS/INS navigation systems based on extended and sigma point Kalman filters". *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, 53(1), pp. 21-31.
- Wiegand, DM; Hanowski, RJ y McDonald, SE (2009): "Commercial drivers' health: A naturalistic study of body mass index, fatigue, and involvement in safety-critical events". *Traffic Injury Prevention* 10, pp. 573-579.
- Williams, AF (2003): "Teenage drivers: patterns of risk". *Journal of Safety Research* 34, pp. 5-15.
- Wormley, SJ (2010, 15 de julio): "GPS errors and estimating your receiver's accuracy". Edu-observatory.org. Disponible online en http://www.edu-observatory.org/gps/gps_accuracy.html (Fecha de consulta, 01 de julio de 2014).
- Xie, C; Zhu, T; Guo, C y Zhang, Y (2013): "Measuring IVIS impact to driver by on-road test and simulator experiment". *Procedia: Social and Behavioral Sciences* 96(6), pp. 1566-1577.
- Yang, S y Peng, H (2009): "Development of an errorable car-following driver model". *Vehicle System Dynamics* 48(6), pp.751-773.
- Yang, Y, Gao, W y Zhang, X, (2010): "Robust kalman filtering with constraints: A case study for integrated navigation". *Journal of Geodesy* 84(6), pp.373-381.
- Yordanov, Z y Hussein, A (2010): "Impact of IVIS on driving performance and safety on the road". Bachelor Thesis. Department of Applied Information Technology, University of Gothenburg (Suecia).
- Young, KL; Bayly, M y Lenné, MG (2012): "Cross-regional in-vehicle information system design: the preferences and comprehension of Australian, US and Chinese drivers". *IET Intelligent Transport Systems* 6(1), pp. 36-43.
- Zabic, M (2011): "GNSS-based road charging systems. Assessment of vehicle location determination". PhD Thesis. Department of Transport, Technical University of Denmark (Dinamarca).
- Zhang, P; Gu, J; Milios, EE y Huynh, P (2005): "Navigation with IMU/GPS/digital compass with unscented kalman filter". *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* 3, pp. 1497-1502.
- Zhang, X; Wang, Q y Wan, D (2007): "Map matching in road crossings of urban canyons based on road traverses and linear heading change model". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 56(6), pp. 2795-2803.
- Zhao, Y (2011): "GPS/IMU integrated system for land vehicle navigation based on MEMS". Degree thesis. Royal Institute of Technology (KTH), Division of Geodesy and Geoinformatics, Stockholm (Suecia).
- Zhou, H y Hu, H (2010): "Reducing drifts in the inertial measurements of wrist and elbow positions". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 59(3), pp. 575-585.



- Zijderhand, F; Van Niffterick, W y Zwiars, A (2006): "Accuracy and reliability of distance and position measurements by GNSS systems". *Anders Betalen voor Mobiliteit*. Traffic and Transport Technology, The Hague (Holanda).
- Zuo, X y Zhang, Y (2012): "Detection and analysis of urban area hotspots based on cell phone traffic". *Journal of Computers* 7(7), pp. 1753-1760.

