

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA E
INFRAESTRUCTURA DE LOS TRANSPORTES



MODELIZACIÓN DE LOS
NIVELES DE SERVICIO EN
AUTOPISTAS EN TIEMPO
PRESENTE PARA LA GESTIÓN
DINÁMICA DEL TRÁFICO

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

ENRIQUE BELDA ESPLUGUES

Dirigida por:

Prof. Doctor ALFREDO GARCÍA GARCÍA

Doctor VICENTE RAMÓN TOMÁS LÓPEZ

OCTUBRE 2011

A Teresa, Pilar, Pablo y Javier

Agradecimientos

Cuando alguien decide llevar a cabo un nuevo trabajo, lo primero que debe tener en cuenta es si encontrará apoyo para ir hacia delante. El apoyo a encontrar debe ser doble: por una parte profesional; que es quién te acompañará en el desarrollo del cometido, y por otra parte personal; pues es la familia quien sufrirá, en forma de dedicación, el tiempo que al nuevo menester dediques.

Verdad es que cuando acabas el quehacer y lo ves plasmado en un documento lo primero que sientes es satisfacción, e inmediatamente lo que hay que hacer es una lista de todas aquellas personas que, de una u otra manera, han hecho posible que llegues al destino que te habías marcado para, lo primero, agradecerles su dedicación y, lo segundo, para compartir con ellos la alegría. Y cuando realizo esa lista espero no olvidar a nadie, así que comencemos: en primer lugar deseo manifestar mi más sincero agradecimiento a mis directores; el Prof. Doctor Alfredo García García y el Doctor Vicente Ramón Tomás López, quienes han sabido infundirme su constante entusiasmo por las labores de investigación que han hecho posible realizar esta tesis. Quiero agradecer también profundamente la dedicación que he tenido por parte de Ruth Gomar, Arturo Sáez y Diego Carmona, que se han volcado conmigo y que me han hecho posible llegar hasta el final, hartamente difícil en el proceso de elaboración de una tesis. No solamente les quiero agradecer el trabajo que han realizado sino también los ánimos que me han infundido, pues durante un proceso tan largo como es la confección de una tesis, no todos los momentos son de optimismo.

No puedo olvidar que redactar una tesis cuando, entre otras cosas, tu quehacer diario esta lejos de la Universidad (aunque a ella dediques parte de tu tiempo como Profesor Asociado) es muy complicado, y que eso sería prácticamente imposible si no hubiese tenido la comprensión y ayuda de mi buen amigo y compañero Federico C. Fernández Alonso, Subdirector General de Gestión del Tráfico y Movilidad de la Dirección General de Tráfico.

Y ahora queda el último agradecimiento, y no por ello el menos importante, a la familia. Recuerdo que en el Proyecto Final de Carrera como Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos fue a mis padres a quien agradecí el esfuerzo realizado que me

Prólogo

había permitido llegar hasta ese momento. Hoy es a mi esposa Teresa y a mis hijos Pilar, Pablo y Javier a quién debo agradecerles su apoyo incondicional, su amor y su paciencia, sin los cuales nunca hubiese tenido ni valor ni fuerzas para poder concluir el trabajo. Gracias a los cuatro por permitirme dedicar parte de vuestro tiempo a llegar hasta aquí.

Índice

I.	Introducción.....	19
II.	Antecedentes.....	21
III.	Estado del Arte.....	23
III.1.	Variables de tráfico y relaciones básicas	23
III.1.1.	Intensidad.....	23
III.1.2.	Velocidad.....	24
III.1.3.	Densidad de tráfico.....	27
III.1.4.	Relaciones entre variables de tráfico.....	28
III.2.	Equipos de adquisición de datos de tráfico	36
III.2.1.	Estación de toma de datos	36
III.3.	Estado del tráfico.....	40
III.3.1.	Capacidad.....	40
III.3.2.	Nivel de servicio.....	42
III.3.3.	Metodología analítico-teórica de obtención del nivel de servicio	45
III.4.	Modelos estadísticos para el análisis del tráfico.....	58
III.5.	Revisión de estudios sobre calidad de datos de las espiras electromagnéticas.....	61
III.6.	Revisión de estudios actuales	65
III.6.1.	Introducción	65
III.6.2.	Evaluación cronológica de estudios relevantes.....	65
IV.	Objetivos.....	81

Índice

IV.1.	Objetivo principal	81
IV.2.	Subobjetivos.....	81
V.	Método.....	83
V.1.	Hipótesis	83
V.2.	Diseño Experimental.....	84
V.2.1.	Definición del área de estudio	84
V.2.2.	Tramos de vía seleccionados.....	85
V.2.3.	Criterios de tramificación.....	86
V.2.4.	Criterios de selección de tramos en función de la localización de las ETDS.....	88
V.2.5.	Caracterización de los tramos del estudio.....	90
V.2.6.	Datos de tráfico	91
V.3.	Reducción de Datos.....	100
V.3.1.	Reducción de datos	100
V.3.2.	Cálculo de la reducción de los datos de tráfico.....	103
V.4.	Propuesta de determinación de niveles de servicio.....	116
V.4.1.	Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico 1	117
V.4.2.	Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico 2	121
V.4.3.	Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación	127
V.4.4.	Comparativas de los 3 algoritmos	171
V.4.5.	Prueba de contraste	187
VI.	Conclusiones y líneas de investigación.....	205
VI.1.	Conclusiones que se aportan	206

VI.2. Líneas de investigación y trabajos abiertos	209
VI.3. Aplicaciones	210
VII. Referencias Bibliográficas.....	212
ANEXO 1. Caracterización de los tramos de estudio y análisis de los mismos	219
ANEXO 2. Gráficas Velocidad/Ocupación para la determinación de umbrales	339
ANEXO 3. Análisis de conglomerados.	351
ANEXO 4. Normativa CTN135 y CTN199	357
ANEXO 5. Datos tratados, aplicación de reducción y comandos.....	361

Resumen

La presente tesis doctoral tiene como objetivo principal la definición de una nueva metodología de modelización en tiempo presente de los niveles de servicio en autopistas mediante la utilización de la información proporcionada por los sensores actualmente instalados en carretera. Se pretende que esta modelización pueda ser utilizada por los sistemas de gestión de tráfico, para obtener una caracterización más ajustada de los niveles de servicio. Esta caracterización mejorará la de gestión del tráfico, ya que la determinación de los niveles de servicio en tiempo presente ayudará a la toma de decisiones para la activación de las medidas de gestión de tráfico.

La investigación se ha basado en la hipótesis fundamental de que los seis niveles de servicio definidos en el Manual de Capacidad (HCM 2000), no se consideran adecuados para la gestión dinámica del tráfico por dos razones fundamentales: a) la metodología es totalmente estática y está orientada al dimensionamiento de las redes viarias y b) que entre algunos niveles de servicio no existen variaciones significativas en las condiciones de circulación.

En el desarrollo del trabajo se distinguen dos fases. La primera consiste en una fase de reducción de datos. Esta reducción se ha basado en un análisis de la calidad de datos obtenidos por las estaciones de monitorización, basadas en espiras. El resultado de la reducción ha consistido en la creación de un conjunto de filtros para la depuración de los datos que garantice la calidad de los mismos.

En la segunda fase se lleva a cabo la propuesta y análisis de diferentes métodos para la obtención del cálculo de nivel de servicio. Estos métodos son:

1. Obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico definido en el Manual de Capacidad. En este método se utiliza para el cálculo los valores de intensidad y porcentaje de vehículos pesados de la ETD.
2. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico. En este método se considera la definición de la velocidad libre obtenida a partir de la velocidad media geométrica para aquellos

Resumen

intervalos en los que los valores de intensidad por sección de medida son inferiores a 400 veh/h.

3. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación. Esta nueva propuesta se fundamenta sobre una de las tres curvas fundamentales de Ingeniería de Tráfico, la que relaciona la velocidad media y el porcentaje de tiempo de ocupación, medidas a través de los equipos de obtención de datos de tráfico ETDs.

Una vez definidos y analizados los diferentes métodos se ha realizado una comparativa entre ellos, así como una prueba de contraste que permita determinar la bondad del análisis. Además, mediante un análisis, basado en la teoría de conglomerados, se ha confirmado la hipótesis de trabajo del método 3. Se ha podido concluir que para la gestión dinámica del tráfico en tiempo presente, el conjunto de niveles de servicio adecuados para la gestión del tráfico son los cuatro niveles de servicio, ya que presentan una clara transición gradual entre los diferentes niveles.

Abstract

The main objective of the present thesis is the design of a new methodology for modelling the levels of service of motorways in real time, based on the information provided by sensors currently located on the road. It is intended that this modelling methodology can be used by traffic management systems, to obtain a more accurate characterization of the levels of service. This characterization will improve traffic management, due to the fact that the determination of the levels of service in real time will help decision-makers in the activation of traffic management measures.

This research has been based on the fundamental hypothesis that the six levels of service defined in the Highway Capacity Manual (HCM 2000), are not suitable for dynamic traffic management, the two main reasons being that: a) the methodology is completely static and it is oriented towards the design of new road networks and b) there are no significant differences between traffic conditions of certain levels of service.

The research development consists of two phases. The first one is a data reduction phase. This reduction has been based on the analysis of the quality of the data provided by monitoring stations, based on loops. The result of this reduction is the creation of a set of filters to ensure data quality.

In the second phase, the proposal and analysis of different methods is carried out to obtain the level of service. These methods are:

1. Obtaining the level of service based on dynamic HCM defined on Highway Capacity Manual. This method uses the intensity values and percentage of heavy good vehicles from the DCS.
2. Practical-analytical methodology for obtaining the level of service based on dynamic HCM. This method considers the definition of free speed based on a geometric average speed. This definition considers those intervals where the intensity values of the measured section are below 400 veh/h.

Abstract

3. Practical-analytical methodology for obtaining the level of service based on the speed-occupancy matrix. This new proposal is based on one of the three basic curves of Traffic Engineering. This curve establishes the relation between the average speed and the percentage of occupancy time, obtained from traffic data capture stations or DCS.

Once the different methods have been defined and analyzed, a comparative study has been made. Also, a contrast test has been carried out to determine the goodness of the analysis. In addition, through an analysis based on cluster theory, the working hypothesis of method 3 has been confirmed. It has been possible to conclude that for dynamic traffic management in real time, the set of levels of service suitable for traffic management are the four levels of service, because it presents a clear transition between them.

Resum

La present tesi doctoral té com a objectiu principal el desenvolupament d'una nova metodologia de modelització en temps real dels nivells de servei en autopistes mitjançant la utilització de la informació proporcionada pels sensors, actualment instal·lats a la carretera. Es pretén que aquesta modelització pugui ser utilitzada pels sistemes de gestió del trànsit, per a obtenir una caracterització més ajustada dels nivells de servei. Aquesta caracterització millorarà la gestió del trànsit, ja que la determinació dels nivells de servei en temps real ajudarà a prendre decisions per a l'activació de les mesures de gestió del trànsit.

La investigació ha estat basada en la hipòtesis fonamental de que els sis nivells de servei definits pel Manual de Capacitat (HCM 2000), no es consideren adequats per a la gestió dinàmica del trànsit per dos raons fonamentals: a) la metodologia és totalment estàtica i està orientada al dimensionament de les xarxes viàries y b) que entre alguns nivells de servei no existeixen variacions significatives en les condicions de circulació.

En el desenvolupament del treball es distingeixen dos fases. La primera consisteix en una fase de reducció de dades. Aquesta reducció ha estat basada en un anàlisi de la qualitat de dades obtingudes per les estacions de monitorització, basades en espirals. El resultat de la reducció ha consistit en la creació d'un conjunt de filtres per a la depuració de les dades que garanteix la qualitat dels mateixos.

En la segona fase es porta a terme la proposta i anàlisi de diferents mètodes per a l'obtenció del càlcul del nivell de servei. Aquests mètodes són:

1. Obtenció del nivell de servei basat en HCM dinàmic, definit al Manual de Capacitat. En aquest mètode s'utilitza per al càlcul els valors d'intensitat i percentatge de vehicles pesats de la ETD.
2. Metodologia analític-pràctica d'obtenció del nivell de servei basat en HCM dinàmic. En aquest mètode es considera la definició de la velocitat lliure obtinguda a partir de la velocitat mitjana geomètrica per aquells intervals en que els valors d'intensitat de secció de mesura son inferiors a 400 veh/h.

Resum

3. Metodologia analític-pràctica d'obtenció del nivell de servei basat en la matriu velocitat ocupació. Aquesta nova proposta es fonamenta sobre una de les tres corbes fonamentals de l'Enginyeria del Trànsit, la que relaciona la velocitat mitjana i el percentatge de temps d'ocupació, mesurades a través dels equips d'obtenció de dades de trànsit (ETD).

Una vegada definits i analitzats els diferents mètodes s'ha realitzat una comparativa entre ells, així com una prova de contrast que permetia determinar la bondat del anàlisi. A més, mitjançant un anàlisi, basat en la teoria de conglomerats, s'ha confirmat la hipòtesi de treball del mètode 3. S'ha pogut concloure que per la gestió dinàmica del trànsit en temps real, el conjunt de nivells de servei adequats per a la gestió del trànsit són els quatre nivells de servei, ja que presenten una clara transició gradual entre els diferents nivells.

I. Introducción

El Libro Blanco del Transporte de la Unión Europea “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad”, así como su posterior revisión, marcó como uno de sus objetivos prioritarios para 2010 combatir la congestión, los accidentes y las emisiones del CO₂, sin por ello perturbar la dinámica del desarrollo económico en el territorio europeo. Para no afectar esta dinámica, es necesario conocer los niveles de calidad de servicio, asimismo dar a conocer los mismos.

La seguridad vial y la confortabilidad o fluidez de la circulación dependen de muchos factores, entre los que se encuentran las características de las vías, las intensidades de tráfico, los conductores y los vehículos. La seguridad vial y la fluidez del tráfico dependen de una gestión y control del tráfico eficiente.

La gestión y control del tráfico consiste en la utilización adecuada del equipamiento existente para capturar la información de la carretera, procesarla para poder determinar el estado de la circulación y desarrollar las estrategias de gestión apropiadas para cada situación.

La aplicación de nuevas tecnologías a la ingeniería del tráfico ha permitido desarrollar un conjunto de sistemas conocidos como Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) que permiten mejorar la gestión del tráfico y aumentar la seguridad vial haciendo un mejor uso de las infraestructuras viarias existentes al optimizar su utilización.

El desarrollo de los ITS ha permitido la gestión dinámica del tráfico. A partir de la utilización de los sistemas ITS, la gestión del tráfico se realiza en tiempo real y se adapta a las diferentes situaciones que se pueden producir en la circulación. Tal y como se expresa en el Manual de Capacidad del 2000, una de las variables más utilizadas en la gestión del tráfico y la que refleja de mejor manera la calidad de la circulación es el nivel de servicio de la vía, así lo corrobora Romana (1995) en el documento “Evaluación práctica de niveles de servicio en carreteras convencionales de dos carriles en España” y también en el trabajo de Roess (2009), “Level of Service Analysis of Freeway Weaving Segments”. El nivel de servicio describe cualitativamente las condiciones de funcionamiento de la circulación viaria, y la

Antecedentes

percepción de estas condiciones por los conductores y/o pasajeros. La definición de un nivel de servicio se describe generalmente en relación con variables tales como velocidad, tiempo de recorrido, libertad de maniobra, interrupciones de la circulación, comodidad y seguridad vial.

Sin embargo, el cálculo de niveles de servicio presenta una serie de problemas que es necesario resolver para su utilización en la gestión dinámica del tráfico en autopistas. Por un lado es necesario disponer de una información de calidad. La monitorización e integración de la información monitorizada por los equipos colocados en la carretera debe ser analizada y tratada para garantizar su nivel de calidad y su utilización por los sistemas. Por otro lado, el cálculo de los niveles de servicio propuestos por el Transportation Research Board (2000) "Highway Capacity Manual", de aquí en adelante HCM 2000, es totalmente estático. Este modelo de cálculo es adecuado para el dimensionado de futuras redes viarias, pero no para la gestión dinámica del tráfico, ya que, no tienen en cuenta el estado del tráfico en tiempo presente para la determinación del nivel de servicio.

II. Antecedentes

El Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras del Instituto del Transporte y Territorio de la Universidad Politécnica de Valencia participó en un proyecto de I+D+i entre los años 2007 y 2010, financiado por el CEDEX, Ministerio de Fomento, denominado “METEOSAFETY: Estudio para la reducción de accidentes frente a condiciones meteorológicas adversas”, con datos de tráfico procedentes de equipos instalados en diferentes autovías por la Dirección General de Tráfico.

Uno de los elementos fundamentales de este proyecto era el análisis y la depuración de datos suministrados por las estaciones de toma de datos, en adelante calidad de datos. Sin entrar en el detalle del proyecto, el interés por el análisis de la calidad de datos en tiempo presente se amplió a la obtención de niveles de servicio dinámico en los centros de gestión de tráfico.

Por otra parte, las herramientas teóricas de cálculo de los niveles de servicio no resultaban las adecuadas para el cálculo dinámico del mismo, puesto que no se trata de un análisis de las condiciones de un tramo de una red de carreteras sino de medir la calidad de la circulación en ese tramo en cada momento en tiempo presente, con objeto de divulgar esa información de manera inmediata a los usuarios del tramo, además de servir de base para la toma de decisiones operativas.

El HCM 2000 es una herramienta extraordinaria para la planificación, diseño y evaluación (en gabinete) de la calidad de la circulación en una carretera. Pero no es utilizable, puesto que se sale de su ámbito de validez para la evaluación en tiempo presente, así como para el tratamiento de una gran cantidad de datos. El planteamiento de los procedimientos de análisis del HCM 2000 se refiere a situaciones estables del funcionamiento del tráfico en períodos de análisis de 15 minutos.

Para la gestión dinámica de la movilidad, los centros de gestión de tráfico utilizan el nivel de servicio como indicador fundamental. Por ello, para la gestión en tiempo presente del tráfico es necesaria la determinación de los niveles de servicio dinámicos, obtenidos a partir de los parámetros suministrados por los equipos de captación instalados en carretera, en particular de las estaciones de toma de datos (ETDs). La complejidad en el tratamiento de un volumen tan elevado de datos así

Antecedentes

como la disponibilidad de los mismos es lo que ha llevado a investigar cómo tratar los mismos (en calidad y en disponibilidad) y de ello establecer el modelo para la obtención del indicador válido.

III. Estado del Arte

En el presente capítulo se definen las variables fundamentales de tráfico, los conceptos teóricos y relaciones entre las mismas, así como los equipos de adquisición utilizados para la obtención de estas variables que se emplean en el estudio objeto de la tesis.

Una vez identificadas las variables fundamentales se definen las variables de segundo orden en materia de tráfico como son la capacidad y el nivel de servicio que representan el estado del tráfico, exponiendo la metodología analítica teórica de cálculo del nivel de servicio basado en el HCM 2000.

El estudio recoge otras investigaciones que han tratado temas aproximados pero ninguna de ellas ha obtenido el comportamiento del nivel de servicio en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico, objetivo de la tesis.

III.1. Variables de tráfico y relaciones básicas

Las variables fundamentales de tráfico son la intensidad, velocidad y densidad. En este apartado se detalla la definición teórica de cada una de las variables y las relaciones entre ellas que constituyen la base para la obtención del nivel de servicio.

III.1.1. Intensidad

Se llama intensidad de tráfico al número de vehículos que pasan a través de una sección fija de una carretera por unidad de tiempo. Las unidades más usadas son vehículos/hora y vehículos/día. Cuando se emplea como unidad los vehículos/hora se denomina intensidad horaria, y cuando se utilizan los vehículos/día se habla de intensidad diaria.

Cuando el tráfico no está formado exclusivamente por coches es necesario obtener la intensidad de un tráfico equivalente que estuviera formado únicamente por coches. Para ello se aplican unos factores de equivalencia que sirven para determinar a cuántos coches equivale cada vehículo de otro tipo. Estos factores de equivalencia dependen del tipo de vehículo (camiones, autobuses, vehículos de recreo, etc.) y de las características del trazado que a su vez dependen del tipo de terreno atravesado (terreno llano, ondulado ó accidentado). Si se conoce la

Estado del Arte

composición del tráfico (porcentajes de vehículos pesados y de recreo) y los correspondientes factores de equivalencia, la intensidad en vehículos equivalentes viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{eq} = \frac{I}{FHPN \cdot f_{VP} \cdot f_P}$$

Ecuación 1: Cálculo de la intensidad equivalente. HCM 2000.

donde:

- I_{eq} : Intensidad equivalente (veh/h).
- I : Intensidad (veh/h).
- f_P : Factor de calidad de la conducción, en general se adopta el valor de 1.
- N : número de carriles.
- f_{VP} : factor de vehículos pesados.
- FHP : factor de hora punta. El intervalo del factor de hora punta en autopistas y autovías está entre 0,80 y 0,95.

$$FHP = \frac{I_{60}}{4 * I_{max15}} < 1$$

Ecuación 2: Cálculo del factor de hora punta. HCM 2000.

Siendo:

- I_{60} : Intensidad en la hora más cargada.
- I_{max15} : Intensidad del cuarto de hora más alto de la hora.

III.1.2. Velocidad

Según el HCM 2000, la velocidad se define como la tasa de movimiento expresada como distancia por unidad de tiempo, generalmente en km/h. Sin embargo, para el tratamiento de la velocidad como dato de tráfico se utilizan los siguientes conceptos de velocidad: velocidad libre y velocidad libre básica.

La velocidad libre VL en una vía se define como la velocidad media de los coches cuando el tráfico es ligero. Esta velocidad libre puede estimarse a partir de la velocidad libre básica VLB , que sería la velocidad libre en una vía en condiciones ideales. A esta velocidad se le aplica correcciones en función de la tipología del tramo.

Según el apartado 23.4 del HCM 2000 sobre tramos básicos de autopista, se establece la velocidad libre a la medida, en campo, en base a la media de los coches cuando el tráfico es inferior a 1.300 v/h/c o a la obtenida según el propio método que aporta el HCM 2000. En concreto, para un tramo básico de autopista se considera velocidad libre a la media de los coches cuando el tráfico es inferior a 1300 v/h/c y la velocidad libre básica es la velocidad máxima legal 120 Km/h. Las correcciones aplicadas a este tipo de tramo, procedentes del HCM 2000, se definen a continuación:

$$VL = VLB - fa - fo - fn - fe$$

Ecuación 3: Cálculo de la velocidad libre. HCM 2000.

donde:

- VL : velocidad libre real (Km/h).
- VLB : velocidad libre básica (Km/h).
- f_a : factor de corrección: anchura de carril.

EXHIBIT 23-4. ADJUSTMENTS FOR LANE WIDTH

Lane Width (m)	Reduction in Free-Flow Speed, f_{LW} (km/h)
3.6	0.0
3.5	1.0
3.4	2.1
3.3	3.1
3.2	5.6
3.1	8.1
3.0	10.6

Tabla 1: Factor de corrección para la anchura de carril. HCM 2000.

Estado del Arte

- f_o : factor de corrección: obstáculos laterales.

EXHIBIT 23-5. ADJUSTMENTS FOR RIGHT-SHOULDER LATERAL CLEARANCE

Right-Shoulder Lateral Clearance (m)	Reduction in Free-Flow Speed, f_{LC} (km/h)			
	Lanes in One Direction			
	2	3	4	≥ 5
≥ 1.8	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	1.0	0.7	0.3	0.2
1.2	1.9	1.3	0.7	0.4
0.9	2.9	1.9	1.0	0.6
0.6	3.9	2.6	1.3	0.8
0.3	4.8	3.2	1.6	1.1
0.0	5.8	3.9	1.9	1.3

Tabla 2: Factor de corrección para obstáculos laterales. HCM 2000.

- f_n : factor de corrección: por número de carriles.

EXHIBIT 23-6. ADJUSTMENTS FOR NUMBER OF LANES

Number of Lanes (One Direction)	Reduction in Free-Flow Speed, f_N (km/h)
≥ 5	0.0
4	2.4
3	4.8
2	7.3

Note: For all rural freeway segments, f_N is 0.0.

Tabla 3: Factor de corrección por número de carriles. HCM 2000.

- f_e : factor de corrección: separación entre enlaces.

EXHIBIT 23-7. ADJUSTMENTS FOR INTERCHANGE DENSITY

Interchanges per Kilometer	Reduction in Free-Flow Speed, f_{ID} (km/h)
≤ 0.3	0.0
0.4	1.1
0.5	2.1
0.6	3.9
0.7	5.0
0.8	6.0
0.9	8.1
1.0	9.2
1.1	10.2
1.2	12.1

Tabla 4: Factor de corrección para la separación entre enlaces. HCM 2000.

III.1.3. Densidad de tráfico

Se denomina densidad de tráfico al número de vehículos que existen por unidad de longitud sobre una carretera. Se puede medir, por ejemplo, obteniendo una fotografía de un tramo de carretera y contando los vehículos que hay en él. Pero realmente esta magnitud rara vez se mide, ya que es posible calcularla fácilmente a partir de medidas de velocidad e intensidad, como se verá más adelante.

La densidad de tráfico ha tenido un interés más teórico que práctico hasta los años 90, ya que por resultar más sencilla la utilización de la intensidad y la velocidad, todos los procedimientos de estudio de la circulación se basaban en estas últimas magnitudes. Sin embargo, el HCM 2000 la define como variable básica que determina el nivel de servicio de la circulación en una vía, por lo que desde ese momento comienza a tener un mayor interés su conocimiento. La libertad de maniobra y la separación con otros vehículos son altamente valoradas por los conductores en relación con la calidad de servicio de circulación. Así si los carriles de una carretera son estrechos será obligado guardar una distancia lateral con los otros vehículos inferior a la deseada; el conductor tenderá a compensar esta situación manteniendo una mayor distancia con el vehículo precedente (intervalo hueco).

La distancia entre dos vehículos sumada a la longitud del vehículo es el intervalo intervehicular espacial o espaciamiento:

$$s = d_{entre_vehículos} + L_{vehículo}$$

Ecuación 4: Cálculo del espaciamiento. HCM 2000.

Esta variable tiene un valor medio, o espaciamiento medio S_m cuya inversa es por definición la densidad:

$$D = \frac{1}{S_m}$$

Ecuación 5: Cálculo del espaciamiento medio. HCM 2000.

Consecuentemente la densidad es una variable que explica directamente la valoración que hacen los conductores de la calidad de la circulación, y de ahí el interés por utilizar esta variable.

Estado del Arte

Evidentemente existe un valor máximo de la densidad de tráfico, que se obtiene cuando todos los vehículos están en fila, sin huecos entre ellos. Esta densidad máxima será igual al producto de la inversa de la longitud media de los vehículos por el número de carriles. En estas condiciones los vehículos estarán parados, ya que les resultaría imposible moverse incluso a pequeña velocidad sin golpearse unos a otros.

$$D = \frac{n}{s_m}$$

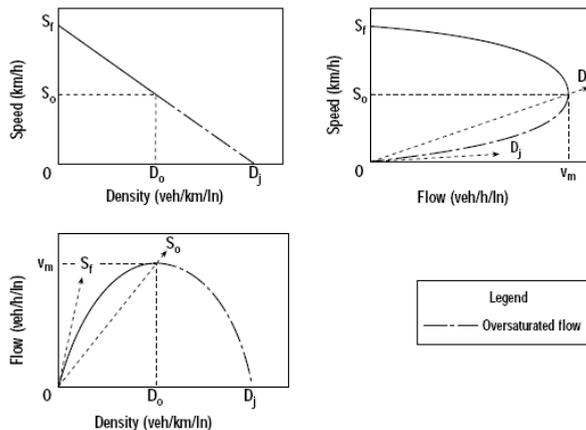
Ecuación 6: Cálculo de la densidad máxima. HCM 2000.

siendo n el número de carriles.

III.1.4. Relaciones entre variables de tráfico.

En el campo de aplicación de la ingeniería de tráfico es de obligada referencia las tres relaciones existentes entre las variables fundamentales de tráfico, intensidad, velocidad y densidad definidas en los apartados anteriores. En este apartado se desarrollan estas tres relaciones cuyas gráficas quedan representadas en la siguiente figura:

EXHIBIT 7-2. GENERALIZED RELATIONSHIPS AMONG SPEED, DENSITY, AND FLOW RATE ON UNINTERRUPTED-FLOW FACILITIES



Source: Adapted from May (2).

Gráfica 1: Relación entre variables de tráfico fundamentales en flujo continuo. HCM 2000.

En la edición especial del Transportation Research Board (2011) se hace referencia a los 75 años del diagrama fundamental de teoría de la circulación. En este documento se ha revisado la vigencia de las relaciones entre las variables de tráfico de nuevo teniendo en cuenta el impacto que los nuevos desarrollos tecnológicos, como las medidas en tiempo presente, los sensores remotos y la telemática, han aportado a la ingeniería del tráfico.

III.1.4.1. Relación fundamental.

Entre las principales características de la circulación existen relaciones que permiten deducir una de ellas a partir de los valores de las otras. Algunas de estas relaciones se deducen de su propia definición, mientras que otras se han obtenido de forma empírica a partir de numerosos datos recogidos en estudios reales.

Estas relaciones son muy utilizadas en estudios de tráfico. Así, cuando se proyecta una nueva carretera o se estudia el acondicionamiento de una existente, en la que se ha determinado la intensidad de tráfico que circulará por ella, se podrá estimar la velocidad de los vehículos correspondiente a esta intensidad a partir de una relación velocidad / intensidad determinada en una carretera de características análogas.

En lo que sigue se supone que los vehículos se mueven a lo largo de un tramo de carretera, sin interrupciones a la circulación. Por consiguiente, si los vehículos llegan a detenerse, será debido a las propias circunstancias del tráfico y no a medidas exteriores, como pueden ser las indicaciones de un semáforo o de un agente de la circulación.

Al estudiar las distribuciones de velocidad se hizo notar la diferencia entre la distribución obtenida midiendo las velocidades al pasar los vehículos por un punto fijo (distribución temporal) y la obtenida al medir las velocidades en un momento dado (distribución espacial).

Sea D la densidad de tráfico, I la intensidad, y sean $f_t(V)$ y $f_e(V)$ las funciones de densidad correspondientes a las distribuciones de velocidad temporal y espacial respectivamente. El número de vehículos con velocidad comprendida entre V y $V+dV$ que pasará por una sección fija A en el intervalo t a $t+dt$ será:

Estado del Arte

$$N_{vehículos} = f_t(V) \cdot dV \cdot I \cdot dt$$

Ecuación 7: Número de vehículos en un intervalo de velocidad determinado. HCM 2000.

Pero estos vehículos serán precisamente aquellos que en el instante t estén delante de la sección A en un tramo de longitud Vdt , es decir $f_e(V) dV \cdot D \cdot Vdt$. Por consiguiente:

$$I \cdot f_t(V) \cdot dt \cdot dV = D \cdot V \cdot f_e(V) dt \cdot dV$$

Ecuación 8. HCM 2000.

Integrando ambos miembros con relación a V se obtiene la relación fundamental

$$I = D \cdot \bar{V}_e$$

Ecuación 9: Cálculo de la intensidad. HCM 2000.

Siendo \bar{V}_e la velocidad media espacial. Esta relación liga por tanto las tres magnitudes fundamentales y permite calcular una de ellas (generalmente la densidad) en función de las otras dos.

Además, la Ecuación 8 permite relacionar las dos distribuciones de velocidades espacial y temporal. Teniendo en cuenta la Ecuación 9 puede escribirse:

$$D \cdot \bar{V}_e \cdot f_t(V) = D \cdot V \cdot f_e(V)$$

Ecuación 10: Relación entre las distribuciones de velocidades espacial y temporal. HCM 2000.

y de aquí, integrando con relación a V

$$\frac{1}{\bar{V}_e} \int_0^{\infty} f_e(V) \cdot dV = \int_0^{\infty} \frac{f_t(V) \cdot dV}{V}$$

Ecuación 11. HCM 2000.

y de aquí,

$$\frac{1}{\bar{V}_e} = \int_0^{\infty} \frac{1}{V} f_t(V) \cdot dV$$

Ecuación 12. HCM 2000.

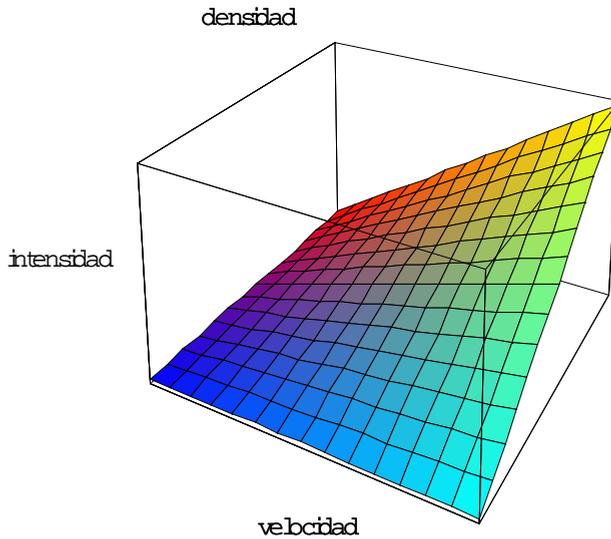
es decir, que la velocidad media espacial coincide con la media armónica de la distribución temporal. La velocidad media temporal será:

$$\bar{V}_t = \frac{1}{\bar{V}_e} \cdot \int_0^{\infty} V^2 f_e(V) \cdot dV = \bar{V}_e + \frac{\sigma_e^2}{\bar{V}_e}$$

Ecuación 13: Velocidad media temporal. HCM 2000.

siendo σ_e^2 la varianza de la distribución espacial. Como se ve la velocidad media temporal es siempre mayor que la velocidad media espacial.

La relación fundamental de la Ecuación 9 enlaza las tres variables macroscópicas básicas del tráfico vial, de forma que cualquier tramo de carretera tiene una circulación que en cada momento queda descrita por una triada de valores (I,V,D) cuya representación se inscribe en la superficie definida por la ecuación. Por lo tanto, a lo largo de un periodo de tiempo la circulación quedará descrita por una curva que se apoyará sobre la superficie (Gráfica 2). En la práctica se opera con representaciones planas correspondientes a las proyecciones de la anterior curva sobre los planos coordenados, que se estudian a continuación.



Gráfica 2: Modelo (ecuación fundamental) de tráfico donde $\bar{V}_e = I/D$ representa la superficie de modelos de flujos de tráfico admisibles.

III.1.4.2. Relación velocidad – densidad.

Basándose en unas consideraciones sencillas, es fácil ver qué tipo de relación puede existir entre la velocidad media de los vehículos y la densidad de tráfico. Evidentemente, si la densidad fuera muy pequeña, casi nula, los pocos vehículos que estuvieran en la carretera podrían circular muy separados y llevar la velocidad que quisieran sin que ningún otro les interfiriera. En estas condiciones, la velocidad de los vehículos podría ser tan alta como lo permitieran las características de la carretera y del propio vehículo. Con densidades mayores, los vehículos tendrían más dificultades para mantener la velocidad deseada porque encontrarían con cierta frecuencia vehículos más lentos delante de ellos que les impedirían mantener su velocidad. Por tanto al aumentar la densidad de tráfico la velocidad media disminuye. En el límite, cuando se alcance la densidad máxima (es decir, cuando la carretera esté totalmente ocupada por vehículos, parachoques contra parachoques), será absolutamente imposible mover un vehículo sin golpear al que le precede, y la velocidad de todos los vehículos será igual a cero. La velocidad media resulta así una función de la densidad que alcanza un valor máximo cuando la densidad es casi cero, y disminuye constantemente al aumentar la densidad hasta llegar a anularse cuando la densidad de tráfico alcanza su valor máximo.

Esta función variará de unas carreteras a otras, pero indudablemente la influencia del tipo de carretera será mayor cuando la densidad es baja; en estas condiciones ya se vio que la velocidad no depende de otros vehículos, sino exclusivamente de las características de la carretera. Por el contrario, cuando la densidad es alta, los conductores deben preocuparse principalmente de los vehículos que les preceden, por lo que la velocidad dependerá más de las condiciones del tráfico que de las de la carretera. Si se representa la variación de la velocidad media en función de la densidad de tráfico (midiéndola en vehículos por Km y carril, para evitar la influencia de la anchura de la carretera), se obtienen curvas como las de la Gráfica 1, en las que las mayores variaciones entre tipos de carretera se producen en las zonas de baja densidad.

La forma funcional de la curva que se obtiene de la relación densidad-velocidad no tiene por qué ser una línea recta como se representa en la Gráfica 1, sino que ésta es una representación estilizada y su comportamiento es el de una función monótona decreciente.

III.1.4.3. Relación intensidad – densidad.

Teniendo en cuenta la relación básica entre intensidad, densidad y velocidad media (Ecuación 9) y la relación existente entre velocidad y densidad, se puede deducir la relación que existe entre intensidad y densidad. Cuando la densidad sea nula, también lo será la intensidad y cuando la densidad alcance su valor máximo, por anularse la velocidad media, se anulará también la intensidad. Entre ambos extremos, la intensidad tendrá valores positivos, y por consiguiente debe alcanzarse un valor máximo de la intensidad. La representación estilizada de la intensidad en función de la densidad resulta en una función con un máximo único en el intervalo entre la densidad nula y la densidad máxima, puntos en los que la intensidad es igual a cero, como las representadas en la Gráfica 1.

Como en el caso de la relación velocidad densidad, estas curvas serán diferentes para las distintas carreteras, presentándose mayores diferencias en la zona de baja densidad, mientras que serán similares en la zona cercana a la densidad máxima.

El hecho de que exista un valor máximo de la intensidad que puede circular por una carretera es de la mayor importancia. **Este valor máximo de intensidad se conoce como capacidad de la carretera, y la densidad para la que se obtiene se llama densidad crítica.** Cada valor de la intensidad, menor que la capacidad, se obtiene

para dos valores distintos de la densidad, uno menor que la densidad crítica y otro mayor. El funcionamiento de la circulación es completamente distinto en ambos casos. Cuando la densidad es menor que la crítica, el tráfico se mantiene relativamente fluido y estable, en el sentido que si se produce alguna pequeña perturbación que aumente momentáneamente la densidad de tráfico, tiende a disiparse y volver a la situación anterior. Por el contrario, cuando la densidad es superior a la crítica, las perturbaciones tienden a producir un empeoramiento de la situación que puede llegar a la detención total del tráfico. Por ello, los puntos de la rama ascendente del diagrama corresponden a condiciones de tráfico que se pueden considerar aceptables, ya que los vehículos se mantienen moviéndose a una velocidad que, aunque no sea la deseable, no sufrirá excesivas variaciones. Por el contrario, los puntos de la rama descendente corresponden a una circulación inestable en que se producen constantemente paradas y avances y las velocidades oscilan entre cero y valores siempre reducidos.

El diagrama que representa la intensidad en función de la densidad se conoce como diagrama fundamental del tráfico, y en él puede obtenerse para cualquier punto la intensidad (ordenada), densidad (abscisa) y velocidad media (pendiente de la recta que une el origen con el punto en cuestión). Todos los puntos posibles deben quedar encerrados por debajo de dicha curva.

III.1.4.4. Relación velocidad – intensidad.

Esta relación es mucho más sencilla de obtener en la práctica, ya que es más fácil medir velocidades e intensidades que densidades. Además, la intensidad de tráfico es una magnitud que define la demanda de tráfico en la carretera, y es por tanto un dato básico, mientras que la velocidad es la magnitud que mejor define el funcionamiento de la circulación desde el punto de vista de los conductores. **Frecuentemente el problema será deducir las condiciones de tráfico (que pueden definirse por la velocidad), conociendo la demanda de tráfico (definida por la intensidad).** Esto hace que las relaciones velocidad-intensidad tengan una importancia práctica mucho mayor que las otras relaciones, y que hayan sido objeto de numerosos estudios empíricos, mientras que las relaciones intensidad densidad y velocidad densidad hayan sido estudiadas principalmente desde el punto de vista teórico.

Como en el caso de la curva intensidad-densidad, se presentan dos velocidades distintas para cada valor de la intensidad, una relativamente elevada, y otra menor

como se aprecia en la Gráfica 1. En esta gráfica se observa que la parte superior de la curva corresponde a una circulación libre y estable, mientras que la parte inferior corresponde a una circulación congestionada e inestable.

Comparando las curvas correspondientes a distintas carreteras, se observa que difieren apreciablemente en la parte superior (velocidades altas), mientras que son parecidas en la parte inferior. La rama superior de la curva, que es la más interesante a efectos prácticos, ya que la rama inferior corresponde a condiciones inaceptables, puede considerarse aproximadamente lineal, variando de unas carreteras a otras su inclinación y ordenada en el origen.

Se han realizado varios estudios: Rakha, H., Van. Aerde, M (1995), De Moor, B., De Schutter, B., Bellemans, T. (2002) para determinar cómo depende la relación velocidad-intensidad de la composición del tráfico (porcentaje de vehículos pesados) y características de la carretera (sección transversal, pendientes, etc.). Dichos estudios forman la base de los procedimientos para determinar la capacidad de las carreteras. Estos estudios están basados en datos aportados por detectores de bucle en intervalos entre 1 y 5 minutos, ubicados en diferentes tipos de vía: autopistas, túneles y vías arteriales y con diferentes regímenes de circulación o estados de tráfico, es decir no sólo en situación de tráfico libre, con el fin de tener una muestra representativa y los resultados se puedan extrapolar tanto a Europa como a Norte América.

El estudio de Rakha, H. y Van. Aerde, M. (1995) se basa en un ajuste multivariable que varía en función del tipo de vía y tipo de estado de tráfico (régimen de circulación). El estudio de De Moor, B., De Schutter, B., Bellemans, T. (2002) está basado en aplicar estas relaciones a los modelos macroscópicos de simulación, para obtener nuevas aplicaciones en la gestión del tráfico tales como la prognosis del flujo de tráfico, detección automática de incidentes y control predictivo de ramp-metering (control en rampas de acceso).

III.2. Equipos de adquisición de datos de tráfico

Para la identificación de las diferentes variables que definen el comportamiento del tráfico es necesario la obtención de un conjunto de datos basados en situaciones y comportamientos reales, que sean precisos, veraces, sencillos y seguros. Para la obtención de estos datos de medida se utilizan: las Estaciones de Toma de Datos (ETD) para la captura de toda la información relativa al comportamiento del tráfico.

Para poder modelar el comportamiento del tráfico de forma correcta es preciso interpretar los datos recibidos por la ETD de forma coherente para realizar un posterior filtrado. El sistema comunica directamente con el Centro de Gestión del Tráfico, donde se encuentran los servidores de información y datos. Estos equipos son los que procesan en un primer nivel los datos para eliminar valores erróneos, fuera de rango, a la vez que se encargan de mantener en comunicación los equipos de toma de datos con el centro de control. Estos dispositivos son las Estaciones Remotas Universales (ERU) y permiten la manipulación de los equipos de campo como periféricos propios de las ERUs.

A continuación se detallan y describen las características de los equipos de comunicaciones y de toma de datos que se utilizan, así como el funcionamiento para la obtención de los datos que se emplean en este estudio. Estos datos son:

- De tráfico: velocidad, intensidad y ocupación como medida indirecta de la densidad.
- Nivel de servicio obtenido a partir de las variables de tráfico.

III.2.1. Estación de toma de datos

Las estaciones de toma de datos se encargan de proporcionar información del estado del tráfico. A partir de esta información se describe cómo se comporta el tráfico en un determinado segmento de la red viaria: congestión, intensidad, ocupación, velocidad media de los vehículos, etc.

La ETD utiliza un conjunto de sensores instalados en la calzada para detectar el paso de los vehículos. Una ETD tiene capacidad para controlar hasta un total de 48 puntos de sensorización que podrán ser de tipo inductivo (espiras), piezoeléctricos (sensores de ejes), lazos virtuales de infrarrojos, microondas o láser (con los

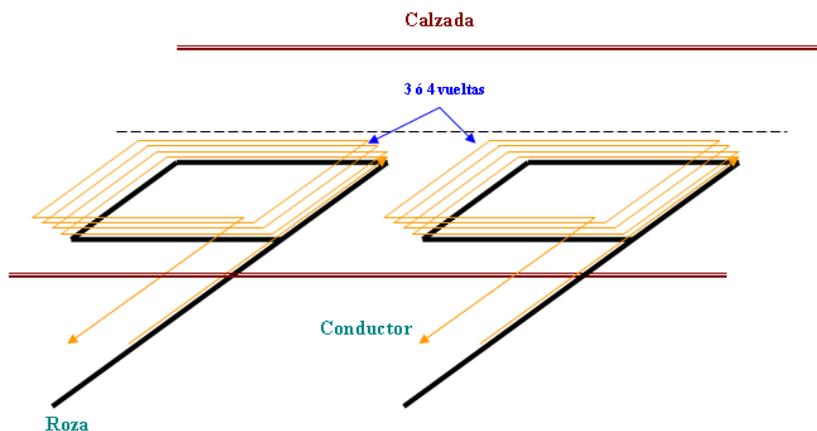
correspondientes equipos adicionales). En función de las características de los sensores instalados en la calzada, (por ejemplo detectores simples o dobles) se obtienen un conjunto de variables de tráfico u otras.

A pesar de que existen diferentes modelos de Estaciones de Toma de Datos, según sea el fabricante, el funcionamiento, utilización y finalidad es la misma para todas ellas. Estos equipos se encuentran normalizados a nivel de protocolo y comunicaciones como periféricos con los equipos adyacentes y de nivel superior por el Comité de Normalización AEN/CTN 135/SC 4 "REGULACIÓN DE TRÁFICO". Debido a la extensión y evolución de este grupo SC4, actualmente ha dado lugar a la generación de un nuevo Comité de Normalización AEN/CTN 199 que está formado por los siguientes Subcomités:

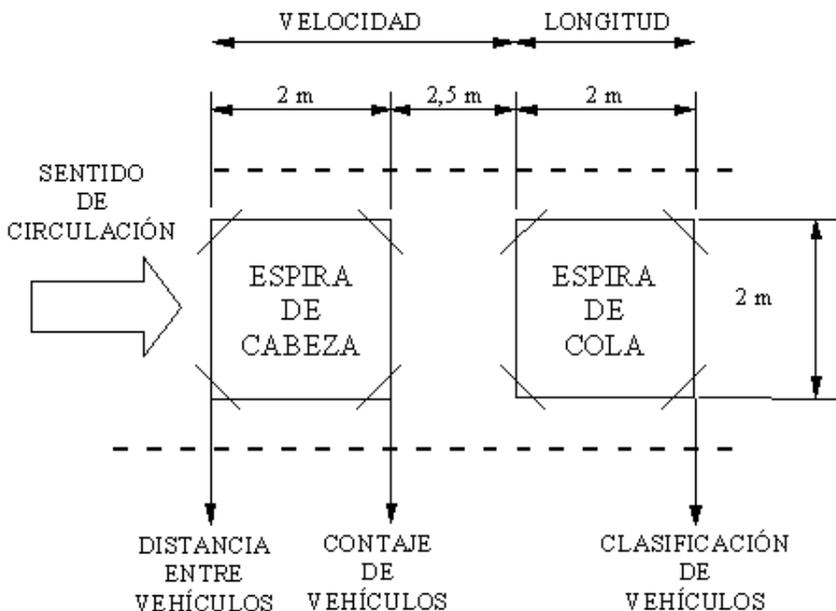
AEN/CTN 199	EQUIPAMIENTO PARA LA GESTIÓN DEL TRÁFICO
SC1	Estaciones remotas
SC2	Reguladores de tráfico
SC3	Detectores y estaciones de toma de datos
SC4	Comunicaciones
SC5	Paneles de Mensaje Variable
SC6	Semáforos
SC7	Estaciones Medioambientales en Carretera
SC8	Postes SOS
SC9	Equipos de vídeo
SC10	Mantenimiento
SC11	Centros de gestión
SC12	Cinemómetros
SC14	Visión artificial
SC15	Calidad de datos

Tabla 5.- Subcomités del CTN 199 de AENOR

Las espiras electromagnéticas son unas bobinas constituidas por un solo conductor empotrado en el pavimento que da varias vueltas formando un polígono en la calzada, situado en la zona de paso de los vehículos. Sus dimensiones y geometrías son muy variables dependiendo del propósito, si bien lo más usual es el tamaño 2x2 metros y forma de cuadrado.



Gráfica 3: Diseño de espira electromagnética.



Gráfica 4: Configuración de las espiras.

El funcionamiento es el siguiente: la ETD está constantemente a la espera de pulsos por las entradas digitales que producen las espiras electromagnéticas colocadas en la calzada. Ante la recepción de uno, lo guarda y analiza la secuencia completa. La ETD tiene definidas una serie de secuencias que coinciden con el paso de vehículos.

En caso de que la secuencia coincida con alguno de los tipos predefinidos, se analiza, se averiguan los datos del vehículo detectado y se produce su conteo. Cada cierto tiempo (periodo de integración), los datos se acumulan y se mantienen listos para servir a la ERU en cuanto ésta los pida. Un proceso de seguimiento registra los eventos que se producen en todas estas tareas.

Las tareas que realiza la ETD se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Gestión de pulsos. Se encarga del registro de los pulsos que llegan a las diferentes tarjetas de entrada digitales.
- Tarea de análisis de secuencias. Analiza las secuencias que se producen como concatenación de los pulsos. Se encarga también de actualizar el estado de cada detector en caso de que las secuencias analizadas resulten incoherentes.
- Tarea de gestión de alarmas. Se encarga de actualizar el estado de las alarmas del armario en caso de que sea una ETD aislada de la ERU.
- Tarea de integración. Integra los datos cada periodo de integración.
- Tarea de comunicaciones con ERU. Se encarga de analizar los mensajes provenientes de la ERU, componer y enviar las respuestas.
- Tarea de datos históricos. Se encarga de almacenar los datos de tráfico de forma local.
- Tarea de Seguimiento. Registra todos los eventos que se producen en la ETD.
- Servicio de Terminal de mantenimiento. Tarea que se encarga de presentar al usuario de forma local tanto para estado y alarmas, datos de tráfico en tiempo real (vehículo a vehículo), datos integrados, datos históricos, calibración de espiras, etc.

Los datos que la ETD es capaz de elaborar a partir de los pulsos que lee de los detectores son: a) datos de tráfico; b) alarmas de operación, debidas a condiciones de tráfico especialmente anómalas (congestiones, cambio de sentido de la circulación,...) y c) información del estado de los detectores. Los datos de tráfico que puede proporcionar una ETD son:

- Datos de tráfico instantáneos. La ETD calcula los parámetros de tráfico de cada vehículo que detecta, independientemente del tipo. Estos datos los puede servir en tiempo real a la ERU.

Estado del Arte

- Datos de tráfico de último periodo. La ETD agrega los datos cada periodo de agregación (parámetro configurable, típico: 1 minuto) y los sirve a la ERU.
- Datos de tráfico históricos. La ETD almacena de forma local todos los datos integrados cada periodo de integración. Los sirve a la ERU bajo petición de ésta. Esta funcionalidad es altamente útil cuando se rompe de forma temporal el enlace de comunicaciones entre la ERU y la ETD. Al recuperarse este enlace, la ERU puede recuperar toda la información de tráfico almacenada localmente por la ETD.

III.3.Estado del tráfico

El estado del tráfico viene determinado por la capacidad y, en consecuencia, el nivel de servicio en el que está operando cada uno de los tramos de la vía. Es una medida cualitativa determinada de forma cuantitativa.

El estado del tráfico se mide a partir de las variables de tráfico de primer nivel: intensidad de tráfico, velocidad y densidad que dan lugar a la variable de segundo nivel, el nivel de servicio, así como de la distribución normal del transporte y de la demanda de tráfico que se genera en relación al espacio disponible en las carreteras, es decir la relación entre la demanda y la capacidad de la vía.

III.3.1. Capacidad

Se define como capacidad de una carretera el máximo flujo horario de vehículos que puede esperarse razonablemente que atraviesen un carril ó sección de medida uniforme durante un determinado periodo de tiempo en las condiciones prevalecientes de estado de la carretera, de la circulación y de los elementos de control de tráfico. La capacidad de una infraestructura de transporte mide su potencial máximo para permitir el desplazamiento de vehículos.

La capacidad de un carril en vehículos/hora, suponiendo una velocidad uniforme, se expresa mediante la siguiente relación:

$$c = \frac{v}{s} \cdot 1000$$

Ecuación 14: Capacidad de un carril. HCM 2000.

donde:

- v: velocidad en Km/h.
- s: separación media mínima en metros entre las partes frontales de dos vehículos sucesivos, para una determinada velocidad.

III.3.1.1. Condiciones que definen la capacidad

La capacidad máxima del tramo de una carretera se consigue cuando las condiciones básicas de circulación son óptimas, y estas condiciones son: buen clima, buena visibilidad, y la inexistencia de incidentes que obstruyan la circulación.

En los procedimientos de análisis descritos en el HCM 2000, estas condiciones se supone que existen. Si alguna de estas condiciones no existe, la velocidad, los niveles de servicio y la capacidad del segmento de la vía tienden a reducirse.

La relación entre la velocidad, la intensidad y la densidad en un segmento básico de carretera depende del flujo de tráfico existente y de las condiciones de la carretera.

El conjunto de condiciones básicas de un tramo de carretera, sobre el cual se supone que la capacidad de la vía es máxima son los siguientes:

- Ancho mínimo de los carriles = 3,6 metros.
- Bermas de 1,8 metros entre el borde de la calzada exterior y los obstáculos u objetos adyacentes a la vía.
- Distancia mínima entre la mediana y el carril = 0,6 metros.
- Flujo constituido únicamente por vehículos ligeros, ausencia de vehículos pesados.
- Cinco o más carriles en una dirección
- Distancia entre entradas o salidas igual o mayor a 3 kilómetros.
- Terreno con un desnivel no mayor del 2%.
- Conductor recurrente, con conocimiento de la vía.

Estado del Arte

Existen ciertas limitaciones y se considera que la metodología no es válida en los siguientes casos:

- Carriles especiales reservados, como carriles para vehículos de alta ocupación (VAO), carriles destinados a camiones, o carriles con una pendiente elevada.
- Tramos en el interior de túneles o tramos largos de puentes.
- Tramos cercanos a las playas de peajes.
- Tramos con velocidades de flujo libre menores a 90 km/h o mayores de 120 km/h.
- Tramos influenciados por retenciones o colas ubicados aguas abajo.
- Zonas con condiciones de demanda por encima de la capacidad.
- Tramos con control policial, radares, o con presencia de sistemas ITS de guiado de vehículos.
- Accesos a vías con sistemas de control de accesos de "ramp-metering".

En la mayoría de los análisis las condiciones existentes difieren de las condiciones ideales, por lo cual se deben incluir correcciones que reflejen la inexistencia de las condiciones ideales.

III.3.2. Nivel de servicio

Para definir el nivel de servicio en cualquier tipo de infraestructura de carreteras es de obligada referencia el HCM 2000.

El nivel de servicio es una medida cualitativa que describe las condiciones de funcionamiento de la circulación viaria, y su percepción por los conductores y/o pasajeros. La definición de un nivel de servicio describe generalmente estas condiciones en relación con variables tales como velocidad, tiempo de recorrido, libertad de maniobra, interrupciones de la circulación, comodidad y seguridad vial. En definitiva representa el grado de libertad de maniobra que el usuario posee cuando circula por la vía; es la variable que define el estado de tráfico de la vía.

En la práctica, el HCM 2000 define los niveles de servicio mediante uno o dos factores que puedan medirse y que son los más representativos del estado de la circulación para el tipo de elemento de carretera que se estudie. Para cada tipo de infraestructura se definen estimadores principales del nivel de servicio. En el caso de flujo continuo son:

- velocidad de recorrido y
- comodidad

III.3.2.1. Definición de niveles de servicio

El Manual de Capacidad clasifica el nivel de servicio en 6 niveles: A, B, C, D, E y F; de acuerdo a las condiciones en que se desarrolla la circulación en tramos de flujo continuo (Chapter 13 del HCM2000 Basic Freeway Segments), cuyas definiciones cualitativas son las siguientes:

- Nivel de Servicio A

Describe la circulación en flujo libre. La velocidad de los vehículos es prácticamente igual a la que eligen libremente sus conductores, sin que se vean obligados a modificarla a causa de otros vehículos. Los efectos de los incidentes o averías en un punto se absorben fácilmente a este nivel.

- Nivel de Servicio B

Representa razonablemente flujo libre y las velocidades de flujo libre se mantienen. La capacidad de maniobra dentro del flujo de tráfico es sólo un poco restringida, y el nivel general de bienestar físico y psicológico proporcionado a los conductores sigue siendo alta. Los efectos de incidentes menores y averías puntuales son todavía de fácil absorción.

- Nivel de servicio C

Describe la situación de circulación con velocidades cercanas a la velocidad en flujo libre de la autopista. La libertad de maniobra dentro de la corriente de tráfico es notablemente más restringida, y los cambios de carril requieren más atención y vigilancia por parte del conductor. Incidentes menores aún pueden ser absorbidos, pero se observa un importante

Estado del Arte

empeoramiento local de servicio. Se forman grupos de vehículos que van a la misma velocidad dando lugar a colas.

- Nivel de servicio D

Es el nivel en el que las velocidades comienzan a disminuir ligeramente con el aumento de los flujos y la densidad comienza a aumentar un poco más rápido. La libertad de maniobra dentro del flujo de tráfico es notablemente más limitada, y el conductor aprecia una reducción en los niveles de bienestar físico y psicológico. Incluso los incidentes de menor importancia pueden crear colas, debido a que el flujo de tráfico tiene poco espacio para absorber las perturbaciones.

- Nivel de Servicio E

Describe el funcionamiento al límite de capacidad. Las operaciones en este nivel son volátiles, ya que prácticamente no hay espacios libres en el flujo de tráfico. Los vehículos están muy próximos entre sí y queda poco espacio para maniobrar y se circula a velocidades superiores a 80 km / h. Cualquier interrupción del flujo de tráfico, tales como los vehículos que entran por un acceso (rampa) o un vehículo que cambie de carril, puede establecer una onda de perturbación que se propaga hacia aguas arriba. En capacidad, ante cualquier incidente mínimo, pueden generarse largas colas. La posibilidad de maniobra dentro de la corriente de tráfico es extremadamente limitada, y el nivel de bienestar físico y psicológico que ofrece el conductor es pobre.

- Nivel de Servicio F

Describe interrupciones en el flujo vehicular. Estas condiciones en general, existen cuando se está dentro de la formación de colas después de haber alcanzado la situación de congestión. También se utiliza para describir las condiciones en el momento de la ruptura o el cuello de botella y el flujo de descarga de cola que se produce a velocidades inferiores a la velocidad más baja alcanzada en el nivel de servicio E, así como las operaciones dentro de la cola que se forma aguas arriba. Siempre que se den las condiciones de nivel de servicio F, tienen el potencial de propagarse aguas arriba de grandes distancias.

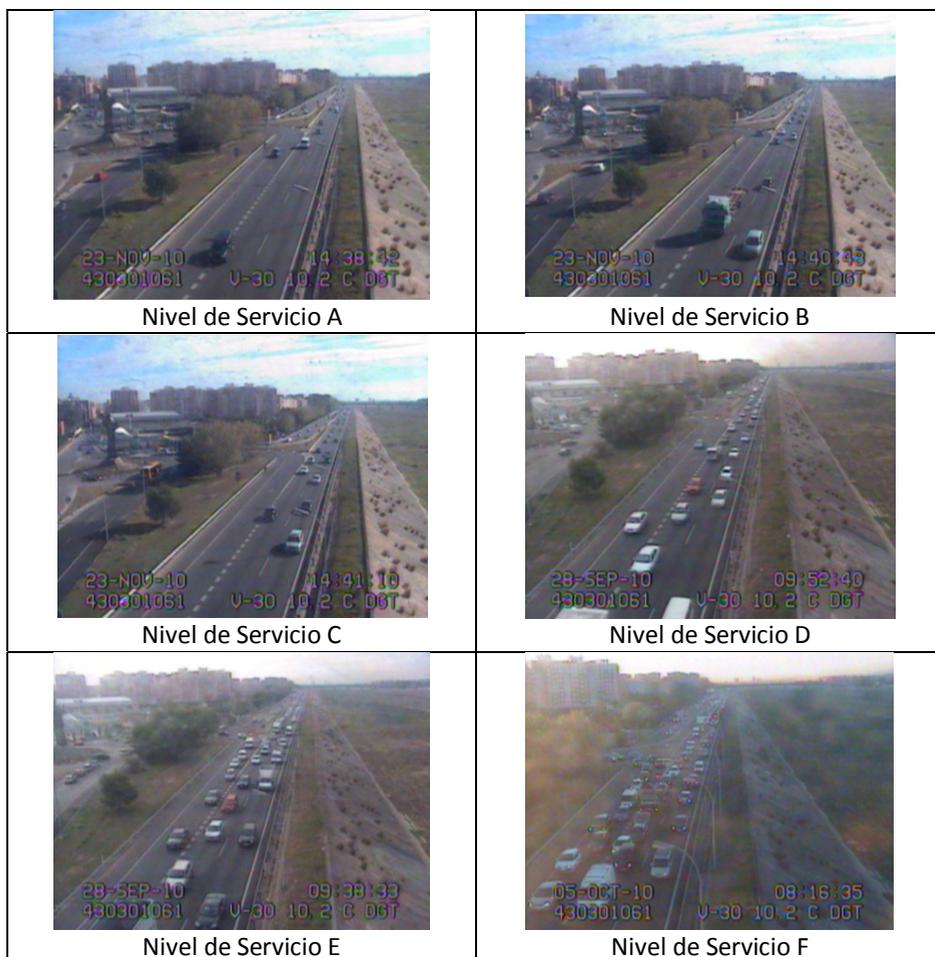


Figura 1: Detalle de los diferentes niveles de servicio en la autopista V-30.

III.3.3. Metodología analítico-teórica de obtención del nivel de servicio

La metodología de obtención del nivel de servicio que se describe en este apartado, se aplica a tramos de flujo continuo. Las variables de tráfico características de flujo continuo consideradas en el Manual de Capacidad son las siguientes:

- Volumen de tráfico por unidad de tiempo, Intensidad (veh/h).

Estado del Arte

- Velocidad (Km/h).
- Densidad (veh./Km).
- Espaciamiento (m) e intervalo entre vehículos (s).

Los tramos básicos corresponden a tramos de una calzada que no están afectados por los movimientos de confluencia o bifurcación o tramos de trenzado, debidos a enlaces próximos en autopistas o autovías, o a intersecciones a nivel de accesos en otras vías con calzadas separadas.

La variable fundamental de tráfico que define el nivel de servicio es la densidad de tráfico, medida en vehículos equivalentes a coches por kilómetro y carril. A continuación se expone la metodología analítica para determinar el valor de densidad.

Para determinar el nivel de servicio se considera la intensidad de tráfico en la calzada que se estudie durante un periodo punta de 15 minutos. Como normalmente se conoce la intensidad media durante una hora I , hay que aplicarle el factor de hora punta para obtener la intensidad en los 15 minutos de punta, en vehículos hora.

La primera variable que se mide es la velocidad libre VL en la vía. En el capítulo 23.4 del HCM 2000 se define como la velocidad media de los coches cuando el tráfico es ligero (inferior a 1.300 v/h/carril), en caso que no se dispusieran los datos de campo, las medidas se establecerían en gabinete; esto se haría para intentar, con datos en tiempo real, establecer un patrón de referencia del cálculo del nivel de servicio con pesados. Esta velocidad libre puede estimarse a partir de la **velocidad libre básica VLB** , que sería la velocidad libre en una vía en condiciones ideales. A esta velocidad básica se le aplican correcciones, para tener en cuenta las características reales de la vía.

Como velocidad libre básica puede tomarse la velocidad de proyecto de la vía o la velocidad máxima legal si fuera menor que la de proyecto.

$$VL = VLB - f_a - f_o - f_n - f_e$$

Ecuación 15: Velocidad Libre básica. HCM 2000.

donde:

- VL : velocidad libre real (Km/h).
- VLB : velocidad libre básica (Km/h).
- f_a : factor de corrección: anchura de carril.

EXHIBIT 23-4. ADJUSTMENTS FOR LANE WIDTH

Lane Width (m)	Reduction in Free-Flow Speed, f_{LW} (km/h)
3.6	0.0
3.5	1.0
3.4	2.1
3.3	3.1
3.2	5.6
3.1	8.1
3.0	10.6

Tabla 6: Ajustes por ancho de carril. HCM 2000.

- f_o : factor de corrección: obstáculos laterales.

EXHIBIT 23-5. ADJUSTMENTS FOR RIGHT-SHOULDER LATERAL CLEARANCE

Right-Shoulder Lateral Clearance (m)	Reduction in Free-Flow Speed, f_{LC} (km/h)			
	Lanes in One Direction			
	2	3	4	≥ 5
≥ 1.8	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	1.0	0.7	0.3	0.2
1.2	1.9	1.3	0.7	0.4
0.9	2.9	1.9	1.0	0.6
0.6	3.9	2.6	1.3	0.8
0.3	4.8	3.2	1.6	1.1
0.0	5.8	3.9	1.9	1.3

Tabla 7: Ajustes por visibilidad de los obstáculos laterales. HCM 2000.

- f_n : factor de corrección: por número de carriles.

EXHIBIT 23-6. ADJUSTMENTS FOR NUMBER OF LANES

Number of Lanes (One Direction)	Reduction in Free-Flow Speed, f_N (km/h)
≥ 5	0.0
4	2.4
3	4.8
2	7.3

Note: For all rural freeway segments, f_N is 0.0.

Tabla 8: Ajustes por número de carriles. HCM 2000.

- f_e : factor de corrección: separación entre enlaces.

EXHIBIT 23-7. ADJUSTMENTS FOR INTERCHANGE DENSITY

Interchanges per Kilometer	Reduction in Free-Flow Speed, f_D (km/h)
≤ 0.3	0.0
0.4	1.1
0.5	2.1
0.6	3.9
0.7	5.0
0.8	6.0
0.9	8.1
1.0	9.2
1.1	10.2
1.2	12.1

Tabla 9: Ajustes por separación entre enlaces. HCM 2000.

Cuando el tráfico no está formado exclusivamente por coches es necesario obtener la intensidad de un tráfico equivalente que estuviera formado únicamente por coches. Para ello se aplican unos factores de equivalencia que sirven para determinar a cuántos coches equivale cada vehículo de otro tipo. Estos factores de equivalencia dependen del tipo de vehículo (camiones, autobuses, vehículos de recreo, etc.) y de las características del trazado que a su vez dependen del tipo de terreno atravesado (terreno llano, ondulado ó accidentado). Si se conoce la composición del tráfico (porcentajes de vehículos pesados y de recreo) y los correspondientes factores de equivalencia, la intensidad en vehículos equivalentes viene dado por la siguiente expresión:

$$I_{eq} = \frac{I}{FHPN \cdot f_{VP} \cdot f_P}$$

Ecuación 16: Ecuación de la Intensidad Equivalente. HCM 2000.

donde:

- I_{eq} : Intensidad equivalente (veh/h).
- I : Intensidad (veh/h).
- f_P : Factor de calidad de la conducción, en general se adopta el valor de 1.
- FHP : factor de hora punta. El intervalo del factor de hora punta en autopistas y autovías está entre 0,80 y 0,95.

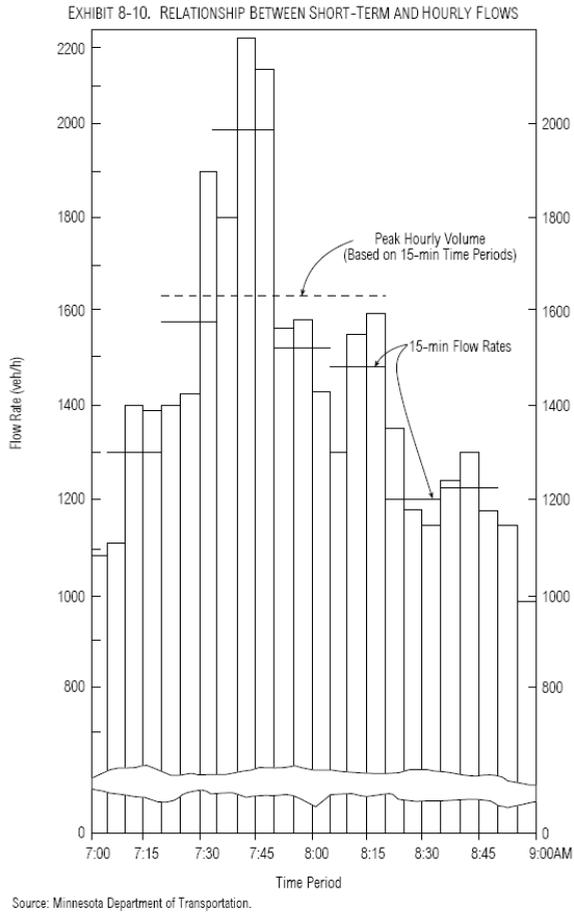
$$FHP = \frac{I_{60}}{4 * I_{max15}} < 1$$

Ecuación 17: Cálculo del factor de hora punta. HCM 2000.

Siendo:

- I_{60} : Intensidad en la hora más cargada.
- I_{max15} : Intensidad del cuarto de hora más alto de la hora.

Estado del Arte



Gráfica 5. HCM 2000.

- N : número de carriles del tramo.
- f_{vp} : factor de vehículos pesados.

$$f_{VP} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

Ecuación 18: Cálculo del factor de vehículos pesados. HCM 2000.

donde:

- P_T : Porcentaje total camiones y autobuses (%).
- P_R : Porcentaje total vehículos de recreo (%).
- E_T : Factor equivalente de camiones y autobuses, dependiente de tipo de terreno y pendiente o rampa.

EXHIBIT 23-8. PASSENGER-CAR EQUIVALENTS ON EXTENDED FREEWAY SEGMENTS

Factor	Type of Terrain		
	Level	Rolling	Mountainous
E_T (trucks and buses)	1.5	2.5	4.5
E_R (RVs)	1.2	2.0	4.0

Tabla 10: Equivalentes en vehículos ligeros para tramos normales. HCM 2000.

EXHIBIT 23-9. PASSENGER-CAR EQUIVALENTS FOR TRUCKS AND BUSES ON UPGRADES

Upgrade (%)	Length (km)	E_T								
		Percentage of Trucks and Buses								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
< 2	All	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
≥ 2-3	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.8-1.2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 1.2-1.6	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 1.6-2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 2.4	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
> 3-4	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	> 0.8-1.2	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 1.2-1.6	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 1.6-2.4	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
	> 2.4	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
> 4-5	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 0.8-1.2	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	> 1.2-1.6	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	> 1.6	5.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0
	> 1.6	5.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0
> 5-6	0.0-0.4	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.5	4.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 0.5-0.8	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	> 0.8-1.2	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	> 1.2-1.6	5.5	5.0	4.5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	> 1.6	6.0	5.0	5.0	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
> 6	0.0-0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 0.4-0.5	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	> 0.5-0.8	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	> 0.8-1.2	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0
	> 1.2-1.6	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5
	> 1.6	7.0	6.0	5.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0

Tabla 11: Equivalentes en vehículos ligeros en rampas (camiones y autobuses). HCM 2000.

EXHIBIT 23-11. PASSENGER-CAR EQUIVALENTS FOR TRUCKS AND BUSES ON DOWNGRADES

Downgrade (%)	Length (km)	E_T			
		Percentage of Trucks			
		5	10	15	20
< 4	All	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	> 6.4	2.0	2.0	2.0	1.5
> 5-6	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
> 5-6	> 6.4	5.5	4.0	4.0	3.0
> 6	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
> 6	> 6.4	7.5	6.0	5.5	4.5

Tabla 12: Equivalentes en vehículos ligeros en pendientes (camiones y autobuses). HCM 2000.

- E_R : Factor equivalente de vehículos de recreo, dependiente de tipo de terreno y pendiente o rampa.

EXHIBIT 23-8. PASSENGER-CAR EQUIVALENTS ON EXTENDED FREEWAY SEGMENTS

Factor	Type of Terrain		
	Level	Rolling	Mountainous
E_T (trucks and buses)	1.5	2.5	4.5
E_R (RVs)	1.2	2.0	4.0

Tabla 13: Equivalentes en vehículos ligeros para tramos normales. HCM 2000.

EXHIBIT 23-10. PASSENGER-CAR EQUIVALENTS FOR RVs ON UPGRADES

Upgrade (%)	Length (km)	E_R								
		Percentage of RVs								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
≤ 2	All	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
> 2-3	0.0-0.8	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	> 0.8	3.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2
> 3-4	0.0-0.4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	> 0.4-0.8	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	> 0.8	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5
> 4-5	0.0-0.4	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	4.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 0.8	4.5	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0
> 5	0.0-0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5
	> 0.4-0.8	6.0	4.0	4.0	3.5	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0
	> 0.8	6.0	4.5	4.0	4.5	3.5	3.0	3.0	2.5	2.0

Tabla 14: Equivalentes en vehículos ligeros en rampas (vehículos de recreo). HCM 2000.

Estado del Arte

La **capacidad** por carril de una calzada tipo autovías y autopistas, expresada en coches/hora/carril viene dada por la siguiente expresión:

$$C = 1800 + 5VL$$

Ecuación 19: Capacidad de un carril. HCM 2000.

donde:

- C : capacidad (coches/hora/carril).
- VL : velocidad libre (Km/h).

La **densidad en capacidad** D_c (coches/Km/carril) para el caso de las autovías y autopistas es:

$$D_c = 28$$

Ecuación 20: Densidad en capacidad. HCM 2000.

La **velocidad de los coches en capacidad** (Km/h) viene dada por la siguiente expresión:

$$V_c = \frac{C}{D_c}$$

Ecuación 21: Velocidad de los coches en capacidad. HCM 2000.

donde:

- C : capacidad (coches/hora/carril).
- V_c : velocidad en capacidad (Km/h).

La velocidad es constante e igual a la velocidad libre $V = VL$ mientras la intensidad I_{eq} no sobrepase un valor límite IL . La expresión de la **intensidad límite** para autovías y autopistas es la siguiente:

$$IL = 3100 - 15VL$$

Ecuación 22: Intensidad límite. HCM 2000.

Para intensidades mayores la velocidad se irá reduciendo hasta hacerse igual a la velocidad en capacidad cuando la intensidad alcance la capacidad. Las expresiones que permiten calcular la velocidad en función de la intensidad son:

- Si $I_{eq} \leq IL$

$$V = VL$$

Ecuación 23: Cálculo de la velocidad en función de la intensidad, si $I_{eq} < IL$. HCM 2000.

- Si $I_{eq} > IL$

$$V = VL - (VL - V_C) \left(\frac{I_{eq} - IL}{C - IL} \right)^{2,6}$$

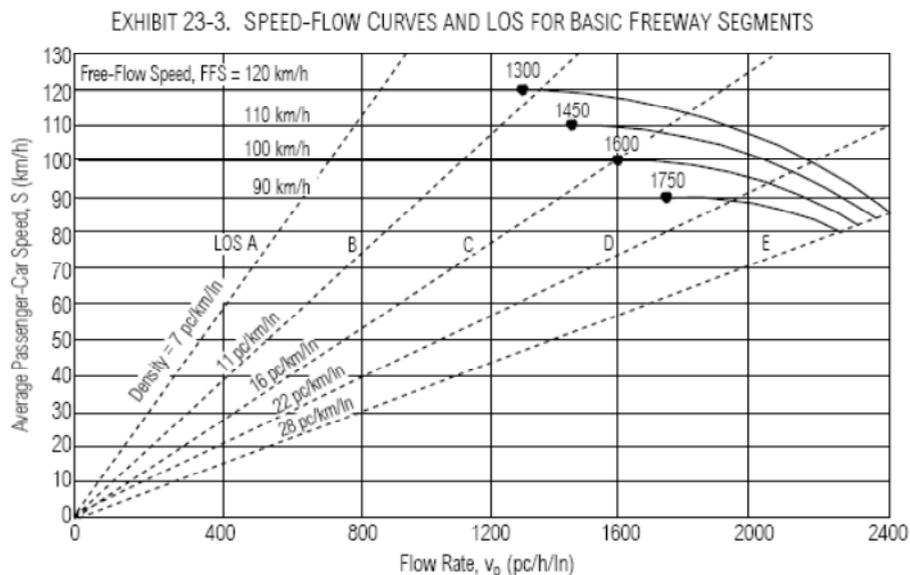
Ecuación 24: Cálculo de la velocidad en función de la intensidad si $I_{eq} > IL$. HCM 2000.

Conocidos ya la intensidad I_{eq} y la velocidad V , se obtiene el valor de la densidad D y con ello el Nivel de Servicio, de acuerdo a la siguiente ecuación y siguiente tabla:

$$D = \frac{I_{eq}}{V}$$

Ecuación 25: Cálculo de la densidad. HCM 2000.

Estado del Arte



Note:

Capacity varies by free-flow speed. Capacity is 2400, 2350, 2300, and 2250 pc/h/ln at free-flow speeds of 120, 110, 100, and 90 km/h, respectively.

For $90 \leq \text{FFS} \leq 120$ and for flow rate (v_p)
 $(3100 - 15\text{FFS}) < v_p \leq (1800 + 5\text{FFS})$,

$$S = \text{FFS} - \left[\frac{1}{28} (23\text{FFS} - 1800) \left(\frac{v_p + 15\text{FFS} - 3100}{20\text{FFS} - 1300} \right)^{2.6} \right]$$

For $90 \leq \text{FFS} \leq 120$ and
 $v_p \leq (3100 - 15\text{FFS})$,
 $S = \text{FFS}$

Gráfica 6: Curvas y umbrales para el cálculo del nivel de servicio. HCM 2000.

EXHIBIT 23-2. LOS CRITERIA FOR BASIC FREEWAY SEGMENTS

Criteria	LOS				
	A	B	C	D	E
FFS = 120 km/h					
Maximum density (pc/km/ln)	7	11	16	22	28
Minimum speed (km/h)	120.0	120.0	114.6	99.6	85.7
Maximum v/c	0.35	0.55	0.77	0.92	1.00
Maximum service flow rate (pc/h/ln)	840	1320	1840	2200	2400
FFS = 110 km/h					
Maximum density (pc/km/ln)	7	11	16	22	28
Minimum speed (km/h)	110.0	110.0	108.5	97.2	83.9
Maximum v/c	0.33	0.51	0.74	0.91	1.00
Maximum service flow rate (pc/h/ln)	770	1210	1740	2135	2350
FFS = 100 km/h					
Maximum density (pc/km/ln)	7	11	16	22	28
Minimum speed (km/h)	100.0	100.0	100.0	93.8	82.1
Maximum v/c	0.30	0.48	0.70	0.90	1.00
Maximum service flow rate (pc/h/ln)	700	1100	1600	2065	2300
FFS = 90 km/h					
Maximum density (pc/km/ln)	7	11	16	22	28
Minimum speed (km/h)	90.0	90.0	90.0	89.1	80.4
Maximum v/c	0.28	0.44	0.64	0.87	1.00
Maximum service flow rate (pc/h/ln)	630	990	1440	1955	2250

Note:

The exact mathematical relationship between density and v/c has not always been maintained at LOS boundaries because of the use of rounded values. Density is the primary determinant of LOS. The speed criterion is the speed at maximum density for a given LOS.

Tabla 15: Niveles de servicio en autopistas, autovías y carreteras con calzadas separadas, HCM 2000.

Nivel de Servicio	Densidad (pc/km/ln)
A	0-7
B	> 7-11
C	> 11-16
D	> 16-22
E	> 22-28
F	> 28

Tabla 16: Resumen de los umbrales de Densidad (vehículo-equivalente/kilómetro/carril) para la obtención del nivel de servicio. HCM 2000.

III.4. Modelos estadísticos para el análisis del tráfico.

Según Pardo C.E. y Del Campo, P.C. (2007) un modelo estadístico es una ecuación matemática que reproduce los fenómenos observados de la forma más exacta posible. Para ello tiene en cuenta los datos suministrados y la influencia que el azar tiene en las observaciones. Existen diferentes modelos estadísticos para el análisis de datos. Cada uno de estos modelos es adecuado para diferentes casos en función de la utilidad que se quiera hacer de los datos dependiendo de las características del problema a analizar.

Con el avance de las TIC, cada vez más, existe un mayor número de datos a procesar. Everitt, B.S. (1995) descubrió que el problema de la clasificación de datos es uno de los primeros problemas que aparecen en la actividad científica. Uno de los aspectos que se tratan en esta tesis es agrupar un gran volumen de datos en diferentes grupos, esto es, realizar una clasificación de este conjunto de datos, que ayuden a validar las hipótesis establecidas en el punto V.1.

En el marco de la presente tesis los datos son pares de elementos asociados a velocidad y ocupación. Cuando hablamos de clasificar un par de coordenadas como estas, (X,Y) en un grupo determinado, a partir de los valores de una serie de parámetros medidos, y además, esa clasificación tiene un cierto grado de incertidumbre, resulta razonable pensar en la utilización de una metodología estadística.

Desde el punto de vista estadístico es posible distinguir dos enfoques diferentes al problema de la clasificación. En el primer enfoque los grupos están bien definidos y se trata de determinar un criterio para etiquetar cada elemento, en nuestro caso pares (X,Y) , como pertenecientes a alguno de los grupos, a partir de los valores de una serie limitada de parámetros. En este caso las técnicas más utilizadas son básicamente técnicas de análisis discriminante, aunque existen otras posibles alternativas, tales como la utilización de la regresión logística, según Baíllo, A. y Grané, A. (2008).

El segundo enfoque no se conoce a priori los grupos en los que se quiere clasificar los elementos y lo que precisamente se desea es establecer los grupos a partir de los datos existentes. Las técnicas estadísticas más utilizadas, según Olsen, S.F.,

Martuzzi, M., Elliot, P. (1996) así como las vistas en "Tratamiento de Datos" en esta área se basan en el análisis de "clusters", que podemos traducir como análisis de agrupaciones y también como análisis de conglomerados. Los métodos de clasificación se pueden dividir en jerárquicos y no jerárquicos. En los no jerárquicos el número de clases se establece previamente y el algoritmo de clasificación asigna los individuos a las clases, partiendo de algunos valores iniciales y buscando optimizar algún criterio establecido de antemano. En la clasificación jerárquica se construye un "árbol" o "dendrograma", (del griego dendron = árbol), cuyas ramas terminales representan a cada uno de los individuos y el tronco es la clase conformada por todos los individuos. Tal y como comentó Martín F. (1995), para obtener alguna clasificación particular se hace "un corte" en el árbol.

Como método no jerárquico se tiene el análisis de conglomerados, que es una técnica multivariante¹ que permite agrupar los casos o variables de un conjunto de datos en función del parecido o similitud existente entre ellos, que ya vieron Pardo, C.E., y Del Campo, P.C. (2007). Esto es, divide un conjunto de datos en grupos o conglomerados (clusters) de forma que los perfiles de los elementos en un mismo grupo sean muy similares entre sí, dando una gran cohesión interna al grupo. Además, los objetos de un grupo o conglomerado son distintos a los objetos de otro conglomerado, propiedad que se conoce como aislamiento externo del grupo.

Este análisis ofrece diversas ventajas respecto a las otras técnicas estadísticas como el análisis discriminante o la regresión logística del primer enfoque:

- El análisis es similar a un análisis factorial, pero es menos restrictivo en sus supuestos al no exigir linealidad ni simetría en los datos.
- Permite la utilización de variables categóricas, como puede ser el nivel de servicio.
- Permite determinar el número óptimo de grupos y su composición basándose en la similitud existente entre los casos, no asumiendo ninguna distribución específica para las variables mientras que el análisis de

¹ El análisis multivariante es un método estadístico utilizado para determinar la contribución de varios factores en un evento o resultado.

Estado del Arte

discriminante efectúa la clasificación tomando como referencia un criterio o variable dependiente.

Dentro del análisis de conglomerados se pueden emplear diversos procedimientos para su tratamiento, como comenta Everitt, B.S. (1995):

- Análisis de conglomerados jerárquico. Este método determina el número óptimo de conglomerados existente en los datos pero no puede tratar con un gran volumen de datos.
- Análisis de conglomerados de K medias. Este método permite determinar el número de conglomerados basándose en las distancias existentes entre ellos y además, permite procesar un número ilimitado de casos.

Ambos métodos de análisis son de tipo aglomerado, en el sentido que parten del análisis de casos individuales e intentan agrupar casos hasta llegar a la formación de grupos o conglomerados homogéneos.

El análisis de conglomerados mediante K medias se puede emplear como técnica exploratoria, clasificando los casos e iterando para encontrar la ubicación de los centroides y posteriormente como técnica de clasificación, clasificando los casos a partir de los centroides obtenidos en el primer paso.

El análisis de conglomerados mediante K medias se ha utilizado en diferentes estudios como:

- Grané, A. y Veiga, H. (2009) lo emplean para la estimación de los requisitos para minimizar el capital-riesgo en inversiones de seguros y gestión de riesgos.
- Allende, H. y Galbiati, J. (2004) lo emplean como filtro no paramétrico para la recuperación de imágenes digitales.
- Díaz, E et al. (2001) analizan la influencia de las desigualdades sociales, la conflictividad social y la pobreza extrema sobre la morbilidad por tuberculosis.

- Borracci, R.A. y Arribalzaga, E.B. (2005) aplican análisis de conglomerados y redes neuronales artificiales para la clasificación y selección de candidatos a residencias médicas.
- Olsen, S.F., Martuzzi, M., Elliot, P. (1996) realizan un análisis de enfermedades, generando una estructura de causas, instantes de aparición y posibles grupos sociales afectados.

Las características de este modelo de análisis estadístico comentadas anteriormente, y los resultados de los estudios analizados han determinado que este tipo de análisis haya sido el utilizado para el modelado estadístico de los datos de esta tesis.

III.5. Revisión de estudios sobre calidad de datos de las espiras electromagnéticas

Los equipos de toma de datos basados en espiras electromagnéticas son uno de los sensores más utilizados en todo el mundo para la monitorización del tráfico. Sin embargo, la utilización de este tipo de sensores ha generado un debate, desde su implantación, sobre la calidad de la información que proporcionan.

Granato (1998) y Aunet (2000) presentan dos estudios con datos de tráfico. Para los estudios, utilizan un conjunto de técnicas estadísticas como el coeficiente de variación, análisis de conglomerados, gráficas de factores de tráfico mensuales y mapeo de estaciones de toma de datos sobre las gráficas. A partir de estas técnicas, obtienen un conjunto de factores y variaciones que aplican a los datos de tráfico para obtener unos datos de intensidades medias Diarias (IMDs) fiables. Ambos procesos no son extrapolables para al tratamiento de los datos del experimento de esta tesis, ya que se aplican a datos históricos para la modificación de IMDs con información errónea, y no para datos en tiempo presente como los que se utilizan en esta tesis.

En Lu, Xiao-Yun, Varaiya, Pravin, Horowitz, Roberto and Palen (2008) se presenta un análisis de los diferentes métodos utilizados para la detección y corrección de datos proporcionados por las espiras con fallos. En este estudio se analizan los diferentes

Estado del Arte

niveles en los que se pueden producir los errores. Identifica errores: a) a nivel de agregación de datos, b) a nivel de espira o estación de toma de datos, c) a nivel de centro de control y d) a nivel de datos históricos frente a datos en tiempo presente. En el estudio recomienda una aproximación para la detección en función del nivel de error. Las recomendaciones se centran en realizar análisis macroscópicos, microscópicos o mesoscópicos en función del nivel de error.

Wall, Z R, Dailey (2003) definen un algoritmo para la detección y corrección de errores en datos de tráfico almacenados. Este estudio se fundamenta en la realización de un análisis de datos off line para determinar si una estación de toma de datos funciona correctamente o no. El estudio parte de una estación de toma de datos correcta, y utiliza la información proporcionada por la misma para analizar las estaciones adyacentes. El parámetro utilizado es el flujo de vehículos. El algoritmo, a partir del flujo de vehículos de la estación de toma de datos correcta, correlaciona los datos de la estación adyacente y analiza las variaciones. Si no aparece una variación significativa, le estación adyacente aparece como validada y se procede a realizar el análisis con la siguiente estación. Este algoritmo es adecuado para determinar la calidad de la información recogida por los equipos de toma de datos cuando se tiene un gran volumen de datos. Sin embargo, este algoritmo no se utiliza para la identificación de errores en tiempo presente, objeto de esta tesis.

Coifman (2001) y Zhanfeng, J., C. Chao, B. Coifman, and P. Varaiya (2001) presentan varios algoritmos para estimar la calidad de los datos proporcionados por las espiras. Ambos trabajos se centran en la información que proporciona una espira simple para determinar la calidad de la información que proporciona. En Coifman (2001) se presenta un algoritmo que permite estimar la velocidad media a partir de la ocupación y la longitud de los vehículos que circulan por ella. En Zhanfeng, J., C. Chao, B. Coifman, and P. Varaiya (2001) se extiende y mejora el algoritmo para la determinación de la velocidad con una calidad adecuada y utilizando una única espira. Ambos estudios se centran en estimar, con la mayor precisión, la longitud efectiva de los vehículos. A partir de esta longitud, y del flujo y la ocupación determinan la velocidad de los vehículos. Sin embargo, los estudios se centran en obtener un dato de velocidad con una buena calidad, partiendo del resto de parámetros proporcionados por la espira, pero partiendo de la base que estos parámetros tienen son correctos. Por lo tanto, este estudio tampoco es adecuado para la reducción de datos objeto de esta tesis, ya que no sólo no se comprueba la calidad de todos los datos, sino porque también se basa en datos proporcionados

por espiras simples, mientras que los datos obtenidos para el experimento de esta tesis son proporcionados por espiras dobles.

Zhang, X, Nihan, N L, Wang, Y (2005) se presenta un estudio para el análisis de los datos proporcionados por espiras dobles. El estudio se centra en el potencial de las espiras dobles para obtener datos de calidad. Sin embargo, el algoritmo presentado en el estudio se centra en el análisis de la información para vehículos pesados y en situaciones de flujo libre. Así pues, este algoritmo tampoco puede aplicarse en el experimento propuesta, ya que en el experimento, no sólo se trabaja con todo tipo de vehículos, sino que también existen situaciones de congestión.

En May A.D, Coifman B, Caiford, R, Merritt, G (2004) se presenta el estudio para mantener, mejorar y fomentar la investigación sobre los sistemas de detección de datos de tráfico de Berkeley Highway Lab. En el estudio se presentan un esquema basado en nueve diagnósticos dinámicos para determinar la calidad y validez de los datos de tráfico. Los diagnósticos se basan en analizar el flujo de la información proveniente de la espira. Si no existe variación de los datos durante un periodo de tiempo determinado implica que la espira no funciona correctamente. Este estudio ha servido de base para definir alguno de los filtros presentados en la reducción de datos de esta tesis. Sin embargo, los periodos de integración utilizados han sido menores, ya que el experimento de esta tesis está enfocado a la gestión de tráfico en tiempo presente.

Los estudios analizados han servido para conocer el estado del arte en materia de calidad de datos de las espiras electromagnéticas. Sin embargo, estos estudios no son extrapolables a la presente tesis, a excepción de May A.D, Coifman B, Caiford, R, Merritt, G (2004) por las siguientes razones principales:

- Todos los estudios se centran en el análisis de la información de la espira a posteriori. No pueden ser utilizados para el análisis en tiempo presente.
- Los estudios se centran en la identificación de qué espiras están mal calibradas y producen un elevado porcentaje de datos erróneos. No obstante, no determinan qué datos de los enviados por las espiras identificadas como correctas son erróneos.
- Que los estudios hubieran tenido más aportación metodológica para disponer de datos totalmente depurados y validados para el análisis de

Estado del Arte

datos en tiempo presente. Estos estudios detectaban cuándo una espira estaba mal (rota) o daba información incorrecta de forma general, pero de las espiras que daban información buena, no identificaba qué datos podrían ser erróneos, ya que no analizaban la coherencia de los datos obtenidos, así como tampoco la relación entre las variables de tráfico.

III.6.Revisión de estudios actuales

III.6.1. Introducción

Según Domínguez, A. y Belda, E. (2009), el trazado de una carretera se define en relación directa con la velocidad a la que se desea que circulen los vehículos en condiciones de comodidad y seguridad aceptables. La máxima velocidad –velocidad específica de un elemento de trazado (V_e) – que puede mantenerse a lo largo de un elemento de trazado considerado aisladamente, en condiciones de seguridad y comodidad, se suele comparar con el percentil 85 de la distribución real de velocidades.

De igual forma, la evaluación del Nivel de Servicio (Level of Service – LOS) por parte de un usuario se ve influenciada por diversos factores así como la dependencia del usuario evaluador con la situación. De esta forma un conductor de automóvil tiene influencias por diversos factores tales como el pavimento, la señalización de la autovía, la información mostrada, el paraje por el que circula. Asimismo el nivel de servicio utilizado para la gestión del tráfico dista del nivel de servicio del conductor previo. Mientras que el primero está enfocado a mejorar el rendimiento de la circulación, el segundo es una percepción del usuario que se encuentra en una autovía, en un atasco o en retenciones. En el caso del gestor del tráfico, es muy importante la variación de la Densidad, de forma que permita medir la calidad de servicio, mientras que para el usuario final es más importante la variación de velocidad y la velocidad libre (FFS), aparte de otros factores nombrados anteriormente.

A continuación se expone la síntesis del conjunto de estudios que se han realizado sobre el cálculo del nivel de servicio, aproximaciones y métodos utilizados para determinar el nivel de servicio LOS.

III.6.2. Evaluación cronológica de estudios relevantes

En este apartado se presenta un resumen cronológico de estudios previos sobre el cálculo, implementación, desarrollo y estimación del nivel de servicio en diversas autovías y carreteras urbanas, según métodos estadísticos, aproximaciones y diversas implementaciones.

Estado del Arte

Serif, I. (2006) realiza una explotación de los datos obtenidos por el despliegue de equipamiento ITS de captura de información con el objeto de determinar el nivel de servicio. En particular se basa en procesamiento de imágenes, que no afecta a la síntesis del análisis ya que se traduce en otro sistema de obtención de datos, con distintas precisiones y capacidades. El objetivo del documento se fundamenta en la mejora del análisis de los datos para la obtención del Nivel de Servicio. El estudio examinó la suavidad, homogeneidad, regularidad, y aleatoriedad del tráfico mediante la construcción de mapas espacio-temporal. El estudio se llevó a cabo durante cinco días laborables en 3,4 millas de distancia.

El cálculo del nivel de servicio se aproximó al definido por el HCM 2000, pero al que se añadieron un juego de parámetros variables opcionales para los operadores del Centro de Control. El análisis se realiza en tiempo presente y se beneficia de la velocidad de transmisión de datos y de cómputo del cálculo de variables.

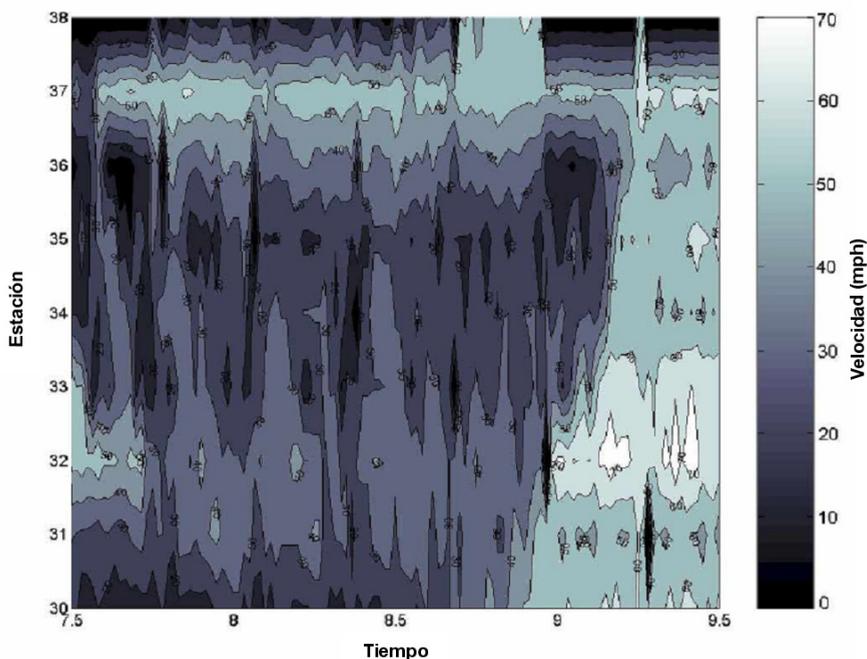
La base inicial del estudio parte de:

- Cómo extraer la información realmente útil sin redundancias
- Cómo utilizar el gran volumen restante de datos para entender el comportamiento estocástico de los datos y crear un sistema de decisiones robusto.

La metodología se basa en un conjunto de medidas aplicadas para extraer características de los mapas de contorno espacio temporales de forma análoga a como se extraen características de las imágenes procesadas utilizando patrones. El HCM 2000 utiliza también mapas de contorno espacio temporal con intensidades y densidades.

Mediante transformadas de Fourier de las imágenes obtenidas y el posterior análisis de los datos se pueden obtener medidas de entropía, energía e inercia. Estas medidas son características de cada punto de la curva espacio temporal.

Un ejemplo de estudio con el resultado de un mapa de contorno se muestra en la gráfica 7.

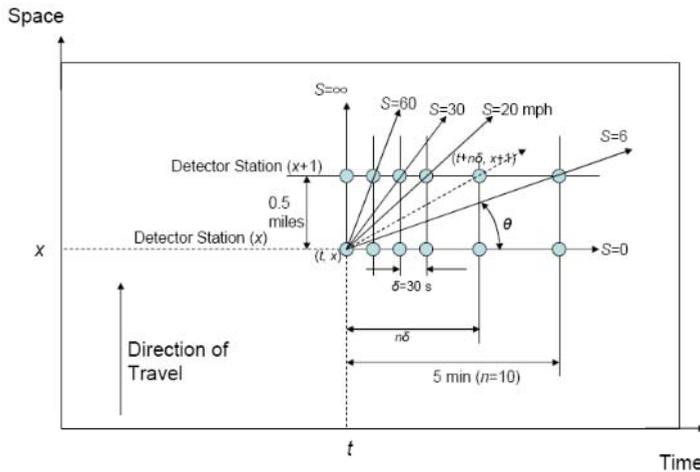


Gráfica 7: Ejemplo de mapa de contorno de velocidad tomado en la autovía del este, en horario diurno (7:30am a 9:30am) el 3-abril-2001 sobre la sección de medida de 4 millas, donde se representa en escala de colores la velocidad en los cuadrantes definidos por la evolución de las estaciones objeto del estudio a lo largo del tiempo. Serif, I. (2006).

La intensidad de cada pixel representado se basa en uno de los tres parámetros básicos (intensidad, velocidad y ocupación) observados en tiempo presente. El estudio marca una limitación de granularidad de las imágenes debido a la gran distancia de separación entre estaciones de conteo. De esta forma los límites de un embotellamiento son abarcados dentro los límites del mapa de contorno y las características medias reflejan el funcionamiento total del sistema para un gran dominio en el tiempo.

Mediante la caracterización de la textura de la imagen se pretende obtener una caracterización de la textura del tráfico para obtener propiedades de gran resolución en el comportamiento del tráfico que no se pueden obtener con medidas estadísticas de primer orden. Se realizan matrices de correlación entre los datos de las determinadas estaciones en tiempo y espacio de forma similar a la que se muestra en la gráfica 8:

Estado del Arte



Gráfica 8: Matriz de correlaciones de los datos en tiempo y espacio como medida de caracterización del comportamiento del tráfico a partir de los mapas de contorno. Serif, I. (2006).

Esta será la matriz base del estudio, a partir de la cual se generarán las transformadas que relacionen las características del tráfico. Se aplican las siguientes técnicas sobre cada imagen:

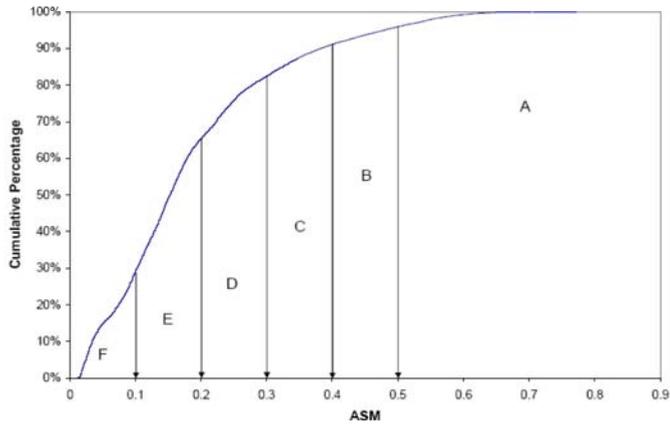
- Suavidad de imágenes (ASM)
- Contraste (CON)
- Homogeneidad de la imagen (IDF, contrario al Contraste)
- Entropía (ENT, medida del grado de desorden de un sistema)

El estudio contó con 14.270 mapas de contorno, cada uno construido en ventanas de 15 minutos en el segmento de 3,4 millas. Los mapas se generaron de observaciones tomadas de 5 periodos sucesivos de 24 horas.

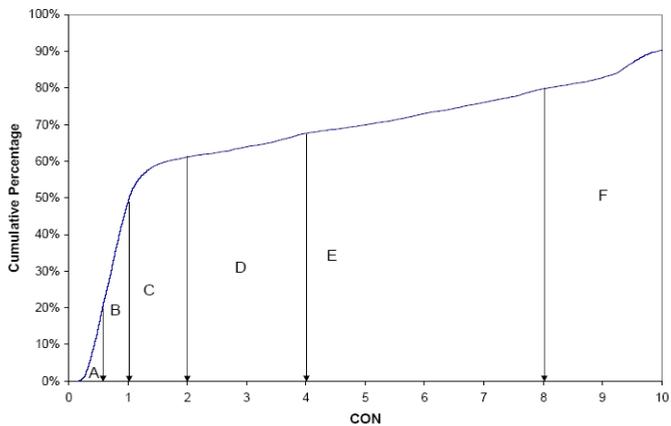
Mediante estudios de correlación de unos mapas sobre otros se realiza un filtrado de imágenes dejando fuera del estudio aquellas variables que no muestran unas fuertes correlaciones entre los diversos mapas. La media de la velocidad es la que presenta una mayor correlación y por tanto la escogida en el estudio para sacar relaciones entre los mapas.

Para establecer el cálculo de LOS, el estudio realiza una división de cada una de las variables suavidad, contraste y entropía por separado, citando la homología con la

división de la Densidad del HCM, ya que es un criterio propio la decisión del umbral de corte (ver gráficas 9, 10 y 11).

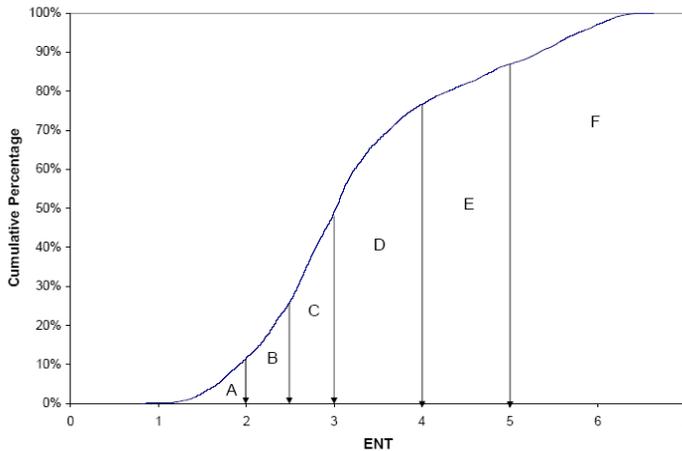


Gráfica 9: Nivel de servicio calculado según criterio suavidad de imágenes (ASM) de la velocidad. Serif, I. (2006).



Gráfica 10: Nivel de servicio calculado según criterio contraste de imágenes (CON) de la velocidad. Serif, I. (2006).

Estado del Arte



Gráfica 11: Nivel de servicio calculado según criterio entropía de imágenes (ENT) de la velocidad. Serif, I. (2006).

A pesar de que el estudio añade un nuevo conjunto de parámetros opcionales para mejorar la determinación del cálculo del nivel de servicio, el estudio sigue teniendo un conjunto de deficiencias:

- El valor del conjunto de parámetros es opcional, y depende de los operadores de cada centro de gestión. Esto supone que no se dispone de un modelo homogéneo para la determinación del nivel de servicio, por lo que el valor de un nivel de servicio está altamente ligado con el centro de gestión (y en su caso con el operador) más que con el estado del tráfico.
- Se sigue tomando como base el modelo del HCM 2000, y no se tiene en cuenta el estado en tiempo presente del tráfico. Por lo tanto sigue siendo un modelo estático, poco adecuado para la gestión del tráfico en tiempo presente.
- Siguen existiendo un elevado número de niveles de servicio. Los 6 niveles de servicio, propuesto por el HCM 2000, son adecuados para el dimensionamiento de una red viaria, pero no para la gestión del tráfico en tiempo presente, ya que entre algunos niveles no existen diferencias significativas (por ejemplo entre el nivel A y B).
- Sigue siendo poco operativo para la gestión dinámica en tiempo presente.

Tang, S. y Wang, F. (2006) estiman el cálculo del Nivel de Servicio basado en PCI (Process Capability Indices) fundamentado en el cálculo a partir de la velocidad y la densidad.

Definen los PCI como unos índices de proceso que determinan los límites de las especificaciones del buen funcionamiento. Su dimensionamiento se basa en la media y varianza y es similar al cálculo de redes neuronales.

Debido al cambio lento de las variables de tráfico, asume que dichos parámetros siguen una distribución normal por lo que pueden aplicarse el cálculo de PCI para evaluar la capacidad de un sistema de tráfico. Aplica las relaciones fundamentales del tráfico para determinar sus ecuaciones y la aplicación de los PCI a las mismas, denotando que para un valor de volumen existen dos posibles valores de velocidad que muestran dos condiciones de tráfico distintas, por lo que el volumen no es un dato significativo para utilizar en los PCI, no siendo así la velocidad, que determina siempre un único valor de Densidad y de Volumen.

Se tomaron datos de la autovía de servicio del proyecto Patrol UC Berkeley, en 16 estaciones detectoras y se realizaron los cálculos obteniéndose que:

- Los cálculos realizados a partir de velocidades y densidades son buenos frente a los cálculos utilizando intensidades, que daban malos resultados
- Dado que el nivel de servicio calculado es estadístico, para un mismo valor según el HCM se pueden dar varios niveles de servicio obtenidos por este cálculo.
- Se puede determinar si hay congestión o no, pero no se puede determinar si es debido a situaciones de tráfico o accidentes.

Este estudio, a pesar de ser un modelo que incluye el estado del tráfico en tiempo presente, determina el nivel de servicio de forma estadística, por lo que el valor del nivel de servicio será más real al estado del tráfico cuanto más información histórica tenga del sistema. Esta situación hace que el modelo presentado no sea adecuado para la gestión del tráfico en tiempo presente. Además, al igual que el modelo presentado por Serif, I. (2006) sigue incorporando todos los niveles de servicio del HCM 2000, que como ya se ha comentado anteriormente, se consideran poco adecuados para la gestión del tráfico en tiempo presente.

Estado del Arte

Ye, Z., Li-Min, J., Guo-Qiang, C. (2009) realizan el cálculo del Nivel de Servicio basándose en un cálculo microscópico que analiza el segmento de tráfico y en un cálculo macroscópico que estima el estado regional del tráfico.

En el estudio microscópico realiza un análisis del segmento alcanzando el nivel del detector. El estudio macroscópico supone la unión de segmentos entre sí, extendiendo el estudio microscópico. De esta forma obtiene un LOS a nivel regional dependiente de un LOS de segmento de tráfico mediante la evaluación de métodos multigrado.

Este estudio presenta una aproximación que determina el nivel de servicio de un tramo, en función del nivel de servicio de los segmentos que lo componen. Esta aproximación presenta un conjunto de desventajas:

- La determinación del nivel de servicio microscópico, a nivel de detector, se basa en el HCM 2000.
- El nivel de servicio calculado para tramos, depende de las características propias del tramo y de la topología del mismo. Así pues, la presencia de incorporaciones o trenzados debe analizarse para determinar el nivel de servicio.

Dong, H., Sun, X., Jiu, L., Qin, Y. (2009) establecen el cálculo del nivel de servicio por regiones que son similares al tráfico urbano, cotejando posteriormente que los cálculos son correctos mediante la percepción visual de estudiantes, profesores, gente estándar, conductores y gestores de tráfico.

El experimento realiza el cálculo de dos índices

- La relación entre la media y el valor total en cierta hora.
- La relación entre la capacidad de la red y la carga máxima en cierta hora determinada.

El estudio muestra el resultado obtenido de los datos de varios cruces importantes de Beijing, concluye que los valores mostrados del nivel de LOS concuerdan en un 66% de los casos, difieren en 1 nivel para el 29% de los casos y tan solo el 0,6 no está de acuerdo con el nivel de servicio. Por tanto, demuestra que la percepción entre los diferentes usuarios no dista demasiado entre un grupo de evaluadores de distinto conocimiento en materia de tráfico.

Dong , H. et al (2009) realizan un modelo de aproximación para calcular el nivel de servicio en base al cálculo de Máxima Entropía que realiza clasificaciones, entendiéndose como tal la separación en cada uno de los seis niveles de servicio que define el HCM 2000. Establece predicciones de futuro mediante la adición de prestaciones a la red. Las prestaciones se añaden con carácter temporal y espacial. Espacialmente se añaden nodos de tráfico, cruces, etc. mientras que las variaciones temporales suponen caracterizar situaciones de tráfico en determinados momentos.

El estudio parte de datos de un día en Beijing como entrenamiento de la red para posteriormente simular con el día siguiente. Las predicciones realizadas son de 5 y 10 minutos y deja como línea abierta de trabajo la predicción de periodos más largos de tiempo. Los resultados obtenidos fueron precisiones de un 80% con un 20% de error de un nivel de servicio para condiciones de tráfico normal, evitando los picos, en los cuales el error de más de un nivel ronda el 2% en picos diurnos.

En el Transportation Reseach Board (2000) en su *special report 209* se desarrolla un método predictivo de cambio de carril para tratar de conocer la velocidad media en las zonas de trenzado, ya que aseguran que el elemento más crítico en los procedimientos del HCM 2000 es la predicción de las velocidades medias en tales zonas. Estas velocidades se convierten en una densidad global que determinan el nivel de servicio. Se hizo un estudio en el cual se necesitó calibrar doce ecuaciones de forma que predijeran las velocidades de las zonas de trenzado. Para el estudio tomaron 157 periodos de 5 minutos y 52 periodos de 15 minutos de zonas distribuidas en California, Oregón, Ohio, Florida, Miami, Arizona, etc. Las conclusiones fueron un buen resultado obtenido en las simulaciones y la adición de un nuevo parámetro de “turbulencias” en la zona de trenzado, aunque no obstante no recomiendan el estudio para determinar el nivel de servicio, pero sí la capacidad de la sección.

Tanto en Dong, H. et al (2009), como en el Transportation Reseach Board (2009) *special report 209*, tienen en cuenta los niveles de servicio del HCM 2000. Por lo tanto se tratan de estudios para la determinación estática del nivel de servicio. En el Transportation Reseach Board (2000) en su *special report 209* se propone un método predictivo para determinar la velocidad media y la densidad de las áreas de trenzado. Sin embargo, este estudio se centra exclusivamente en áreas de trenzado y no extrapola las conclusiones para el resto de segmentos rectos sin

Estado del Arte

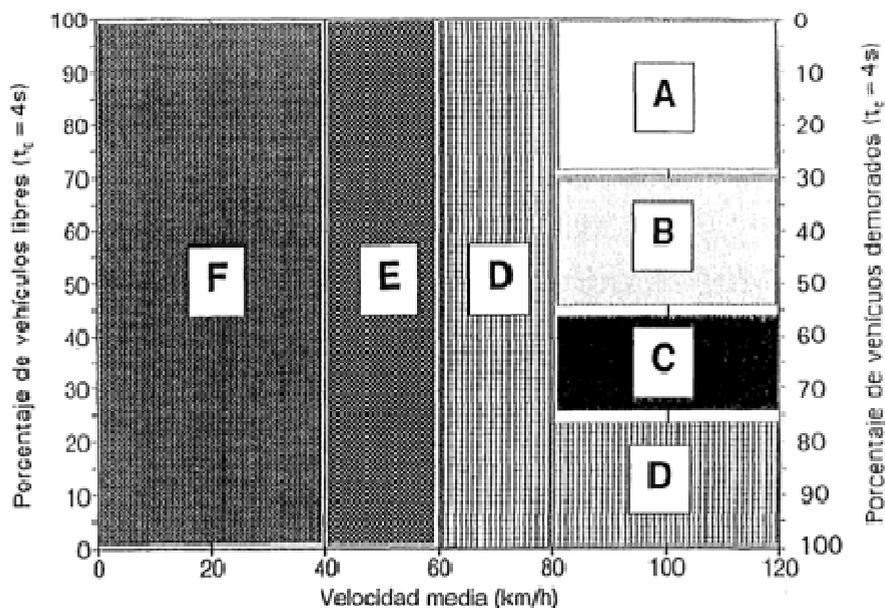
incorporaciones ni salidas, mucho más frecuentes de la red viaria, donde además se instalan los equipos de monitorización.

Romana, M. (1995) desarrolla su Tesis en una primera parte, revisando los criterios para la evaluación del nivel de servicio seguido de una segunda parte, en la que realiza una nueva propuesta de cálculo a partir de parámetros de circulación que afectan al conductor directamente. En su cálculo realiza la toma de datos de tráfico mediante técnicas de video, para determinar el porcentaje de vehículos demorados y la velocidad media temporal, frente a los cálculos iniciales que parten de los factores de velocidad de recorrido y relación intensidad/capacidad, parámetros que en ocasiones son difíciles de obtener con equipos de conteo.

La Tesis se basaba en la grabación, mediante cámara de video, de dos secciones de un tramo de carretera de doble sentido que, una vez analizado, proporcionaban los siguientes datos:

- Intensidad
- Densidad del tramo observado en cada cámara
- Densidad del tramo experimentado
- Velocidad en el tramo observado en cada cámara
- Velocidad de recorrido
- Intervalos
- Adelantamientos

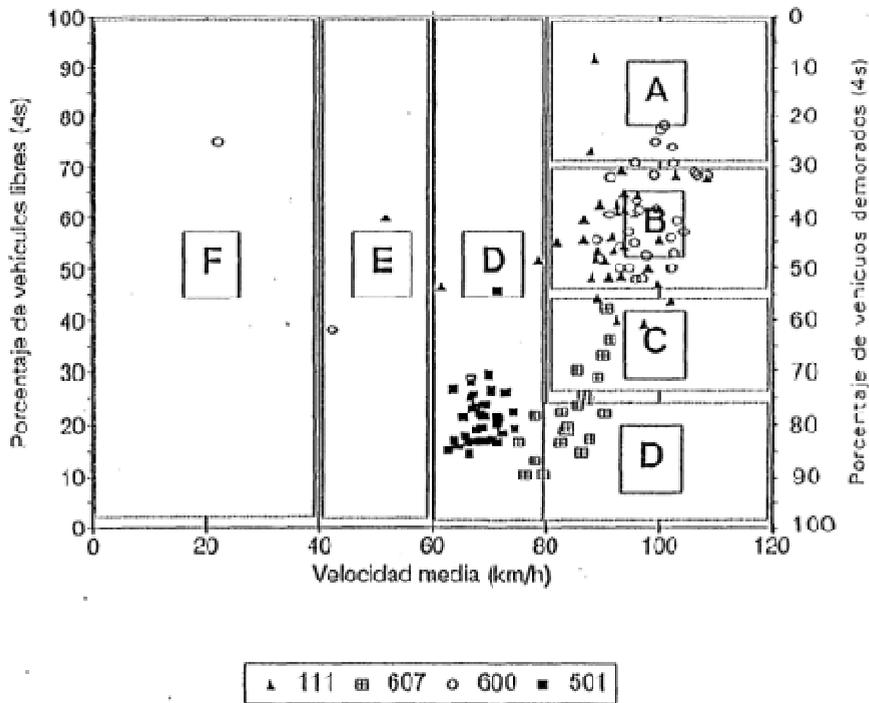
El estudio plantea igualmente una matriz de nivel de servicio basado en velocidad libre y porcentaje de vehículos demorados/libres tal y como se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 12: Matriz del nivel de servicio basado en velocidad libre y porcentaje de vehículos demorados. Romana, M. (1995).

El estudio tuvo lugar tomando datos de diversas carreteras de Madrid y contaba con un total de 258 periodos de 5 minutos por sentido, en carreteras de doble sentido de circulación. El análisis de datos, junto a la toma de datos conlleva un tiempo total de 2,1 horas totales por hora de datos. Una vez analizados los datos y llevados a la tabla (gráfica 13), se muestran a continuación las regiones en las cuales obtuvieron resultados, las cuales no se cubren al 100%, teniendo el gran volumen de condiciones de tráfico para niveles de servicio desde el A hasta el D.

Estado del Arte



Gráfica 13: Regiones de la matriz donde se obtuvieron datos. Romana, M. (1995).

La tesis concluye con comentarios sobre cada variable calculada y en el caso del nivel de servicio, que es la parte que referenciamos en la presente tesis, hace mención a la velocidad como una variable no suficientemente representativa para el cálculo del nivel de servicio en carreteras convencionales de dos carriles, por lo que apuesta por la conjunción de valores velocidad y porcentaje de vehículos demorados. Asimismo concluye con un intervalo de 15 minutos como recomendación para la evaluación del nivel de servicio, de los cuales se pueden medir tres o cuatro periodos a lo largo de dos horas.

Esta tesis presenta como novedad que tenía en cuenta el estado del tráfico en tiempo presente para la determinación del nivel de servicio. Sin embargo, sigue manteniendo los 6 niveles del manual de capacidad. Este número de niveles se considera excesivo, como ya se ha comentado anteriormente y como se expondrá detalladamente en el capítulo 3 de esta tesis. Otro aspecto diferente por el cual este estudio no entraría en el ámbito de esta tesis, es que la tesis de Romana, M. (1995).

se centra en carreteras de dos sentidos donde sólo existe una única calzada, situación totalmente diferente a las autovías y autopistas, con dos calzadas separadas, que son el objeto del estudio en esta tesis.

Klodzinski, J., Gordin, E., Al-Deek, H. (2008) realizan el estudio del nivel de servicio basado en el retardo, en contrapartida con otras variables como densidad, tasa V/C, etc. El estudio se centra en carreteras de peaje en lugar de autovías, y tomó como ejemplos prácticos peajes de Orlando y Florida, con niveles de servicio representantes en cada una de ellas.

Los sistemas de peaje son distintos de las autovías, ante todo por la facilidad para la medida del retraso de los vehículos, pero que al mismo tiempo este retraso puede ser variable en este tipo de autovía por el sistema de control de paso por los sistemas de acceso (rapidez de los conductores en el pago, problemas varios, etc.). Además del retraso se tomaron otros datos para evaluar la medida de efectividad (MOE, Measure of Effectiveness), número de vehículos equivalentes en una cola y número de vehículos procesados en un intervalo de tiempo sobre el total del análisis.

Los datos tomados en Orlando (Florida) corresponden a grabaciones de vehículo tras vehículo en hora punta (7-8 am) desde 1994 a 2000. Se excluyeron del análisis los lunes, viernes y fines de semana. En estos videos se obtuvieron datos de llegadas, salidas, tiempo de servicio y tasa de transferencia vehicular. En el cálculo descartan el uso de la densidad para calcular el nivel de servicio debido a que por circunstancias del punto de peaje se pueden producir colas que alteren el nivel de servicio.

Asimismo, descarta la Intensidad/Capacidad (V/C) por causas similares al caso anterior, la capacidad depende del conductor y de la capacidad de pagar en la estación de peaje. Por tanto, escoge el retardo como variable para evaluar el nivel de servicio, ya que lo considera como un nivel de inconveniencia. El estudio concluye con una catalogación de Nivel de Servicio a vehículos por segundo en la plaza de peaje, siendo el nivel A cinco vehículos por segundo, de B a E treinta vehículos por segundo y F más de ciento veinticinco vehículos por segundo.

Este estudio se centra en determinar el estudio del nivel de servicio en zonas cercanas al peaje para la determinación de las colas. Esta situación, pese a centrarse

Estado del Arte

en una autopista, no puede compararse con el estudio objeto de esta tesis, ya que se trata de obtener en nivel de servicio, en tiempo presente, y en situaciones de flujo sin restricciones físicas como las barreras de peaje.

Existen otros estudios como en de Rakha, H, Van Aerde, M. (1995) en el cual se dedujo la relación Velocidad-Intensidad a partir de las relaciones Intensidad-Densidad y Velocidad-Densidad, considerando un ajuste menos aproximado que el que refleja el presente estudio, debido a que el tratamiento de datos fue muy inferior. El estudio de Van Aerde, M. y Rakha, H. (1995) trató 1.208 datos frente a los 40.221.823 datos tratados en el presente estudio, lo que justifica que la aproximación alcanzada por Van Aerde, M. y Rakha, H. (1995) en su trabajo es muy inferior a la alcanzada aquí.

De los estudios analizados se desprende que no hay ninguna aproximación a los objetivos de esta tesis. En primer lugar, ninguno de los estudios analizados propone una disminución del número de niveles de servicio propuestos por el manual de capacidad. Esta disminución, propuesta por esta tesis en el capítulo 3, se debe a que las diferencias de algunos niveles de servicio consecutivos (por ejemplo A y B) no son significativas para determinar diferentes medidas de gestión del tráfico para cada nivel.

Por otra parte, la gran mayoría de estudios toman como base el modelo del HCM. Este modelo es totalmente estático, ya que utiliza la velocidad de diseño de la vía para el cálculo del estado del tráfico. Así pues el nivel de servicio obtenido no es función directa del estado del tráfico sino del dimensionado de la red viaria, por lo que no es factible su uso para la determinación de estrategias de gestión del tráfico en tiempo presente.

A fecha de inicio de los trabajos de la presente tesis doctoral en enero de 2.008, la última versión del Highway Capacity Manual era la del 2.000, siendo la única oficial. Sin embargo, durante el año 2.010 se publicó una nueva versión de dicho documento que no ha estado disponible hasta abril del 2.010. y que comparando las diferencias con el HCM 2000 no afecta a la tesis, ya que básicamente son las siguientes:

- Se añade la ley I/V para 75 mph.
- Se suprime la versión métrica.

- Se vuelven a obtener las leyes I/V con datos nuevos y antiguos. Las leyes propuestas son ligeramente diferentes en su formulación matemática, pero sus gráficas difieren muy poco de la versión del HCM 2000. Además el procedimiento establecido para los Tramos Básicos en Autopista no ha sufrido modificaciones relevantes.

IV. Objetivos

IV.1. Objetivo principal

El objetivo general de esta tesis es la *definición de una nueva metodología de modelización en tiempo presente de los niveles de servicio en autopistas mediante la utilización de datos de sensores en carretera.*

Se pretende que esta modelización pueda ser utilizada por los sistemas de sensorización actualmente más extendidos para obtener una caracterización de los niveles de servicio más ajustada a su definición teórica, de forma que los gestores de tráfico puedan trabajar con información más precisa a la hora de la toma de decisiones.

IV.2. Subobjetivos

Para conseguir el objetivo general deben resolverse los siguientes objetivos parciales:

- Estudiar la calidad de los datos obtenidos de las ETDs, analizando cuáles son los mecanismos existentes para incrementar la calidad del dato y proponiendo los más adecuados para mejorar la consistencia y filtrado de los datos obtenidos de los sensores en carretera. Aplicar estos mecanismos a los datos utilizados en el análisis de nivel de servicio en tiempo presente.
- Analizar la viabilidad de adaptar el modelo de cálculo de nivel de servicio del HCM, mediante la utilización de la información disponible por los sensores en carretera.
- Definir y ajustar un nuevo modelo matemático que permita un cálculo de los niveles de servicio teniendo cuenta el estado del tráfico en tiempo presente.
- Contrastar los resultados de los diferentes modelos propuestos para el cálculo del nivel de servicio de las carreteras.

V. Método

V.1. Hipótesis

Las hipótesis de partida de la presente tesis doctoral son:

- Los datos proporcionados por las estaciones de toma de datos, basadas en espiras electromagnéticas, en tiempo presente poseen errores inherentes al detector. Por lo tanto es necesario realizar una reducción de datos para poder trabajar con los datos correctos.
- El HCM 2000 es la única referencia técnica que detalla la metodología de cálculo del nivel de servicio. Se utiliza el HCM 2000 para obtener un patrón de referencia, que permita comparar los resultados de los modelos propuestos con el modelo HCM 2000.
- Los 6 niveles de servicio definidos en el HCM 2000 no se consideran adecuados para la gestión dinámica del tráfico ya que entre algunos de ellos no existen variaciones en las condiciones de circulación significativas. Así pues, se toma como hipótesis de partida la reducción a 4 niveles. Estos niveles surgen de agrupar los niveles A y B y los niveles E y F.
- Los parámetros para el cálculo del nivel de servicio se utilizan de forma dinámica. Esto es, dependiendo del método propuesto se utiliza como velocidad libre básica:
 - o El límite de velocidad de cada tramo.
 - o La velocidad libre básica; como la media geométrica de las velocidades cuando la intensidad es menor a 400 veh/h. Este valor viene determinado por la experiencia práctica, en la Dirección General de Tráfico (DGT) del Ministerio de Interior del Gobierno de España, que indica que cuando hay en la carretera una intensidad de 400 veh/h. es cuando éstos circulan a la velocidad libre.

Método

- La velocidad media por minuto, como dato proporcionado por la ETD cada minuto. Este periodo de integración es el mínimo intervalo de datos agregado por la estación de toma de datos y se considera adecuado para trabajar en la gestión del tráfico en tiempo presente.
- Se asimila la densidad de tráfico a la ocupación. Esta hipótesis se debe a la imposibilidad de medir la densidad con los equipos ITS actualmente desplegado en las carreteras del Estado, en los que se basa el experimento. Tal y como se define en Kim Y, Hall F. L. (2004), Hall, F. L. (1986) y en el Minnesota Department of Transportation (2000) la densidad tiene una relación directa con la ocupación. Así pues, puede calcularse directamente la densidad a partir de parámetros que proporciona la espira como la ocupación y la longitud del vehículo.

V.2. Diseño Experimental

V.2.1. Definición del área de estudio

La definición de una serie de criterios de selección es imprescindible para llevar a cabo la elección del tramo de estudio sobre el que se desarrollará el presente trabajo. Dichos criterios permitirán seleccionar un tramo de vía que se ajuste correctamente a las características del estudio.

Los criterios definidos se centran en dos hechos fundamentales. El primero de ellos es el análisis de la capacidad de la vía, y el segundo la homogeneidad de los viales correspondientes a la vía. Además, con objeto de relacionar los valores adquiridos por el equipamiento en carretera como las estaciones de toma de datos (ETD) se tendrá en cuenta la localización geográfica de éstas y la distancia existente entre ellas. La zona de estudio seleccionada deberá disponer de equipamiento de este tipo con una correcta localización y proximidad.

Además, los tramos seleccionados deberán ser lo más homogéneos posibles entre sí, ya que esto permitirá hacer una correcta comparación de los datos ofrecidos por su equipamiento. Tanto las características geométricas como los valores de las variables de tráfico de cada tramo deberán ser equivalentes. El objetivo de la búsqueda de esta similitud es obtener elementos prácticamente equivalentes, de

forma que los análisis y resultados obtenidos a partir de cada tramo puedan ser directamente extrapolables entre sí.

Además, tal como se ha comentado en el punto anterior, uno de los criterios de clasificación de tramos consistirá en las características del tráfico de cada tramo. Una de las variables que pertenece a este conjunto es la capacidad de los viales, que adquiere una gran importancia, ya que los viales de alta capacidad presentan valores muy significativos del grupo de variables que conforman el fenómeno del tráfico (velocidad, intensidad, ocupación, etc.). Los análisis realizados sobre tramos con viales de este tipo consiguen eliminar los vehículos poco significativos para el estudio (ciclomotores, bicicletas, etc.), centrandó el trabajo en los vehículos ligeros, que son los principales usuarios de este tipo de vías.

V.2.2. Tramos de vía seleccionados

La zona seleccionada cuenta con tramos de vía con estaciones de toma de datos (ETD) que trabajan de forma paralela almacenando la información correspondiente. No obstante, para analizar la información ofrecida por dicho equipamiento es necesario disponer de datos con frecuencia cada minuto, ya que de esta forma se consigue una continuidad que se ajusta correctamente a la realidad del tráfico. Tal como ocurre con el equipamiento instalado en determinados tramos de vía, la información almacenada presenta una frecuencia de minuto. Por lo tanto, para el presente estudio se analizarán aquellas vías que ofrezcan un equipamiento que proporcione datos con frecuencia cada minuto y que además presenten las siguientes características:

- Deben pertenecer a una autopista.
- Todos presentan dos carriles por sentido de circulación con separadores físicos entre ambos sentidos.
- El carril derecho de cada vía siempre está destinado preferentemente a la circulación de vehículos pesados, mientras que el carril izquierdo es de uso prácticamente exclusivo de los vehículos ligeros.

Para determinar en qué fechas hubo sucesos representativos, esto es, variaciones significativas de los niveles de servicio, ha sido imprescindible la colaboración con la Dirección General de Tráfico a través del Centro de Gestión del Tráfico de la Comunidad Valenciana. Como resultado de dicha colaboración se han escogido

Método

varios tramos de la autovía A-3 ya que se ajustan adecuadamente al estudio asociado al presente trabajo.

V.2.3. Criterios de tramificación

Para realizar una tramificación óptima hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Se consideran tramos, todas aquellas longitudes de carretera en las cuales, tanto la ***intensidad de los vehículos que por ahí circulan como la capacidad de la carretera sean de iguales ó semejantes características.***
- En cuanto a la intensidad, cada tramo estará limitado por las vías de incorporación o desvíos existentes; por lo tanto, un tramo se define entre entradas y salidas, no pudiendo tener ningún tipo de desviación o incorporación que altere la intensidad de vehículos que por él circulan.
- Así mismo, un tramo debe tener en toda su longitud la misma capacidad de circulación y, por lo tanto, serán tramos distintos todos aquellos en que aumente o disminuya el número de carriles, la pendiente sea distinta, supere un máximo de radio de curvatura, el porcentaje de vehículos pesados que circulan varíe con respecto a otra sección de carretera, y en definitiva cualquier factor que afecte a la capacidad de la vía (factores según HCM 2000).
- Al tener que extrapolar los datos recogidos en una sección de medida a una longitud de carretera, a medida que esta longitud sea mayor, la fiabilidad de los datos es menor. Por término general se considera que la longitud de los tramos no debe exceder los 1.500 metros. Y para la estimación de tiempos de recorrido esta longitud disminuye hasta 1.100 metros. En el caso de la detección automática de incidentes en tramos conflictivos es conveniente disminuir esta separación entre ETD hasta incluso los 700 metros.
- Se consideran tramos especiales en los que, por problemas de congestión en vías de salida o de incorporación, el carril de circulación

derecho de la vía troncal, se ve afectado en la continuidad del flujo circulatorio. En estos casos, la longitud de vía de la zona troncal afectada por la congestión de la vía de salida o de incorporación, se considerará como tramo independiente del troncal.

En el siguiente ejemplo, se observa la separación de las secciones de medida 1 y 2, como consecuencia de las retenciones que se producen en la salida (tramo 3); por lo tanto se considera como tramo especial el tramo 2 (sección de medida 2):

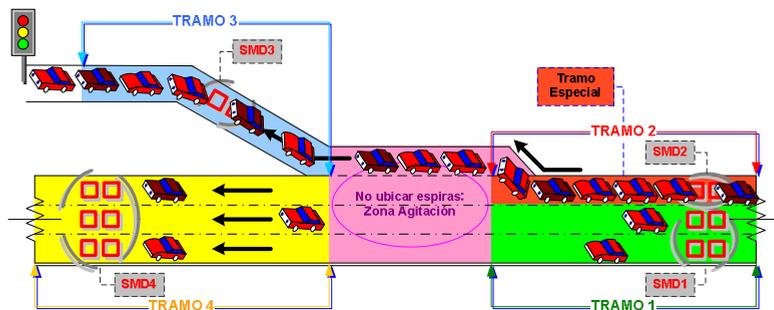


Figura 2: Tramificación.

Si un desvío presenta problemas de retenciones, como el del ejemplo mostrado, éstas pueden llegar a afectar a los usuarios que circulen por la vía troncal, ya que pueden encontrarse vehículos parados o bien con velocidades muy bajas en el carril derecho de la vía troncal. También puede afectar a los vehículos que se quieran desviar y que pueden encontrarse el mismo problema nada más iniciar el desvío. Estas situaciones pueden provocar accidentes, que son evitables si con anterioridad se informa a los conductores de la problemática con que se van a encontrar.

En las incorporaciones que presentan gran volumen de tráfico, el efecto de inseguridad vial es análogo al expresado anteriormente para las desviaciones, siendo muy importante informar al usuario de la situación que se le presentará en la próxima incorporación.

V.2.4. Criterios de selección de tramos en función de la localización de las ETDs

Cada tramo definido con los criterios expuestos anteriormente, es susceptible de ser controlado por un equipo detector. Como norma general, la ubicación de las ETD dentro de cada tramo corresponderá con el inicio de éste según el sentido de circulación, sin embargo se ha evitado seleccionar aquellos tramos que dispongan de ETD en las siguientes situaciones:

- Zonas de carretera que por disminuciones de velocidad provoquen cambios de carriles frecuentes en los vehículos.
- Proximidades de incorporaciones de otras vías a la zona troncal o bien de salidas (desvíos) de la vía troncal a otras vías. En estas zonas de trenzado se producen cambios de carriles de manera frecuente y se considera una **zona de agitación**.
- Zonas de **curvas** en la vía troncal, donde las medidas que se obtienen no son representativas, debido a que la velocidad de los vehículos disminuye considerablemente por el efecto de las frenadas en la curva.

Mediante los siguientes ejemplos gráficos, se muestran los criterios de ubicación de ETD que consideran la distancia que debe respetarse en puntos de troncales, entradas y salidas:

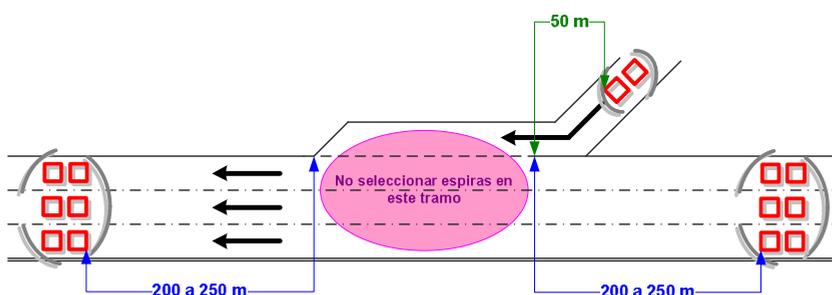


Figura 3: Ubicación en Troncal con Incorporación.

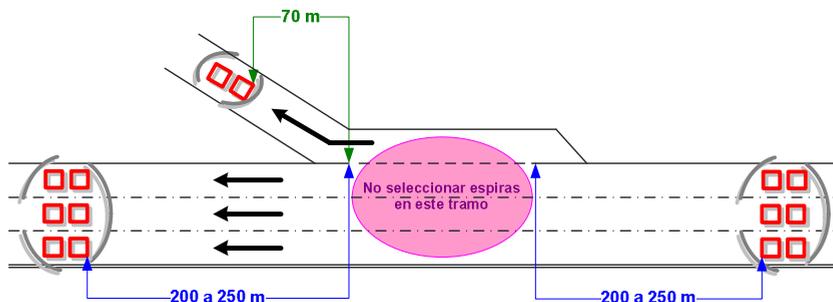


Figura 4: Ubicación en Troncal con Salida.

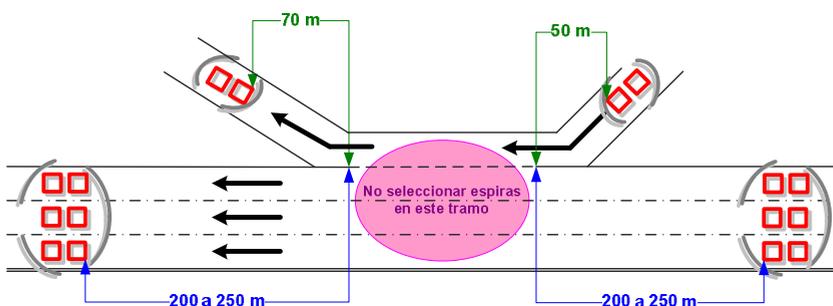


Figura 5: Ubicación en Troncal con Zona de trenzado: entrada/salida.

Por último, también hay que tener en cuenta que en algunas incorporaciones y desvíos, la trayectoria que realizan los vehículos no se corresponde con la traza centrada de la carretera; por ello, las ETD no deben ir centradas sobre el carril, sino sobre la trayectoria que siguen la mayoría de los vehículos; requiere por tanto una previa observación en campo:

Método

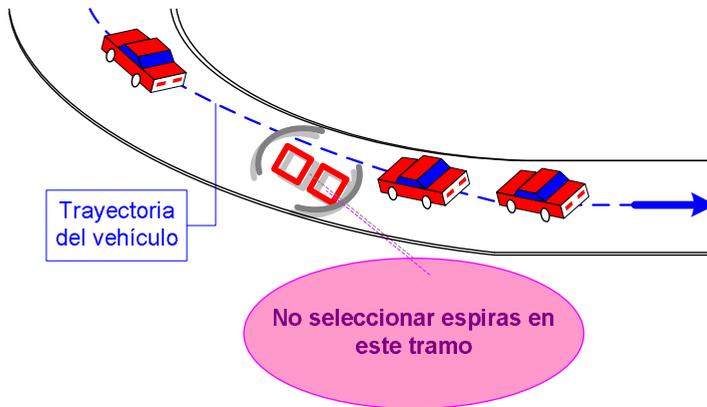


Figura 6: Ubicación sobre la trayectoria de los vehículos.

V.2.5. Caracterización de los tramos del estudio

La caracterización de los tramos es una tarea importante no sólo para conocer exactamente la ubicación del punto de conteo y su dimensionamiento sino también para conocer sus características y definir el comportamiento del tramo bajo estudio.

En la tabla 17 se detallan los puntos donde se encuentran ubicadas las Estaciones de Toma de Datos y sobre las cuales se ha centrado el estudio.

Punto Kilométrico	Sentido	Número de Carriles	Anchura carriles
186+500	CRECIENTE	2	3.5m
186+450	DECRECIENTE	2	3.5m
212+100	CRECIENTE	2	3.5m
212+780	DECRECIENTE	2	3.5m
242+000	CRECIENTE	2	3.5m
242+000	DECRECIENTE	2	3.5m
248+010	DECRECIENTE	3	3.5m
248+010	CRECIENTE	3	3.5m
255+290	DECRECIENTE	2	3.5m
255+290	CRECIENTE	2	3.5m
270+000	DECRECIENTE	2	3.5m
270+000	CRECIENTE	2	3.5m
285+150	CRECIENTE	2	3.5m
285+150	DECRECIENTE	2	3.5m
291+450	CRECIENTE	2	3.5m
291+450	DECRECIENTE	3	3.5m
296+475	CRECIENTE	2	3.5m
296+475	DECRECIENTE	2	3.5m

Tabla 17: Listado de estaciones de toma de datos

V.2.6. Datos de tráfico

Un aspecto fundamental del experimento reside en una correcta obtención de los datos de las diferentes variables de tráfico. Las entidades sobre las que se obtienen las variables fundamentales de tráfico se pueden clasificar en entidades físicas y entidades lógicas. Las entidades físicas se refieren a equipos de medida individuales mientras que las entidades lógicas son agrupaciones virtuales de las entidades físicas de acuerdo a criterios de ingeniería de tráfico.

Método

Las entidades físicas lógicas del presente estudio son:

- **Detector: Entidad básica inferior** del que se obtienen las variables de tráfico correspondientes a un carril de la ETD. Es el dispositivo que detecta la presencia o el paso de vehículos mediante la variación de la inductancia de un lazo. En tráfico interurbano, el detector mide la detección de los vehículos que pasan por dos ETD que están alineados en el sentido longitudinal de circulación.

A partir de las variables de tráfico aportadas por las ETDs, el software de la aplicación obtiene nuevas variables para entidades de abstracción superior a la del carril (detector). Estas entidades lógicas son las denominadas **Entidades Superiores del Sistema**.

- **Sección de Medida: Entidad básica superior** que representa la unión lógica virtual de un conjunto de detectores de tráfico. Las secciones de medida pueden ser **físicas o virtuales**:
 - La **sección de medida física** resultan de la agrupación lógica de los detectores del mismo tipo de una sección de la carretera de comportamiento de tráfico homogéneo. Es un ente de mayor abstracción en el que se tienen en cuenta las mismas variables de tráfico medidas por los detectores más el **Nivel de Servicio**. Su funcionalidad es la de servir de estación medidora que ofrezca datos de tráfico globales de un punto kilométrico de una vía en un único sentido de circulación definido.
 - La **sección de medida virtual**, resulta de la combinación de secciones de medida reales, es decir la combinación de detectores de diferentes secciones de la vía. La única variable de tráfico fiable que se obtiene para esta entidad es la **intensidad** con el fin de obtener el aforo ó número de vehículos que pasan por una sección de medida como resultado de sumas y restas de las secciones de medida físicas que la componen.
- **Tramo**: Área comprendida entre 2 puntos de una red de carreteras con un comportamiento de tráfico homogéneo, situado en una misma vía y en un mismo sentido de circulación, sin interrupciones de accesos (entradas/salidas) ni variaciones de capacidad. Su funcionalidad es la de extrapolar las medidas de las variables de tráfico de la sección o secciones de medida contenidas en él, a un tramo de vía de comportamiento de tráfico homogéneo.

A continuación se detalla la información que se obtiene de la ETD, equipo de adquisición de datos utilizado en el estudio. Asimismo se detalla el tratamiento de datos que se realiza a nivel superior mediante un software del Centro de Control, a partir de las variables de tráfico aportadas por las ETD basado en una serie de integraciones/agregaciones para obtener las variables de tráfico aplicadas a las entidades superiores que se consideran.

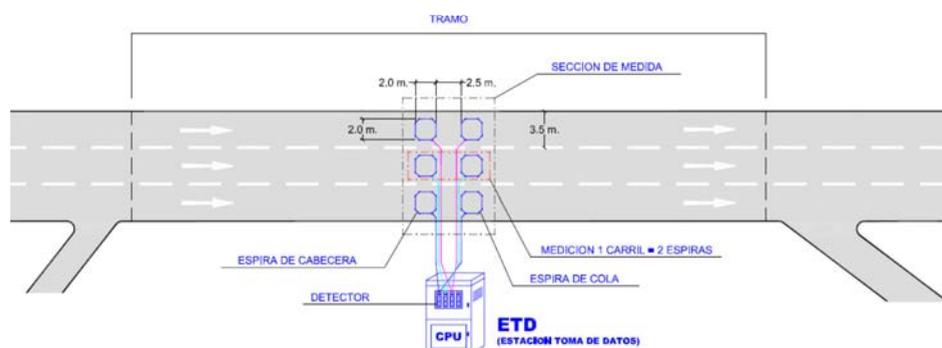


Figura 7: Esquema de entidades físicas y lógicas.

V.2.6.1. *Agregación de datos en tiempo presente*

Los datos básicos de tráfico de la *ETD en tiempo real*, corresponden a los proporcionados por cada uno de los detectores de la ETD, pertenecientes al último **periodo de integración (PI) de 1 minuto de tiempo**. Éste periodo de integración viene recomendado por la norma UNE 135411-3:2004 Aenor (2004), como valor por defecto, para la integración de los datos suministrados en tiempo presente por los detectores de las estaciones remotas.

Estos datos están referidos a las siguientes variables de tráfico que se obtienen a partir de todos los vehículos registrados por la **entidad inferior del sistema, detector** (formado por espiras dobles) **ó carril** durante el periodo de integración PI de 1 minuto:

Método

- **Intensidad (I_D):** Número de vehículos que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración PI de 1 minuto. Se expresa en n° vehículos ó veh/h realizando la siguiente conversión:

$$I_D(veh/h) = N^\circ Vehículos * 60,$$

Porque 1 hora tiene 60 intervalos de 1 minuto. En el caso de agregaciones temporales:

- Si $PI = 5 \text{ min} \Rightarrow I_D(veh/h) = N^\circ Vehículos * 12$,
porque 1 hora tiene 12 intervalos de 5 minutos.
 - Si $PI = 15 \text{ min} \Rightarrow I_D(veh/h) = N^\circ Vehículos * 4$,
porque 1 hora tiene 4 intervalos de 15 minutos.
- **Ocupación (O_D):** Media aritmética de los tiempos de ocupación de los vehículos que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración. Se expresa en porcentaje % respecto del periodo de integración de 1 minuto:

$$O_D(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \text{Tiempos Ocupación}_i (sg)}{n} * \frac{100}{PI = 60 (sg)},$$

siendo n el número de vehículos registrados en el periodo de integración PI.

- **Velocidad Media (V_D):** Media aritmética de las velocidades de los vehículos que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración, medida en Km/h .
- **Distancia Media (D_D):** Media aritmética de las distancias entre vehículos consecutivos registrados por el detector D en el periodo de integración, medida en metros m .
- **Longitud Media (L_D):** Media aritmética de las longitudes de los vehículos que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración, medida en decímetros dm .

- **Composición Longitud (CL_{DC}):** Número de vehículos clasificados por longitud, de acuerdo a las categorías establecidas según los umbrales configurados, que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración. Se expresa en % de la categoría que corresponda, por ejemplo %L que corresponde al porcentaje de ligeros.

El sistema permite obtener hasta 2 clasificaciones distintas por longitud de acuerdo a los umbrales configurados. Normalmente se establecen 2 categorías, *ligero* y *pesado* a partir de un umbral:

- Si $L \leq 5,6\text{metros} \Rightarrow \text{LIGERO}$
- Si $L > 5,6\text{metros} \Rightarrow \text{PESADO}$

- **Composición Velocidad (CV_{DC}):** Número de vehículos clasificados por velocidad, de acuerdo a las categorías establecidas según los umbrales configurados, que han sido registrados por el detector D en el periodo de integración. El sistema permite obtener hasta 3 clasificaciones distintas por velocidad. Se expresa en % de la categoría que corresponda, por ejemplo %L que corresponde al porcentaje de ligeros.
- **Congestión (C_D):** Variable booleana que indica la existencia de alguna activación de alarma de congestión determinada por el algoritmo HIOCC (High Occupancy) implementado en el ETD en el periodo de integración. Se expresa en $SÍ=1$ ó $NO=0$.

Esta alarma de detección de congestión la genera la propia ETD independientemente por cada uno de los carriles asociados a la misma. El algoritmo estándar HIOCC (High Occupancy) se utiliza para la detección de colas a nivel local. Opera identificando movimientos lentos o estacionarios de los vehículos sobre cada uno de los detectores. Trabaja cada segundo (i) con la ocupación (%) obtenida en este instante. Es una variable discreta que vale 0 si no hay alarma y 1 si la hay.

La activación de la alarma se produce cuando la ocupación instantánea de cualquiera de las ETD sobrepasa un valor de ocupación $O_i = 95\%$ (configurable) durante un tiempo t_1 , tiempo de activación = 10 segundos (configurable). Esta alarma se desactiva cuando pasado un tiempo t_2 , tiempo desactivación = 3 segundos (configurable), se alcanza un valor de ocupación alisada $O_a = 35\%$ (configurable). Esta

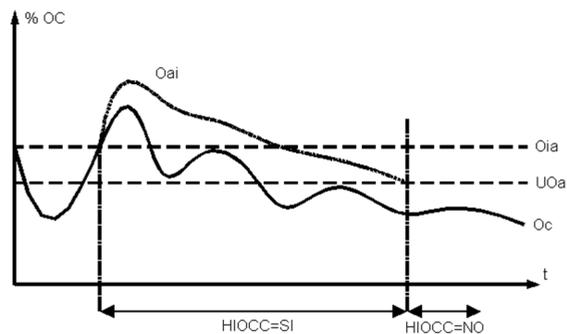
Método

ocupación alisada está influenciado por un factor de alisamiento $fa = 64$ (configurable).

$$Oa_i = \left[O_i * \left(\frac{1}{fa} \right) + \left[Oa_{i-1} * \left(\frac{fa-1}{fa} \right) \right] \right]$$

Siendo:

- O_i : Ocupación instantánea del detector en % que se calcula cada segundo (i).
- fa : Factor de alisamiento.
- Oa_i : Ocupación influenciada por el factor de alisamiento.
- Oa_{i-1} : Ocupación influenciada por el factor de alisamiento del segundo anterior.
- Oia : Umbral de activación
- UOa : Umbral de desactivación



Si estando la alarma activada se detecta $O_i = 0$ durante un cierto tiempo $t_c = 8$ segundos (programado en código interno, no configurable), entonces se paraliza el cálculo de la ocupación alisada, para evitar las paradas y arranques de los vehículos.

- **Alarma Kamikaze (K_D):** Variable booleana que indica la existencia de algún vehículo circulando en sentido contrario en el periodo de integración. Se expresa en $SI=1$ ó $NO=0$.
- **Sentido Inverso (SI_D):** Variable booleana que indica que la circulación en el periodo de integración ha presentado una

modificación de sentido respecto al habitual. Esto sucede en carril reversible, que en determinado instante varía su sentido de circulación, y puede ocurrir en mitad de un periodo de integración. Se expresa en $SÍ=1$ ó $NO=0$.

- **Error (E_D):** Es el porcentaje de tiempo dentro del periodo de integración en que si hubiesen pasado vehículos, el detector D no los registra. Este parámetro representa la fiabilidad de la medida obtenida en el periodo de integración. Se expresa en %.

V.2.6.2. **Agregación de datos de detectores a secciones**

Las variables de tráfico de las secciones de medida resultan de la **agregación espacial** de los datos de los n detectores que las componen:

- **Intensidad (I_S):** Número total de vehículos que han sido registrados por los detectores D_i asociados a la sección de medida S en el periodo de integración. Se expresa en n° vehículos ó veh/h realizando la siguiente conversión:

$$N^{\circ}Vehículos_S = \sum_{i=1}^{i=n} N^{\circ}Vehículos_{D_i}$$

$$I_S(veh/h) = \sum_{i=1}^{i=n} N^{\circ}Vehículos_{D_i} * 60,$$

porque 1 hora tiene 60 intervalos de 1 minuto. En el caso de agregaciones temporales:

- Si $PI = 5 \text{ min} \Rightarrow I_S(veh/h) = N^{\circ}Vehículos * 12$,
porque 1 hora tiene 12 intervalos de 5 minutos.
- Si $PI = 15 \text{ min} \Rightarrow I_S(veh/h) = N^{\circ}Vehículos * 4$,
porque 1 hora tiene 4 intervalos de 15 minutos.
- **Ocupación (O_S):** Media aritmética de los tiempos de ocupación de los detectores D_i asociados a la sección de medida S en el periodo de integración. Se expresa en porcentaje % respecto del periodo de integración de 1 minuto:

$$O_S (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \text{TiempoOcupación}_{D_i} (sg)}{n} * \frac{100}{PI = 60(sg)}$$

- **Ocupación Ponderada (Op_S):** Media aritmética de las ocupaciones de los detectores D_i asociados a la sección de medida S ponderada por las intensidades de los mismos en el periodo de integración PI de 1 minuto, medida en porcentaje %. Se utiliza **para el cálculo del Nivel de Servicio**, como **medida indirecta de la Densidad** de tráfico:

$$Op_S (\%) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} O_{D_i} * I_{D_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} I_{D_i}}$$

- El valor de la variable Ocupación a nivel de sección de medida, tiene sentido en ingeniería de tráfico para la obtención de la variable Nivel de Servicio y para la algorítmica de detección automática de incidentes de forma automática.

- **Velocidad Media (V_S):** Media aritmética de las velocidades de los detectores D_i asociados a la sección de medida S ponderada por las intensidades de los mismos en el periodo de integración, medida en Km/h.

$$V_S (Km / h) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} V_{D_i} * I_{D_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} I_{D_i}}$$

- **Distancia Media (D_S):** Media aritmética de las distancias de los detectores D_i asociados a la sección de medida S ponderada por las intensidades de los mismos en el periodo de integración, medida en metros m.

$$D_S (m) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} D_{D_i} * I_{D_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} I_{D_i}}$$

- **Longitud Media (L_S):** Media aritmética de las longitudes de los detectores D_i asociados a la sección de medida S ponderada por las intensidades de los mismos en el periodo de integración, medida en decímetros dm .

$$L_S (dm) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} L_{D_i} * I_{D_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} I_{D_i}}$$

- **Composición Longitud (CL_{SC}):** Número total de vehículos clasificados por longitud de los detectores D_i asociados a la sección de medida S , de acuerdo a las categorías establecidas según los umbrales configurados, en el periodo de integración. Se expresa en % de la categoría que corresponda, por ejemplo %L que corresponde al porcentaje de ligeros.

$$CL_{SC} = \sum_{i=1}^{i=n} CL_{DC_i}$$

siendo C la categoría de la composición.

- **Composición Velocidad (CV_{SC}):** Número total de vehículos clasificados por velocidad de los detectores D_i asociados a la sección de medida S , de acuerdo a las categorías establecidas según los umbrales configurados, en el periodo de integración. Se expresa en % de la categoría que corresponda, por ejemplo %L que corresponde al porcentaje de ligeros.

$$CV_{SC} = \sum_{i=1}^{i=n} CV_{DC_i}$$

siendo C la categoría de la composición.

- **Congestión (C_S):** Variable booleana que indica la existencia de alguna activación de alarma de congestión HIOCC (High Occupancy) en alguno de los detectores D_i asociados a la sección de medida S , durante el periodo de integración. Se expresa en $SÍ=1$ ó $NO=0$.

Método

- **Alarma Kamikaze (K_S):** Variable booleana que indica la existencia de alguna activación de alarma Kamikaze en alguno de los detectores D_i asociados a la sección de medida S , durante el periodo de integración. Se expresa en $SÍ=1$ ó $NO=0$.
- **Sentido Inverso (SI_S):** Variable booleana que indica la existencia de alguna activación de alarma en Sentido Inverso en alguno de los detectores D_i asociados a la sección de medida S , durante el periodo de integración. Se expresa en $SÍ=1$ ó $NO=0$.

Es decir, la sección de medida S detectará alarma de Congestión, Kamikaze y/ó Sentido Inverso cuando alguno de los detectores D_i que la forman detecte alarma de Congestión, Kamikaze y/ó Sentido Inverso en el periodo de integración.

A partir de los valores agregados de las variables de tráfico, se obtiene una nueva variable para la entidad Sección de Medida:

- **NIVEL DE SERVICIO**, que resulta de la combinación de las variables de tráfico: Velocidad y Ocupación.

V.3. Reducción de Datos

V.3.1. Reducción de datos

La reducción de datos es el proceso de análisis de los datos obtenidos, de las entidades lógicas, para garantizar su calidad. Este modelado aborda todo el proceso de reducción de datos realizado, a partir de los datos originales obtenidos para el estudio. Los datos resultantes de esta depuración serán los que se usarán para la obtención de los datos finales que serán analizados. Ello no sólo implica una revisión de los datos existentes en busca de anomalías, sino también un estudio pormenorizado de las variables existentes con el objetivo de determinar cuáles serán las finalmente utilizadas en el análisis.

V.3.1.1. Formato y procedencia de los datos

Los datos analizados, tal y como se menciona en el Anexo 1 se originan en la A-3 y son producidos por las Estaciones de Toma de Datos, procedentes de las espiras asociadas a cada una de ellas. El proceso de depuración se ha realizado de forma independiente, para cada una de las ETD existentes en los tramos seleccionados.

Para cada dato de tráfico proporcionado cada minuto, se dispone de un conjunto de 21 registros, que se muestran en la Tabla 18.

Código	Código identificativo de la espira en carretera
Fecha/Hora	Fecha y hora de los datos
Intensidad	Intensidad de vehículos contabilizada
Ocupación	Porcentaje de ocupación de los vehículos en la espira
Congestión	Determina si hay una congestión o no
Kamikaze	Identifica los vehículos que circulan en sentido contrario
Dirección	Dirección de los vehículos
Velocidad	Velocidad media de los vehículos en el minuto transcurrido
Longitud Media	Longitud media de los vehículos
Distancia Media	Distancia media de separación de los vehículos
VehLong1	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud1
VehVel1	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad1
VehLong2	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud2
VehVel2	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad2
VehLong3	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud3
VehVel3	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad3
VehLong4	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud4
VehVel4	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad4
VehLong5	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Longitud5
VehVel5	Número de vehículos que están dentro del rango determinado por la Velocidad5
Error	Identifica si ha habido un error en los datos

Tabla 18: Conjunto de variables de tráfico.

V.3.1.2. Variables consideradas

Del conjunto total de variables disponibles de tráfico, presentadas en la Tabla 18, se utilizan para el presente estudio un grupo reducido de ellos. La selección ha sido realizada debido a que son los que aportan mayor información al estudio o son indispensables para el proceso de cálculo de los niveles de servicio. Aunque para la reducción de datos han sido aprovechados todas y cada una de las variables, para el procesamiento y cálculo de los niveles de servicio se ha realizado una selección de los mismos. La selección de variables empleadas es las siguientes:

Método

- Intensidad
- Ocupación
- velocidad media
- porcentaje de vehículos ligeros
- porcentaje de vehículos pesados

La intensidad ha sido seleccionada por tratarse de una entrada para las ecuaciones tradicionales del cálculo del nivel de servicio, ya que aporta información sobre el flujo de vehículos en una sección dada. La ocupación ha sido escogida debido a que en una de las propuestas para el cálculo del nivel de servicio hace uso de la ocupación como variable para la estimación de la densidad.

La velocidad media se emplea también en el proceso del cálculo del nivel de servicio, al aportar información crucial sobre la fluidez y facilidad de circulación de los vehículos. Las últimas variables tratadas son el conteo de vehículos ligeros y pesados para la determinación del porcentaje de pesados, empleado en el cálculo del nivel de servicio. Sin este valor no se podría determinar la categorización de los vehículos, obteniendo valores para el nivel de servicio incorrectos al no disponer de dicho parámetro.

El resto de variables de tráfico no se han empleado directamente en el cálculo y procesamiento en los diferentes métodos de obtención de los niveles de servicio, aunque no por ello han sido despreciadas. Tanto el código de la espira, como la fecha y hora del registro y la dirección de los vehículos es indispensable para la agrupación de los diferentes registros y su posterior tratamiento. Detallar que el conteo de vehículos de categoría 3 o superior, así como la velocidad media de los vehículos de categoría 3 o superior se ha descartado al no estar implementado en la actualidad su uso y no disponer de valores útiles en el tratamiento posterior realizado a los datos.

La variable error, solo ha sido revisada en el proceso de reducción de datos, coincidiendo en muchas ocasiones con el filtrado del dato debido a la aplicación de los diferentes filtros establecidos. Otras variables no empleadas han sido la congestión, kamikaze y longitud media de los vehículos, puesto que no aportaban información apreciable para el proceso que se llevará a cabo.

V.3.2. Cálculo de la reducción de los datos de tráfico

V.3.2.1. Depuración

Una vez determinadas las principales variables de interés para el análisis de este estudio se ha procedido a depurar los datos obtenidos. El aspecto inicial de los datos considerados era bastante bueno, ya que prácticamente eran continuos en cuanto a su temporalidad, presentándose poca discontinuidad.

Posteriormente, para cada una de las variables del estudio se realizará un proceso de depuración orientado a los siguientes aspectos:

- Identificación y tratamiento de valores fuera del rango.
- Identificación y tratamiento de inconsistencias.
- Identificación y tratamiento de datos que falten.
- Identificación de sesgos sistemáticos.

Finalizado el proceso de depuración, se realizarán transformaciones y agrupaciones de variables de forma que posibiliten la utilización de determinadas técnicas estadísticas y faciliten la interpretación de los resultados.

En ocasiones el fallo de los sensores no aparece por la inexistencia de un dato, sino por la anomalía del mismo. La detección de estos datos erróneos no es fiable al 100%, ya que se basa en un análisis del orden de magnitud de los mismos. Los fallos en los datos de tráfico se han tratado de una manera diferente. Una vez analizados los datos en bruto se han detectado diversos errores en los mismos. Para la depuración de estos datos erróneos que entorpecerían en gran manera los estudios y conclusiones que de ellos se extrajeran, se ha recurrido a realizar una depuración basada en un conjunto de filtros. Para la detección de los errores en los datos de tráfico se propone realizar una depuración basada en un conjunto de 10 filtros:

- Filtro 1: se le asigna a carriles con espira cortada. Cuando ocurre esta situación, no hay intensidad y la ocupación es del 100% durante un tiempo $t=60s$, los datos del registro de cada minuto que cumplen con el filtro son descartados.
(*Intensidad* = 0) AND (*Ocupación* = 100) AND (*HIOCC* = YES)

Método

- Filtro 2: cuando la intensidad medida por el detector supera la intensidad máxima del carril. La intensidad máxima de un carril, según el HCM2000 la I_{max} de un carril no puede superar los 3200 veh/h. Por lo que si algún detector supera este valor se descartan los datos de dicho registro. En el lenguaje de la gestión del tráfico se denomina que la espira se ha quedado “enganchada” y cuenta constantemente vehículos.

$$I > I_{MAX}$$

- Filtro 3: cuando no hay intensidad ni ocupación durante un tiempo $t=86400s$, los datos del registro de cada minuto que cumplen con el filtro son descartados.

$$(Intensidad = 0) AND (Ocupación = 0)$$

- Filtro 4: cuando no hay intensidad y la ocupación es un valor positivo durante un tiempo $t=60s$. No se puede cumplir que haya ocupación y que no haya intensidad de vehículos, esto sería un error del detector, por lo que se descartan los datos que cumplen el filtro.

$$(Intensidad = 0) AND (Ocupación > 0)$$

- Filtro 5: cuando no hay intensidad y la velocidad media es positiva durante un tiempo $t=60s$. Este filtro es similar al anterior, no se puede cumplir que no haya intensidad y que la velocidad media sea superior a 0. Por lo que aquellos registros que cumplen el filtro son descartados.

$$(Intensidad = 0) AND (Velocidad \neq 0)$$

- Filtro 6: Cuando la velocidad media es 0 y la intensidad es diferente de 0 durante un tiempo $t=60s$. No es lógico que si la velocidad media sea 0 haya intensidad de vehículos, por lo tanto cuando se cumple dicho filtro son descartados los registros.

$$(Velocidad = 0) AND (Intensidad \neq 0)$$

- Filtro 7: Debido a la experiencia de la DGT, se realiza una comparación entre la ocupación del minuto anterior y el actual. Si la diferencia en valor absoluto de la ocupación entre un minuto y el anterior es superior al 25%

se descartan los datos del detector en el periodo de integración actual, puesto que los datos no son fiables para la obtención del nivel de servicio.

De forma empírica se determina el valor del 25%, porque de un periodo de integración $i-1$ a un periodo de integración i , en situación de estado de tráfico normal, no se registran variaciones superiores al 5%. Por tanto para determinar que es una variación anormal, el valor del 25% se considera un salto brusco de un valor de ocupación de un periodo a otro de integración.

Cuando se pasa a un estado de tráfico lento o retención incluso congestión por alguna incidencia, tanto recurrente como no recurrente (accidente), se genera una situación de atasco en formación. Análogamente para la situación cuando se va deshaciendo el atasco. Por tanto es algo progresivo y no una variación repentina.

El valor en porcentaje que representa la ocupación, es el tiempo en el que un vehículo ha estado ocupando la espira durante el periodo de integración que son 60 segundos. Si durante los 60s, un vehículo ha estado detenido sobre la espira, la ocupación sería del 100%. En tráfico interurbano es muy difícil que se registren valores del 100%, porque incluso cuando hay situaciones de retención, los vehículos van avanzando, ya que no hay ningún obstáculo que impida que avancen. Mientras que en tráfico urbano, pueden registrarse estos valores de ocupación, porque cuando el semáforo está en rojo, el tiempo de la fase roja puede superar los 60 segundos, para ciclos a partir de 90 segundos por ejemplo, que es un valor muy habitual para la regulación semafórica.

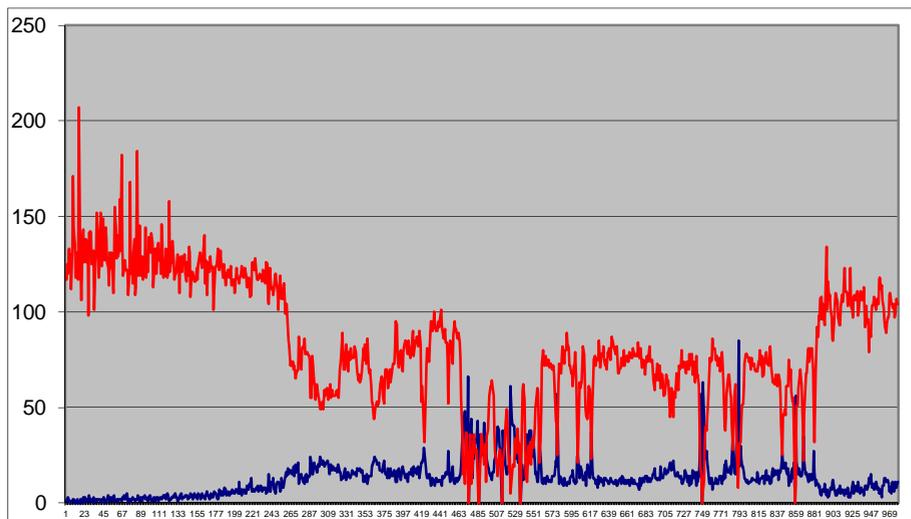
$$|\text{Ocupación}_{(i)} - \text{Ocupación}_{(i-1)}| > 25\%$$

- Filtro 8: Se realiza una comparación entre la velocidad del minuto anterior y el actual. Si la diferencia en absoluto de la velocidad entre un minuto y el anterior es superior a 55km/h, se descartan los datos del detector en el periodo de integración actual, puesto que los datos no son fiables para la obtención del nivel de servicio.

$$|\text{Velocidad}_{(i)} - \text{Velocidad}_{(i-1)}| > 55\text{km/h}$$

Método

La justificación del valor de velocidad es análoga al caso anterior, y por ello a continuación se presenta una gráfica temporal velocidad-ocupación con la tabla de valores como muestra de los datos registrados en la sección de medida ubicada en el PK 296,475 sentido creciente:



Gráfica 14: Gráfica temporal que relaciona la velocidad y ocupación de la sección de medida PK 296,475 sentido creciente durante 24 horas

En la gráfica puede observarse los valores de velocidad representados en color rojo y la ocupación en azul. Son valores de la sección de medida a lo largo de un periodo de tiempo, un día. En el primer tramo desde la izquierda, cuando la velocidad comienza a bajar, lo hace de forma escalonada y sin saltos bruscos. De la misma forma que los valores de ocupación comienzan a subir.

También puede observarse en la gráfica un “pico” de ocupación en la parte derecha de la curva, que corresponde a una variación brusca de ocupación de un periodo de integración al consecutivo, de forma que este valor, se desecharía.

La tabla 19 representa los valores numéricos correspondientes a las situaciones descritas anteriormente. En la parte izquierda pueden verse los

valores escalonados sin saltos bruscos cuando baja la velocidad y sube la ocupación. En la parte derecha de la tabla, marcado en rojo pueden verse los saltos bruscos.

Método

periodo de registro	Ocupación (%)	Velocidad (Km/h)	Intensidad (veh/h)
17/04/2006 11:17	8	122	2880
17/04/2006 11:18	7	119	2340
17/04/2006 11:19	8	117	2940
17/04/2006 11:20	8	115	2700
17/04/2006 11:21	5	126	1740
17/04/2006 11:22	6	125	2400
17/04/2006 11:23	8	107	2580
17/04/2006 11:24	15	104	3780
17/04/2006 11:25	6	123	1980
17/04/2006 11:26	6	117	2340
17/04/2006 11:27	11	112	3420
17/04/2006 11:28	10	113	3360
17/04/2006 11:29	13	109	3900
17/04/2006 11:30	8	111	2640
17/04/2006 11:31	6	119	2580
17/04/2006 11:32	5	120	2160
17/04/2006 11:33	10	115	3300
17/04/2006 11:34	11	111	3420
17/04/2006 11:35	11	101	3360
17/04/2006 11:36	10	112	3360
17/04/2006 11:37	6	119	2040
17/04/2006 11:38	7	108	2460
17/04/2006 11:39	13	107	3780
17/04/2006 11:40	9	107	2580
17/04/2006 11:41	8	114	2760
17/04/2006 11:42	10	115	2820
17/04/2006 11:43	14	99	3660
17/04/2006 11:44	16	103	4260
17/04/2006 11:45	14	104	3660
17/04/2006 11:46	18	91	4380
17/04/2006 11:47	15	85	3300
17/04/2006 11:48	17	82	3540
17/04/2006 11:49	16	72	3360
17/04/2006 11:50	17	74	3360
17/04/2006 11:51	15	72	2940
17/04/2006 11:52	15	74	2880
17/04/2006 11:53	19	70	3420
17/04/2006 11:54	14	72	2760
17/04/2006 11:55	20	65	3240
17/04/2006 11:56	16	68	2940
17/04/2006 11:57	18	69	3240
17/04/2006 11:58	21	70	1800
17/04/2006 11:59	10	87	2280
17/04/2006 12:00	13	76	2880
17/04/2006 12:01	14	73	2880
17/04/2006 12:02	15	70	2880
17/04/2006 12:03	13	81	2580
17/04/2006 12:04	11	82	2580
17/04/2006 12:05	13	81	2760
17/04/2006 12:06	10	86	2640
17/04/2006 12:07	14	78	3000
17/04/2006 12:08	15	78	3000
17/04/2006 12:09	11	79	2400
17/04/2006 12:10	13	78	2820
17/04/2006 12:11	14	77	2820
17/04/2006 12:12	14	75	2880
17/04/2006 12:13	24	55	3480

periodo de registro	Ocupación (%)	Velocidad (Km/h)	Intensidad (veh/h)
17/04/2006 19:43	13	74	2520
17/04/2006 19:44	15	69	2640
17/04/2006 19:45	16	63	2820
17/04/2006 19:46	9	77	1920
17/04/2006 19:47	16	66	2760
17/04/2006 19:48	11	67	2220
17/04/2006 19:49	14	61	2400
17/04/2006 19:50	22	40	2340
17/04/2006 19:51	37	19	840
17/04/2006 19:52	57	14	1380
17/04/2006 19:53	0	0	0
17/04/2006 19:54	63	5	360
17/04/2006 19:55	45	12	1500
17/04/2006 19:56	30	32	1080
17/04/2006 19:57	23	40	2460
17/04/2006 19:58	27	38	2880
17/04/2006 19:59	21	46	2760
17/04/2006 20:00	18	51	2700
17/04/2006 20:01	11	67	2220
17/04/2006 20:02	10	76	2340
17/04/2006 20:03	13	74	2700
17/04/2006 20:04	13	75	2640
17/04/2006 20:05	7	86	1980
17/04/2006 20:06	10	81	2220
17/04/2006 20:07	10	81	2160
17/04/2006 20:08	11	80	2520
17/04/2006 20:09	13	75	2580
17/04/2006 20:10	10	77	2400
17/04/2006 20:11	12	72	2580
17/04/2006 20:12	10	73	2400
17/04/2006 20:13	14	76	2820
17/04/2006 20:14	14	69	2580
17/04/2006 20:15	14	72	2820
17/04/2006 20:16	10	79	2160
17/04/2006 20:17	14	72	2700
17/04/2006 20:18	12	64	2160
17/04/2006 20:19	20	41	2280
17/04/2006 20:20	13	38	1440
17/04/2006 20:21	22	45	2760
17/04/2006 20:22	19	57	2940
17/04/2006 20:23	16	64	2700
17/04/2006 20:24	16	67	2880
17/04/2006 20:25	16	67	2940
17/04/2006 20:26	19	58	2880
17/04/2006 20:27	15	55	2460
17/04/2006 20:28	22	42	2160
17/04/2006 20:29	37	28	2520
17/04/2006 20:30	25	43	2880
17/04/2006 20:31	16	55	2340
17/04/2006 20:32	15	62	2640
17/04/2006 20:33	19	45	2460
17/04/2006 20:34	37	28	2220
17/04/2006 20:35	44	8	420
17/04/2006 20:36	85	21	60
17/04/2006 20:37	19	31	840
17/04/2006 20:38	30	32	1080
17/04/2006 20:39	23	42	2640

Tabla 19: Valores numéricos de la Gráfica 14.

- Filtro 9: se comprueba la congruencia entre los parámetros de número de vehículos y distancia de separación entre ellos. Si hay intensidad superior a 2 vehículos, la ocupación es positiva pero inferior al 100%, la distancia entre los vehículos debe ser superior a 0. Cuando algún registro incumple el filtro es descartado, puesto que es un error de detección de la espira.

$$(Intensidad > 2) \text{ AND } (Ocupación < 100\%) \text{ AND } (GAP > 0)$$

- Filtro 10: se comprueba que todas las variables de tráfico: velocidad, ocupación, intensidad, ligeros, pesados y distancia entre vehículos son iguales en el periodo de integración actual y el anterior. Si son iguales se descartan por mantenerse la información en el detector. En muchas ocasiones el detector se queda colgado y envía al centro de control la misma información hasta que es reparado o vuelve al correcto funcionamiento.
- Filtro 11: se comprueba que la suma de ligeros y pesados, no difiere del total del contaje en un X%. De forma que todos los vehículos que cuenta los clasifica, admitiendo un error de hasta un 20%, en este caso, de vehículos que no clasifique.

$$\left| N^{\circ} \text{vehículos}_{total} - \sum_{i=1}^n N^{\circ} \text{vehículos}_{clasificados} \right| > X\%$$

Siendo:

- $N^{\circ} \text{vehículos}_{total}$: el número de vehículos totales que se han contado, en contaje, medido en número de vehículos y no en intensidad (vehículos/hora).
- $\sum_{i=1}^n N^{\circ} \text{vehículos}_{clasificados}$: el número de vehículos que han sido clasificados por los “n” tipos de clasificación; en este caso la clasificación se establece para 2 categorías, ligeros y pesados; medido en número de vehículos.

Método

- X%, porcentaje que define la desviación de la “no coincidencia” del total de vehículos respecto a la suma de los “n” tipos clasificados:

$$\text{Contaje} \neq \sum_{i=1}^n N^{\circ} \text{vehículos}_{\text{clasificados}}, \text{ con el fin de englobar}$$

en dos grupos los datos: unos que la “no coincidencia” no sea >20%, y por tanto estos datos se pueden tratar para algoritmos de ingeniería de tráfico tales como niveles de servicio, estados de tráfico y/o tiempos de recorrido. Y otro grupo en el que esta desviación es muy amplia y por tanto este dato no se utilizará para algoritmos de ingeniería de tráfico.

El porcentaje de desviación utilizado, 20%, ha sido el propuesto por el subcomité 15 “Calidad de datos” del comité técnico de normalización 199 “equipamiento para la gestión del tráfico” en la propuesta de norma PNE199152-1-1 (2010) “Calidad de datos. Análisis de datos de tráfico”.

$$\text{Error}_{\text{Conteo}}(\%) = \frac{N^{\circ} \text{veh}_{\text{aut}} - N^{\circ} \text{veh}_{\text{VIDEOVERIF}}}{N^{\circ} \text{veh}_{\text{VIDEOVERIF}}} * 100$$

donde:

- $\text{Error}_{\text{Conteo}}$ es el error de conteo expresado en porcentaje (%).
- $N^{\circ} \text{veh}_{\text{aut}}$ es el número de vehículos medidos de forma automática, por la ETD.
- $N^{\circ} \text{veh}_{\text{VIDEOVERIF}}$ es el número de vehículos reales que han pasado por la sección de medida, obtenidos a partir de una videoverificación (contaje manual).

$$\text{Error}_{\text{Ligeros} \rightarrow \text{Pesados}}(\%) = \frac{N^{\circ} \text{veh}_{\text{lig} \rightarrow \text{pes}}}{N^{\circ} \text{veh}_{\text{lig}}} * 100$$

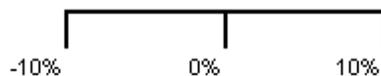
$$\text{Error}_{\text{Pesados} \rightarrow \text{Ligeros}}(\%) = \frac{N^{\circ} \text{veh}_{\text{pes} \rightarrow \text{lig}}}{N^{\circ} \text{veh}_{\text{pes}}} * 100$$

$$|\text{Error}_{\text{Clasificación}}(\%)| = \frac{N^{\circ} \text{veh}_{\text{lig} \rightarrow \text{pes}} + N^{\circ} \text{veh}_{\text{pes} \rightarrow \text{lig}}}{N^{\circ} \text{veh}_{\text{lig}} + \text{pes}} * 100$$

donde:

- $Error_Ligeros \rightarrow Pesados$ es el error de vehículos que siendo ligeros se han clasificado como pesados, expresado en porcentaje (%).
- $Error_Pesados \rightarrow Ligeros$ es el error de vehículos que siendo pesados se han clasificado como ligeros, expresado en porcentaje (%).
- $N^{\circ} veh_lig \rightarrow pes$ es el número de vehículos que siendo ligeros se han clasificado como pesados.
- $N^{\circ} veh_pes \rightarrow lig$ es el número de vehículos que siendo pesados se han clasificado como ligeros.
- $N^{\circ} veh_lig$ es el número de vehículos reales ligeros.
- $N^{\circ} veh_pes$ es el número de vehículos reales pesados.
- $N^{\circ} veh_lig + pes$ es el número de vehículos reales totales tenidos en cuenta para la clasificación.

Para los algoritmos de nivel de servicio, el error del 20% propuesto en la norma PNE199152-1-1 (2010), comentada al inicio del filtro, es admisible porque no desvirtúa los valores de niveles de servicio obtenidos tanto por el algoritmo de nivel de servicio basado en HCM estático como dinámico. Y para el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, no interviene. El 20% representa un intervalo del +/-10% de vehículos por ello en valor absoluto es del 20%:



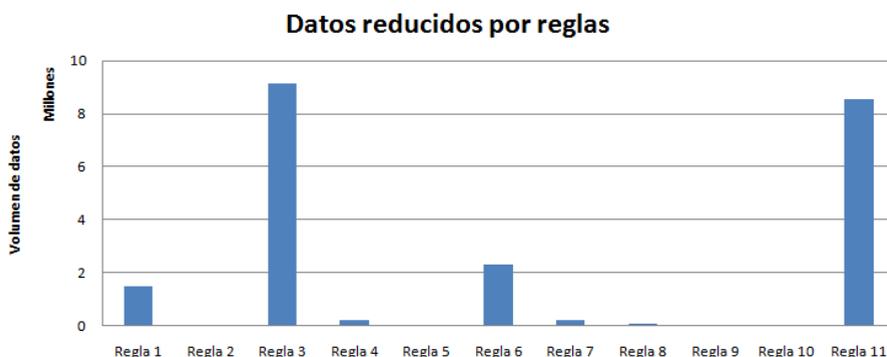
Método

Una vez definidos todos los filtros se ha procedido a la aplicación de los mismos sobre los datos recopilados para la presente tesis. La aplicación de filtros se ha realizado de forma secuencial. El cómputo total de datos asciende a 42.350.422 registros. De todos ellos se han reducido más de la mitad de ellos, concretamente 23.727.235 registros, en base a la aplicación de los filtros, a datos nulos o registros sin información. Y han sido empleados en los cálculos 18.623.187 registros. En la Tabla 20 se puede apreciar cuantos registros ha despreciado o reducido cada uno de los filtros. En el Anexo 6, en formato CD, se encuentran almacenados los datos originales, la aplicación de reducción de datos y los comandos para la extracción de los datos de la Base de Datos donde han sido almacenados para su extracción y posterior tratamiento. De esta manera se puede apreciar que todos ellos han eliminado, en mayor o menor manera, registros, implicando con ello que todos los filtros son útiles y necesarios para la reducción de datos.

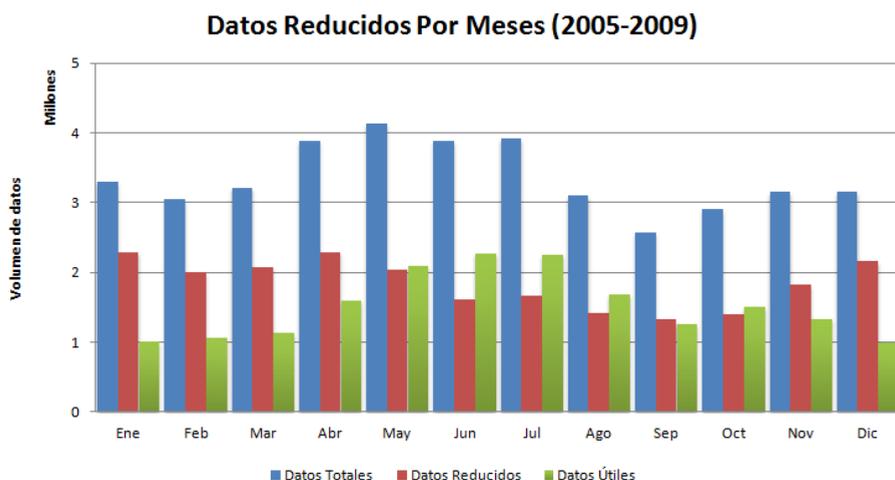
Totales	
Filtro 1	1.504.651
Filtro 2	50
Filtro 3	9.130.687
Filtro 4	194.159
Filtro 5	1.335
Filtro 6	2.291.947
Filtro 7	232.737
Filtro 8	83.980
Filtro 9	9.473
Filtro 10	29.637
Filtro 11	8.559.308

Tabla 20: Reducción de datos por cada una de las reglas.

Todos estos valores numéricos se han representado en la Gráfica 15, de manera que los filtros 1, 3, 6 y 11 han sido los que mayores registros han reducido. El filtro 1 y 6 están sobre el mismo orden de reducción de datos y el filtro 3 y 11 realizan un filtrado mucho mayor de registros, siendo el filtro 3 el que indica que no hay datos útiles puesto que no hay ni intensidad ni ocupación de la vía y el filtrado 11 es el correspondiente a la comprobación del porcentaje de ligeros y pesados.



Gráfica 15: Volumen de datos reducidos por cada regla.

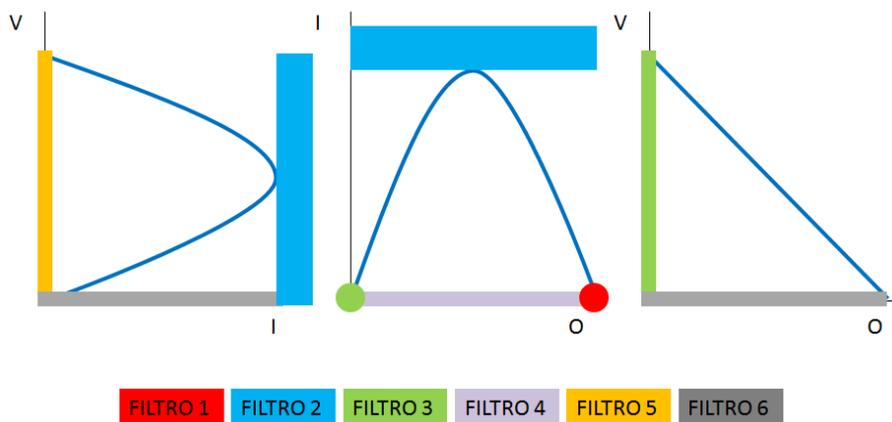


Gráfica 16: Volumen de datos inicial, reducidos y datos útiles.

En la Gráfica 16 se puede apreciar la reducción de datos por meses, desde mayo de 2005 hasta abril de 2009. En ella se distingue cuándo ha habido algún tipo de mantenimiento en la estación de toma de datos y en las espiras, siendo los mejores meses, en cuanto a calidad de datos junio y julio, puesto que tienen un gran volumen de registros, pero los registros reducidos han sido, proporcionalmente, inferiores al resto de meses. Siendo estos meses los que mayor número de registros han aportado al estudio junto con mayo.

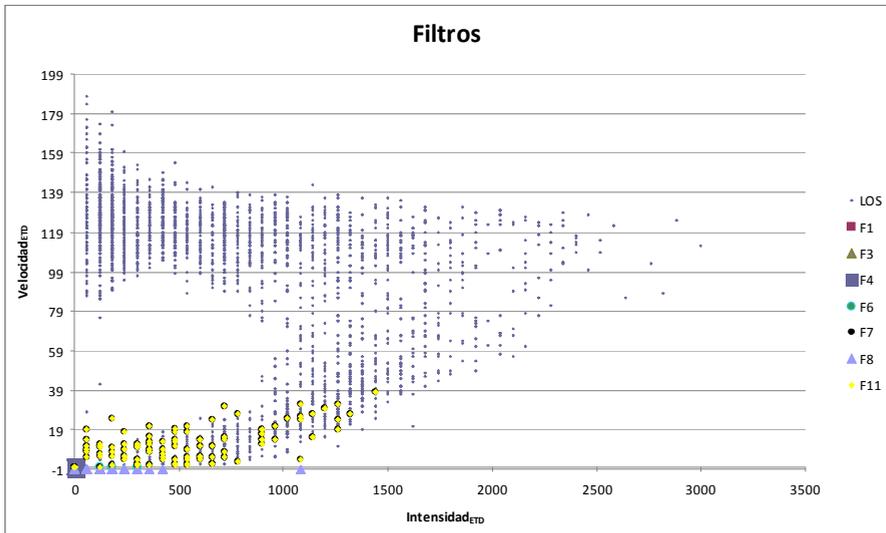
Método

Si representáramos los resultados de aplicar cada uno de los filtros en las curvas características de las relaciones fundamentales de la ingeniería del tráfico, (velocidad-Intensidad, Intensidad-ocupación, Velocidad-Ocupación) tendríamos las representaciones que se muestran en la Gráfica 17. En ella se aprecian las diferentes zonas o puntos en los que trabajan cada uno de los filtros.

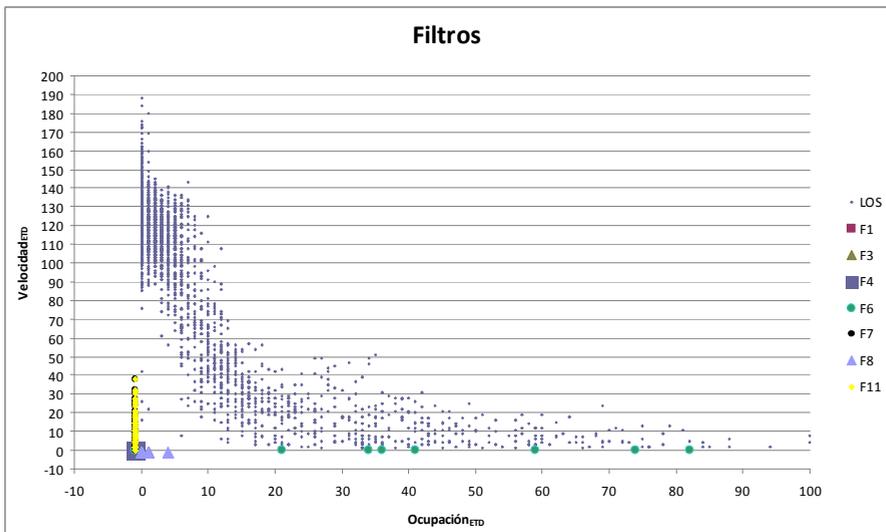


Gráfica 17: Significado de los filtros sobre las tres curvas características de las relaciones fundamentales de ingeniería de tráfico.

En las gráficas siguientes (Gráfica 18, Gráfica 19 y Gráfica 20) se han representado los filtros, sobre las curvas características (similar a la Gráfica 17), pero con datos reales. En las tres gráficas se han representado los mismos registros, pudiéndose observar la variabilidad de los puntos filtrados de una a otra curva característica. Se puede apreciar, a su vez, que hay registros cuyos valores son negativos. Ello es debido a que cuando la espira no obtiene un dato válido o correcto lo registra con valores negativos, para indicar su invalidez, quedando el valor marcado como no útil.

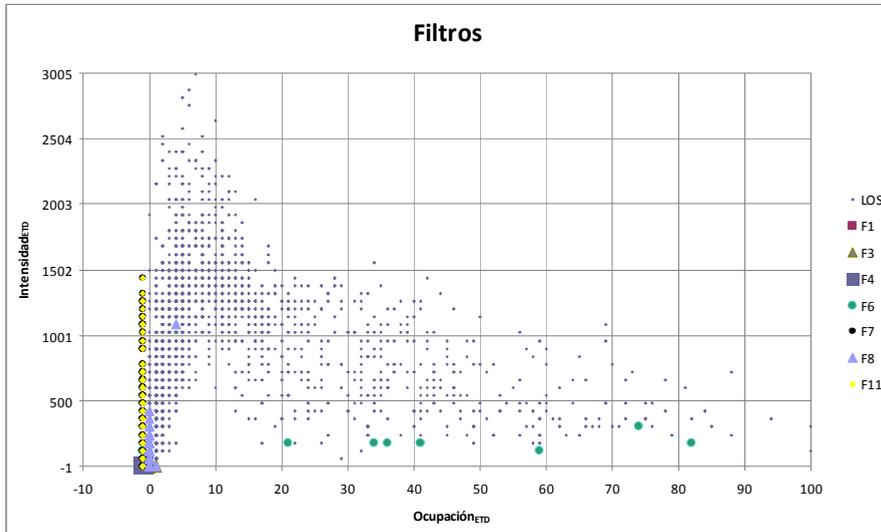


Gráfica 18: Representación de los filtros calculados sobre una curva característica de velocidad-intensidad.



Gráfica 19: Representación de los filtros calculados sobre una curva característica de velocidad-ocupación.

Método



Gráfica 20: Representación de los filtros calculados sobre una curva característica de intensidad-ocupación.

V.4. Propuesta de determinación de niveles de servicio

En este apartado se definen los modelos propuestos para el cálculo de los niveles de servicio, basados en los datos de tráfico obtenidos por las ETDs (Estación de Toma de Datos):

- Algoritmo de nivel de servicio basado en HCM 2000, denominado HCM dinámico 1, definido en el estado del arte III.3.3. Este modelo permite crear un patrón de referencia, utilizado solo a efectos de comparación, utilizando la velocidad de flujo libre la calculada en gabinete.
- Algoritmo de nivel de servicio basado en HCM 2000, denominado dinámico 2. Es una adaptación del algoritmo de nivel de servicio basado en HCM 2000, definido en el estado del arte III.3.3, pero tomando como velocidad

libre, la velocidad media geométrica para aquellos intervalos en los que los valores de intensidad de la sección de medida son estables e inferiores a 400 veh/h. Este valor, tal y como se ha comentado en las hipótesis de partida de la tesis, viene determinado por la experiencia práctica, en la DGT, que indica que cuando hay en la carretera una intensidad de 400 veh/h. es cuando éstos circulan a la velocidad libre.

- Algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz Velocidad-Ocupación.

Seguidamente se establece la comparativa de los resultados de los niveles de servicio obtenidos por cada modelo.

Para realizar la comparativa de resultados de cada uno de los modelos se ha tomado una muestra del experimento de 16 registros. Los datos obtenidos por la ETD de esta muestra se representan en la tabla 21:

muestra id	SECCIÓN DE MEDIDA	fecha	Nº carriles	Intensidad (veh/h)	Ocupación (%)	Velocidad (Km/h)	%Vehículos Ligeros	% Vehículos Pesados
1	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	2880	7	77	95,45	4,55
2	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	2	4380	7	120	75,76	24,24
3	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	2	1740	26	12	93,10	6,90
4	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	2520	7	63	97,62	2,38
5	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	3420	10	69	89,47	10,53
6	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	2880	7	77	95,00	5,00
7	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	2	4380	7	120	76,00	24,00
8	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	2	1740	26	12	93,00	7,00
9	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	2520	7	63	98,00	2,00
10	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	3420	10	69	89,00	11,00
11	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:36	2	3060	8	122	90,00	10,00
12	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:21	2	3240	9	123	92,00	8,00
13	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 10:23	2	2520	5	132	96,00	4,00
14	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 14:03	2	2460	5	92	89,00	11,00
15	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 17:22	2	2580	8	62	85,00	15,00
16	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 19:00	2	2160	3	106	88,00	12,00

Tabla 21: Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Datos de tráfico en periodo de 1 minuto.

V.4.1. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico 1

Este método de cálculo del nivel de servicio es el definido en el Manual de Capacidad. Considera los valores de intensidad y porcentaje de vehículos pesados de la ETD y no se considera el valor de velocidad obtenida de la ETD. Este criterio es el que más se adapta a la metodología descrita en el apartado “1.2.3 Metodología analítico-teórica de obtención del nivel de servicio”. Por tanto para este algoritmo el

Método

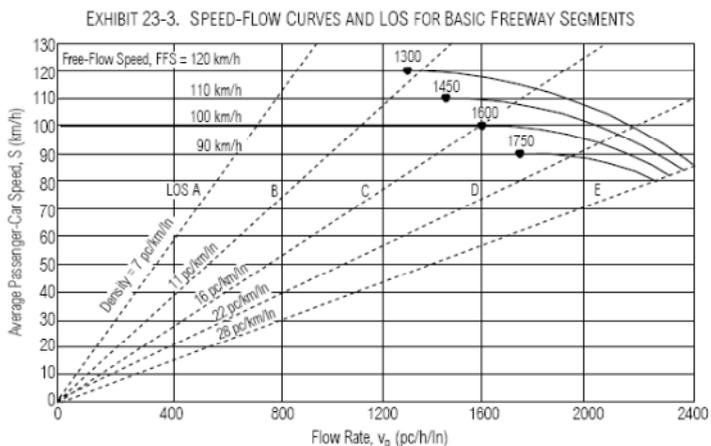
valor de Velocidad Libre Básica es un dato estático y siempre será el límite de velocidad de la vía, en este caso del experimento es $VLB = 120Km/h$.

Para la misma muestra del experimento, los valores obtenidos con el algoritmo dinámico 1 del HCM se muestran en la tabla 21:

muestra Id	1- VL	2-leq	3- fvp	4- C	5- Vc	6- IL	7- V	8- D	NS
1	111,70	1583,58	0,98	2358,50	84,23	1424,50	111,42	14,21	C
2	111,70	2640,27	0,89	2358,50	84,23	1424,50	57,18	46,17	F
3	111,70	967,74	0,97	2358,50	84,23	1424,50	111,70	8,66	B
4	111,70	1370,97	0,99	2358,50	84,23	1424,50	111,70	12,27	C
5	111,70	1935,48	0,95	2358,50	84,23	1424,50	105,97	18,26	D
6	111,70	1587,10	0,98	2358,50	84,23	1424,50	111,41	14,25	C
7	111,70	2637,42	0,89	2358,50	84,23	1424,50	57,51	45,86	F
8	111,70	968,23	0,97	2358,50	84,23	1424,50	111,70	8,67	B
9	111,70	1368,39	0,99	2358,50	84,23	1424,50	111,70	12,25	C
10	111,70	1939,84	0,95	2358,50	84,23	1424,50	105,85	18,33	D
11	111,70	1727,42	0,95	2358,50	84,23	1424,50	110,23	15,67	C
12	111,70	1811,61	0,96	2358,50	84,23	1424,50	108,92	16,63	D
13	111,70	1381,94	0,98	2358,50	84,23	1424,50	111,70	12,37	C
14	111,70	1395,32	0,95	2358,50	84,23	1424,50	111,70	12,49	C
15	111,70	1491,13	0,93	2358,50	84,23	1424,50	111,67	13,35	C
16	111,70	1230,97	0,94	2358,50	84,23	1424,50	111,70	11,02	C

Tabla 22: Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Obtención del nivel de servicio-algoritmo HCM dinámico 1.

A continuación se presentan dos gráficas, Gráfica 21 y Gráfica 22, que representan la relación velocidad, intensidad equivalente (V-leq), es decir, la representación de los pares de valores de los campos 7 y 2 de la tabla anterior, Tabla 22, calculados de acuerdo el algoritmo HCM dinámico 1, y que corresponden a las gráficas características del algoritmo HCM dinámico 1 de las secciones de medida, donde se observa que todos los valores se mueven a lo largo de la curva con poca dispersión de nube de puntos, ya que en este caso, hasta alcanzar el nivel de servicio D, la velocidad media de los vehículos que pasan (campo 7 de la tabla) es constante $V=111,42$ Km/h para una VLB tomada como constante= 120 Km/h:



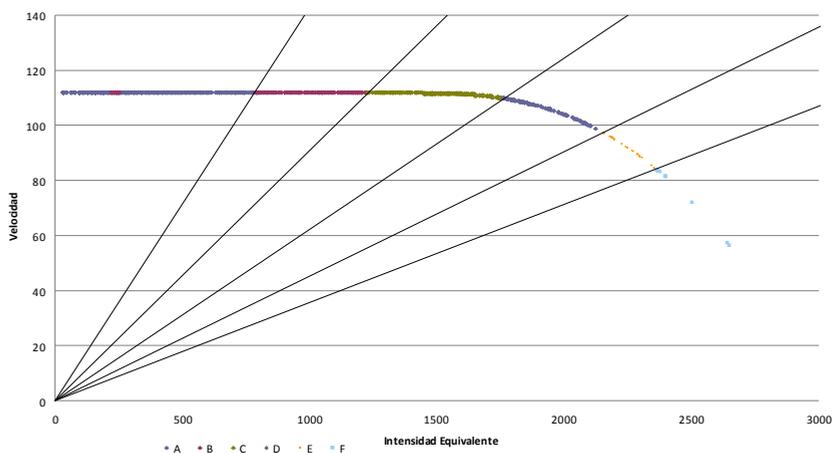
Note:
Capacity varies by free-flow speed. Capacity is 2400, 2350, 2300, and 2250 pc/h/ln at free-flow speeds of 120, 110, 100, and 90 km/h, respectively.

For $90 \leq FFS \leq 120$ and for flow rate (v_p)
 $(3100 - 15FFS) < v_p \leq (1800 + 5FFS)$,

$$S = FFS - \left[\frac{1}{28} (23FFS - 1800) \left(\frac{v_p + 15FFS - 3100}{20FFS - 1300} \right)^{2.6} \right]$$

For $90 \leq FFS \leq 120$ and
 $v_p \leq (3100 - 15FFS)$,
 $S = FFS$

Gráfica 21: Curva característica del algoritmo del manual de capacidad. HCM 2000.

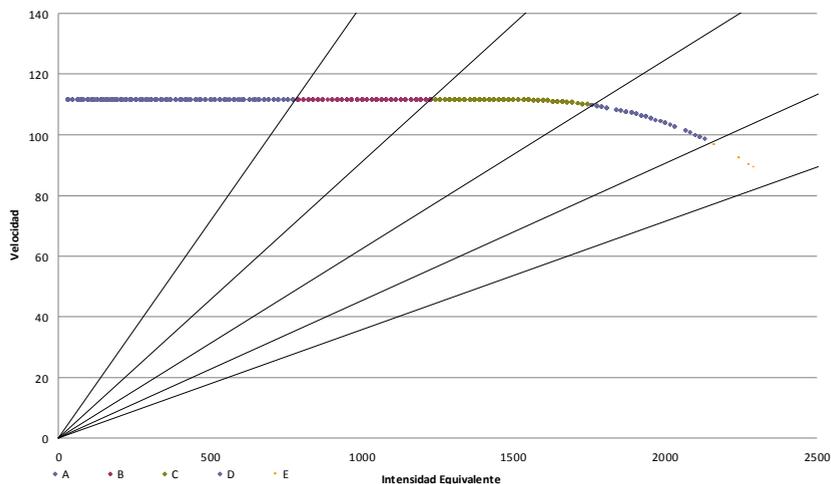


Gráfica 22: Curva característica del algoritmo HCM 2000 dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente el día 17/04/2006, 24h.

Método

En la Gráfica 22 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo HCM dinámico 1. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al día 17/04/2006 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido creciente. Puede observarse la partición de las rectas correspondientes a las pendientes que van tomando los valores de la densidad D para identificar los 6 niveles de servicio alcanzados.

En la Gráfica 23 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo HCM dinámico 1. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al día 20/03/2006 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido decreciente. Puede observarse la partición de las rectas correspondientes a las pendientes que van tomando los valores de la densidad D para identificar los 6 niveles de servicio alcanzados.



Gráfica 23: Curva característica del algoritmo HCM 2000 dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

V.4.2. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico 2

Este método está basado en la metodología descrita en el apartado III.3.3 “Metodología analítico-teórica de obtención del nivel de servicio”. Sin embargo esta propuesta considera la definición de la velocidad libre obtenida a partir de la velocidad media geométrica para aquellos intervalos en los que los valores de intensidad de sección de medida son inferiores a 400 veh/h.

La velocidad media geométrica se define como la máxima velocidad media que puede conseguirse en condiciones de seguridad en un tramo de carretera cuando las circunstancias meteorológicas y de tráfico son tan favorables que las únicas limitaciones vienen determinadas por las características del tramo. Esta velocidad es estable, no varía en cada periodo de integración, pero sí es específica de cada sección de medida. La tabla 23 muestra las velocidades geométricas de las secciones de medida del experimento.

SECCIÓN DE MEDIDA		Velocidad Media Geométrica	Nº registros
PK	SENTIDO		
186+450	DECREC	107,28	579.739
212+100	CREC	108,28	633.614
212+780	DECREC	114,74	333.301
242+000	CREC	110,23	649.842
248+010	DECREC	108,93	464.024
248+010	CREC	112,37	708.150
255+290	DECREC	112,68	451.573
255+290	CREC	106,86	505.285
270+000	DECREC	105,18	623.171
270+000	CREC	114,44	620.802
285+150	CREC	105,63	451.715
285+150	DECREC	109,61	477.476
291+450	CREC	110,63	310.596
296+475	CREC	107,57	373.090
296+475	DECREC	110,11	411.905

Tabla 23.- Velocidades geométricas de las secciones de medida.

La aplicación dinámica de este método se basa en considerar la velocidad libre como la velocidad media geométrica obtenida en cada sección de medida. Asimismo considera como valor de la intensidad, el valor obtenido por la ETD en el mismo periodo de integración.

Método

A continuación se detalla el proceso de cálculo del nivel de servicio mediante el algoritmo HCM dinámico 2, tomando los datos de velocidad, intensidad y % vehículos pesados de la ETD en cada periodo de integración de 1 minuto, para una muestra tomada del experimento. La metodología de cálculo se detalla en los siguientes pasos:

Paso 1: Se obtiene la velocidad libre en función de la velocidad geométrica de cada sección de medida, que es estable para todos los periodos de integración.

$$VL = V_{GEOM}$$

Paso 2: Obtención del factor de vehículos pesados, necesario para obtener la intensidad equivalente del paso 3:

$$f_{VP} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}, \text{ tomando}$$

$$P_T = \%Pesados_{ETD}$$

$$E_T(\text{camiones_buses}) = 1,5$$

$$E_R(\text{recreo}) = 1,5$$

Paso 3: Se obtiene la intensidad equivalente en función del factor de hora punta y el factor de vehículos pesados:

FHP : factor de hora punta. El intervalo del factor de hora punta en autopistas y autovías está entre 0,80 y 0,95.

$$FHP = \frac{I_{60}}{4 * I_{max15}} < 1$$

Ecuación 26: Cálculo del factor de hora punta.

Siendo:

I_{60} : Intensidad en la hora más cargada.

$I_{\max 15}$: Intensidad del cuarto de hora más alto de la hora.

Datos de la sección de medida PK285,15 DECRECIENTE:

fecha	I_{60}	I_{15}	fecha	I_{60}	I_{15}	fecha	I_{60}	I_{15}
0:14:00		85	8:14:00		159	16:14:00		576
0:29:00		65	8:29:00		156	16:29:00		570
0:44:00		58	8:44:00		206	16:44:00		587
0:59:00	272	64	8:59:00	754	233	16:59:00	2.369	636
1:14:00		44	9:14:00		264	17:14:00		622
1:29:00		90	9:29:00		312	17:29:00		501
1:44:00		138	9:44:00		348	17:44:00		456
1:59:00	371	99	9:59:00	1.315	391	17:59:00	2.054	475
2:14:00		116	10:14:00		425	18:14:00		520
2:29:00		240	10:29:00		455	18:29:00		492
2:44:00		173	10:44:00		526	18:44:00		612
2:59:00	594	181	10:59:00	2.005	599	18:59:00	2.153	529
3:14:00		182	11:14:00		639	19:14:00		588
3:29:00		105	11:29:00		593	19:29:00		577
3:44:00		77	11:44:00		577	19:44:00		513
3:59:00	432	68	11:59:00	2.340	531	19:59:00	2.278	600
4:14:00		47	12:14:00		562	20:14:00		538
4:29:00		43	12:29:00		563	20:29:00		592
4:44:00		33	12:44:00		585	20:44:00		578
4:59:00	150	27	12:59:00	2.299	589	20:59:00	2.307	599
5:14:00		21	13:14:00		546	21:14:00		646
5:29:00		20	13:29:00		481	21:29:00		690
5:44:00		26	13:44:00		579	21:44:00		582
5:59:00	102	35	13:59:00	2.157	551	21:59:00	2.620	702
6:14:00		27	14:14:00		528	22:14:00		567
6:29:00		57	14:29:00		685	22:29:00		512
6:44:00		43	14:44:00		538	22:44:00		515
6:59:00	194	67	14:59:00	2.300	549	22:59:00	2.181	587
7:14:00		62	15:14:00		367	23:14:00		510
7:29:00		81	15:29:00		370	23:29:00		595
7:44:00		127	15:44:00		565	23:44:00		279
7:59:00	413	143	15:59:00	1.924	622	23:59:00	1.595	211

Tabla 24: Obtención factor hora punta (*FHP*). Los valores I_{60} e I_{15} se expresan en número de vehículos.

$$FHP = \frac{2.620}{4 * 702} = \frac{2.620}{2.808} = 0,93 < 1$$

Método

$$I_{eq} = \frac{I}{FHP \cdot N \cdot f_{VP}}, \text{ tomando } I = I_{ETD}$$

$$FHP(0,85 - 0,95) = 0,93$$

Paso 4: Obtención de la capacidad

$$C = 1800 + 5VL$$

$$D_c = 28$$

Paso 5: Velocidad en capacidad

$$V_c = \frac{C}{D_c}$$

Paso 6: Intensidad límite

$$IL = 3100 - 15VL$$

Paso 7: Velocidad equivalente, en función de la velocidad libre.

Según la condición que relaciona la intensidad equivalente con la intensidad límite.

$$V \left\{ \begin{array}{l} I_{eq} < IL \Rightarrow V = VL = V1 \\ I_{eq} > IL \Rightarrow V = VL - (VL - V_c) \left(\frac{I_{eq} - IL}{C - IL} \right)^{2,6} = V2 \end{array} \right\}$$

Paso 8: Obtención de la densidad

$$D = \frac{I_{eq}}{V}$$

A partir de los valores obtenidos en el paso 8 donde se obtiene la densidad, se toma el valor de nivel de servicio según corresponde a la Tabla 16.

En la tabla 25 se muestran los valores obtenidos en cada paso de cálculo del algoritmo para cada muestra del experimento, así como el nivel de servicio obtenido:

muestra id	1- VL	2-leq	3- fvp	4- C	5- Vc	6- IL	7- V	8- D	NS
1	105,63	1583,58	0,98	2328,15	83,15	1515,55	105,59	15,00	C
2	105,63	2640,27	0,89	2328,15	83,15	1515,55	53,29	49,55	F
3	109,61	967,74	0,97	2348,05	83,86	1455,85	109,61	8,83	B
4	109,61	1370,97	0,99	2348,05	83,86	1455,85	109,61	12,51	C
5	109,61	1935,48	0,95	2348,05	83,86	1455,85	104,48	18,52	D
6	105,63	1587,10	0,98	2328,15	83,15	1515,55	105,59	15,03	C
7	105,63	2637,42	0,89	2328,15	83,15	1515,55	53,63	49,18	F
8	109,61	968,23	0,97	2348,05	83,86	1455,85	109,61	8,83	B
9	109,61	1368,39	0,99	2348,05	83,86	1455,85	109,61	12,48	C
10	109,61	1939,84	0,95	2348,05	83,86	1455,85	104,36	18,59	D
11	110,11	1727,42	0,95	2350,55	83,95	1448,35	108,87	15,87	C
12	110,11	1811,61	0,96	2350,55	83,95	1448,35	107,65	16,83	D
13	110,11	1381,94	0,98	2350,55	83,95	1448,35	110,11	12,55	C
14	114,44	1395,32	0,95	2372,20	84,72	1383,40	114,44	12,19	C
15	114,44	1491,13	0,93	2372,20	84,72	1383,40	114,35	13,04	C
16	114,44	1230,97	0,94	2372,20	84,72	1383,40	114,44	10,76	B

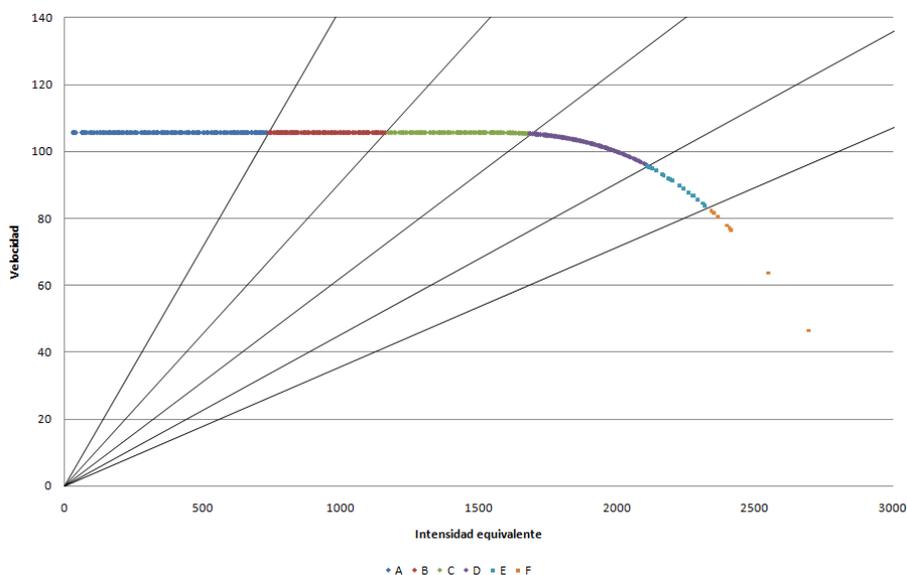
Tabla 25: Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Obtención del nivel de servicio-algoritmo HCM dinámico 2.

En la Tabla 25 se representa en la última columna los valores del nivel de servicio calculado basado en el algoritmo HCM dinámico 2 para cada registro de la muestra seleccionada. Cada columna desde la primera hasta la última, identifica cada valor obtenido en cada paso de cálculo del algoritmo. En la columna 1-VI se obtiene la velocidad libre, en la 2-leq la intensidad equivalente; en la 3-fvp el factor de vehículos pesados que interviene en el cálculo de la intensidad equivalente 2-leq; 4-C capacidad; en la 5-Vc velocidad en capacidad; en la 6-IL intensidad límite; en la 7-V es la velocidad equivalente en función de la velocidad libre según la relación entre intensidad equivalente e intensidad límite y en la 8-D densidad.

A continuación se presentan las gráficas velocidad, intensidad equivalente (V-leq), es decir la representación de los pares de valores de los campos 7 y 2 de la tabla

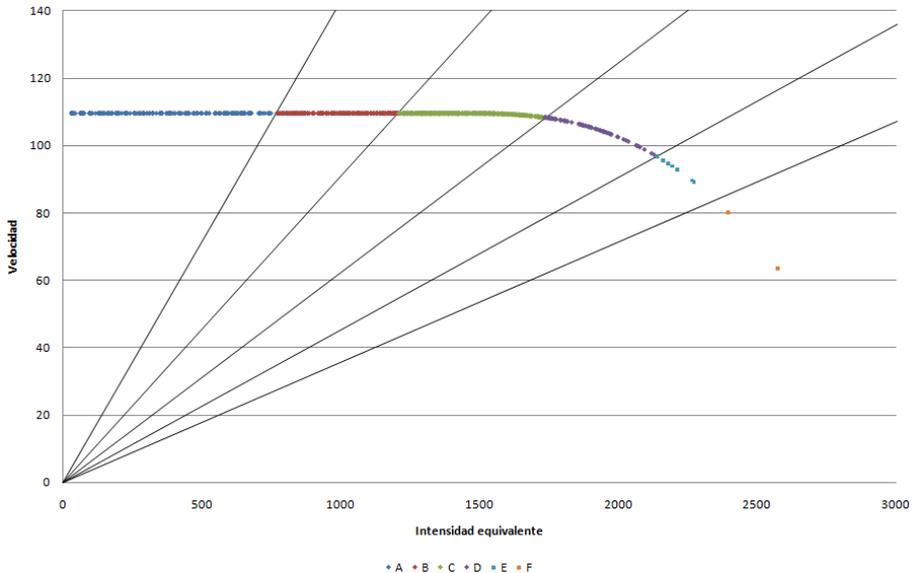
Método

anterior calculados de acuerdo al algoritmo HCM dinámico 2, que corresponden a las gráficas características de este algoritmo, de las dos secciones de medida, donde se observa que hay una dispersión de los valores y no se mueven a lo largo de un valor constante de velocidad hasta alcanzar el nivel de servicio C, como puede observarse en la curva característica del algoritmo según HCM (Gráfica 21) porque el valor tomado en el experimento es VLB=Velocidad Geométrica y que por tanto no es constante y varía en cada periodo de integración:



Gráfica 24: Curva característica del algoritmo HCM 2000 dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 04/09/2007.

En la Gráfica 24 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo HCM dinámico 2. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al día 04/09/2007 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido creciente. Puede observarse la partición de las rectas correspondientes a las pendientes que van tomando los valores de la densidad D para identificar los 6 niveles de servicio alcanzados.



Gráfica 25: Curva característica del algoritmo HCM 2000 dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

En la Gráfica 25 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo HCM dinámico 2. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al día 20/03/2006 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido decreciente. Puede observarse la partición de las rectas correspondientes a las pendientes que van tomando los valores de la densidad D para identificar los 6 niveles de servicio alcanzados.

V.4.3. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación

Este nuevo método aplica una propuesta sobre una de las tres curvas fundamentales de Ingeniería de Tráfico, la que relaciona la velocidad media y el porcentaje de tiempo de ocupación, medidas a través de los equipos de obtención de datos de tráfico ETDs. Se toma el porcentaje de ocupación como medida indirecta de la densidad.

Método

La ocupación viene definida como porcentaje de tiempo en el que la espira está ocupada. Se toma la ocupación como medida indirecta de la densidad, debido a que la densidad es una variable complicada de evaluar y de hecho no se puede calcular en situaciones reales. El HCM 2000 indica que la única forma de obtener el valor real de la variable densidad sería mediante fotografía aérea, técnica que no se ha utilizado en el estudio.

Como se observan en las tres curvas fundamentales de la ingeniería de tráfico, la relación entre la velocidad-ocupación, es una relación unívoca; donde a cada valor de ocupación (densidad) le corresponde un único valor de velocidad y viceversa.

Mientras que en los casos anteriores, para cada valor de intensidad se obtienen dos valores de velocidad u ocupación según corresponda. Dependiendo de las dos posibles situaciones en que pueda encontrarse: una en la parte estable de la curva, cuando no se ha alcanzado la intensidad máxima, y otra en la parte de régimen inestable, cuando ya se ha alcanzado la intensidad máxima y la curva presenta una dispersión considerable. Por este motivo, se considera la curva velocidad-ocupación como la relación óptima para la obtención del nivel de servicio.

V.4.3.1. Matriz de Nivel de Servicio

En la Tesis se elabora la propuesta de simplificar el cálculo del nivel de servicio mediante una agrupación en 4 nuevos niveles de servicio en vez de los 6 niveles de servicio que cita el HCM 2000, con el objeto de:

- Simplificar el cálculo del nivel de servicio
- Simplificar la interpretación del nivel de servicio
- Interpretar adecuadamente el nivel de servicio existente con la consiguiente actuación en base a dicho nivel de servicio por parte de un organismo competente en materia de Tráfico y Seguridad Vial.

La utilización de seis niveles de servicio, de la A a la F, según el Manual de Capacidad, ofrece unas posibilidades muy amplias en la interpretación de una determinada condición de Tráfico que de forma muy similar puede determinarse un nivel de servicio u otro de forma que no sea la elección más adecuada. Mediante la agrupación en menos niveles, se separan más los diferentes niveles entre sí, de forma que sea mayor la diferencia entre los diferentes niveles de servicio y la decisión tomada sea prácticamente inequívoca.

En esta tesis se propone la siguiente definición de niveles de servicio, estableciendo unos umbrales límite a nivel ilustrativo inicial:

- Nivel de servicio 1, tráfico fluido, circulación libre y la velocidad de los vehículos es prácticamente igual a la que eligen libremente sus conductores, y aunque se puedan ver influenciados por otros vehículos por un aumento de densidad, las características geométricas y las condiciones de la circulación son tales que los vehículos pueden conseguir velocidades medias superiores a 72 Km/h en autovías y una ocupación media inferior a 16%.
- Nivel de servicio 2, tráfico lento, la velocidad de los vehículos en su mayor parte deberá ajustarse teniendo en cuenta las de los vehículos que les preceden, aunque las condiciones son tales que la velocidad media de los vehículos se establece empíricamente en un intervalo entre 32 y 72 km/h y una ocupación entre 16 y 28%. Las posibilidades de adelantamiento son reducidas y se forman grupos de vehículos que van a la misma velocidad. La circulación sigue siendo estable.
- Nivel de servicio 3, retenciones, se producen paradas intermitentes. Las velocidades son reducidas y los vehículos alcanzan velocidades medias entre 8 y 32 Km/h y se presentan ocupaciones entre el 28 y 35%, llegándose a alcanzar la capacidad de la vía en ciertos instantes y aproximándose a la inestabilidad. Este estado presenta frecuentes detenciones bruscas y se circula con paradas y arrancadas sucesivas. Se observan largas colas, con una distancia entre vehículos muy pequeña, donde es casi imposible realizar adelantamiento entre vehículos.
- Nivel de servicio 4, congestión, corresponde a situaciones de paradas largas o detención total. El intervalo de la velocidad media está entre 0 y 8 Km/h y para una ocupación superior al 35%. En esta situación se supera la capacidad de la vía.

Así pues, según la definición anterior, de los niveles de servicios propuestos en esta tesis, y de la definición de los niveles de servicio del HCM 2000 mostrados en la figura 1, podrían relacionarse de la siguiente manera quedando esta asimilación supeditada a la verificación final:

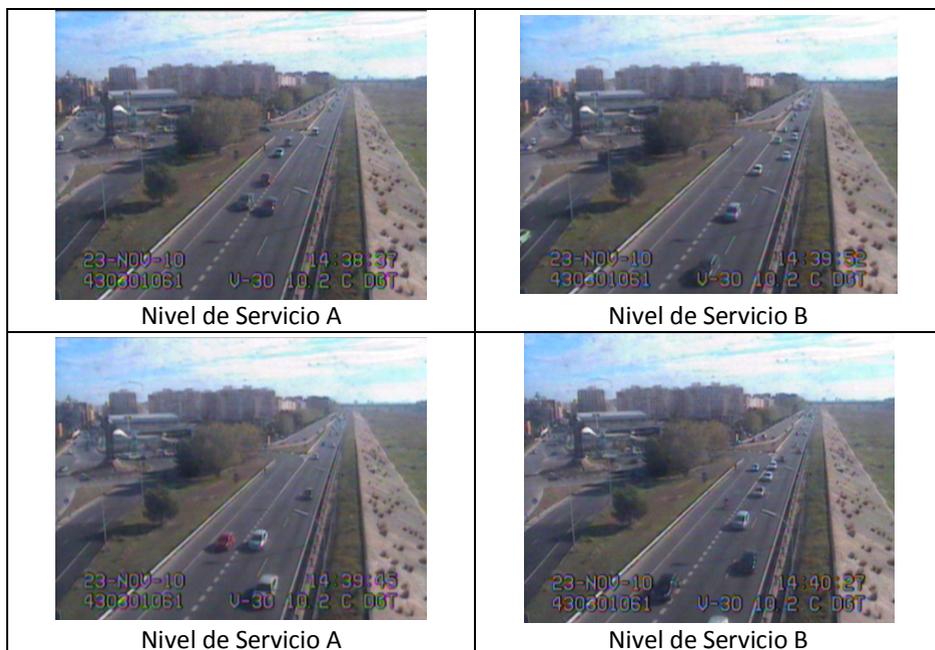
Método

- Nivel 1, se podría relacionar en la mayoría de los casos con los niveles A, B, C y D del HCM2000.
- Nivel 2, se podría relacionar con los niveles D y E del HCM2000.
- Nivel 3, se podría relacionar con los niveles D, E y F del HCM2000.
- Nivel 4, se podría relacionar con el nivel F del HCM2000.

Como puede observarse existen solapes en algunas situaciones.

Para validar empíricamente la agrupación de los niveles de servicio presentados anteriormente, se han tomado diferentes capturas de imágenes de las cámaras de video vigilancia de tráfico a diferentes horas de las condiciones de tráfico de forma que muestren que las medidas adoptadas para ambos niveles de servicio A y B o E y F son similares en cada uno de las dos agrupaciones, según Tráfico Fluido o Congestión respectivamente.

En la tabla 26 se muestra la comparación entre diferentes niveles de servicio A y B.



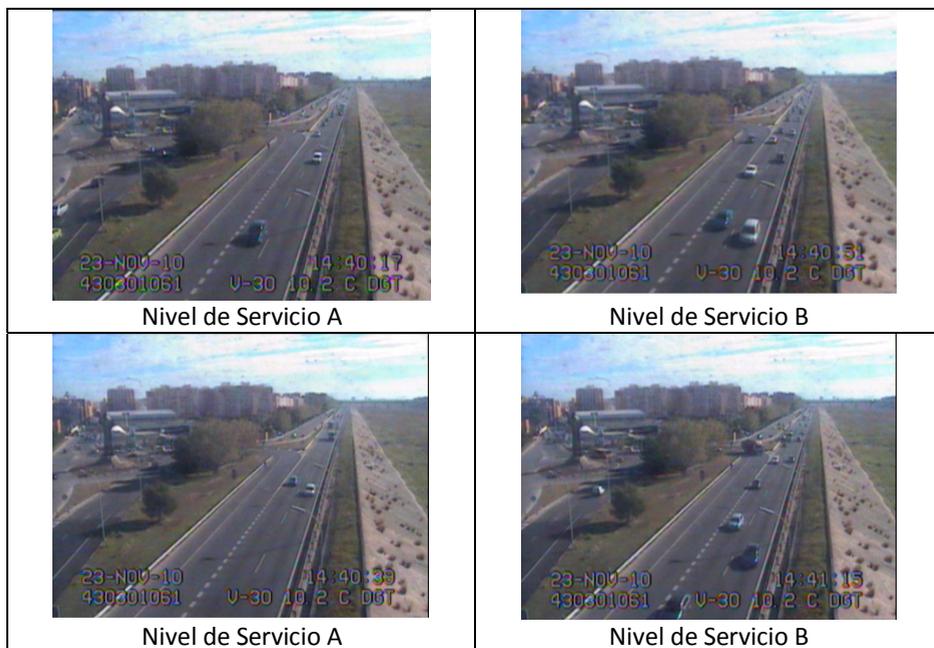
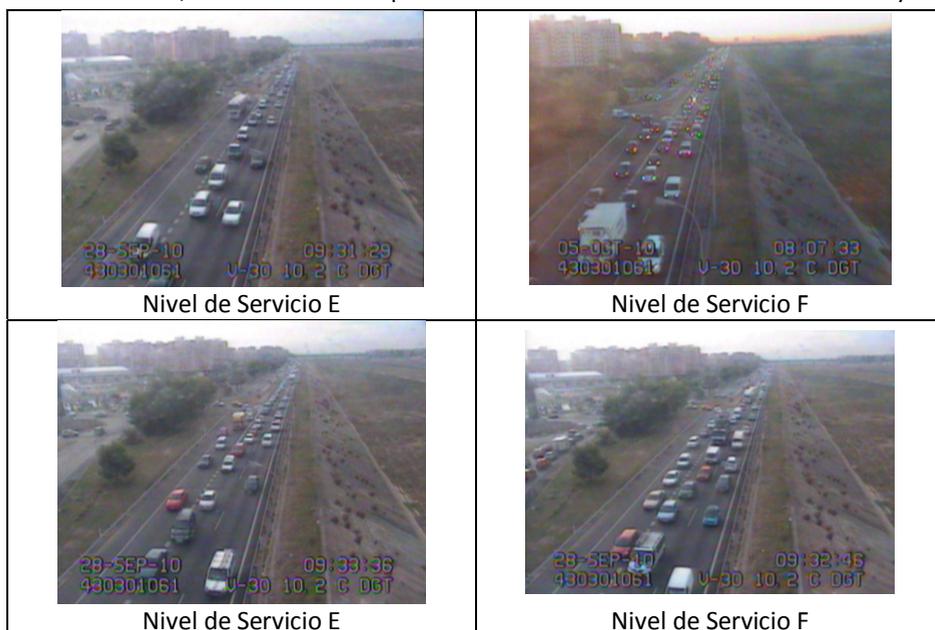


Tabla 26: Comparativa niveles servicio A y B del Manual de Capacidad

A continuación, se muestra la comparación entre diferentes niveles de servicio E y F.



Método

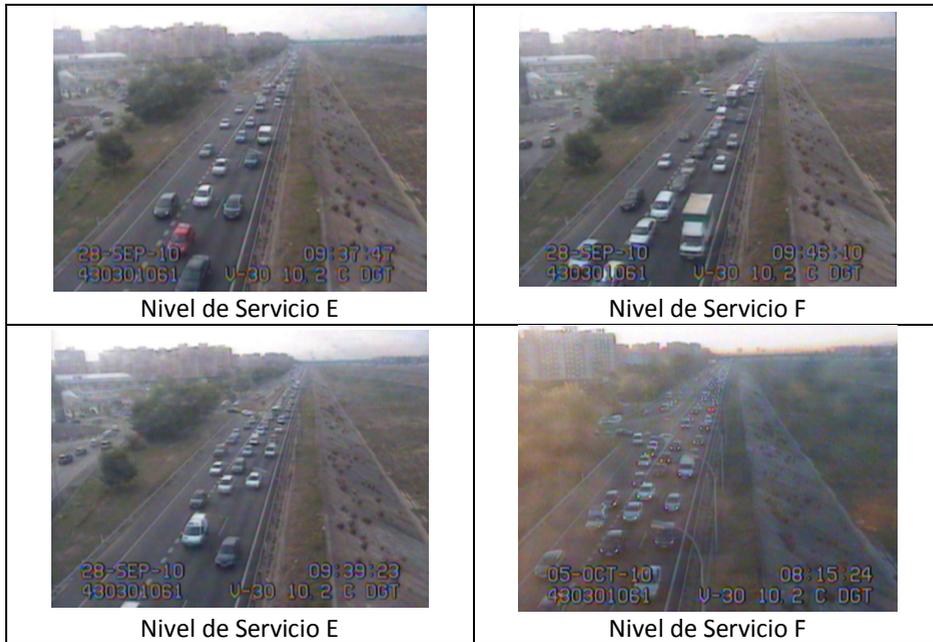
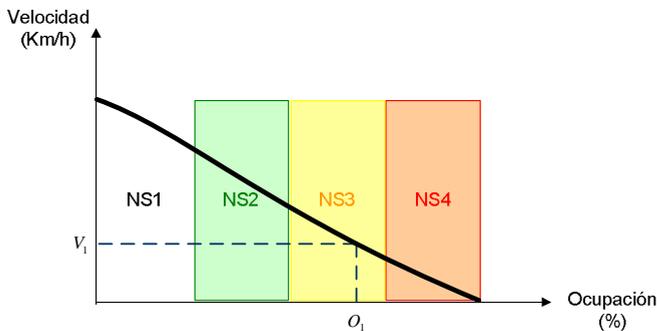


Tabla 27: Comparativa niveles servicio E y F del Manual de Capacidad

Además de estos cuatro niveles de servicio, se considera una nueva categoría ‘nivel de servicio indeterminado’ que corresponde a una relación incoherente entre velocidad y ocupación asignándole el color gris. De esta forma, la curva característica de ingeniería de tráfico velocidad-ocupación, se divide en ejes generándose las zonas que identifican los 4 niveles de servicio:



Gráfica 26: División en ejes sobre la curva fundamental de ingeniería de tráfico velocidad-ocupación

Esta división en ejes da lugar a la matriz que asignando umbrales de velocidad y ocupación, se obtiene el nivel de servicio:

Velocidad (Km/h)					
		1	1	2	0
V ₃ V ₂ V ₁	V ₃	1	1	2	0
	V ₂	2	2	2	3
	V ₁	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O ₁	O ₂	O ₃	Ocupación (%)

Gráfica 27: Matriz del Nivel de Servicio Actual

Se trata de un algoritmo, que únicamente requiere la configuración de 3 umbrales para la ocupación y 3 umbrales para la velocidad aplicado a la entidad tramo; y una matriz genérica para todo el sistema, siendo configurables los campos de la misma. El modo de funcionamiento es el siguiente:

Si por ejemplo una sección de medida tiene configurados los siguientes valores de umbrales (obtenidos a partir del ajuste de umbrales cuya metodología se detalla en el siguiente apartado):

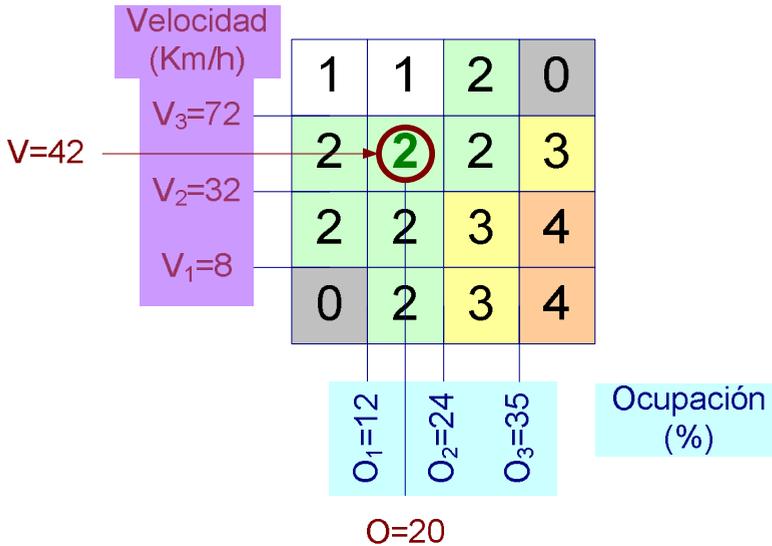
- $V_1 = 8$, $V_2 = 32$ y $V_3 = 72$
- $O_1 = 16$, $O_2 = 28$ y $O_3 = 35$

Y se obtiene en el periodo de integración de 1 minuto actual los siguientes valores de velocidad y ocupación:

- $V = 42\text{Km/h}$ y $O = 20\%$.

Método

Entrando en la matriz configurada, se obtendría un nivel de servicio actual. Por lo tanto el tramo correspondería al valor 2 (color verde), y resultaría una situación de tráfico lento.



Gráfica 28: Ejemplo Obtención Nivel de Servicio Actual

La matriz de nivel de servicio es configurable pero es única para todo el sistema, es decir que una vez configurada es la que toma el algoritmo de nivel de servicio, de forma que cada par de valores del periodo de integración en tiempo real, entran en la matriz y de acuerdo a los umbrales configurados, se le asigna el valor de la casilla correspondiente de la matriz.

El nivel de servicio obtenido para la sección de medida a partir de los valores de ocupación y velocidad medidos en la misma, se extrapola a la entidad lógica superior tramo. Se define tramo como la entidad lógica jerárquica superior, que corresponde a un tramo de carretera homogéneo, es decir con el mismo número de carriles en toda su extensión, sin variaciones de capacidad y sin interrupciones por enlaces, zonas de trenzado y/o accesos.

Lo normal es que un tramo esté formado por una única sección de medida; en este caso, el valor del nivel de servicio para la entidad tramo será el obtenido en la sección de medida.

V.4.3.2. Metodología para el ajuste de umbrales de las secciones de medida

Se trata de determinar los umbrales de velocidad: V1, V2 y V3 y de ocupación: O1, O2 y O3 para cada sección de medida. Los umbrales varían para cada sección de medida, por tanto se calculan para cada una de ellas. Aunque bien es cierto que hay muchas secciones de medida que se comportan de la misma forma y por tanto los umbrales coinciden o son muy similares. Si un punto de medida está situado en un acceso a una ciudad, la velocidad a la que se circula en situación de tráfico fluido, es inferior a la que se circula por un tramo de autopista.

De igual forma hay que considerar la geometría de la autopista (terreno llano y ondulado, rampas, pendientes y carriles adicionales), es decir en un tramo de curvas de la autopista, la velocidad media, será inferior que en los tramos rectos, siendo la situación de tráfico fluido en ambos casos.

En cuanto a la ocupación, hay que tener en cuenta que hay tramos de autopista con mayor flujo vehicular, por tanto el porcentaje de ocupación será mayor que otros, siendo el tráfico fluido.

Tras haber considerado los puntos anteriores, la determinación de los umbrales de velocidad y ocupación para cada punto de medida se realiza mediante los 3 pasos siguientes.

V.4.3.2.1 Obtención del tamaño de muestra

Se obtiene una muestra representativa sobre el número de gráficas históricas de cada sección de medida. Este tamaño de muestra estará basado sobre la totalidad de los vehículos que circulan por la autopista durante “n” meses. Se establece tomar una muestra, a partir de los datos almacenados en la base de datos del sistema, que sea estadísticamente representativa, razonable en tiempo de almacenamiento de datos y refleje el comportamiento total de la población.

Método

Para determinar el tamaño y fiabilidad de la muestra hay que considerar los siguientes parámetros:

- Nivel de confianza de la muestra.
- Composición y niveles de servicio (que se encuentren los 4 niveles de servicio: 1, 2, 3 y 4).
- Errores de detección de datos, o intervalos en el que no se han registrado valores de velocidad y ocupación, que determinan los niveles de servicio de la sección de medida.
- Tamaño total de la población, considerando la población como el número de gráficas correspondientes a un día de toma de datos por sección de medida.

La fórmula para el cálculo del tamaño de la muestra a utilizar en una sección de medida sometida al proceso de verificación, según Fernández P.S. (1996) será la siguiente:

$$N = \frac{N_p}{1 + \frac{(p_m - p_{pob})^2 * (N_p - 1)}{Z^2 * p * q}}, \text{ donde:}$$

- N es el tamaño de la muestra estadísticamente representativa.
- N_p es el tamaño total de la población, que corresponderá a la IMD registrada en la sección de medida.
- $(p_m - p_{pob})$ es el margen de error tolerable. Se considera un 2%.
- p_m es el margen de error admisible.
- p_{pob} es el margen de error permanente en la medición de la variable a estimar.
- q este parámetro asume qué proporción de la muestra no puede representar las mismas características de la población, debido a diversos factores subjetivos y objetivos de los individuos u objetos que conforman la población. Para tamaños de población elevados, como es el caso que nos ocupa, se adoptan parámetros entre el 2 y el 10%.

- p es la probabilidad que tiene la muestra en poseer las mismas cualidades de la población (homogeneidad). Como $p + q = 1$ (probabilidad máxima), entonces: $p = 1 - q$
- Z es el valor tipificado del Nivel de Confianza que en una distribución Normal $N(0,1)$ genera un valor X que deja dentro del intervalo $(-X, X)$ un porcentaje de área total igual al límite de confianza establecido, normalmente un 95% $\Rightarrow Z = 1,96$.

Con este valor se asegura que los valores que se obtengan sobre la muestra tienen una probabilidad del 95% de ser iguales a los obtenidos en caso de haber evaluado el 100%.

Para cada sección de medida se obtendrá un tamaño de muestra, de acuerdo a la IMD que se registre. A modo de ejemplo, se presentan los tamaños de muestras para las diferentes IMDs alcanzadas en las secciones de medida de la carretera CV-35 y CV-50 que presentan mismas condiciones que la carretera A-3 mostrada en el experimento de la tesis:

Método

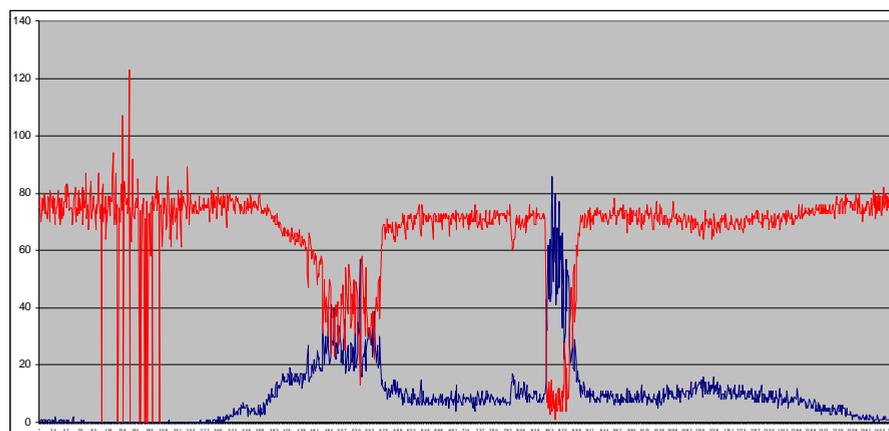
Nº de SEC	IMD	LIGEROS	PESADOS	MUESTRA SIN DISTINGUIR CLASIFICACIÓN							
				ERROR	p	q	Z	NUM	DEN 1	DEN 2	MUESTRA
SEC01 PK003+300C T CV-35	66.600	65.038	1.562	0,02	0,90	0,10	1,96	26,64	0,346	78,05	853
SEC02 PK003+300D T CV-35	67.271	65.555	1.716	0,02	0,90	0,10	1,96	26,91	0,346	78,827	853
SEC03 PK005+200C T CV-35	43.990	42.991	999	0,02	0,90	0,10	1,96	17,6	0,346	51,892	848
SEC04 PK005+200D T CV-35	48.129	46.433	1.696	0,02	0,90	0,10	1,96	19,25	0,346	56,68	849
SEC05 PK006+300C T CV-35	55.090	52.131	2.959	0,02	0,90	0,10	1,96	22,04	0,346	64,734	851
SEC06 PK006+300D T CV-35	53.322	51.699	1.623	0,02	0,90	0,10	1,96	21,33	0,346	62,688	851
SEC07 PK007+500C T CV-35	54.462	52.449	2.013	0,02	0,90	0,10	1,96	21,78	0,346	64,007	851
SEC08 PK007+500D T CV-35	53.843	50.051	3.791	0,02	0,90	0,10	1,96	21,54	0,346	63,291	851
SEC09 PK008+320C T CV-35	49.025	46.863	2.162	0,02	0,90	0,10	1,96	19,61	0,346	57,717	849
SEC10 PK008+320D T CV-35	51.778	48.562	3.216	0,02	0,90	0,10	1,96	20,71	0,346	60,902	850
SEC11 PK009+220C T CV-35	32.963	31.614	1.349	0,02	0,90	0,10	1,96	13,18	0,346	39,135	842
SEC12 PK009+220D T CV-35	30.817	30.005	812	0,02	0,90	0,10	1,96	12,33	0,346	36,652	841
SEC15 PK011+200C T CV-35	49.190	45.851	3.339	0,02	0,90	0,10	1,96	19,68	0,346	57,907	849
SEC16 PK011+200D T CV-35	49.027	45.443	3.584	0,02	0,90	0,10	1,96	19,61	0,346	57,72	849
SEC17 PK012+800D T CV-35	51.868	48.517	3.351	0,02	0,90	0,10	1,96	20,75	0,346	61,006	850
SEC18 PK012+800C T CV-35	51.750	48.378	3.373	0,02	0,90	0,10	1,96	20,7	0,346	60,87	850
SEC19 PK014+850C T CV-35	41.259	38.189	3.070	0,02	0,90	0,10	1,96	16,5	0,346	48,733	847
SEC20 PK014+850D T CV-35	41.368	38.299	3.069	0,02	0,90	0,10	1,96	16,55	0,346	48,859	847
SEC21 PK016+750C T CV-35	33.378	30.478	2.901	0,02	0,90	0,10	1,96	13,35	0,346	39,615	843
SEC22 PK016+750D T CV-35	33.479	30.785	2.693	0,02	0,90	0,10	1,96	13,39	0,346	39,731	843
SEC23 PK017+720C T CV-35	25.539	23.481	2.058	0,02	0,90	0,10	1,96	10,22	0,346	30,545	836
SEC24 PK017+720D T CV-35	20.349	18.296	2.053	0,02	0,90	0,10	1,96	8,139	0,346	24,541	829
SEC25 PK019+800C T CV-35	22.372	20.070	2.302	0,02	0,90	0,10	1,96	9,949	0,346	26,882	832
SEC26 PK019+800D T CV-35	22.719	20.176	2.543	0,02	0,90	0,10	1,96	9,087	0,346	27,283	833
SEC27 PK022+900C T CV-35	17.019	15.075	1.944	0,02	0,90	0,10	1,96	6,807	0,346	20,689	823
SEC28 PK022+900D T CV-35	17.248	15.241	2.007	0,02	0,90	0,10	1,96	6,899	0,346	20,953	823
SEC29 PK024+780C T CV-35	13.915	12.118	1.796	0,02	0,90	0,10	1,96	5,565	0,346	17,097	814
SEC30 PK024+780D T CV-35	14.964	13.249	1.715	0,02	0,90	0,10	1,96	5,985	0,346	18,311	817
SEC31 PK026+700C T CV-35	8.791	7.466	1.325	0,02	0,90	0,10	1,96	3,516	0,346	11,169	787
SEC32 PK026+700D T CV-35	9.191	7.641	1.550	0,02	0,90	0,10	1,96	3,676	0,346	11,632	790
SEC33 PK027+540C T CV-35	7.586	6.386	1.200	0,02	0,90	0,10	1,96	3,034	0,346	9,7756	776
SEC34 PK027+540D T CV-35	7.941	6.513	1.427	0,02	0,90	0,10	1,96	3,176	0,346	10,185	780
SEC35 PK028+840C T CV-35	7.275	5.879	1.397	0,02	0,93	0,07	1,96	2,91	0,25	12,635	576
SEC36 PK028+840D T CV-35	7.228	6.086	1.143	0,02	0,93	0,07	1,96	2,891	0,25	12,56	576
SEC37 PK031+900C T CV-35	6.419	5.128	1.292	0,02	0,93	0,07	1,96	2,567	0,25	11,266	570
SEC38 PK031+900D T CV-35	6.368	5.195	1.173	0,02	0,93	0,07	1,96	2,547	0,25	11,183	569
SEC39 PK036+640C T CV-35	4.961	4.075	886	0,02	0,94	0,06	1,96	1,984	0,217	10,157	488
SEC40 PK036+640D T CV-35	4.925	3.898	1.026	0,02	0,94	0,06	1,96	1,969	0,217	10,09	488
SEC41 PK038+400C T CV-35	3.455	2.664	792	0,02	0,96	0,04	1,96	1,382	0,148	10,366	333
SEC42 PK038+400D T CV-35	3.470	2.721	749	0,02	0,96	0,04	1,96	1,388	0,148	10,407	333
SEC43 PK040+370C T CV-35	2.715	2.263	452	0,02	0,98	0,02	1,96	1,085	0,075	15,416	176
SEC44 PK040+370D T CV-35	2.841	2.343	499	0,02	0,98	0,02	1,96	1,136	0,075	16,089	177
SEC45 PK049+640C T CV-35	1.379	1.157	222	0,02	0,98	0,02	1,96	0,551	0,075	8,3205	166
SEC46 PK049+640D T CV-35	1.375	1.187	189	0,02	0,98	0,02	1,96	0,55	0,075	8,2995	166
SEC47 PK051+300C T CV-35	1.644	1.421	223	0,02	0,98	0,02	1,96	0,657	0,075	9,7302	169
SEC48 PK051+300D T CV-35	1.613	1.441	172	0,02	0,98	0,02	1,96	0,645	0,075	9,5657	169
SEC49 PK091+400C T CV-50	3.712	3.091	621	0,02	0,90	0,10	1,96	1,484	0,346	5,2928	701
SEC50 PK091+400D T CV-50	3.431	2.921	510	0,02	0,90	0,10	1,96	1,372	0,346	4,968	691
SEC51 PK093+870C T CV-50	6.001	5.351	650	0,02	0,93	0,07	1,96	2,4	0,25	10,597	566
SEC52 PK093+870D T CV-50	6.043	5.402	642	0,02	0,93	0,07	1,96	2,417	0,25	10,664	567
SEC53 PK094+980C T CV-50	8.649	7.733	916	0,02	0,96	0,04	1,96	3,459	0,148	24,448	354
SEC54 PK094+980D T CV-50	8.336	7.358	978	0,02	0,96	0,04	1,96	3,334	0,148	23,601	353

Según la tabla de datos que corresponde a una IMD real registrada en diferentes secciones de medida de la CV-35, se observa que para una IMD de más de 10.000 veh, basta con calcular los conglomerados para un tamaño de muestra de entre 800 y 900 curvas de datos. Esta muestra es suficientemente representativa, porque se alcanza una curva exponencial.

Una vez calculados los umbrales con el tamaño de muestra obtenida para cada sección de medida, se mantendrían estos umbrales obtenidos por el método de los conglomerados hasta que se aprecie una variación significativa en la IMD, en cuyo caso se procedería a un nuevo cálculo de umbrales con un nuevo tamaño de muestra.

V.4.3.2.2 Definición de intervalos genéricos por niveles de servicio

Aplicando esta fórmula estadística, se generan las N gráficas correspondientes para cada sección de medida. En una gráfica de muestra se obtienen los datos históricos de las variables de tráfico de velocidad y ocupación de cada una de las secciones de medida, en periodos de 1 minuto de 1 día, para hacer un seguimiento del comportamiento de ambas variables. La gráfica que se genera por día es de este tipo:

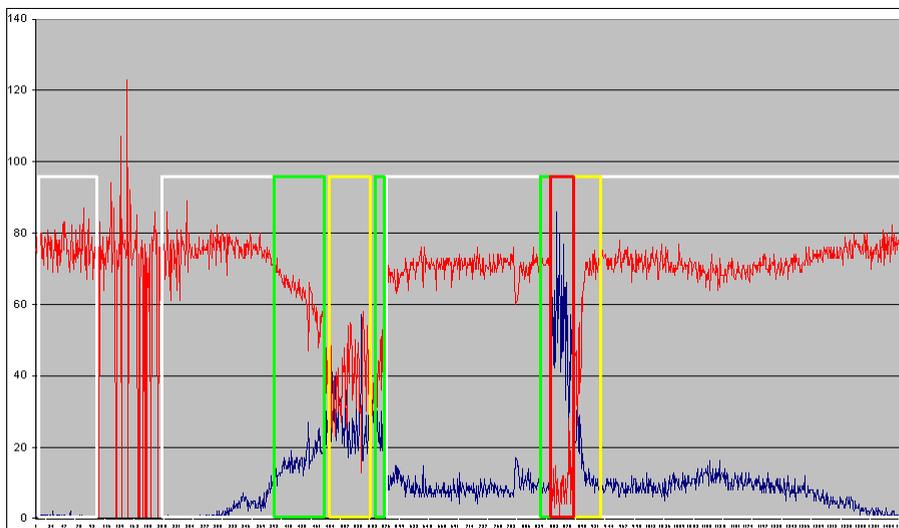


Gráfica 29: Representación temporal de la relación fundamental Velocidad-Ocupación de una sección de medida en 24 horas por pares de valores en periodos de 1 minuto (1.440 registros)

Método

La variable de velocidad se expresa por la curva de color rojo, expresada en (Km/h) y la curva de color azul corresponden a los valores de ocupación expresados en (%). Se observa la inflexión de los datos, a valores altos de velocidad, la ocupación es baja y viceversa. Cuando la velocidad baja, la ocupación sube. Las inflexiones determinan los pares de valores velocidad-ocupación que definen los 4 niveles de servicio.

Por tanto para cada gráfica, se establecen los intervalos que determinan los 4 niveles de servicio 1, 2, 3 y 4.



Gráfica 30: División en intervalos por niveles de servicio sobre la gráfica Velocidad-Ocupación de una sección de medida.

Como puede observarse en la gráfica de ejemplo, se establecen:

- 4 intervalos de nivel de servicio 1 en color blanco, que corresponde a un estado de tráfico fluido.
- 3 intervalos de nivel de servicio 2 en color verde, situación de estado de tráfico lento.
- 2 intervalos de nivel de servicio 3 en color amarillo, estado de tráfico con retenciones.

- 1 intervalo de nivel de servicio 4 en color rojo, estado de tráfico con congestión.

Durante las horas nocturnas (hasta las 06:00 horas aproximadamente), los valores de ocupación son muy bajos (aproximadamente del 0%), y los valores de velocidad muy altos, alcanzándose velocidades medias de hasta 120 Km/h. Se observan caídas de velocidad, es decir con valores de 0 Km/h, que corresponden a periodos de tiempo en los que no ha pasado ningún vehículo (en este caso, si se obtuviera la variable intensidad para el mismo periodo de integración de 1 minuto, dicho valor sería 0).

En la gráfica se observa hora punta de mañana en el intervalo de 08:00 a 10:00 horas, donde la velocidad baja considerablemente a la vez que la ocupación sube. Esto se repite en intervalo de punta de la tarde que sería de 18:00 a 20:00 horas aproximadamente.

Puede diferenciarse que la hora punta de la mañana es menos acentuada que la de la tarde, por lo que se distinguiría que en la punta de la mañana se forma el tráfico lento y se llegaría hasta la situación de demoras, mientras que la hora punta de la tarde representaría un estado de tráfico de congestión porque los valores de ocupación suben alcanzando valores máximos y los de velocidad bajan hasta registrarse periodos de integración con velocidades medias de 0 Km/h, lo que representa la situación clara de congestión.

Esta situación debe reforzarse con el ajuste visual mediante cámara de TV, de forma que se analicen los diferentes estados de tráfico que van sucediendo y ver la variación de los datos de velocidad y ocupación, de forma que permita optimizar los valores de los umbrales.

V.4.3.2.3 Análisis de conglomerados para la determinación de umbrales

La determinación de los umbrales de velocidad y de ocupación para cada sección de medida se justifica en la presente tesis mediante el análisis de conglomerados usando la técnica de las K-medias sobre el conjunto total de datos para cada uno de los puntos kilométricos estudiados. Según Pardo y Del Campo (2007), el análisis de conglomerados (cluster analysis) es una técnica multivariante que permite agrupar

Método

los casos o variables de un archivo de datos en función del parecido o similitud existente entre ellos. Este análisis calcula la distancia de cada uno de los puntos a un punto centroide del conjunto total de puntos, generándose de esta manera diferentes agrupaciones. Este algoritmo obtiene una partición directa de un conjunto de valores por variables cuantitativas. La propuesta de Lebart, L.; Morineau, A.; Piron, M. (1995) es utilizarlo para obtener una partición que minimice la inercia intraclases. Para el cálculo de conglomerados se ha hecho uso de una herramienta estadística, como es el SPSS (Statistical Package for the Social Sciences).

Conforme se van introduciendo valores uno a uno en el procedimiento, los centroides se va desplazando de su punto original al punto final a través de las diferentes iteraciones del procedimiento. El sistema detiene su cálculo cuando tras una iteración no ha habido cambios en el centroide obtenido. Una vez obtenidos los valores de los centroides, se deben determinar los límites, para ello se deben calcular los puntos medios entre cada uno de los centroides, tal y como se observa en el trabajo presentado por el Development Core Team (2007).

Para todas y cada una de las secciones de medida se ha realizado un estudio de k-medias sobre días con características similares de tráfico.

- **PK 186+450 Sentido decreciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	64,00	16,00	,00*	2,00
Velocidad	17,00	47,00	159,00	102,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	21,390	8,847	22,442	4,739
2	13,115	11,992	10,636	1,099
3	5,957	7,572	4,721	1,274
4	3,984	3,174	1,843	,761
5	2,484	1,538	,670	,168
6	,553	,553	,124	,208
7	,555	,287	,000	,138
8	,000	,062	,017	,074
9	,000	,034	,000	,029
10	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	49,33	29,81	3,46	16,22
Velocidad	13,94	21,03	112,07	48,84

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	39,57	23,02	9,84	0,00
Velocidad	0,00	17,49	34,91	80,46

Método

- **PK 212+100 Sentido creciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	,00*	6,00	18,00	41,00
Velocidad	152,00	113,00	65,00	16,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	16,364	9,006	2,819	19,604
2	15,208	1,614	1,453	10,616
3	5,671	,603	2,986	5,249
4	3,450	,154	3,143	2,808
5	2,930	,225	2,557	2,216
6	2,693	,400	1,524	1,266
7	1,841	,357	1,268	1,120
8	1,303	,148	1,026	,162
9	1,219	,364	,568	,638
10	,695	,212	,454	,465
11	,000	,066	,390	,155
12	,000	,021	,321	,306
13	,000	,022	,196	,154
14	,000	,022	,089	,000
15	,000	,000	,121	,154
16	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	1,73	11,88	26,58	57,12
Velocidad	119,12	58,29	22,14	10,11

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	41,85	19,23	6,81	0,00
Velocidad	0,00	16,13	40,22	88,71

- **PK 212+780 Sentido decreciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	81	18	3	0*
Velocidad	10	21	93	162

* Valor próximo a cero y positivo.

Método

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	,000	6,246	24,605	27,928
2	,000	5,340	,162	1,641
3	22,010	1,254	,521	,736
4	16,354	1,610	,284	,270
5	9,573	5,315	,143	,149
6	4,785	6,328	,156	,333
7	3,166	5,818	,062	,139
8	2,514	6,160	,060	,000
9	1,210	4,298	,108	,000
10	,857	2,274	,000	,000
11	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	53,75	27,13	14,04	2,01
Velocidad	12,31	24,11	60,14	116,66

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	40,44	20,59	8,03	0,00
Velocidad	0,00	18,21	42,13	88,40

- **PK 242+000 Sentido creciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	3	12	0*	69
Velocidad	94	32	156	12

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	21,732	7,571	25,171	14,917
2	,605	7,170	1,317	8,486
3	,950	3,891	,792	7,313
4	,873	3,996	,579	5,063
5	,792	5,026	,515	3,819
6	,028	4,504	,079	2,130
7	,130	4,955	,000	2,060
8	,181	3,187	,079	1,193
9	,280	3,445	,000	,334
10	,158	2,115	,000	,341
11	,051	,495	,000	,000
12	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	12,30	30,61	2,41	51,77
Velocidad	62,78	25,36	121,52	14,01

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Método

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	41,19	21,46	7,36	0,00
Velocidad	0,00	19,69	44,07	92,15

- **PK 248+010 Sentido decreciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	67,00	8,00	0,00*	14,00
Velocidad	12,00	80,00	162,00	40,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	21,670	8,316	21,829	8,411
2	3,579	1,024	9,070	7,502
3	6,565	2,191	5,771	11,320
4	2,951	2,655	3,397	11,288
5	3,175	1,615	1,585	6,453
6	2,554	,617	,699	3,330
7	1,283	,305	,204	1,982
8	,000	,508	,000	1,024
9	,689	,396	,015	,890
10	,668	,487	,056	,812
11	,000	,251	,116	,105
12	,000	,034	,000	,053
13	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	55,24	13,43	1,44	26,68
Velocidad	26,74	112,38	120,90	58,11

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	41,96	21,06	7,44	0,00
Velocidad	0,00	13,37	42,43	85,25

- **PK 248+010 Sentido creciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	10,00	24,00	,00*	84,00
Velocidad	77,00	18,00	156,00	11,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Método

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	17,308	22,713	28,591	26,482
2	,500	15,090	5,532	8,479
3	1,768	6,947	1,768	8,792
4	1,270	5,554	,997	5,046
5	,787	2,113	,497	1,854
6	,374	,876	,213	,928
7	,315	,300	,208	,000
8	,244	,000	,113	,000
9	,139	,000	,064	,000
10	,271	,000	,121	,000
11	,298	,300	,075	,000
12	,243	,149	,076	,000
13	,032	,000	,013	,000
14	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	15,22	29,39	3,01	49,07
Velocidad	51,21	20,81	114,89	12,44

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	39,23	22,31	9,12	0,00
Velocidad	0,00	16,63	36,01	83,05

- **PK 255+290 Sentido decreciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	26,00	39,00	10,00	,00*
Velocidad	33,00	14,00	84,00	151,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	9,896	14,826	11,923	18,666
2	13,611	5,095	,364	5,473
3	6,566	,000	,241	3,123
4	2,575	4,275	,516	1,440
5	2,083	3,523	,307	,864
6	,720	1,073	,106	,289
7	,470	2,116	,187	,266
8	,201	,000	,121	,173
9	,000	,000	,082	,078
10	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	26,11	51,12	16,99	1,74
Velocidad	18,12	10,84	48,80	119,21

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Método

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	38,62	21,55	9,37	0,00
Velocidad	0,00	14,48	33,46	84,01

- **PK 255+290 Sentido creciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	,00*	19,00	9,00	51,00
Velocidad	172,00	29,00	79,00	9,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	19,733	3,205	6,685	29,283
2	7,795	7,256	,120	7,728
3	4,436	5,326	,461	4,438
4	3,164	4,600	,948	4,808
5	1,870	3,413	,894	2,822
6	,928	2,146	,617	2,210
7	,661	,798	,492	,485
8	,000	,140	,048	,000
9	,000	,121	,042	,000
10	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	2,64	29,58	14,51	53,96
Velocidad	117,49	15,26	43,81	12,98

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	41,77	22,05	8,58	0,00
Velocidad	0,00	14,12	29,54	80,65

- **PK 270+000 Sentido decreciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	,00*	10,00	20,00	41,00
Velocidad	152,00	85,00	39,00	5,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Método

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	16,364	9,006	2,819	19,604
2	15,208	1,614	1,453	10,616
3	5,671	,603	2,986	5,249
4	3,450	,154	3,143	2,808
5	2,930	,225	2,557	2,216
6	2,693	,400	1,524	1,266
7	1,841	,357	1,268	1,120
8	1,303	,148	1,026	,162
9	1,219	,364	,568	,638
10	,695	,066	,321	,155
11	,000	,000	,121	,000
12	,000	,000	,089	,000
13	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	3,88	11,17	28,21	48,55
Velocidad	111,38	59,23	19,21	12,54

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	38,38	19,69	7,53	0,00
Velocidad	0,00	15,88	39,22	85,31

- **PK 270+000 Sentido creciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	17	28	0*	60
Velocidad	23	9	156	12

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	21,732	7,571	25,171	14,917
2	,605	7,170	1,317	8,486
3	,950	3,891	,792	7,313
4	,873	3,996	,579	5,063
5	,792	5,026	,515	3,819
6	,028	4,504	,079	2,130
7	,130	4,955	,000	2,060
8	,181	3,187	,079	1,193
9	,280	3,445	,000	,334
10	,158	2,115	,000	,341
11	,051	,495	,000	,000
12	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	11,24	24,63	1,78	46,33
Velocidad	51,26	19,43	124,06	12,81

Método

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	34,98	17,43	6,51	0,00
Velocidad	0,00	16,12	35,34	87,66

- **PK 285+150 Sentido creciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	6,00	43,00	24,00	37,00
Velocidad	81,00	9,00	19,00	13,00

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	24,835	23,244	9,111	10,956
2	7,078	5,487	7,305	,414
3	4,518	4,334	4,737	,898
4	3,085	2,927	2,883	1,577
5	1,840	1,657	1,539	1,684
6	1,220	,833	,622	1,569
7	,807	,000	,315	1,368
8	,713	,000	,349	1,475
9	,327	,000	,318	,798
10	,297	,000	,000	,671
11	,206	,000	,000	,537
12	,000	,000	,306	,060
13	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	1,87	53,09	14,14	30,24
Velocidad	118,33	12,24	41,73	14,75

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	40,65	24,99	8,01	0,00
Velocidad	0,00	13,50	28,24	80,03

- **PK 285+150 Sentido decreciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	34,00	19,00	40,00	,00*
Velocidad	80,00	22,00	32,00	140,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Método

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	9,484	9,483	24,946	21,608
2	1,676	4,626	4,990	6,768
3	2,286	4,362	3,525	3,777
4	2,393	1,433	1,263	2,234
5	1,743	,464	,443	1,348
6	,610	,000	,000	,453
7	,898	,391	,000	,599
8	,374	,000	,000	,258
9	,222	,000	,000	,147
10	,021	,000	,000	,014
11	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	12,30	24,40	45,50	2,46
Velocidad	44,80	19,50	10,00	117,22

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	34,90	18,30	7,36	0,00
Velocidad	0,00	14,75	32,15	81,01

- **PK 291+450 Sentido creciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	13,00	,00*	93,00	33,00
Velocidad	68,00	162,00	13,00	38,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	13,831	26,393	25,531	10,284
2	,641	6,228	17,276	5,005
3	,956	2,657	11,258	3,219
4	1,027	1,653	6,445	2,494
5	1,107	1,353	3,412	1,776
6	,821	,787	2,822	1,642
7	,873	,719	1,757	1,292
8	,676	,502	,390	,281
9	,000	,000	,101	,069
10	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	21,39	3,00	54,67	36,53
Velocidad	49,99	114,43	17,17	25,24

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Método

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	45,60	28,96	12,20	0,00
Velocidad	0,00	21,21	37,62	82,21

- **PK 296+475 Sentido creciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	62,00	,00*	24,00	3,00
Velocidad	10,00	160,00	39,00	79,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	19,945	19,444	10,626	2,808
2	13,452	7,283	5,207	,064
3	3,957	4,690	2,093	,443
4	2,598	2,737	,814	,744
5	2,313	1,523	,399	,593
6	,716	1,268	,130	,645
7	,700	,717	,049	,451
8	,000	,867	,000	,569
9	,000	,447	,291	,417
10	,000	,662	,503	,718
11	,000	,452	,511	,607
12	,700	,254	,126	,275
13	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	54,50	4,13	31,50	15,12
Velocidad	12,70	111,02	26,43	63,90

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	43,00	23,31	9,63	0,00
Velocidad	0,00	19,57	45,17	87,46

- **PK 296+475 Sentido decreciente**

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	,00*	55,00	5,00	30,00
Velocidad	159,00	16,00	72,00	25,00

* Valor próximo a cero y positivo.

Método

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	16,500	20,585	1,407	3,323
2	8,025	6,116	1,365	3,781
3	5,465	2,601	1,507	2,715
4	3,458	1,770	2,007	1,653
5	1,297	1,432	1,003	1,250
6	,706	,685	,608	,637
7	,716	,407	,668	,381
8	,703	,269	,716	,257
9	,024	,073	,060	,035
10	,552	,000	,606	,000
11	,178	,000	,386	,264
12	,000	,000	,079	,132
13	,000	,000	,000	,000

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	2,04	50,75	12,16	32,02
Velocidad	101,27	13,02	44,36	20,39

A continuación se presenta la tabla con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente.

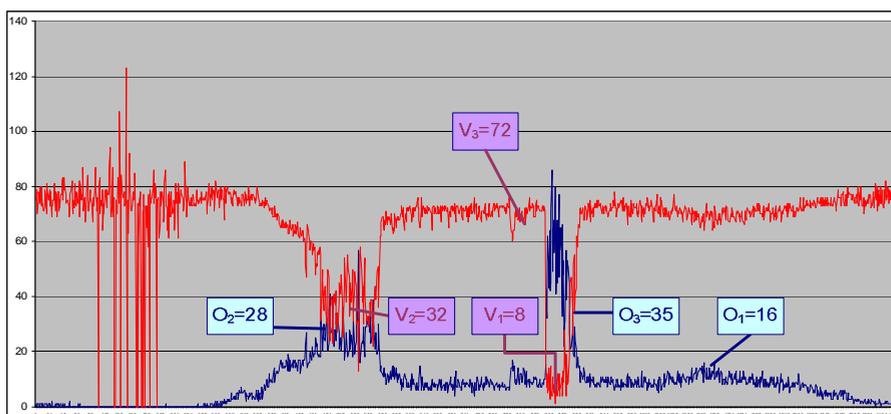
Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	41,39	22,09	7,10	0,00
Velocidad	0,00	16,70	32,37	72,82

V.4.3.3. *Umbrales ajustados para las secciones de medida del estudio*

Como puede observarse en la gráfica 31, el análisis en detalle de los conglomerados se corresponde a un análisis estadístico de alto nivel para determinar los umbrales asociados a cada intervalo.

Una vez fijados los umbrales, debe verificarse por cámara de TV para asegurarse que los valores fijados para cada sección de medida corresponden al tráfico real en carretera, con el fin de evitar malas interpretaciones (ejemplo: en un periodo de integración han pasado 2 camiones a una velocidad media de 85 Km/h, cuando las circunstancias normales por esa sección de medida se circula en situación de tráfico fluido a 125 Km/h).



Gráfica 31: Determinación de umbrales por aproximación genérica de alto nivel sobre la gráfica temporal de la sección de medida.

La tabla 28 presenta los umbrales asignados a cada una de las secciones de medida del estudio, basado en los datos obtenidos de cada ETD.

Método

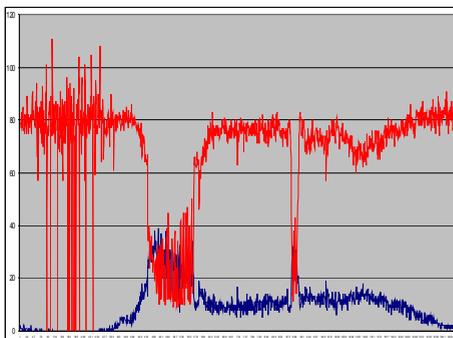
SECCIÓN DE MEDIDA		UMBRALES DE VELOCIDAD			UMBRALES DE OCUPACIÓN		
PK	SENTIDO	V1	V2	V3	O1	O2	O3
186+450	DECREC	17	35	80	10	22	40
212+100	CREC	16	40	89	7	19	42
212+780	DECREC	18	42	88	8	21	40
242+000	CREC	20	44	92	7	21	41
248+010	DECREC	21	42	85	7	20	41
248+010	CREC	17	36	83	9	22	39
255+290	DECREC	15	33	84	9	22	39
255+290	CREC	14	30	81	9	22	42
270+000	DECREC	16	39	85	8	20	38
270+000	CREC	16	35	88	7	17	35
285+150	CREC	14	28	80	8	25	41
285+150	DECREC	15	32	81	7	18	35
291+450	CREC	21	38	82	12	29	46
296+475	CREC	20	45	87	10	23	43
296+475	DECREC	17	32	73	7	22	41
PROMEDIO		17	37	84	8	22	40

Tabla 28: Umbrales alcanzados por el método de aproximación de conglomerados de las secciones de medida objeto de la tesis.

V.4.3.4. Caso práctico obtención nivel de servicio Matriz Velocidad-Ocupación del experimento

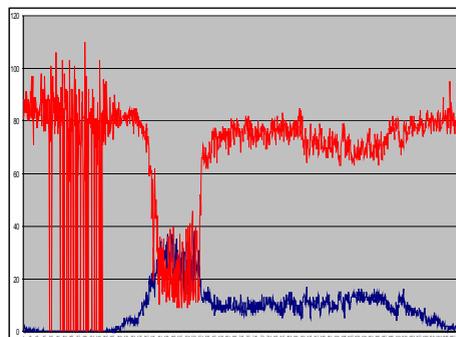
En este apartado se presentan los umbrales ajustados para cada sección de medida del experimento sobre la matriz, que es única para todo el sistema, y las gráficas sobre las que se ha realizado el ajuste.

PK186,45 DECRECIENTE					
80	V3	1	1	2	0
35	V2	2	2	2	3
17	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		10	22	40	



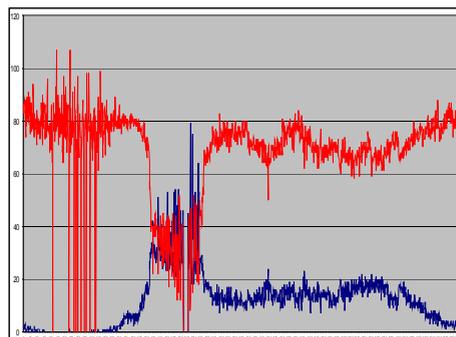
Gráfica 32: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK186,45 en sentido decreciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK212,1 CRECIENTE					
89	V3	1	1	2	0
40	V2	2	2	2	3
16	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		7	19	42	



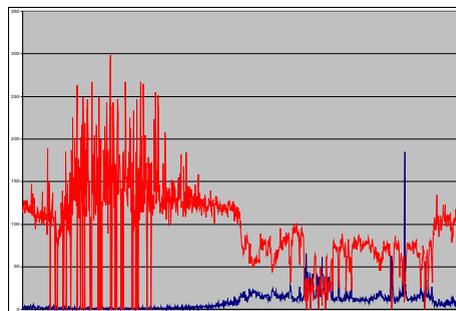
Gráfica 33: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK212,1 en sentido creciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK212,78 DECRECIENTE					
88	V3	1	1	2	0
42	V2	2	2	2	3
18	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		8	21	40	



Gráfica 34: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK212,78 en sentido decreciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

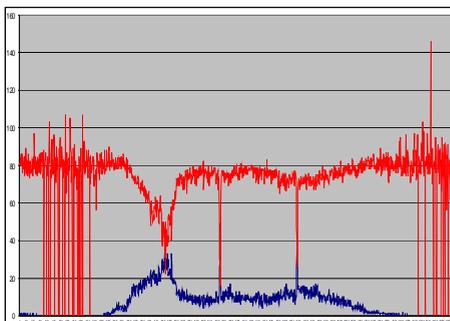
PK242 CRECIENTE					
92	V3	1	1	2	0
44	V2	2	2	2	3
20	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		7	21	41	



Gráfica 35: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK242 en sentido creciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

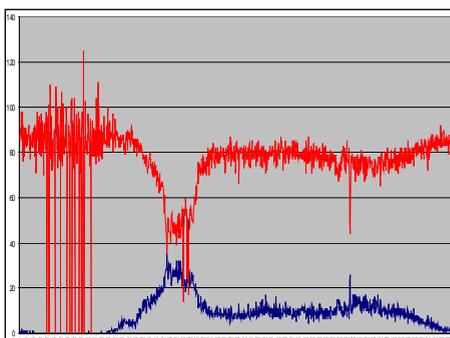
Método

PK248,01 DECRECIENTE					
85	V3	1	1	2	0
42	V2	2	2	2	3
21	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		7	20	41	



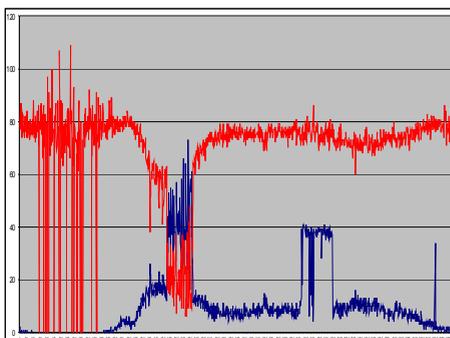
Gráfica 36: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK248,01 en sentido decreciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK248,01 CRECIENTE					
83	V3	1	1	2	0
36	V2	2	2	2	3
17	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		9	22	39	



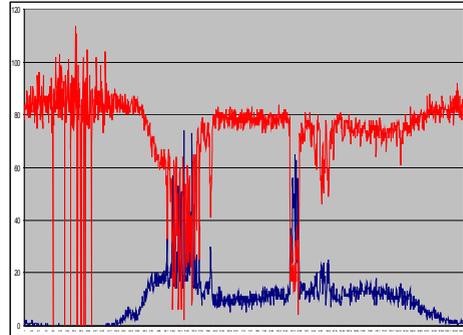
Gráfica 37: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK248,01 en sentido creciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK255,29 DECRECIENTE					
84	V3	1	1	2	0
33	V2	2	2	2	3
15	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		9	22	39	



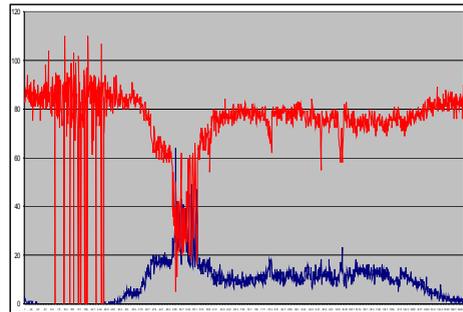
Gráfica 38: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK255,29 en sentido decreciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK255,29 CRECIENTE					
81	V3	1	1	2	0
30	V2	2	2	2	3
14	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		9	22	42	



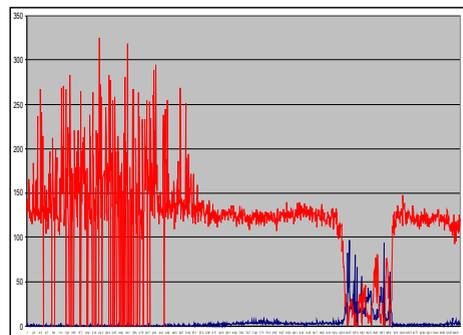
Gráfica 39: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK255,29 en sentido creciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK270 DECRECIENTE					
85	V3	1	1	2	0
39	V2	2	2	2	3
16	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		8	20	38	



Gráfica 40: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK270 en sentido decreciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

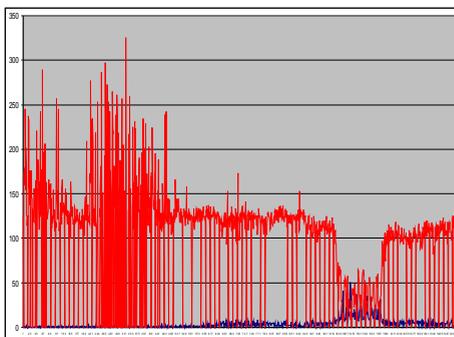
PK270 CRECIENTE					
88	V3	1	1	2	0
35	V2	2	2	2	3
16	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		7	17	35	



Gráfica 41: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK270 en sentido creciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

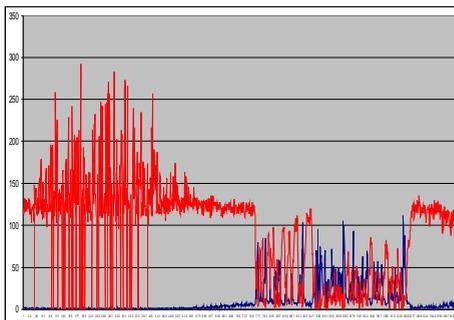
Método

PK285,15 DECRECIENTE					
81	V3	1	1	2	0
32	V2	2	2	2	3
15	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		7	18	35	



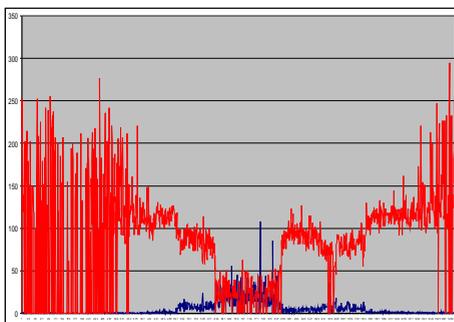
Gráfica 42: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK285,15 en sentido decreciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK285,15 CRECIENTE					
80	V3	1	1	2	0
28	V2	2	2	2	3
14	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		8	25	41	



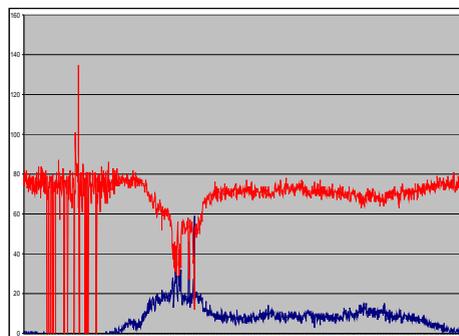
Gráfica 43: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK285,15 en sentido creciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK291,45 CRECIENTE					
82	V3	1	1	2	0
38	V2	2	2	2	3
21	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		12	29	46	



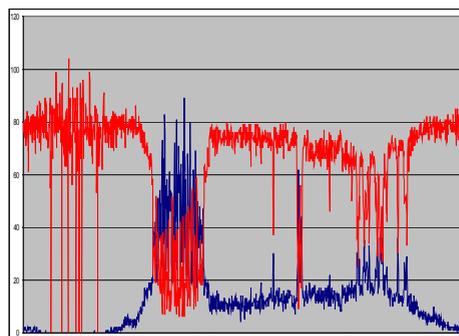
Gráfica 44: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK291,45 en sentido decreciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK296,475 CRECIENTE					
87	V3	1	1	2	0
45	V2	2	2	2	3
20	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		10	23	43	



Gráfica 45: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK296,475 en sentido creciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

PK296,475 DECRECIENTE					
73	V3	1	1	2	0
32	V2	2	2	2	3
17	V1	2	2	3	4
		0	2	3	4
		O1	O2	O3	
		7	22	41	



Gráfica 46: Representación de los umbrales de la sección de medida del PK296,475 en sentido decreciente y gráfica de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación.

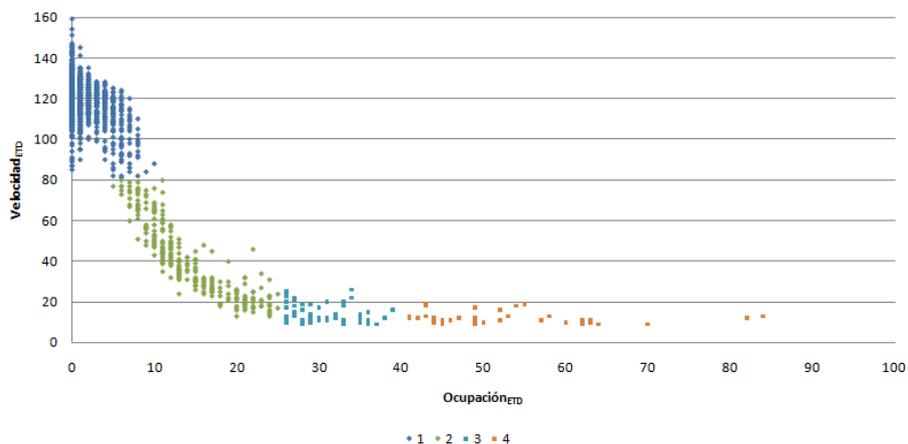
De la Gráfica 32 a la Gráfica 46 se han representado sobre la matriz del nivel de servicio basada en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación, los umbrales obtenidos para las secciones de medida tomadas como muestra del experimento. A la derecha de la matriz, se observan una de las gráficas de la muestra representativa sobre la que se han obtenido mediante conglomerados los umbrales de velocidad y ocupación para esta sección de medida. Como puede verse, el comportamiento de los pares de valores velocidad-ocupación son diferentes en cada caso.

Método

Para la muestra tomada del experimento, el nivel de servicio obtenido por este método es el representado en la parte amarilla, con la equivalencia de valores a las letras del HCM.

muestra id	SECCIÓN DE MEDIDA	fecha	Nº carriles	Intensidad (veh/h)	Ocupación (%)	Velocidad (Km/h)	%Vehículos Ligeros	% Vehículos Pesados	NS (V/D)	NS
1	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	2880	7	77	95,45	4,55	2	C
2	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	2	4380	7	120	75,76	24,24	1	A,B
3	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	2	1740	26	12	93,10	6,90	3	D
4	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	2520	7	63	97,62	2,38	2	C
5	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	3420	10	69	89,47	10,53	2	C
6	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	2880	7	77	95,00	5,00	1	A,B
7	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	2	4380	7	120	76,00	24,00	1	A,B
8	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	2	1740	26	12	93,00	7,00	3	D
9	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	2520	7	63	98,00	2,00	2	C
10	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	3420	10	69	89,00	11,00	1	A,B
11	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:36	2	3060	8	122	90,00	10,00	1	A,B
12	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:21	2	3240	9	123	92,00	8,00	1	A,B
13	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 10:23	2	2520	5	132	96,00	4,00	1	A,B
14	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 14:03	2	2460	5	92	89,00	11,00	2	C
15	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 17:22	2	2580	8	62	85,00	15,00	2	C
16	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 19:00	2	2160	3	106	88,00	12,00	1	A,B

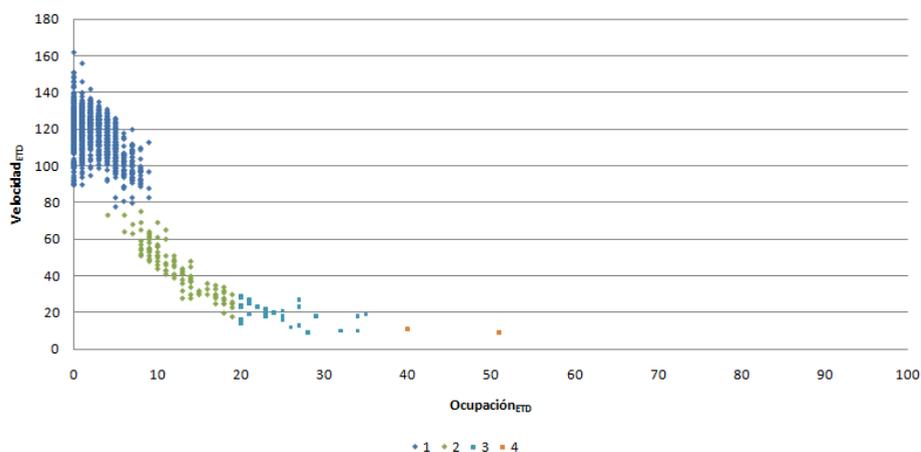
Tabla 29: Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Obtención del nivel de servicio-algoritmo matriz velocidad-ocupación.



Gráfica 47: Curva característica del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

En la Gráfica 47 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al día 17/04/2006 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido creciente. Puede

observarse la agrupación por niveles de servicio donde se distinguen perfectamente los escalones en cada paso.



Gráfica 48: Curva característica del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

En la Gráfica 48 se representan los valores en intervalos de 1 minuto obtenidos del nivel de servicio basado en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación. Se han representado todos los registros de 1 minuto correspondientes al día 20/03/2006 de la sección de medida ubicada en el PK 285,15 en sentido decreciente. Puede observarse la agrupación por niveles de servicio donde se distinguen perfectamente los escalones en cada paso.

V.4.4. Comparativas de los 3 algoritmos

A continuación se presenta gráficamente la comparativa entre los tres algoritmos a partir de la representación de las 2 curvas fundamentales de la ingeniería del tráfico (velocidad-intensidad, curva con tendencia de parábola, a cada valor de intensidad le corresponden dos valores de velocidad) y (velocidad-ocupación, curva cuya tendencia es lineal, a cada valor de velocidad le corresponde uno de ocupación y viceversa). La tercera curva fundamental de ingeniería de tráfico (intensidad-

Método

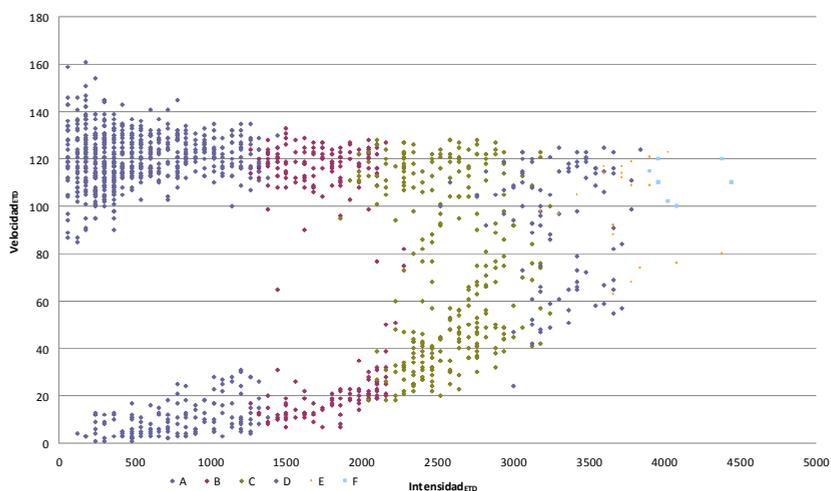
densidad) no se ha considerado porque es análoga a la curva (velocidad-intensidad) en el sentido de tendencia que es una parábola y por tanto para cada valor de intensidad se estaría ante dos situaciones diferentes: una de tráfico fluido, es decir para un valor de intensidad reflejaría que estarían pasando pocos vehículos porque el valor de la densidad es bajo, y otra de estado de tráfico con retenciones y/o congestión, donde estarían pasando pocos vehículos porque la densidad de circulación es muy elevada. Además la ETD da el valor de la velocidad, mientras que la ocupación se ha adoptado como medida indirecta de la densidad.

muestra Id	SECCIÓN DE MEDIDA	fecha	NS (V/O)		NS HCM dinámico 1	NS HCM dinámico 2
1	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	2	C	C	C
2	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	1	A,B	F	F
3	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	3	D	B	B
4	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	C	C	C
5	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	2	C	D	D
6	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 19:52	1	A,B	C	C
7	PK285,15 CRECIENTE	17/04/2006 12:31	1	A,B	F	F
8	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 17:34	3	D	B	B
9	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 18:22	2	C	C	C
10	PK285,15 DECRECIENTE	20/03/2006 19:43	1	A,B	D	D
11	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:36	1	A,B	C	C
12	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 13:21	1	A,B	D	D
13	PK296,48 DECRECIENTE	17/04/2006 10:23	1	A,B	C	C
14	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 14:03	2	C	C	C
15	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 17:22	2	C	C	C
16	PK270,00 CRECIENTE	09/04/2007 19:00	1	A,B	C	B

Tabla 30: Muestra del experimento de 16 registros de 4 secciones de medida. Comparativa en la obtención de los niveles de servicio por los tres algoritmos objeto del experimento.

La Tabla 30 resume los niveles de servicio obtenidos por los tres algoritmos objeto del experimento para los 16 registros tomados como muestra representativa. Las columnas amarillas corresponden al nivel de servicio basado en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación; la columna azul corresponde al algoritmo de nivel de servicio basado en el HCM dinámico 1 donde la velocidad libre básica no varía ya que en esta vía es de 120 Km/h; la columna rosa corresponde al algoritmo de nivel de servicio basado en el HCM dinámico 2 donde la velocidad libre básica se corresponde a la velocidad geométrica y por tanto es variable en cada sección de medida.

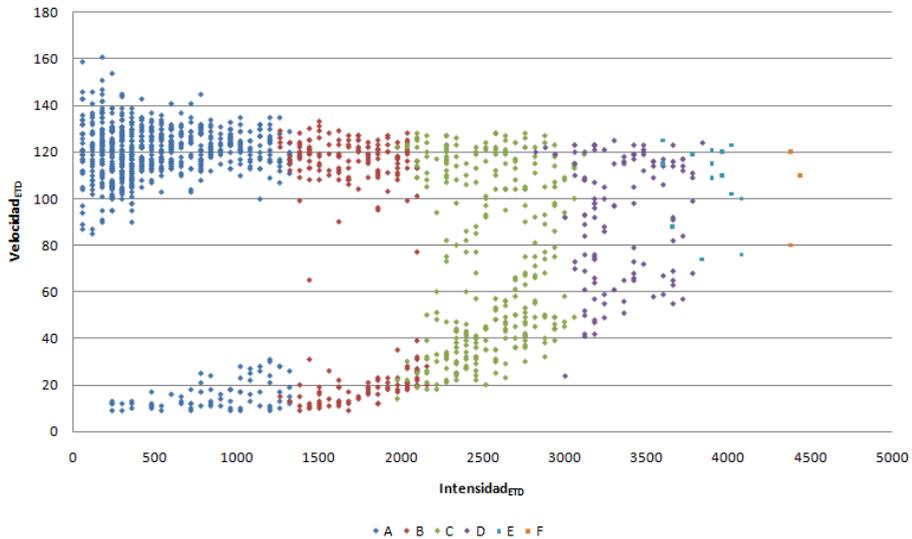
Por tanto, se representan los pares de valores I, V de la ETD, y V-O de la ETD. Cada par de valores están representados por un color que corresponden a los valores de nivel de servicio calculados por cada algoritmo de NS propuesto (HCM dinámico 1, HCM dinámico 2 y matriz velocidad-ocupación). Así puede observarse como un mismo par de valores, alcanza un nivel de servicio que puede llegar a ser distinto en cada algoritmo como se han representado en la tabla anterior de los calculados y tomados como ejemplo:



Gráfica 49: Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

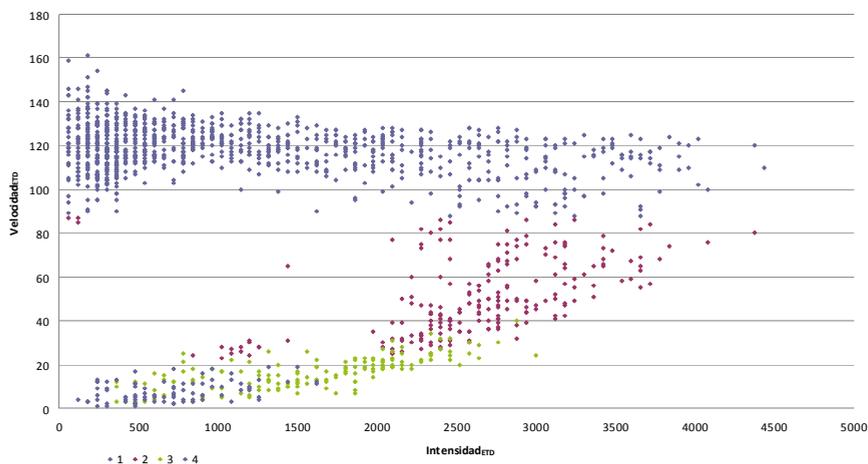
En la Gráfica 49 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 1. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

Método



Gráfica 50: Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

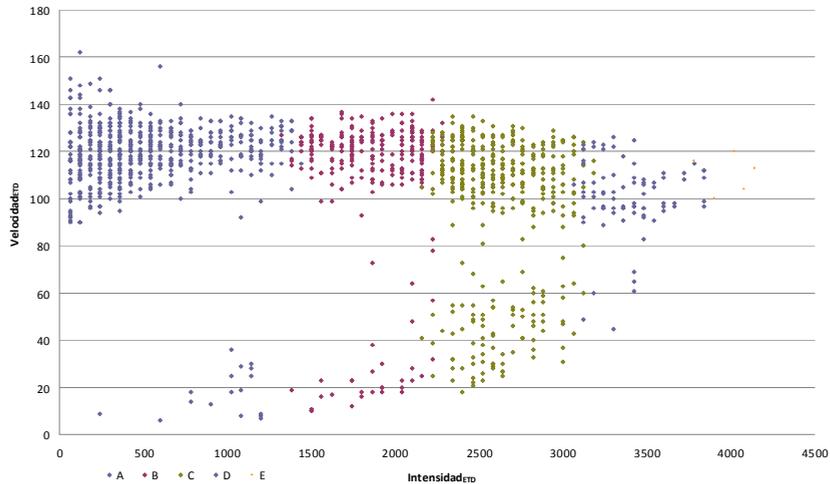
En la Gráfica 50 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 2. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.



Gráfica 51: Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

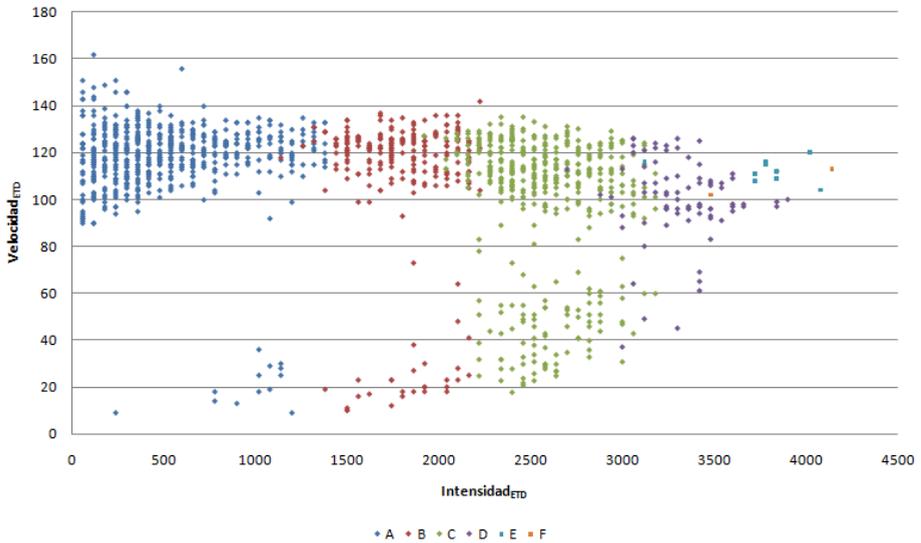
En la Gráfica 51 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en la Matriz Velocidad-Ocupación. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

Método



Gráfica 52: Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

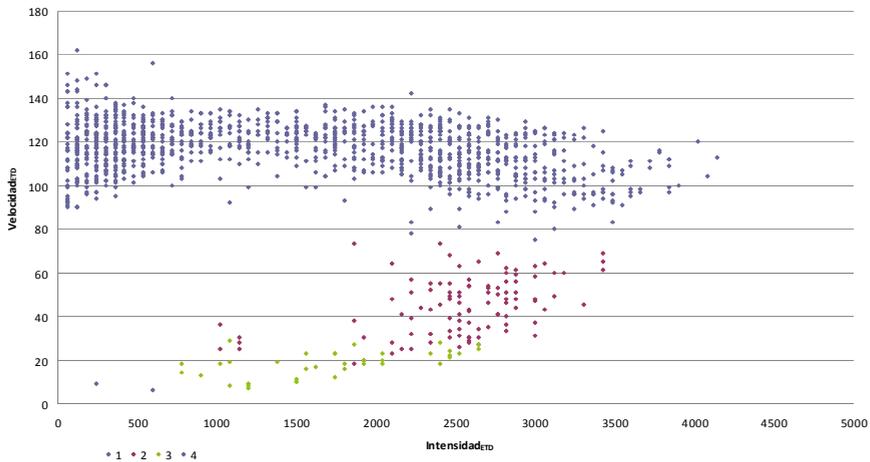
En la Gráfica 52 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 1. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.



Gráfica 53: Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

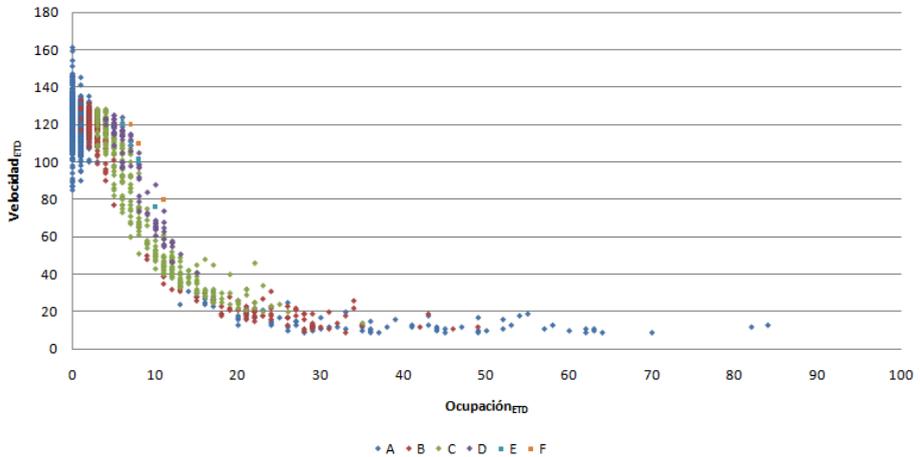
En la Gráfica 53 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 2. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día

Método



Gráfica 54: Curva característica de la relación fundamental velocidad-intensidad generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

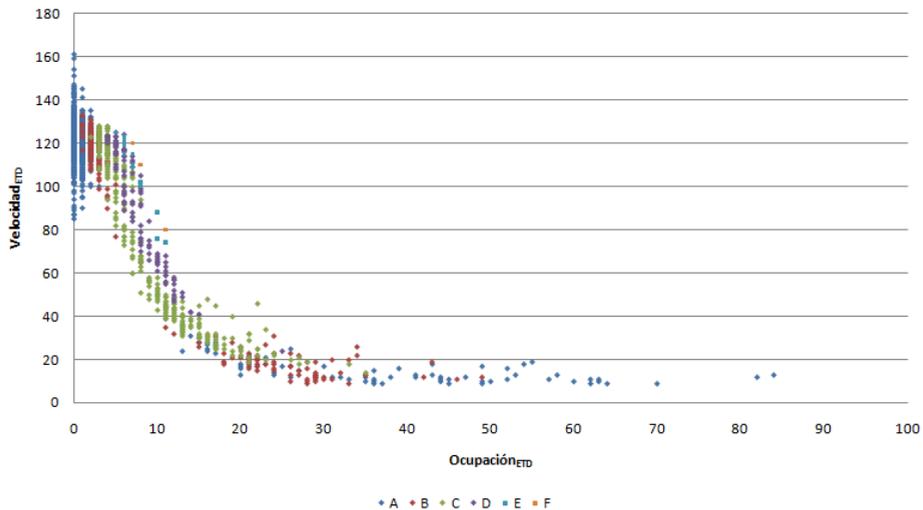
En la Gráfica 54 se representan los pares de valores de velocidad e intensidad obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en la Matriz Velocidad-Ocupación. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.



Gráfica 55: Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

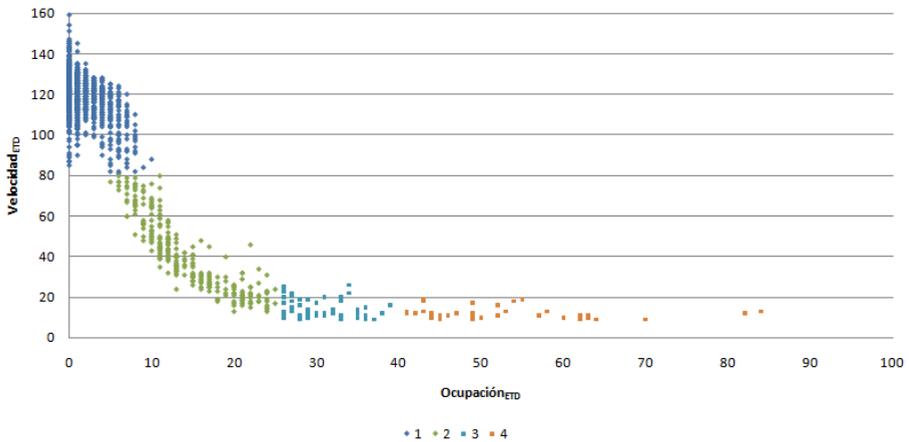
En la Gráfica 55 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 1. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

Método



Gráfica 56: Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

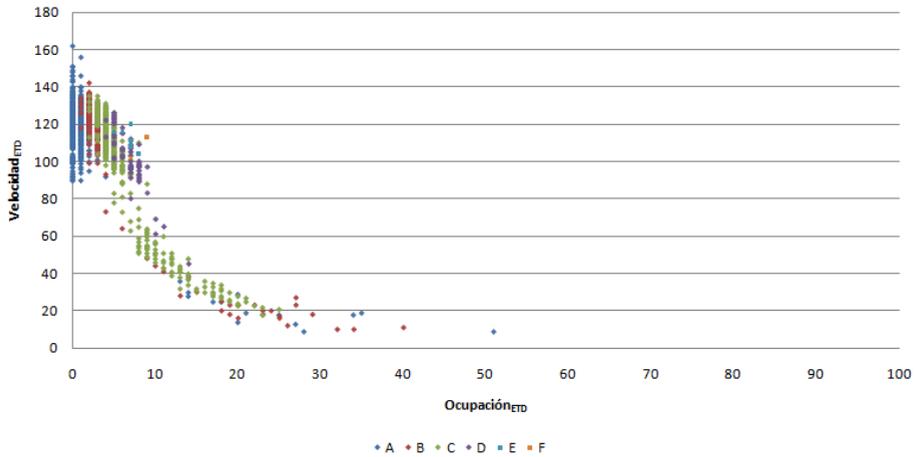
En la Gráfica 56 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 2. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.



Gráfica 57: Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido creciente durante 24 horas del día 17/04/2006.

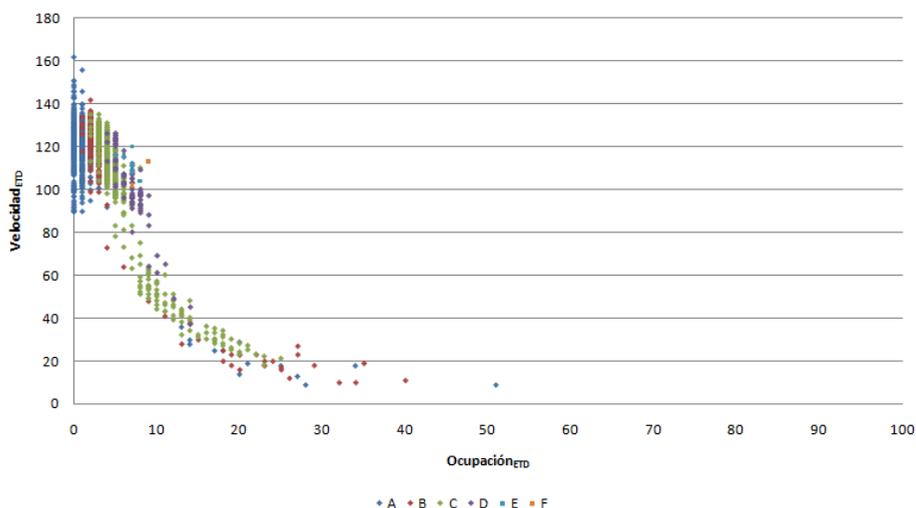
En la Gráfica 57 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en la Matriz Velocidad-Ocupación. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

Método



Gráfica 58: Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 1 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

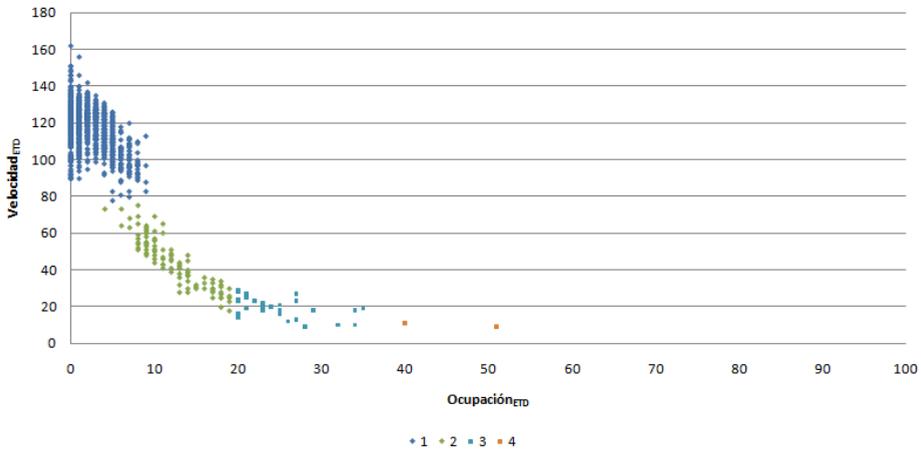
En la Gráfica 58 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 1. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.



Gráfica 59: Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo HCM dinámico 2 para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

En la Gráfica 59 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en el HCM dinámico 2. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

Método



Gráfica 60: Curva característica de la relación fundamental velocidad-ocupación generada por los pares de valores de la ETD del algoritmo matriz velocidad-ocupación para la muestra de la sección de medida ubicada en el PK285,15 sentido decreciente durante 24 horas del día 20/03/2006.

En la Gráfica 60 se representan los pares de valores de velocidad y ocupación obtenidos por la ETD, que corresponden a los valores utilizados en el experimento y sobre los que se han obtenido los niveles de servicio por los tres algoritmos distintos. En este caso se representa cada par de valores con el color correspondiente al nivel de servicio alcanzado por el algoritmo basado en la Matriz Velocidad-Ocupación. La muestra representada corresponde a los valores válidos de los que se han filtrado sobre los 1.440 registros de 1 día.

Esta observación de los algoritmos basados en HCM, los dinámicos 1 y 2, obtienen el nivel de servicio a partir de la densidad considerada como la relación entre la intensidad equivalente y la velocidad media (Average Passenger-Car Speed) donde se observa cómo afecta el valor de intensidad frente a la velocidad, ya que la densidad es función de la intensidad equivalente en mayor proporción que la velocidad media. Y la velocidad de la relación de la densidad puede ser función de la intensidad equivalente cuando:

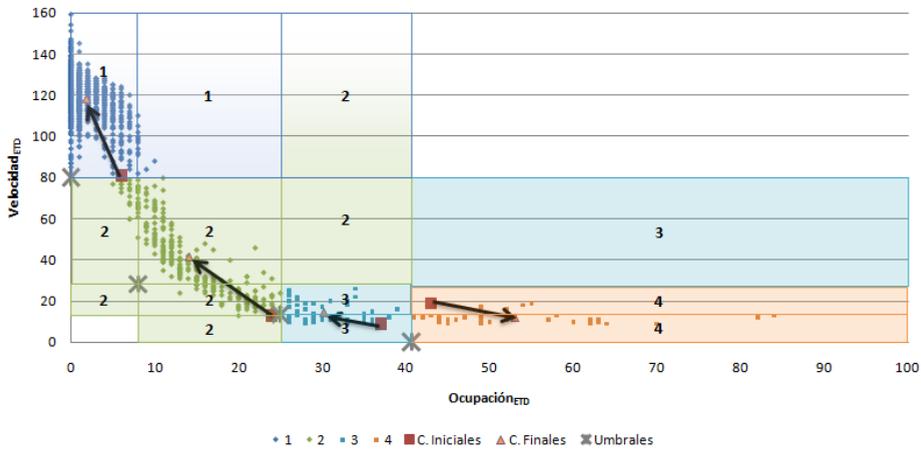
$$V \left\{ \begin{array}{l} I_{eq} < IL \Rightarrow V = VL = V1 \\ I_{eq} > IL \Rightarrow V = VL - (VL - V_C) \left(\frac{I_{eq} - IL}{C - IL} \right)^{2.6} = V2 \end{array} \right\}$$

Por tanto de nuevo tendría mayor peso la variable intensidad que la velocidad. Mientras que en el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, se considera la variable velocidad en la misma proporción que la variable ocupación (densidad), ambas al 50%.

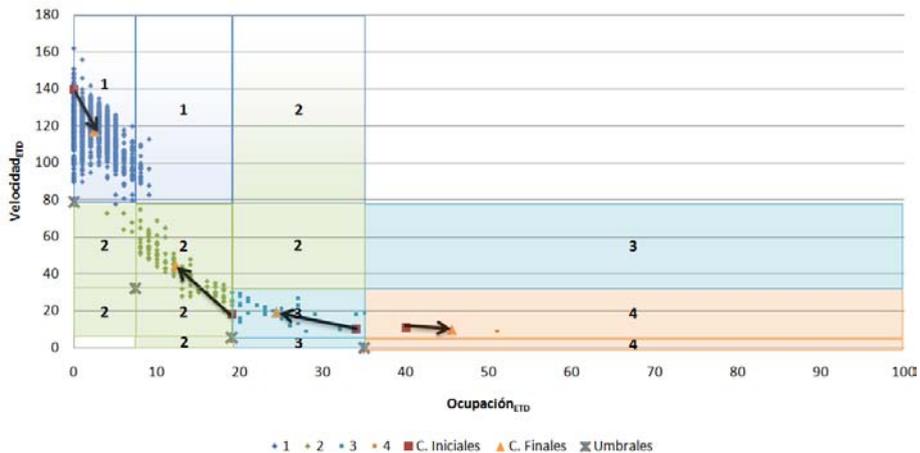
Para demostrar la eficiencia de la matriz Velocidad-Ocupación en la identificación del nivel de servicio óptimo, sobre los datos de tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico basado en el algoritmo de los conglomerados de las K medias, se ha procedido a superponer en las gráficas, correspondientes a las secciones de medida de la comparativa entre algoritmos, el conjunto de valores de los centroides iniciales, los centroides finales obtenidos, así como los umbrales calculados por dicho algoritmo.

Esto se ha representado en la curva característica de este algoritmo formada por los pares de valores de velocidad y ocupación de la ETD y se han creado líneas asociadas a los umbrales, que se ajustan a las filas y columnas de la matriz. Tal y como se puede ver en la Gráfica 61 y Gráfica 62.

Método



Gráfica 61: Representación del movimiento de los centroides y los umbrales que determinan la matriz, sobre la nube de puntos que forman la curva característica (V-O), para la muestra de la sección de medida del PK285,15 sentido creciente.



Gráfica 62: Representación del movimiento de los centroides y los umbrales que determinan la matriz, sobre la nube de puntos que forman la curva característica (V-O), para la muestra de la sección de medida del PK285,15 sentido decreciente.

En la representación se aprecia que se realizan cambios graduales de nivel de servicio, no siendo normalmente posible un salto doble de un nivel de servicio a otro, teniendo que pasar previamente por su antecesor o sucesor.

Por todo esto, se concluye que el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, se considera adecuado para aplicar las estrategias de la gestión del tráfico en tiempo presente.

V.4.5. Prueba de contraste

Con el objeto de comprobar y validar los resultados expuestos en el apartado anterior, se ha realizado una prueba de contraste que permita comparar los métodos en las limítrofes, zonas de cambio, de un nivel de servicio a otro. La prueba consiste en comparar y contrastar, en estas zonas, los resultados de aplicar tres métodos:

- El primer método consiste en determinar el nivel de servicio según el criterio subjetivo del ingeniero de tráfico, actuando como observador.
- El segundo método consiste en determinar el nivel de servicio según el criterio de umbrales gráficas de Velocidad/Ocupación.
- El tercer método consiste en determinar el nivel de servicio según el criterio de ajuste algoritmo Conglomerados.

Para la realización de la prueba de contraste se ha tomado una sección de autovía en la cual se produzcan retenciones durante alguna zona horaria del día y se realiza un estudio del tráfico durante esas horas conflictivas. El análisis de estudio proporciona un conjunto de videos e imágenes que muestra el estado de la red viaria a las diferentes horas del día, acompañados de los datos fundamentales de tráfico: intensidad, velocidad y ocupación.

Esta prueba de contraste se ha realizado en la carretera A-6 de la Coruña en la provincia de Madrid, en el punto kilométrico 17+300 sentido entrada a Madrid. Este punto ha sido seleccionado porque presenta retenciones prolongadas durante algunas horas, propias de los días laborales, con una intensidad de vehículos alta a primera y última hora, lo que permite analizar diferentes niveles de servicio.

El punto kilométrico 17+300 de la A-6 se sitúa en el paso por “Las Rozas”, donde se pueden observar retenciones a primera hora de la mañana hasta mitad de mañana

Método

en el sentido de entrada a la capital. El punto exacto es el que se muestra en la Figura 8.

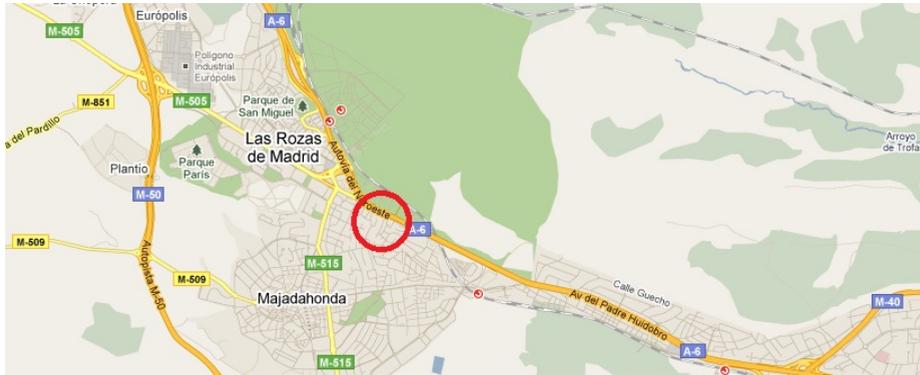


Figura 8: Localización del punto para la prueba de contraste.

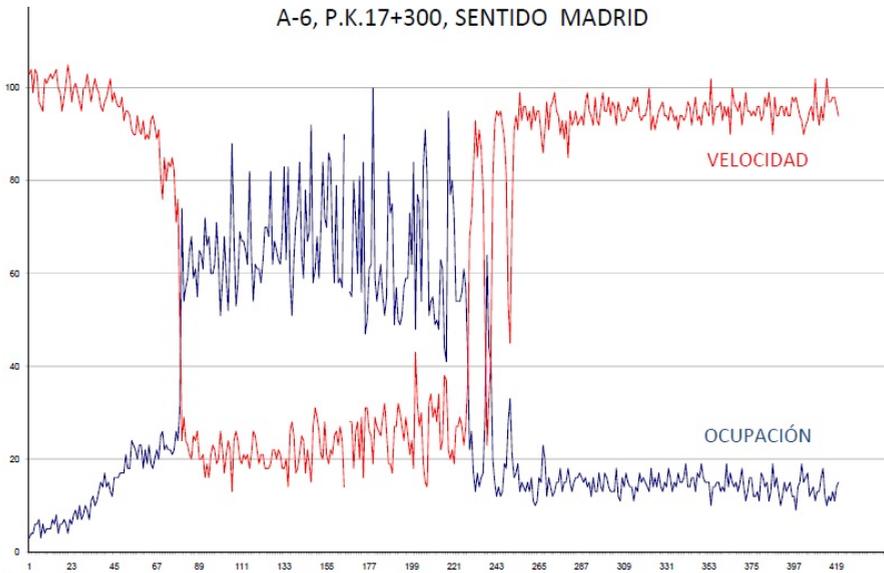
Para la realización de la prueba de contraste, se realizarán varios procesos de capturas de imágenes en tiempos precisos en los cuales se determine el cambio de nivel de servicio de forma que, posteriormente, se puedan comparar las capturas entre ellas y se verifique la conformidad del proceso estudiado en la presente tesis.

Se toma como día de prueba el 12 de mayo de 2011 donde se toman datos cada minuto, obtenidos directamente del equipo de toma de datos. La gráfica de Velocidad/Ocupación de ingeniería de tráfico referida a este día, vía y punto kilométrico es la que se muestra en la Gráfica 63.

Según los videos y datos obtenidos en el día bajo estudio, se realizan diferentes capturas que determinan los cambios de nivel de servicio. Estos cambios siguen los siguientes criterios:

- **MÉTODO 1:** Criterio del ingeniero de tráfico. Se determina el cambio de nivel de servicio realizando una visualización de imágenes por cámara de televisión exclusivamente, sin considerar los datos registrados en la base de datos.

Esta captura es totalmente subjetiva ya que es realizada según la apreciación de un ingeniero de tráfico y podría variar entre la visualización por parte de diferentes ingenieros visualizando el mismo registro audiovisual.



Gráfica 63: Gráfica velocidad/ocupación del día de prueba.

El ingeniero de tráfico procede a realizar el visionado del video de cámara de televisión y establece tres valores

- Tráfico fluido: VERDE
- Tráfico denso: AMARILLO
- Tráfico congestión: ROJO

Instantes antes de cada una de las situaciones en las cuales el ingeniero de tráfico considera que hay un cambio de nivel de servicio, se anota la hora de video y se captura la imagen de video. Posteriormente se obtiene el valor real obtenido por el equipo de toma de datos, de forma que permita comparar su apreciación con los otros métodos realizados.

Mediante este método no se obtienen valores umbrales de corte, sino imágenes que determinan situaciones de inicio de tráfico fluido, denso y congestión

Método

- MÉTODO 2: Criterio de umbrales gráficas de Velocidad/Ocupación. Se trata de determinar los umbrales de velocidad: V1, V2 y V3 y de ocupación: O1, O2 y O3 para la sección de medida tomando los datos reales cada minuto de la gráfica velocidad y ocupación de ingeniería de tráfico.

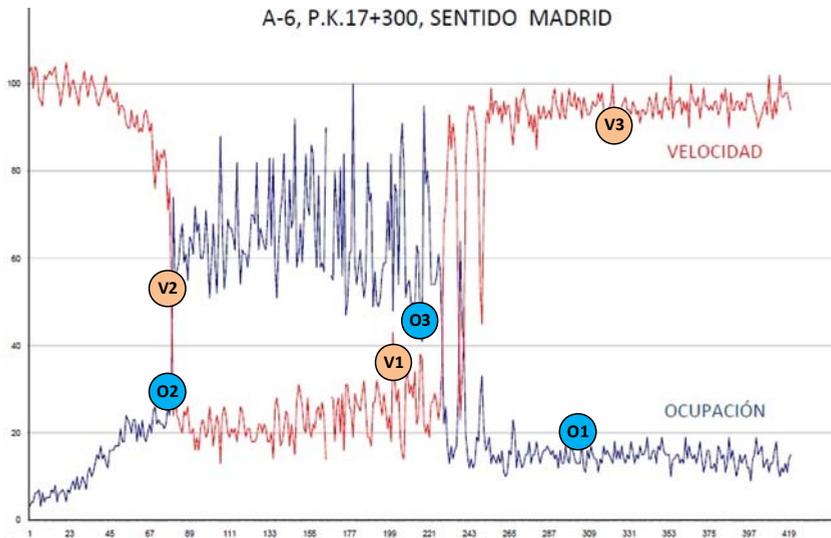
Los umbrales se determinan para:

- el paso de tráfico fluido a lento (NS1 a NS2), para:
 - la velocidad, menor valor de la parte de la curva que representa el tráfico fluido, V3.
 - la ocupación, el mayor valor de la parte de la curva que representa el tráfico fluido, O1.

Realmente el valor que determina el paso del NS1 al NS2 es el umbral de velocidad, como puede verse en la matriz velocidad/ocupación, presentada en el apartado anterior.

- el paso de tráfico lento a retenciones (NS2 a NS3), para:
 - la velocidad, el primer escalón de bajada de la velocidad, que corresponde cuando la ocupación comienza a subir, V2.
 - la ocupación, el primer escalón de subida, que corresponde con la bajada de la velocidad, O2.
- el paso de retenciones a congestión (NS3 a NS4), para:
 - la velocidad, el mayor de la parte de la curva que representa el estado de tráfico de congestión, V1.
 - la ocupación, el menor de la parte de la curva que representa el estado de tráfico de congestión, O3.

Los umbrales pueden observarse en la gráfica 64.



Tras el análisis de los datos, se obtienen los siguientes valores:

- V1: 32
 - V2: 51
 - V3: 90
 - O1: 19
 - O2: 31
 - O3: 47
- MÉTODO 3: Criterio de ajuste algoritmo Conglomerados. Mediante el algoritmo, que toma como punto de partida los datos analizados por la gráfica velocidad/ocupación, se establecen iteraciones para llegar a calcular los umbrales consolidados según los conglomerados.

Después del análisis de los datos del día 12-04-2011 se realiza el proceso de cálculo de conglomerados, paso a paso obteniendo para el día de prueba:

- Centros iniciales de los conglomerados, Tabla 31
- Historial de Iteraciones, Tabla 32
- Centros finales de los conglomerados, Tabla 33

Método

Centros iniciales de los conglomerados

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	100	61	10	28
Velocidad	19	24	102	54

Tabla 31: Centros iniciales de los conglomerados para el día de prueba

Historial de iteraciones

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	24,105	,531	8,362	5,028
2	9,613	1,235	,000	1,944
3	5,162	1,011	,000	2,332
4	1,106	,443	,000	,000
5	1,661	,792	,000	,000
6	,655	,364	,000	,000
7	,220	,347	,000	2,368
8	,000	,000	,135	2,833
9	,000	,000	,130	2,095
10	,000	,000	,060	,937
11	,000	,000	,114	1,611
12	,000	,000	,107	1,389
13	,000	,000	,000	,000

Tabla 32: Historial de iteraciones de los conglomerados para el día de prueba

Centros de los conglomerados finales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	57	42	14	24
Velocidad	20	30	110	72

Tabla 33: Centros finales de los conglomerados para el día de prueba.

A continuación se presenta la tabla 34 con el cálculo de los umbrales ordenados por velocidad ascendente y su correspondencia en la gráfica velocidad/ocupación de ingeniería de tráfico representando el mismo comportamiento que el método previo.

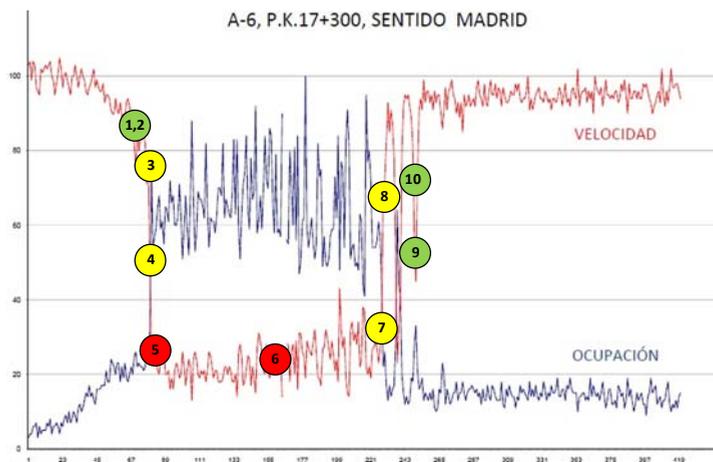
Cálculo de los umbrales

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	49,50	33,00	19,00	0,00
Velocidad	0,00	25,00	51,00	91,00

Tabla 34: Umbrales finales de los conglomerados para el día de prueba.

V.4.5.1. Niveles de Servicio según criterio método 1: Ingeniero de Tráfico

El ingeniero analiza el video y obtiene la evolución de niveles mostrada en la Figura 9, que se corresponde con los datos de tráfico descritos en la misma. Junto con las imágenes de los cambios de nivel de servicio, se presenta, en la Gráfica 65, la evolución de la Intensidad y Velocidad, donde se muestra el punto exacto en el cual se determina el cambio de Nivel de Servicio.



Gráfica 65: Identificación de los umbrales.

Método

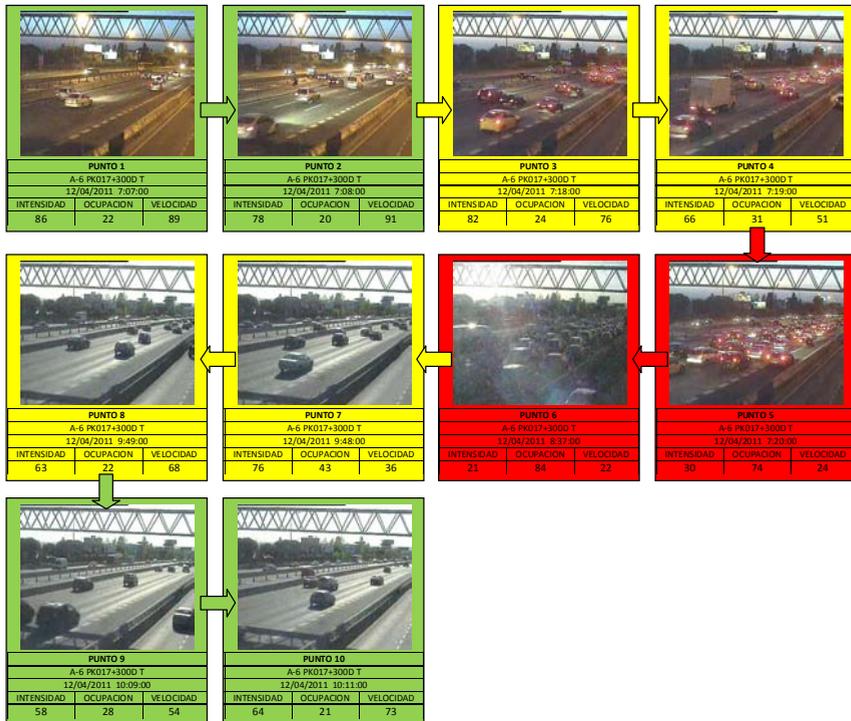


Figura 9: Evolución de los niveles de servicio con los datos de tráfico.

V.4.5.2. Niveles de Servicio según criterio método 2: Gráfica velocidad/ocupación

Después del análisis de la gráfica 64, se establecen los siguientes valores umbrales de matriz velocidad/ocupación

- V1: 32
- V2: 51
- V3: 90
- O1: 19
- O2: 31
- O3: 47

Que representan la matriz Velocidad/Ocupación de la Figura 10

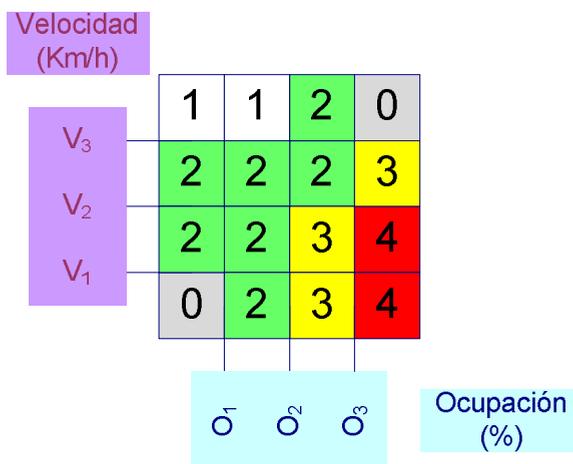


Figura 10: Matriz Velocidad/Ocupación.

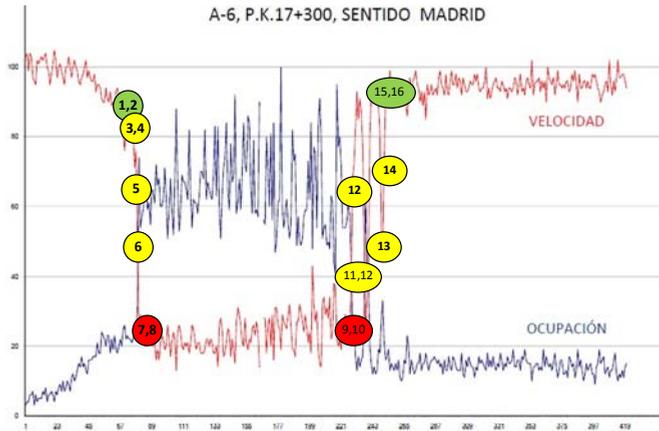
Con los valores umbrales y la matriz velocidad/ocupación se seccionan los datos de tal forma que separan los diferentes niveles de sección según los valores de velocidad y ocupación. La traza resumida en tiempo es la mostrada en la Tabla 35.

SECCION	FECHA/HORA	INTENSIDAD	OCUPACION	VELOCIDAD	NIVEL DE SERVICIO
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:05	73	18	94	1
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:06	79	20	92	1
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:07	86	22	89	2
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:08	78	20	91	1
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:09	95	25	81	2
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:10	86	26	76	2
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:18	82	24	76	2
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:19	66	31	51	2
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:20	30	74	24	4
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 7:21	79	54	29	4
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 9:46	68	61	23	4
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 9:47	71	57	27	4
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 9:48	76	43	36	3
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 9:49	63	22	68	2
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 10:10	65	33	45	3
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 10:11	64	21	73	2
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 10:12	64	16	91	1
SEC PK017+300D T A-6	12/04/2011 10:13	68	17	94	1

Tabla 35: Traza resumida con los valores de tráfico.

Método

Tomando capturas instantáneas antes y después de cada uno de los cortes de nivel de servicio, se representa en la Gráfica 66 los momentos de corte de cada nivel de servicio según este método, así como imágenes antes y después de cada instante en la Figura 11.



Gráfica 66: Identificación de los umbrales.

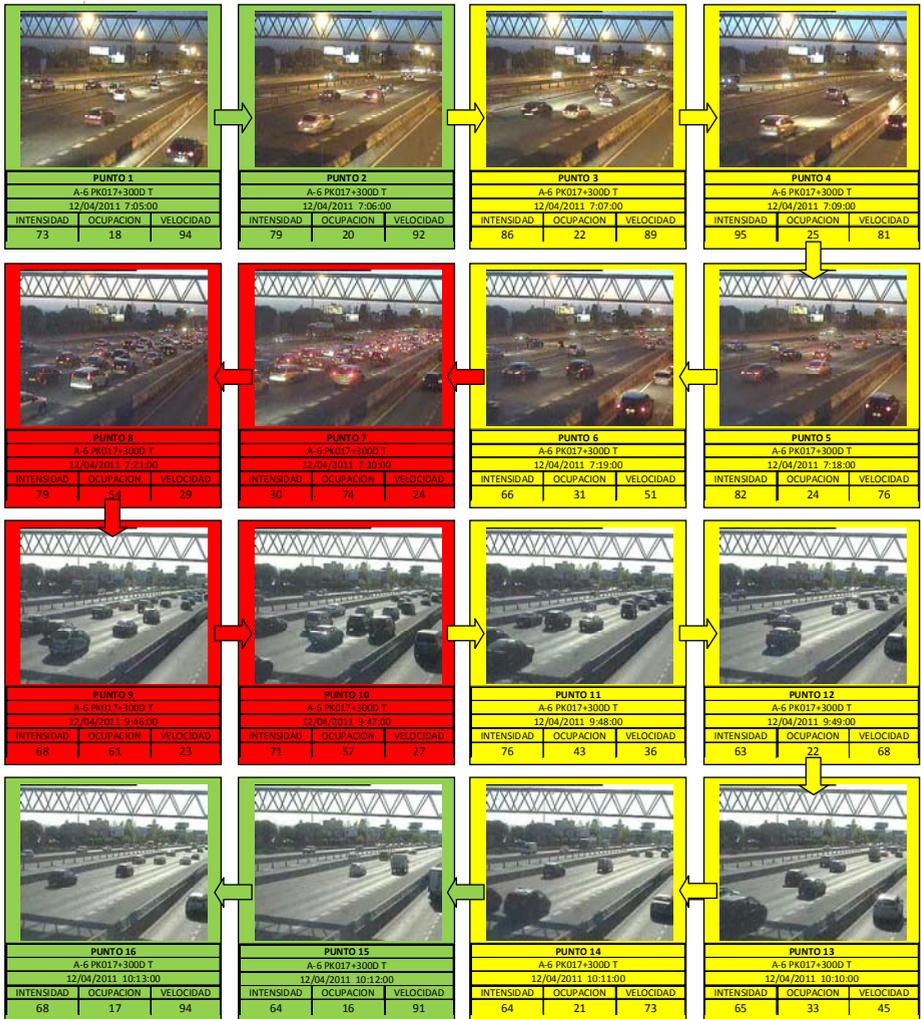


Figura 11: Evolución de los niveles de servicio con los datos de tráfico.

Método

**V.4.5.3. Niveles de Servicio según criterio método 3:
Algoritmo conglomerados**

Después del cálculo de umbrales de conglomerados, se establecen los siguientes valores umbrales de matriz velocidad/ocupación.

- V1: 25
- V2: 51
- V3: 91
- O1: 19
- O2: 33
- O3: 50

Que representan la matriz Velocidad/Ocupación de la Figura 12

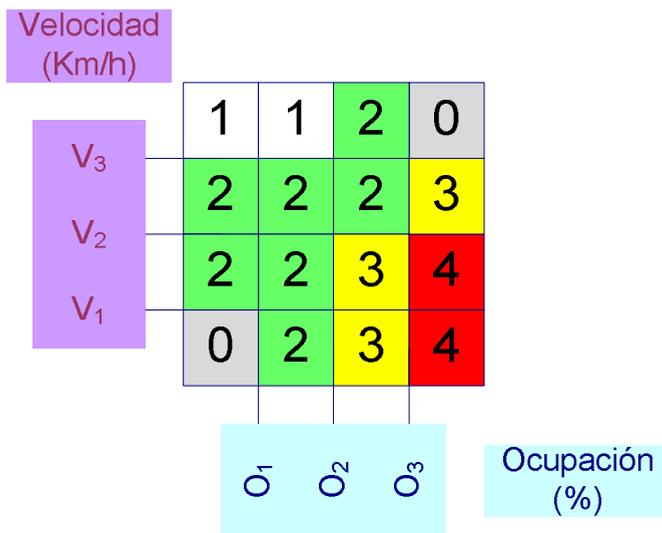


Figura 12: Matriz Velocidad/Ocupación.

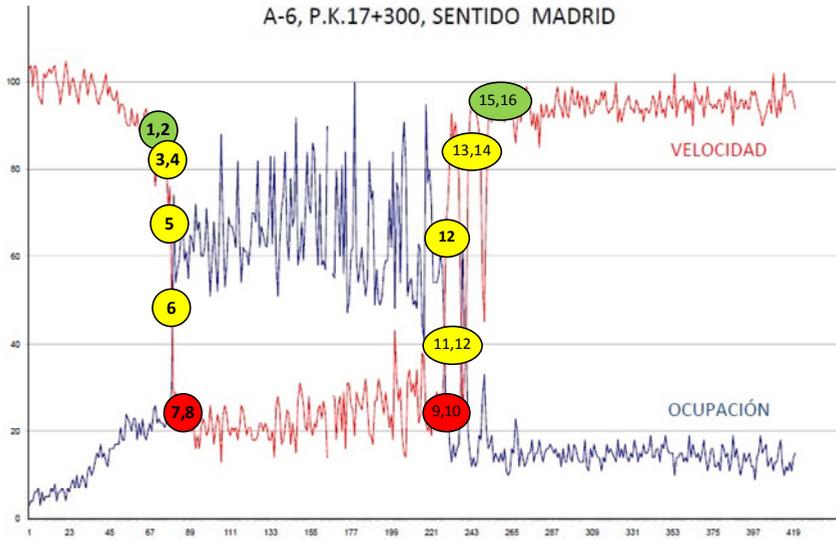
Con los valores umbrales y la matriz velocidad/ocupación se seccionan los datos de tal forma que separan los diferentes niveles de sección según los valores de velocidad y ocupación. La traza resumida en tiempo es la mostrada en la Tabla 36.

SECCION	FECHA/HORA	INTENSIDAD	OCUPACION	VELOCIDAD	NIVEL DE SERVICIO
SEC FK017+300	12/04/2011 7:05	73	18	94	1
SEC FK017+300	12/04/2011 7:06	79	20	92	1
SEC FK017+300	12/04/2011 7:07	86	22	89	2
SEC FK017+300	12/04/2011 7:08	78	20	91	2
SEC FK017+300	12/04/2011 7:18	82	24	76	2
SEC FK017+300	12/04/2011 7:19	66	31	51	2
SEC FK017+300	12/04/2011 7:20	30	74	24	4
SEC FK017+300	12/04/2011 7:21	79	54	29	4
SEC FK017+300	12/04/2011 9:46	68	61	23	4
SEC FK017+300	12/04/2011 9:47	71	57	27	4
SEC FK017+300	12/04/2011 9:48	76	43	36	3
SEC FK017+300	12/04/2011 9:49	63	22	68	2
SEC FK017+300	12/04/2011 10:11	64	21	73	2
SEC FK017+300	12/04/2011 10:12	64	16	91	2
SEC FK017+300	12/04/2011 10:13	68	17	94	1
SEC FK017+300	12/04/2011 10:14	73	19	91	2
SEC FK017+300	12/04/2011 10:15	60	13	99	1
SEC FK017+300	12/04/2011 10:16	60	15	93	1

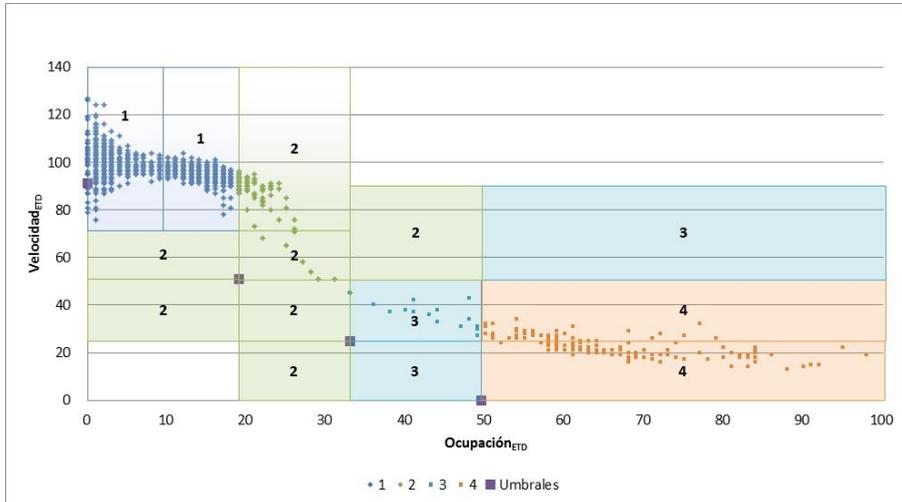
Tabla 36: Traza resumida con los valores de tráfico.

Tomando capturas instantes antes y después de cada uno de los cortes de nivel de servicio, se representa en la Gráfica 67 los momentos de corte de cada nivel de servicio según este método, así como imágenes antes y después de cada instante en la Figura 13. En la gráfica 68 se muestra igualmente para este método la distribución de umbrales que determinan la matriz sobre la nube de puntos de la curva característica Velocidad/Ocupación.

Método



Gráfica 67: Identificación de los umbrales.



Gráfica 68: Distribución de umbrales que determinan la matriz sobre la nube de puntos de la curva característica Velocidad/Ocupación.

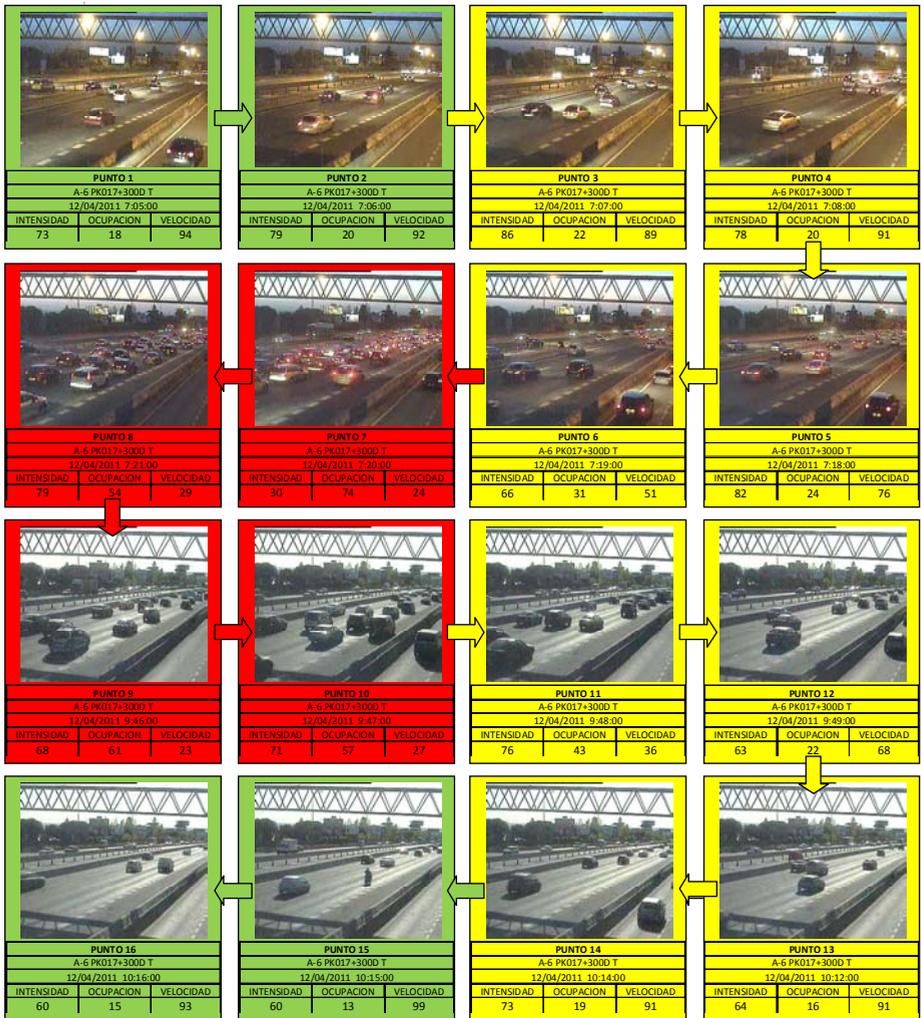


Figura 13: Evolución de los niveles de servicio con los datos de tráfico.

Método

A continuación se muestra un conjunto de imágenes, figura 14, 15, y 16 clasificados en niveles de servicio, para comparar los tres métodos del contraste. En la primera columna se muestra el análisis de la cámara, en la segunda columna el análisis dependiente de la gráfica Velocidad/Ocupación y por último, en la tercera columna lo obtenido por el análisis de conglomerados.



Figura 14: Valores de tráfico del nivel de servicio A y B.



Figura 15: Valores de tráfico del nivel de servicio C y D.



Figura 16: Valores de tráfico del nivel de servicio E y F.

Método

Del análisis de la comparativa entre los tres métodos puede observarse que:

- El análisis gráfico de los resultados es similar entre todos los métodos.
- Los resultados son iguales para el método 2 y 3 en algunos puntos de corte, lo que verifica el buen funcionamiento de los conglomerados. Esto se debe a que el corte entre los diferentes niveles de servicio se produce en el mismo punto, ya que los umbrales por el método de conglomerados y por el método de la Velocidad/Ocupación son prácticamente iguales, con diferencias de $\pm 1\text{Km/h}$.
- El algoritmo de matriz/ocupación refleja una respuesta similar a la obtenida por el ingeniero de tráfico.
- El análisis de conglomerados y su buen funcionamiento práctico establece que el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación sea un método estadístico para la ingeniería de tráfico. Este algoritmo permite evaluar en todo momento los umbrales de nivel de servicio de un segmento de la red viaria en tiempo presente.

VI. Conclusiones y líneas de investigación.

Este último capítulo recoge las principales conclusiones de la memoria, analizando las aportaciones realizadas y planteando nuevas líneas de investigación a partir de los resultados obtenidos.

Una de las inquietudes que impulsaron el desarrollo de esta tesis doctoral, fue la referente a la calidad de datos existentes, proporcionados por el equipamiento de gestión del tráfico. Esta inquietud ya sirvió para dar forma y contenido a un trabajo de investigación que el autor de esta tesis realizó con el fin de obtener en su momento (2004) el DEA (Diploma de Estudios Avanzados).

Tras haber trabajado en diferentes Centros de Gestión del Tráfico como son los de Sevilla (Suroeste) y Valencia (Levante) como Director de los mencionados Centros y recalar actualmente en los Servicios Centrales de la Dirección General de Tráfico (DGT) como Subdirector General Adjunto de Circulación, teniendo, entre otras, la responsabilidad del correcto funcionamiento de todos los Centros de Gestión del Tráfico en España a excepción de los del País Vasco y Cataluña, la inquietud sobre la calidad de los datos se fue transformando en preocupación.

Es cierto que cada vez hay una tipología más amplia de equipos capaces de funcionar como Estaciones de Toma de Datos (como son: los lectores de matrículas LPR (License Plate Recognition), los propios radares (cinemómetros), equipos con diferentes tecnologías de ondas no intrusivas y utilizados en sistemas de peaje Free-Flow) pero el mayor número de equipos existentes en nuestras carreteras (y en los de casi todo el mundo, me atrevería a decir) es el de espiras de lazo inductivo. Esto es así porque su relación calidad/precio es extraordinaria. Cuando hablamos de calidad en este caso, es de la calidad teórica del equipo en el momento de su instalación y cuando hablamos de calidad de datos, hablamos de los datos producidos por el equipo en tiempo presente durante su funcionamiento.

Conclusiones

La ausencia de datos de calidad en un primer momento hace que la gestión del tráfico se realice en muchos casos de forma cualitativa y no cuantitativa. Una vez superado este problema (el de la calidad de datos), la preocupación es otra, ¿nos sirven las herramientas actuales definidas en el HCM2000 como teoría de referencia para el cálculo de los niveles de calidad de la circulación (niveles de servicio)?.

Tras este planteamiento inicial, se desarrolla todo el trabajo experimental que da forma a la tesis y cuyas aportaciones se describen a continuación.

VI.1. Conclusiones que se aportan

Las contribuciones principales que se derivan del presente trabajo se pueden clasificar en dos áreas:

- Reducción de datos.
- Nuevo modelo para la determinación de los niveles de servicio para la gestión del tráfico.

Los datos tratados en el estudio han sido los correspondientes a las 17 secciones de medida, un total de 65 detectores, en datos almacenados en periodos de agregación de 1 minuto, desde Mayo de 2005 hasta Abril de 2009, un total de 52 meses.

En el área de la reducción de datos se ha propuesto un conjunto de filtros que permite garantizar la calidad de los datos proporcionados en tiempo real por las estaciones de toma de datos, basadas en espiras electromagnéticas.

Los filtros presentados identifican posibles errores en los datos. Los filtros eliminan aquellos datos que se encuentran fuera de los rangos posibles; eliminan también, mediante la correlación de las variables de las ETD, aquellos datos que son inconsistentes. Además, la reducción de datos propuesta identifica los sesgos sistemáticos que se producen en la captura de datos y también es capaz de identificar la falta de datos y tratar su ausencia lo que se denomina restauración de datos.

El análisis de la aplicación de los filtros sobre los datos de las distintas ETDs proporciona resultados muy positivos. Los resultados obtenidos son coherentes ya

que se aprecia un suavizado de los datos sin eliminar excesivos datos ni modificar significativamente la relación de las variables fundamentales del tráfico.

La propuesta de filtros resultante de la tesis, concretamente los filtros centrados en los valores empíricos, se han propuesto para formar parte de la norma *Equipamiento para la gestión del tráfico. Calidad de datos. Análisis de datos de tráfico* del subcomité 15 “calidad de datos” del comité técnico de normalización 199 (Equipamiento para la gestión del tráfico). Conclusión que para el autor de la tesis supone una aportación de vital importancia en el desarrollo práctico de la gestión del tráfico en tiempo presente.

El objetivo principal del estudio es la obtención de un algoritmo de nivel de servicio para la gestión del tráfico en tiempo presente basado en la curva velocidad-ocupación tomando como referencia comparativa las técnicas del HCM. Por ello a continuación se detallan las conclusiones obtenidas respecto a los algoritmos probados en el experimento.

Como ha quedado demostrado en el experimento, los algoritmos HCM dinámico 1 y dinámico 2, no reflejan la realidad del estado del nivel de servicio en un tramo de carretera en un instante determinado, es decir para la gestión del tráfico en tiempo presente. Esto es porque han resultado niveles de servicio mayores al nivel A, en la zona de nivel de servicio A de la curva característica de este algoritmo (velocidad-intensidad equivalente). Por tanto se concluye que los HCM dinámicos 1 y 2 son algoritmos teóricos útiles para el dimensionamiento de carreteras con una IMD horizonte y no se considera apropiado para los sistemas de gestión y explotación de tráfico, en tiempo presente.

Por ello se propone un nuevo modelo basado en la curva fundamental de ingeniería de tráfico del HCM velocidad-densidad (EXHIBIT 7-2 del HCM 2000). Así pues se aplican directamente las técnicas del HCM 2000, considerando la única curva de las tres que tiene una relación unívoca, es decir para un valor de velocidad corresponde uno de densidad y no hay posibilidad de estar en dos situaciones diferentes como en el caso de las relaciones velocidad-intensidad ni intensidad-densidad, donde para un valor de velocidad o de densidad hay dos posibles estados de intensidad.

En este modelo se realiza una primera aproximación que corresponde a la gestión de 4 niveles de servicio en vez de los 6 que considera el HCM, porque resulta más

Conclusiones

práctico y eficiente a la hora de identificar los estados de tráfico. Esto es porque como se ha demostrado, los valores de las variables de tráfico (velocidad, ocupación e intensidad) en los niveles de servicio A y B son aproximados y de la misma forma se aproximan los valores de los niveles E y F.

En el modelo del nivel de servicio velocidad-ocupación se ha demostrado que se puede considerar la variable ocupación como medida indirecta de la densidad por sus valores fiables que representan esta variable.

Con este modelo se concluye que los resultados de niveles de servicio obtenidos corresponden a una agrupación más real y con una clasificación sin dispersión, y sin obtener niveles de servicio superiores a los niveles A y B en la zona de nivel A ó B.

La ventaja de este modelo es que se ha obtenido un nuevo método estadístico basado en los conglomerados, para la aproximación óptima de los umbrales de velocidad y ocupación característicos de cada sección de medida, que puede implementarse de forma dinámica con el fin de automatizar el sistema y además considera el comportamiento histórico recurrente de cada sección de medida.

Los resultados obtenidos en la comparativa realizada entre los 3 métodos muestran la agrupación de los pares de valores de acuerdo a los niveles de servicio calculados, En los dos primeros algoritmos, dinámico 1 y 2, tiene un mayor peso la variable intensidad que la velocidad. Mientras que en el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, se considera la variable velocidad en la misma proporción que la variable ocupación (densidad), ambas al 50%.

Así pues, se determina que el algoritmo de nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación, aunque sea un método empírico, se considera adecuado para aplicar las estrategias de la gestión del tráfico en tiempo presente. Además, las pruebas de contraste realizadas para determinar los niveles de servicio en las zonas umbrales, es decir donde se produce el cambio, de los niveles de servicio, corroboran y apoyan esta afirmación.

Remarcar por último, que las velocidades libres obtenidas están dentro del rango de valores permitidos por el HCM 2000 para la obtención y uso de la Velocidad libre.

VI.2. Líneas de investigación y trabajos abiertos

Vistas las conclusiones del trabajo, en primer lugar, podemos establecer futuras líneas de investigación dirigidas a mejorar la calidad de datos. Cuando hablamos de calidad de datos, no nos referimos sólo a parámetros del tráfico tomados desde ETDs compuestas por detectores de lazos inductivos, sino a todos los datos utilizados también en los Centros de Gestión del Tráfico como son los meteorológicos y los medioambientales.

También queda como trabajo abierto el establecimiento de medidas correctoras de datos de tráfico procedentes de otros medios de captación, ya que estos datos pueden incorporarse fácilmente al método de cálculo de nivel de servicio propuesto.

Las investigaciones iniciales como consecuencia de este documento están sirviendo como base para el desarrollo de documentos de Normalización dentro del Subcomité 15 del CTN-199 "Calidad de datos".

En segundo lugar futuras líneas de investigación podrían ir dirigidas a estudiar el comportamiento del tráfico en autopistas pero bajo la influencia de meteorología adversa, definiendo ésta como la presencia de lluvia, viento o la combinación de ellos según diferentes estados del clima.

El problema que esta investigación conlleva es la dificultad real de encontrar todos los estados del clima y todos los estados del tráfico en carreteras homogéneas. Problema que hace todavía más interesante la investigación.

Todo lo hasta ahora mencionado en un tratamiento cuantitativo de los datos sería muy interesante y abriría nuevos trabajos la comparación de los resultados del experimento con un análisis del comportamiento de los conductores (de la percepción de la situación por parte de ellos) estableciendo la correlación existente entre el comportamiento del conductor ante un suceso y los datos cuantitativos procedentes del equipo de medida que registra el mencionado evento.

Los siguientes puntos se presentan como trabajos abiertos relacionados con los logros obtenidos por esta tesis:

Conclusiones

- Sobre la metodología de la reducción de los datos de tráfico instantáneos obtenidos para la medición de carril o detector: con el fin de evaluar el funcionamiento de los sistemas de la gestión de tráfico, tanto en ámbito urbano como interurbano. Así como la determinación de métodos algorítmico-estadísticos de reconstrucción y sustitución de datos inexistentes o incoherentes.
- A partir del método de obtención de nivel de servicio basado en el algoritmo de la matriz velocidad-ocupación:
 - o Alcanzar método estadístico de determinación de umbrales a partir del método empírico desarrollado en el experimento.
 - o Alcanzar la relación del algoritmo dinámico que relacione con diferentes estados de climatología: lluvia, viento, nieve de gran importancia en los sistemas de gestión y explotación dinámica del tráfico.
- La consideración del minuto como duración del periodo de referencia, nace de la propia definición de la tesis como modelización de los niveles de servicio en autopistas en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico y en principio hasta aquí se quería llegar. El análisis de estabilidad de la aplicación del algoritmo para este periodo podría arrancar futuras líneas de investigación basadas en la aplicación del método a datos integrados en periodos de tiempo de mayor duración (5',10', 15') y sus resultados y relaciones.
- También es posible y necesario que con los resultados de niveles de servicio según los datos de minuto, se elabore una metodología de gestión que asegure la consistencia en el tiempo de los niveles de servicio a facilitar.

VI.3. Aplicaciones

Debido a la estrecha colaboración con el subcomité 15 de calidad de datos del comité técnico de normalización 199 (Equipamiento para la gestión del tráfico), se

ha propuesto incluir el conjunto de filtros resultante de la tesis, concretamente los filtros centrados en los valores empíricos, como parte de la norma *Equipamiento para la gestión del tráfico. Calidad de datos. Análisis de datos de tráfico*. Aplicación, que para el autor de la tesis supone una aportación de vital importancia en el desarrollo práctico de la gestión del tráfico en tiempo presente.

Así mismo, las investigaciones iniciales como consecuencia de este documento están sirviendo como base para el desarrollo de diversos documentos de Normalización dentro del Subcomité 15 del CTN-199 “Calidad de datos”.

Valencia, a 25 de Octubre de 2011

Enrique Belda Esplugues

VII. Referencias Bibliográficas

AENOR (2004): *Norma Española, UNE 135411-3. Equipamiento para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 3: características funcionales.*

ALLENDE, H. y GALBIATI, J. (2004): *A non-parametric filter for digital image restoration, using cluster analysis.* Pattern Recognition Letters, vol. 25, pp. 841-847.

AUNET, B(2000) *Wisconsin's approach to variation in traffic data.* North American Travel Monitoring Exhibition and Conference .2000

BAÍLLO, A. y GRANÉ, A. (2008): *Local linear regression for functional predictor and scalar response.* Functional and Operational Statistics, Dabo-Niang, S. and Ferraty F. (Eds.), Springer. (ISBN 978-3-7908-2061-4)

BORRACI, R.A. y ARRIBALZAGA, E.B. (2005): *Aplicación de análisis de conglomerados y redes neuronales artificiales para la clasificación y selección de candidatos a residencias médicas.* Educación Médica vol 8 número 1. ISSN 1575.

BOX, P.C. y OPPENLANDER, J.C. (1976): *Manual for Traffic Engineering Studies.* 4th Edition, Institute of Transportation Engineers, Arlington, Virginia, EEUU.

CÁSTOR, G., et al. (2006): *Tratamiento de Datos.* Ediciones Díaz de Santos. ISBN 84-7978-736-8.

COIFMAN, B (2001). *Improved Velocity Estimation Using Single Loop Detectors.* Transportation Research A, Vol. 35, No. 10, 2001, pp. 863–880.

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2006): *Libro Blanco - La política Europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad.* Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo. COM(2001)370 FINAL. SEC(2006) 768. Bruselas.

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS (2006): *Por una Europa en movimiento. Movilidad sostenible para nuestro continente. Revisión intermedia del Libro Blanco del transporte de la Comisión Europea de 2001.* Comunicación de la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo. COM(2006)314 FINAL. SEC(2006) 768. Bruselas.

COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN CTN 135/SC4. (2004): *Regulación del*

tráfico. Norma UNE 135441-3 (*Equipamiento vial para carreteras. Sensores de variables atmosféricas en carreteras*). Parte 3: Equipamiento.

DE MOOR, B.; DE SCHUTTER, B.; BELLEMANS, T. (2002): *Models for traffic control*. Journal A, vol. 43, no. 3-4, pp. 13-22.

DEVELOPMENT CORE TEAM (2007): *A Language and Environment for Statistical Computing*, Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. ISBN: 3-900051-07.

DÍAZ, E. et al. (2001): *Influencia de las desigualdades sociales, la conflictividad social y la pobreza extrema sobre la morbilidad por tuberculosis*. Revista Española de Salud Pública. Vol 75. número 6, pág 517-528. Noviembre – Diciembre 2001.

DOMÍNGUEZ, A.; BELDA, E. (2009): *Máster en Investigación y Reconstrucción de Accidentes. Módulo V: El factor vía*. Instituto Universitario de Tráfico y Seguridad Vial. Universitat de València.

DONG, H.; SUN, X.; JIA, L.; QIN, Y. (2009): *An Experiment Study on Level of Service for the Regional Road Traffic*. International Conference on Natural Computation, pp. 233-235, 2009 Fifth International Conference on Natural Computation, IEEE.

DONG, H. et al. (2009): *Road Traffic State Prediction with a Maximum Entropy Method*. Proceedings of the 2009 Fifth International Joint Conference on INC, IMS and IDC. Pages 628-630. IEEE Computer Society.

EVERITT, B. S. (1995): *Commentary: Classification and cluster analysis*. BMJ 1995; 311: 535-536.

FERNÁNDEZ, P.S. (1996): *Determinación del tamaño muestral*. Cad Aten. p. 138-141.

FORTUJIN, L.G.H. (2009): *Turbo Roundabouts. Estimation of Capacity*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. No. 2130. Pp 83-92. ISSN: 0361-1981.

GALIN, D. (1981): *Velocidad en carreteras rurales de dos caminos - un análisis de regresión múltiple sobre dos carriles*. Ingeniería de tráfico y el Control, no. 22, 1981, pp. 453-460.

GRANATO S. *The Impact of Factoring Traffic Counts for Daily and Monthly Variation in Reducing Sample Counting Error*. Transportation Conference Proceedings. 1998

Bibliografía

GRANÉ, A. y VEIGA, H. (2009): *Outliers and the estimation of minimum capital risk requirements*. Investigaciones en Seguros y Gestión de Riesgos, Heras, A., Vilar, J.L., Guillén, M. (Eds.), Fundación MAPFRE. (ISBN 978-84-9844-158-1).

HALL, F. (1986). *The Relationship Between Occupancy and Density*. *Transportation Forum*, Dec. 1986, pp. 46–52

HEASLIP, K.; KONDYLI, A.; ARGUEA, D.; ELEFTERIADOU, L.; SULLIVAN, F. (2009): *Estimation of Freeway Work Zone Capacity Through Simulation and Field Data*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies. No. 2130.

INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS (2000): *Norma 3.1 - IC Trazado*. 27 de diciembre de 1999. BOE de 2 de Febrero de 2000.

KIM Y, HALL F. (2004). *Relationships Between Occupancy and Density Reflecting Average Vehicle Lengths*. Transportation Research Record. ISSN 0361-1981 (Print). Volume 1883 / 2004. 85-93 DOI 10.3141/1883-10. 2004.

KLAVER, K. et al. (2007): *Analysis and modeling of auto users' perceptions of quality of service on urban streets*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies. Pag 167-175. Vol. 1883/2004. ISSN: 0361-1981.

KLODZINSKI, J.; GORDIN, E.; M. AL-DEEK, H. (2008): *Evaluation of Impacts of Open Road Tolling on Main-Line Toll Plaza*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Transportation Research Board of the National Academies. ISSN 0361-1981. Vol. 2012/2007. Pág. 72-83.

KRAEMER, C.; PARDILLO, J.; ROCCI, S.; ROMANA, M.; SÁNCHEZ, V. Y DEL VAL, M. (2009): *Ingeniería de Carreteras*, volumen I, 2ª edición. Mc Graw Hill. Madrid.

LEBART, L.; MORINEAU, A.; PIRON, M. (1995): *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, Collection: Sciences Sup. Dunod Ed., Paris.

LU, XIAO-YUN, VARAIYA, PRAVIN, HOROWITZ, ROBERTO AND PALEN, JOE (2008). *Faulty Loop Data Analysis/Correction and Loop Fault Detection*. 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual Meeting. 2008

MARTÍN, F. (1995): *Congruencia taxonómica y clasificaciones*. Boletín de la Asociación Española de Entomología 19:5.

MAY A.D. (1990): *Traffic flow fundamentals*. Prentice Hall, New Jersey.

MAY A. D, COIFMAN B. CAYFORD R, MERRITT G (2004). *Automatic Diagnostics of Loop Detectors and the Data Collection System in the Berkeley Highway Lab UCB*. ITS-PRR-2004-13 California PATH Research Report. 2004

McQUEEN (1999): *Intelligent transportation systems architecture*. Pages 201–258. Artech House Books.

Minnesota Department of Transportation (2000). Density Calculation from detector data. <http://data.dot.state.mn.us/datatools/Density.html>. 2000.

OLSEN, S.F.; MARTUZZI, M.; ELLIOT, P. (1996): *Cluster analysis and disease mapping—why, when, and how? A step by step guide*. BMJ 1996; pag 313 Nº 863-6

PARDO, C. E. y DEL CAMPO, P. C. (2007): *Combinación de métodos factoriales y de análisis de conglomerados en R: el paquete FactoClass*, Revista Colombiana de Estadística Volumen 30, nº 2, p231-245. Bogotá.

PAVIA E.G. y O'BRIEN, J.J. (1986): *Weibull Statistics of Wind Speed over the Ocean*. Journal of climate and applied meteorology. Vol. 25.

PINGNATARO, L.J. (1975): *Traffic Engineering. Theory and Practice*. Prentice Hall, New Jersey.

PNE199152-1-1 (2010) *Calidad de datos. Análisis de datos de tráfico*. Pre norma del sub comité 15 del comité técnico de normalización CTN199.

RAKHA, H. y VAN. AERDE, M. (1995): *Multivariate Calibration of Single Regime Speed-Flow-Density Relationships*. Department of Civil Engineering, Ellis Hall, Queen's University, Kingston. Ontario. Canada, K7L 3N6.

Bibliografía

RAKHA, H.A.; FARZANEH, M.; ARAFEH, M.; STERZIN, E. (2008): *Inclement Weather Impacts on Freeway Traffic Stream Behavior*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. No. 2071. Pp 8-18. ISSN: 0361-1981.

ROESS, R.P. y ULERIO, J.M. (2009): *Capacity of Freeway Weaving Segments*. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. Pag 34-41. Vol 2130/2009. ISSN: 0361-1981.

ROESS, R.P. y ULERIO, J.M. (2009): *Level of Service Analysis of Freeway Weaving Segments*. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board. Pag 25-33. Vol 2130/2009. ISSN: 0361-1981.

ROMANA, M. (1995): *Evaluación práctica de niveles de servicio en carreteras convencionales de dos carriles en España*. Departamento de Ingeniería Civil. Transportes. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

SERIF, I. (2006): *Deriving Traffic Performance Measures and Levels of Service from Second-Order Statistical Features of Spatiotemporal Traffic Contour Maps*. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board.

SMEED, R.J. y BENNET, G. (1949): *Research on road safety and traffic flow*. Institute of Civil Engineers. Road Paper nº.29, London.

TANG, S. y WANG, F. (2006): *A PCI-Based Evaluation Method for Level of Services for Traffic Operational Systems*. IEEE Transport. Intelligent Transport Systems. Vol. 7, no 4, pp 494-499.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2011): *75 years of the fundamental diagram for traffic flow theory*. Transportation Research Circular Number E-C149. Washington D.C., June 2011.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000): *Highway Capacity Manual – Special Report 209*. National Research Council. Washington D.C., 2000.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000): *Highway Capacity Manual*. National Research Council. Washington D.C., EEUU.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2010): *Highway Capacity Manual*. 5th Edition. National Research Council. Washington D.C., EEUU.

WALL, Z R, DAILEY, D J.(2003) *Algorithm for detecting and correcting errors in*

archived traffic data. Transportation Research Record No. 1855, Transportation Data Research. ISSN: 0361-1981. 2003

YE, Z.; LI-MIN, J.; GUO-QIANG, C. (2009): *A multi-grade evaluation model for traffic level of service*. 2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Vol.6, pp.3112-3115, July 2009 IEEE.

ZHANFENG, J., CHAO C., COIFMAN B., AND VARAIYA P. (2001) *The PeMS Algorithms for Accurate, Real-Time Estimates of g-Factors and Speeds from Single-Loop Detectors*. IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings, 2001, pp. 536–541.

ZHANG, X, NIHAN, N L, WANG, Y (2005). *Improved Dual-Loop Detection System for Collecting Real-Time Truck Data*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board Issue Number: 1917 Publisher: Transportation Research Board ISSN: 0361-1981. 2005

ANEXO 1. Caracterización de los tramos de estudio y análisis de los mismos

El punto de medida siguiente, está ubicado en la A-3 en el punto kilométrico 270+000. El tramo está formado por dos carriles por sentido, en cada carril hay instalada una espira doble, por lo que se recopila constantemente información de los cuatro carriles y ambos sentidos. Previo y posterior al punto de medición existen salidas y entradas de la vía, por lo que el punto de medición únicamente adquiere datos del tráfico unificado, no siendo modificado por aceleraciones o deceleraciones para la incorporación o salida de la vía. Los detalles gráficos de este punto de medición se pueden ver en la Ilustración 1.

Sobre este punto se han analizado un total de 2 mediciones en diversas fechas. El conjunto total de datos analizados ha sido de 2881, una vez filtrados, se han reducido hasta 1683, descartando 1198 datos por incumplir uno o varios requisitos de los filtros establecidos. A continuación puede verse detalladamente cada una de las mediciones con sus gráficas adjuntas.

A-3, PK.270+000

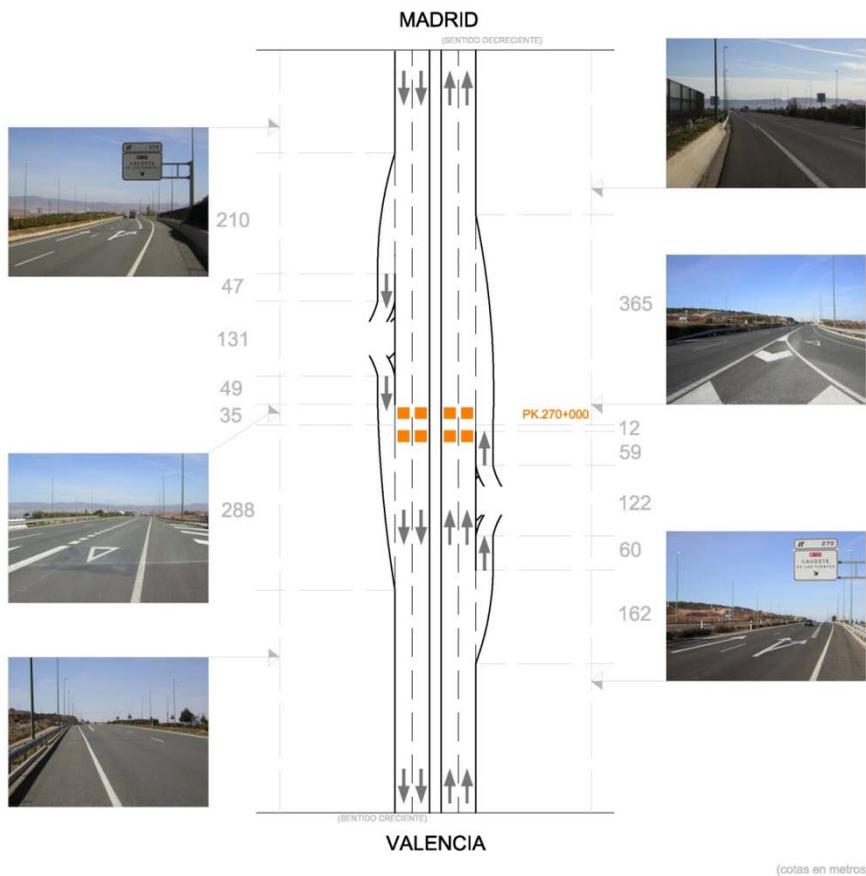
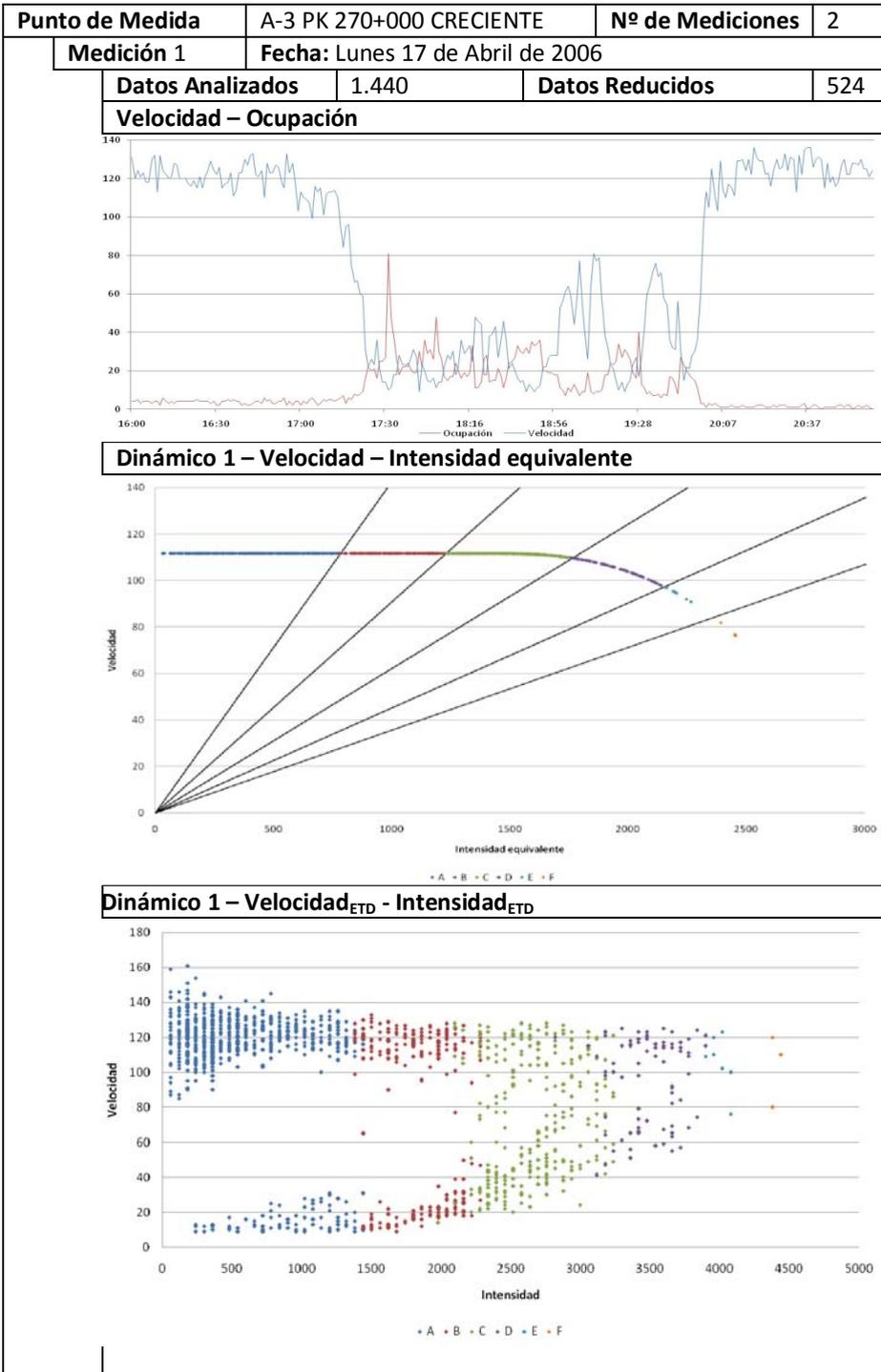
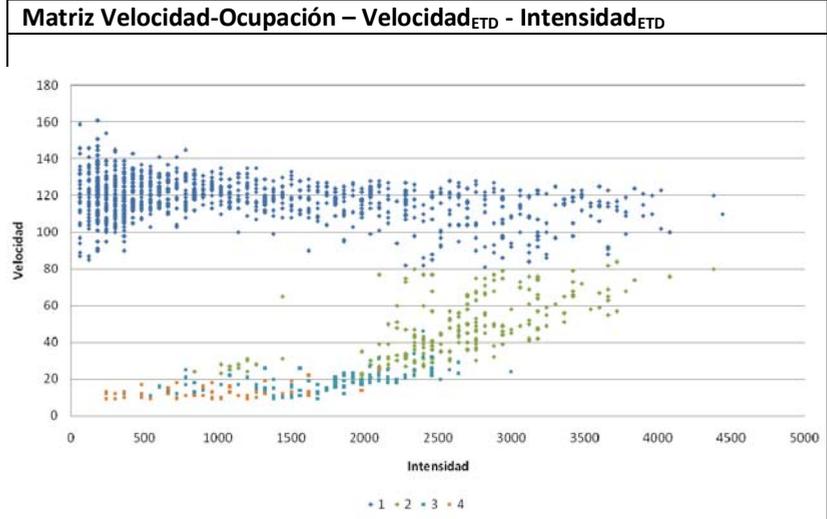
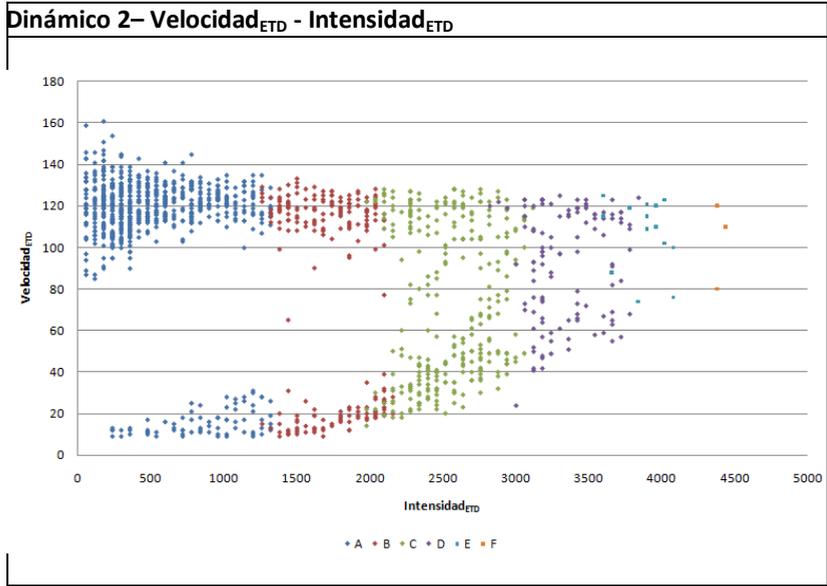
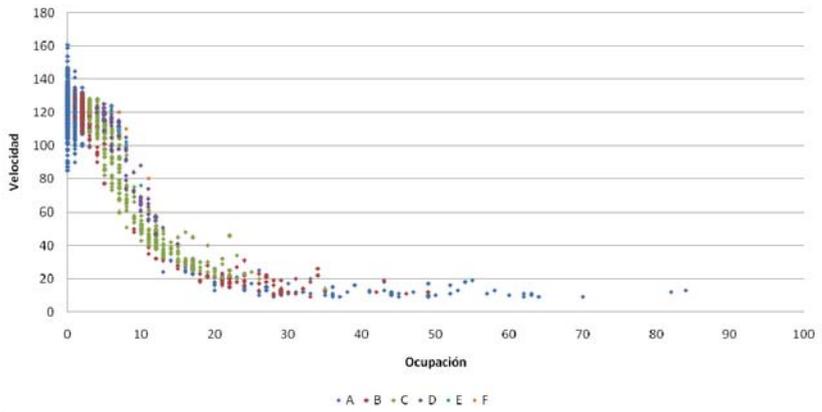


Ilustración 1: Esquema de la A-3 PK 270+000.

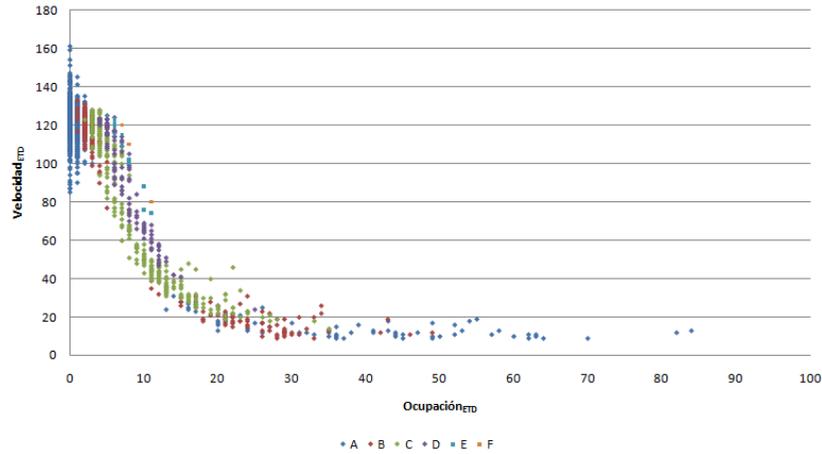


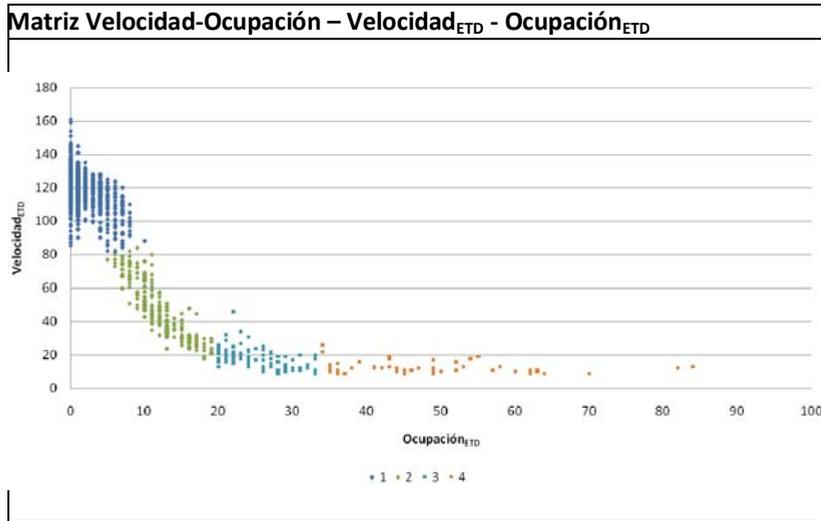


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

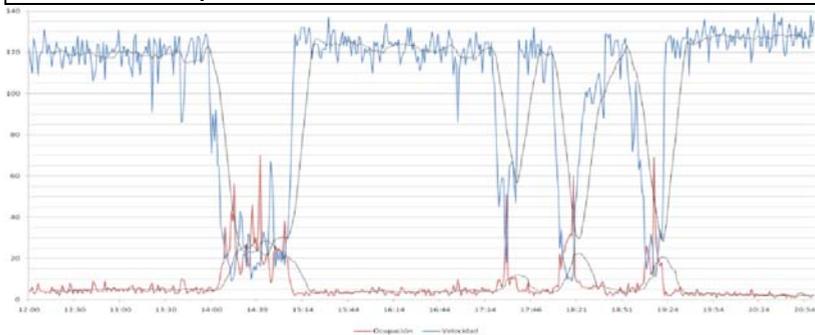




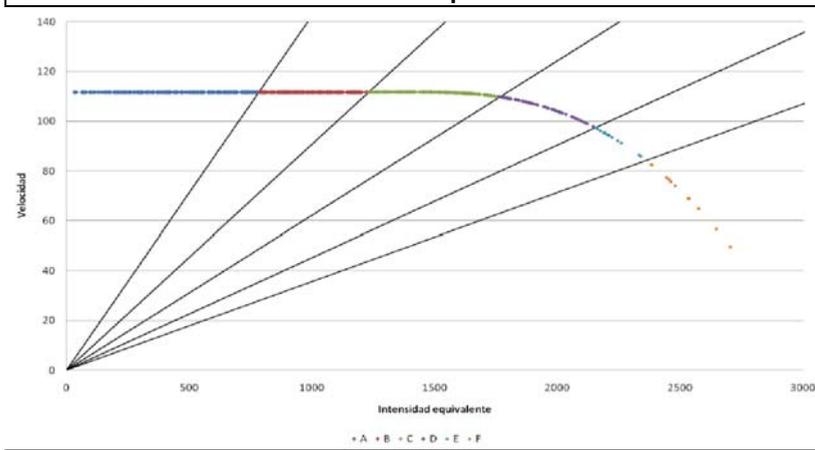
Medición 2	Fecha: Lunes 04 de Abril de 2007		
-------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.441	Datos Reducidos	674
-------------------------	-------	------------------------	-----

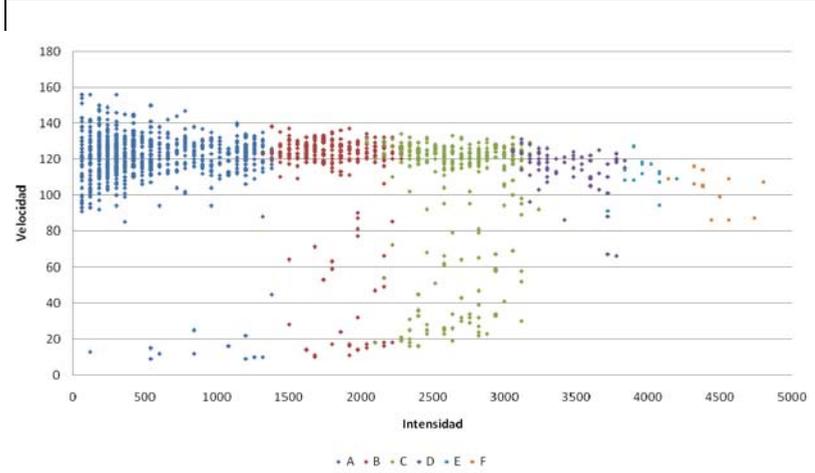
Velocidad – Ocupación



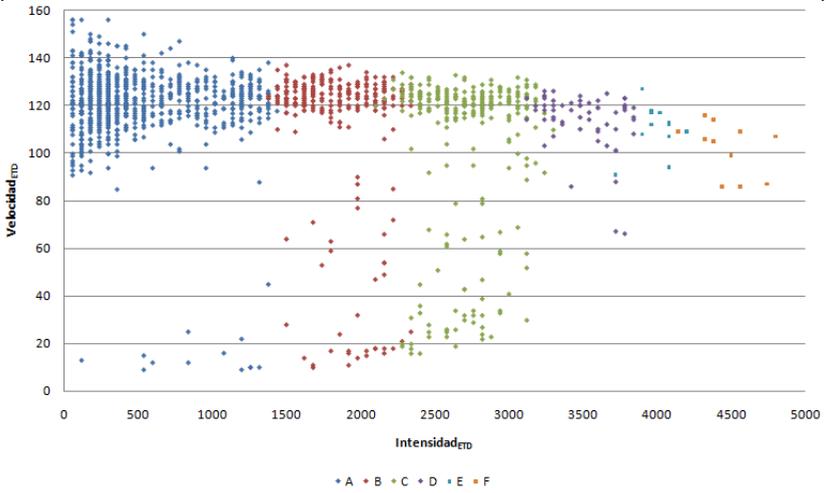
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



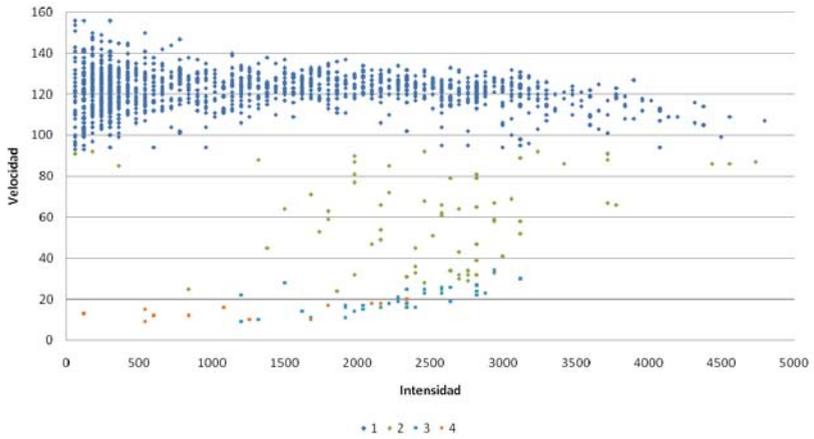
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



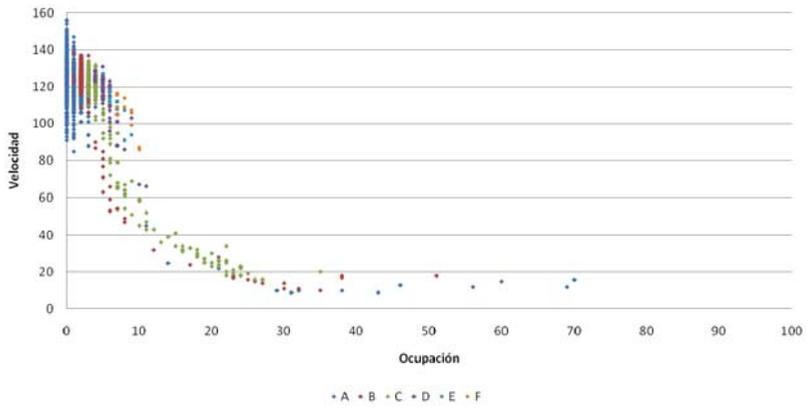
Dinámico 2– Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



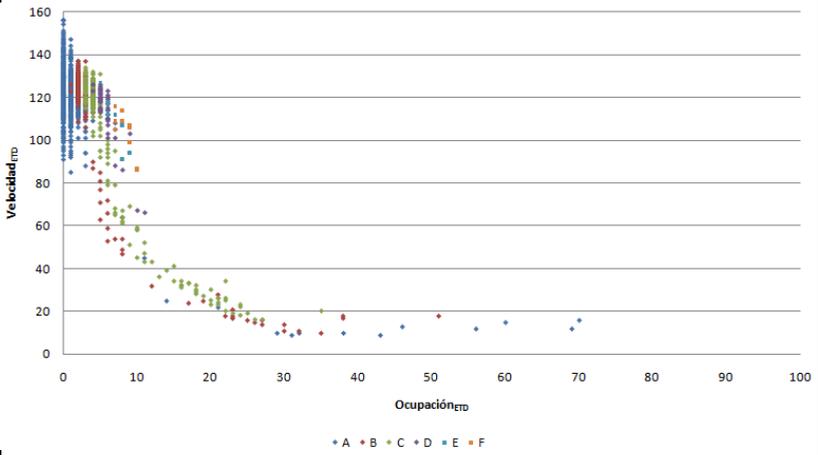
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

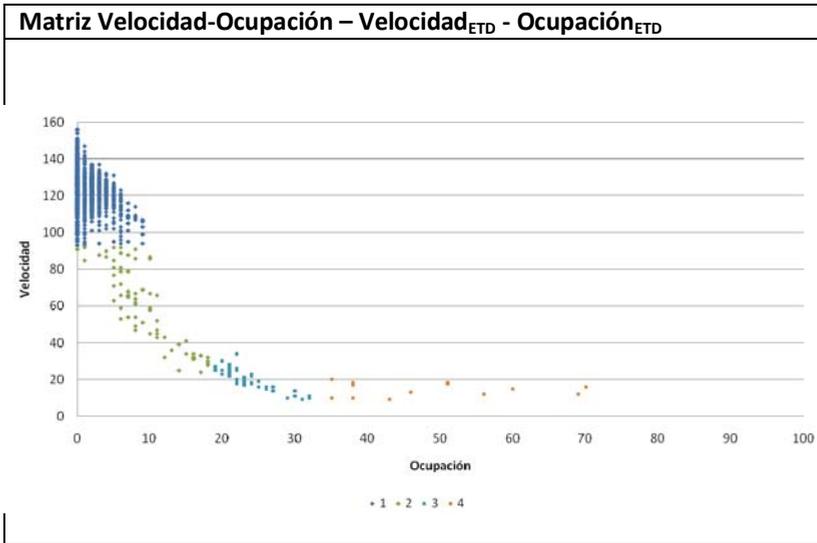


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}





El punto de medida siguiente, está ubicado en la A-3 en el punto kilométrico 285+150. El tramo está formado por dos carriles por sentido, en cada carril hay instalada una espira doble, por lo que se recopila constantemente información de los cuatro carriles y ambos sentidos. Previo y posterior al punto de medición existen salidas y entradas de la vía, por lo que el punto de medición únicamente adquiere datos del tráfico unificado, no siendo modificado por aceleraciones o deceleraciones para la incorporación o salida de la vía. Los detalles gráficos de este punto de medición se pueden ver en la Ilustración 2.

Sobre este punto se han analizado un total de 5 mediciones en diversas fechas. El conjunto total de datos analizados ha sido de 6516, una vez filtrados, se han reducido quedándose en 2829, descartando 2687 datos por incumplir uno o varios requisitos de los filtros establecidos. A continuación puede verse detalladamente cada una de las mediciones con sus gráficas adjuntas.

A-3, PK.285+150

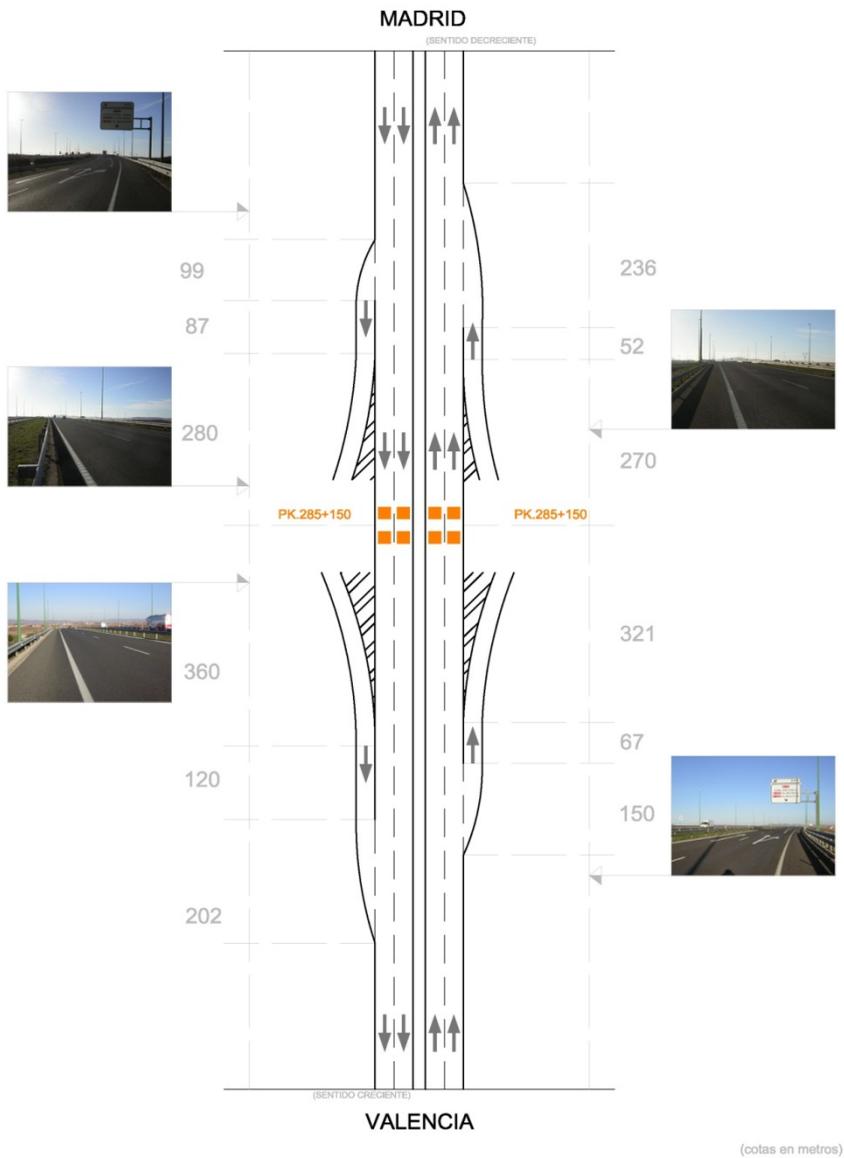
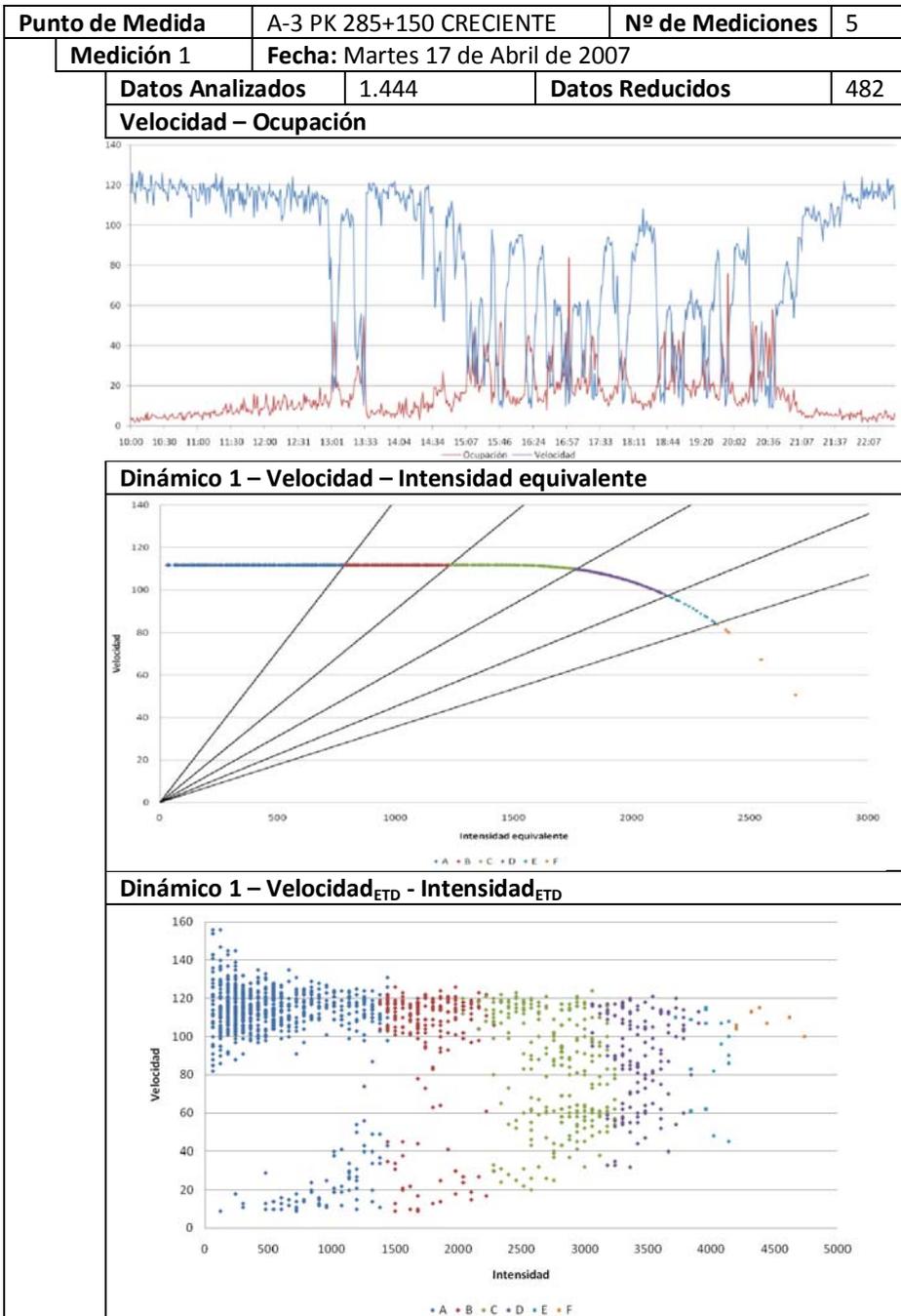
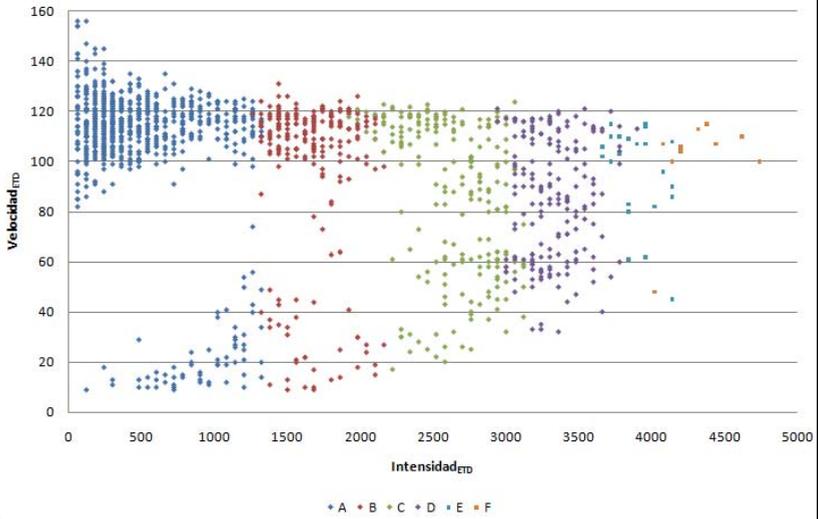


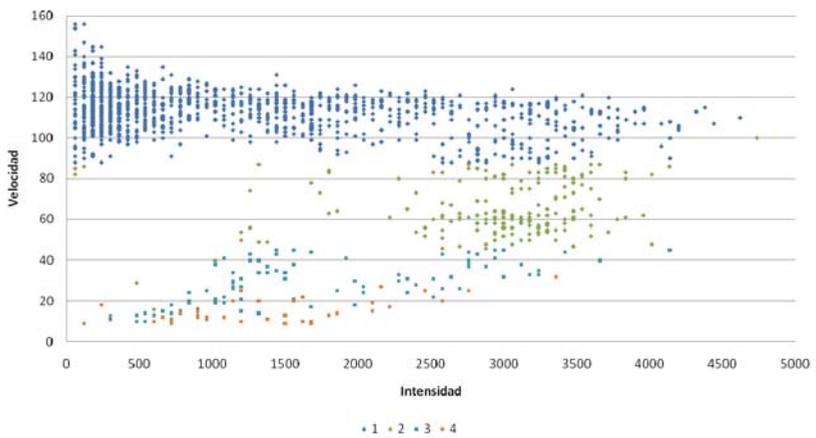
Ilustración 2: Esquema de la A-3 PK 285+150.



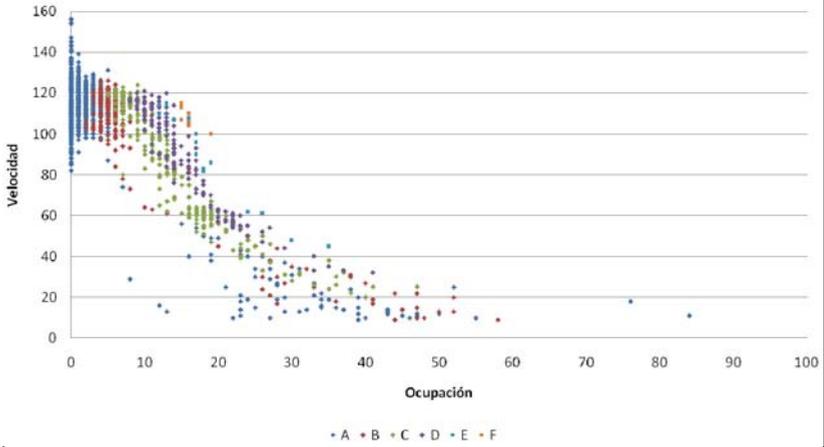
Dinámico 2- Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



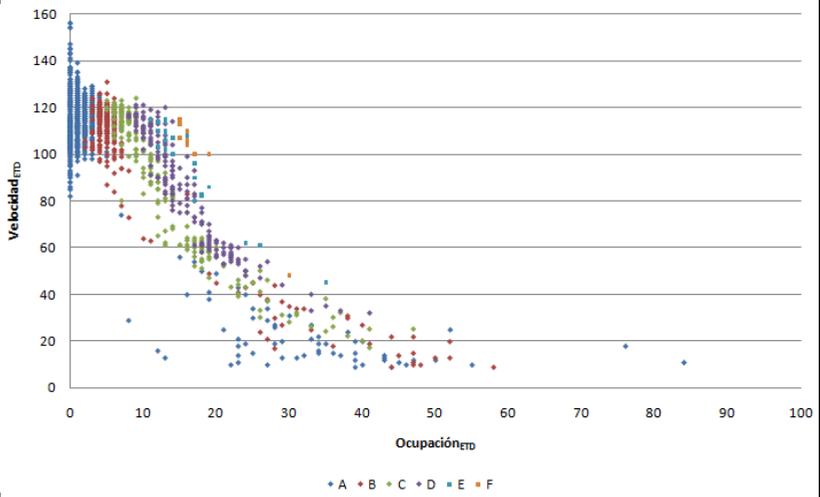
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

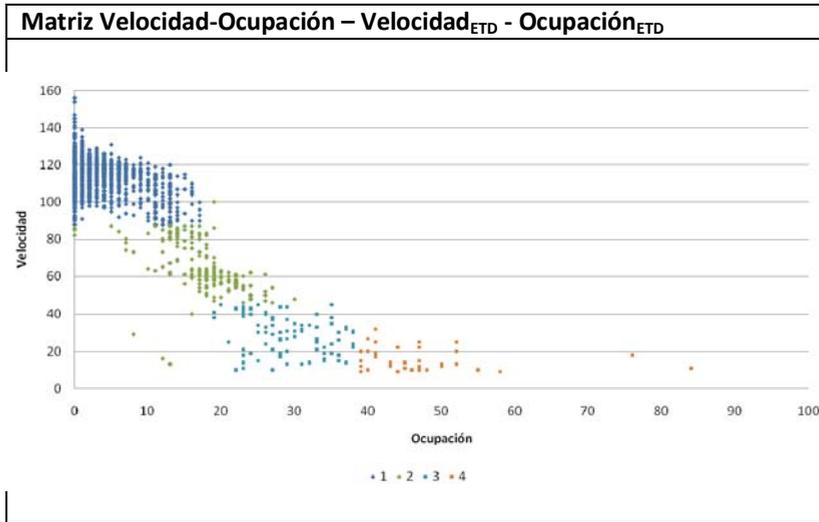


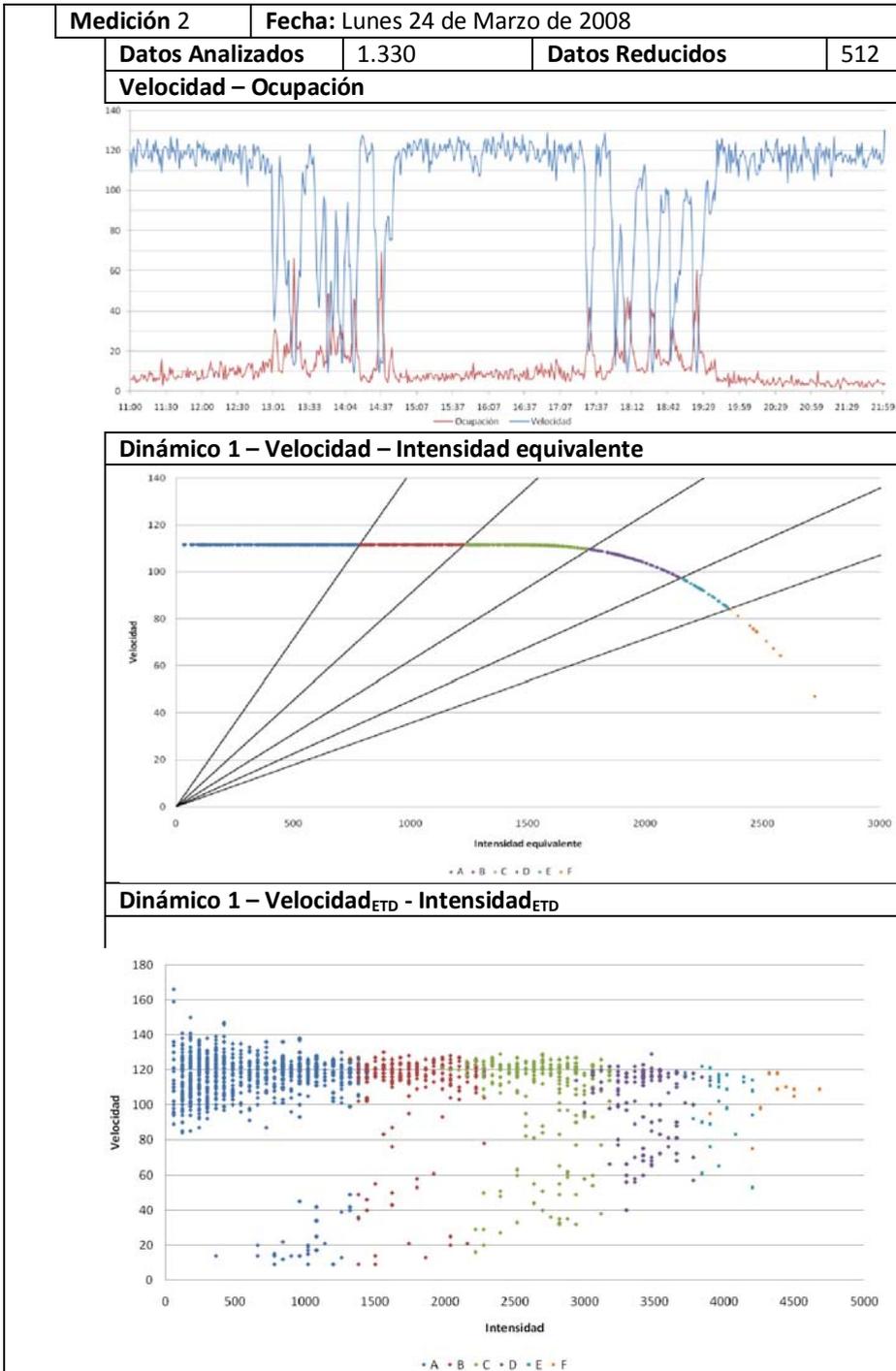
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



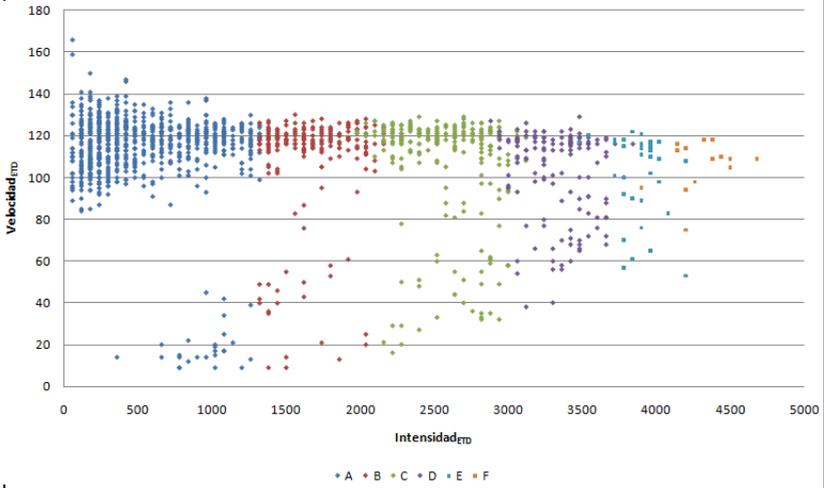
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



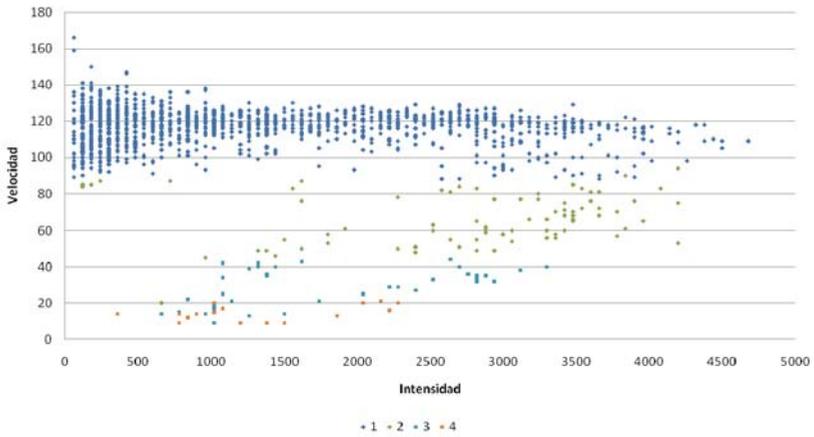




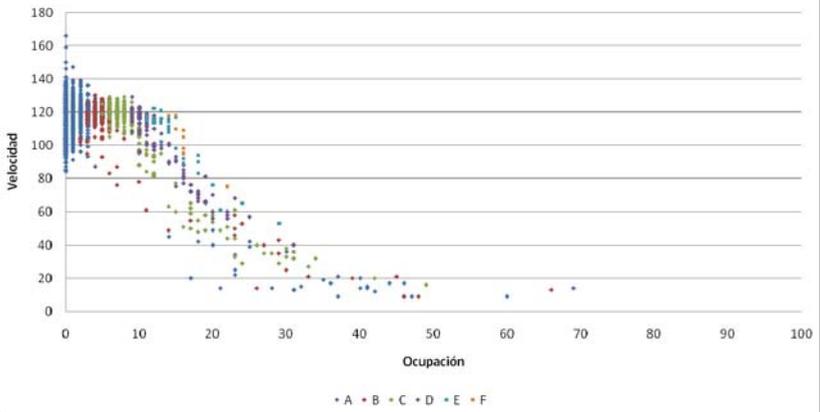
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



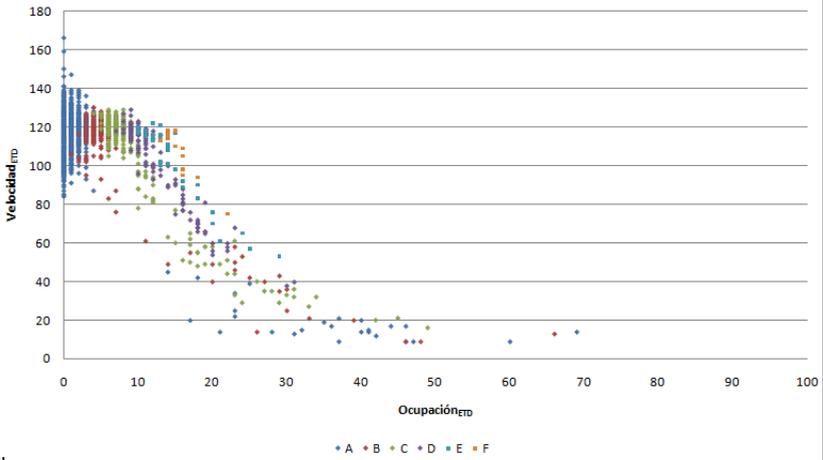
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

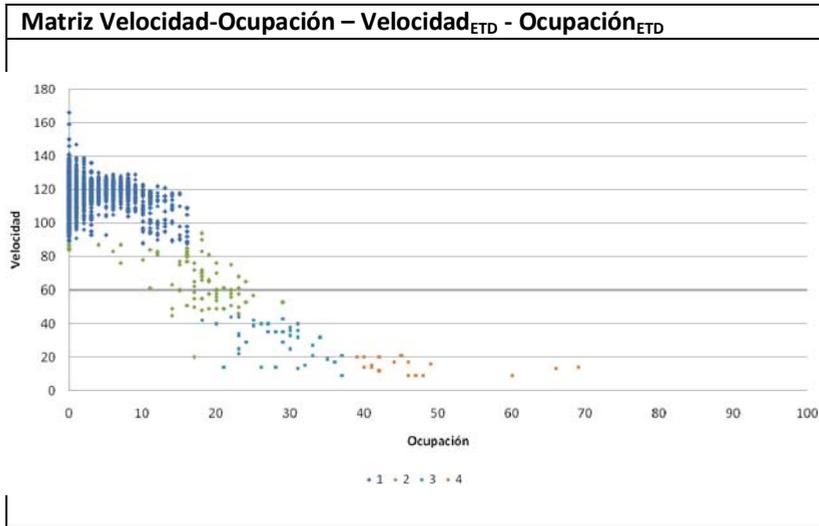


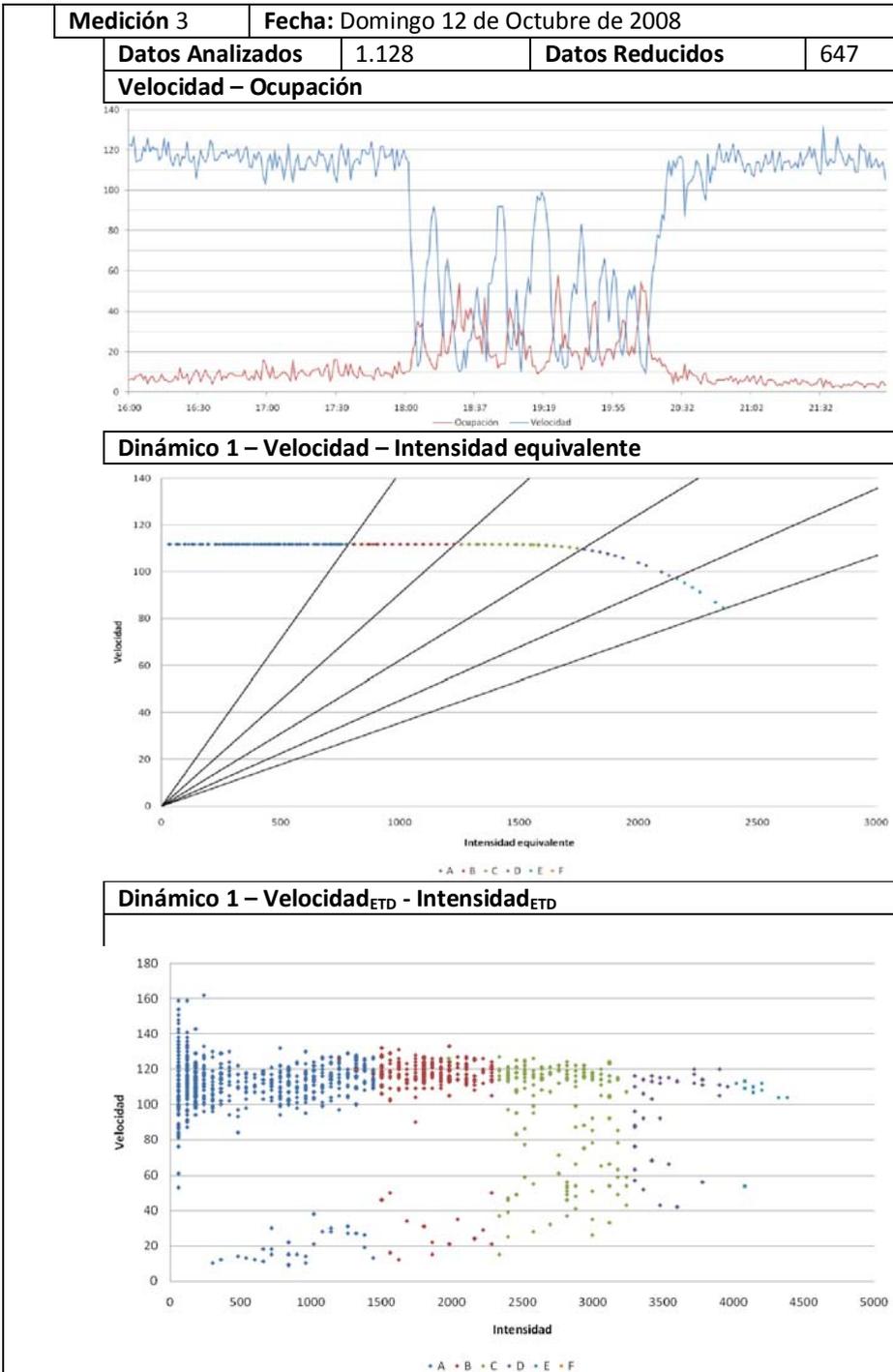
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



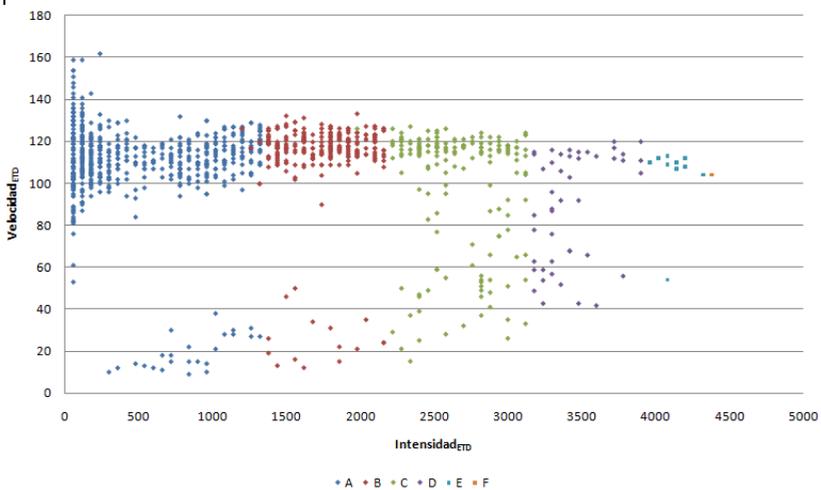
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



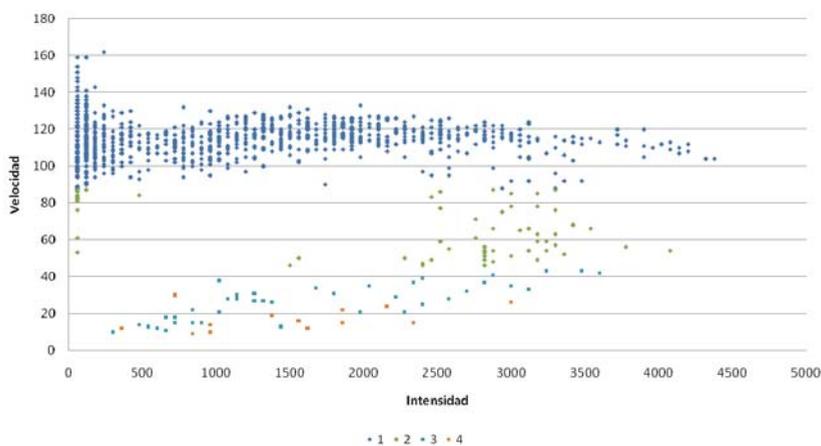




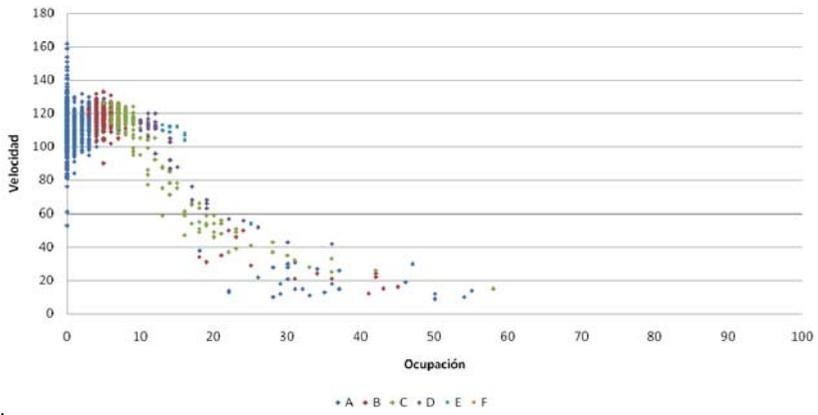
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



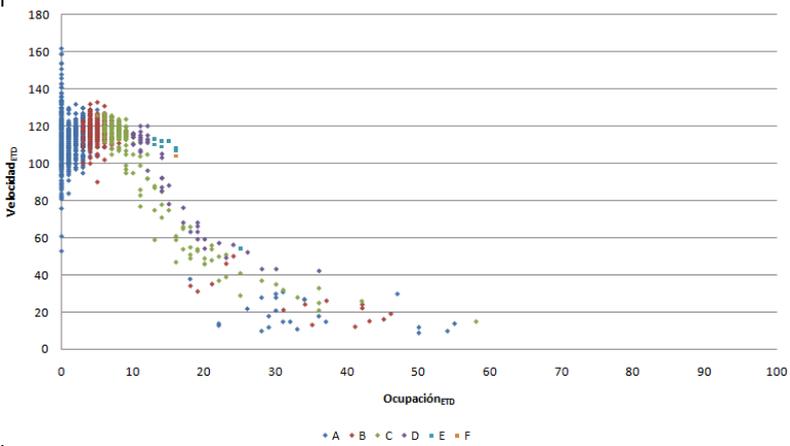
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

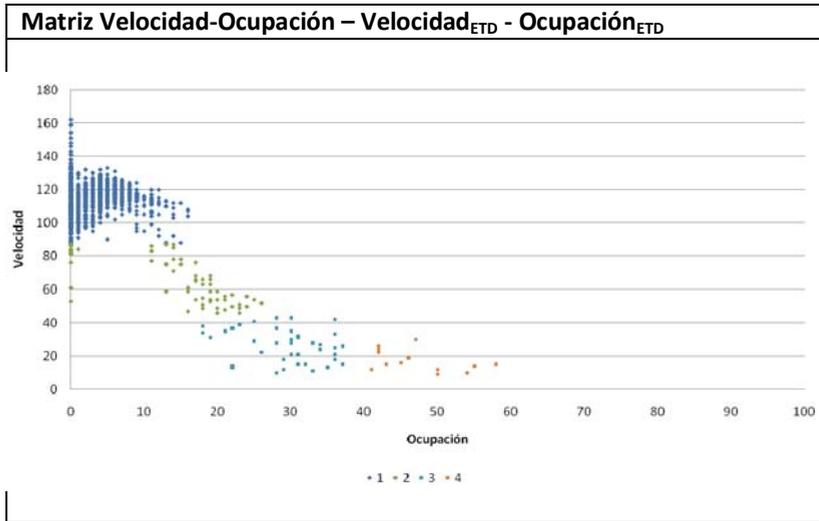


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

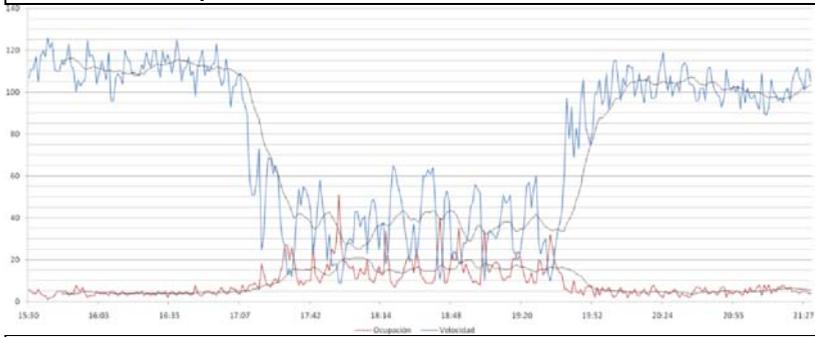




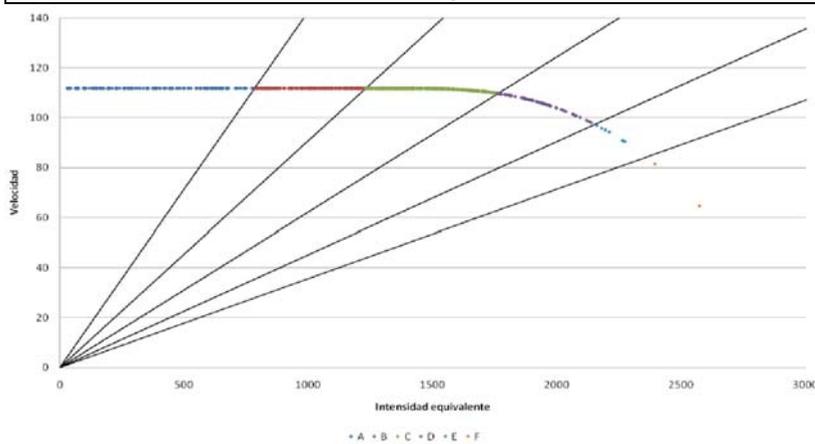
Medición 4	Fecha: Lunes 20 de Marzo de 2006		
-------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.328	Datos Reducidos	497
-------------------------	-------	------------------------	-----

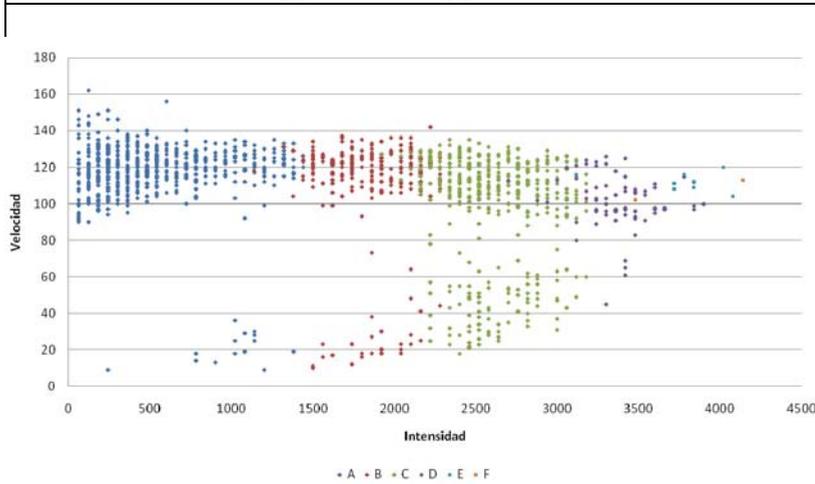
Velocidad – Ocupación



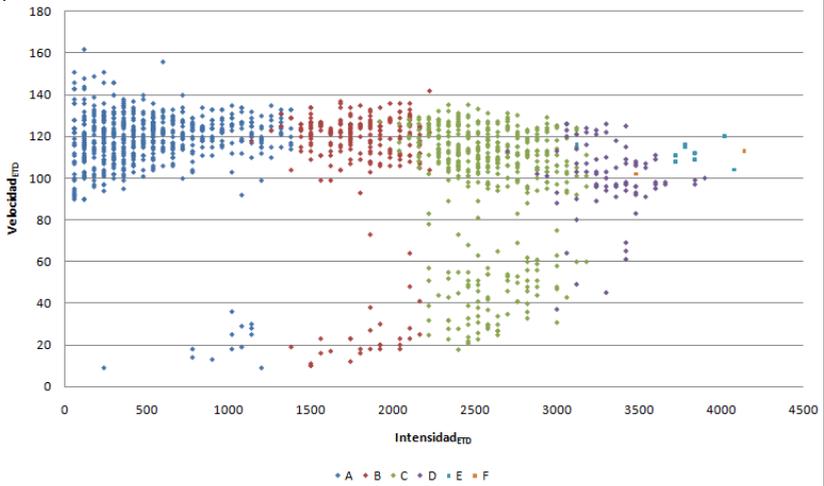
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



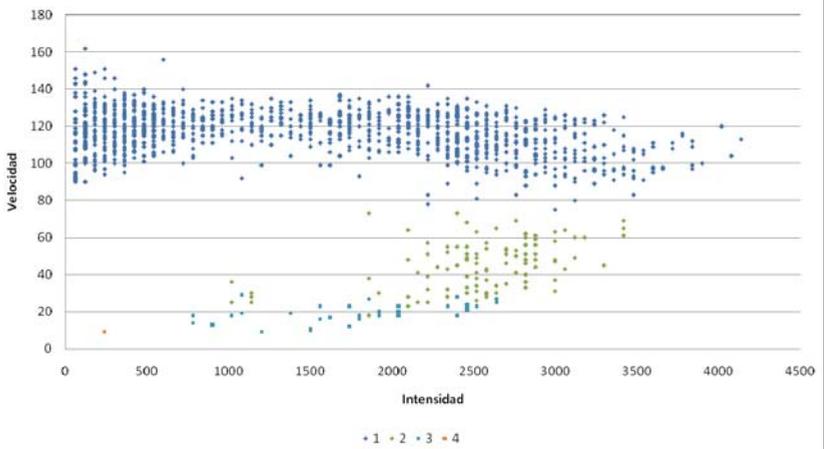
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



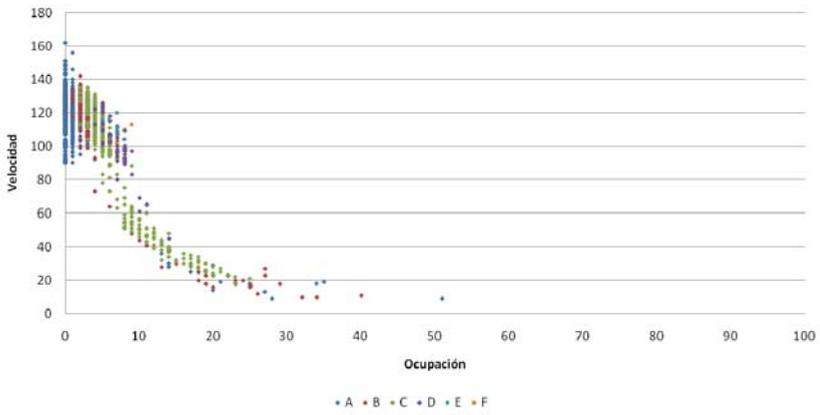
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



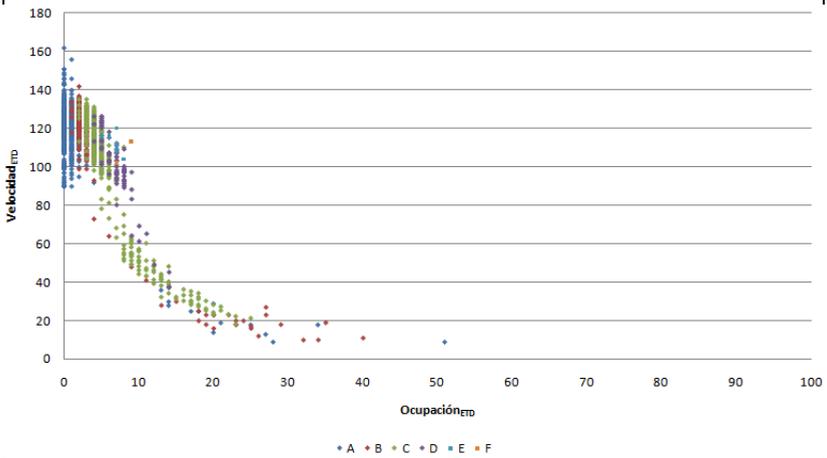
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

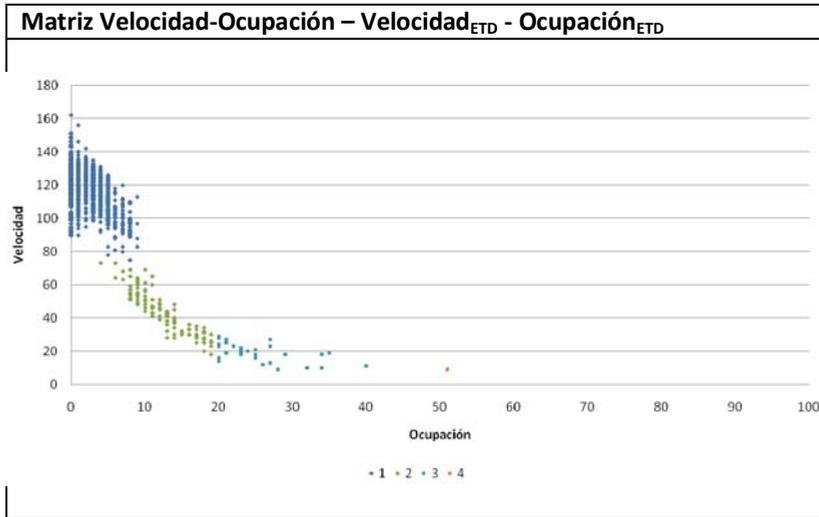


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

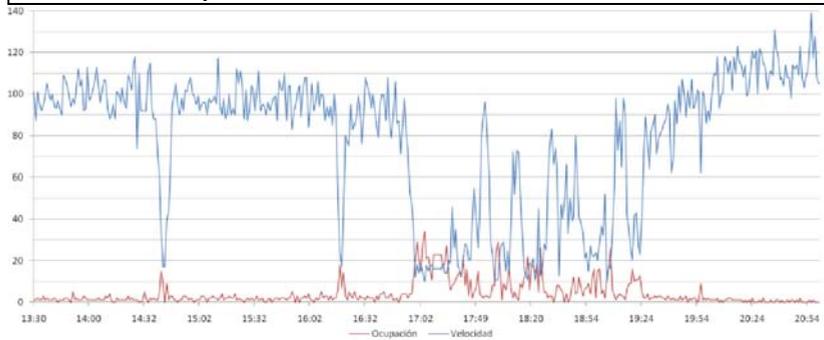




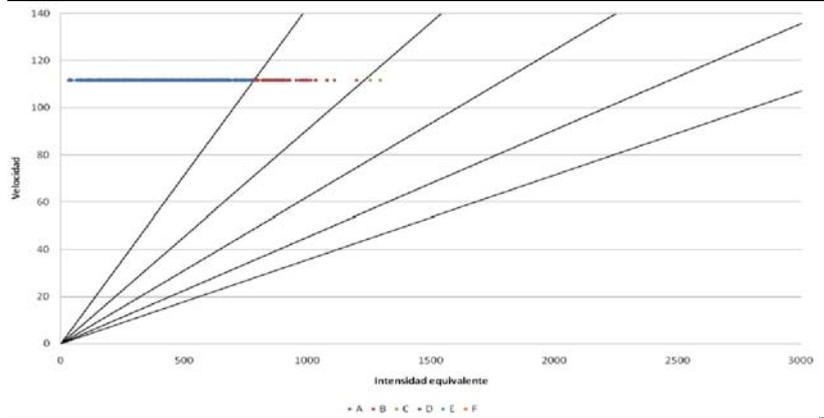
Medición 5	Fecha: Jueves 26 de Junio de 2008		
-------------------	--	--	--

Datos Analizados	1.286	Datos Reducidos	549
-------------------------	-------	------------------------	-----

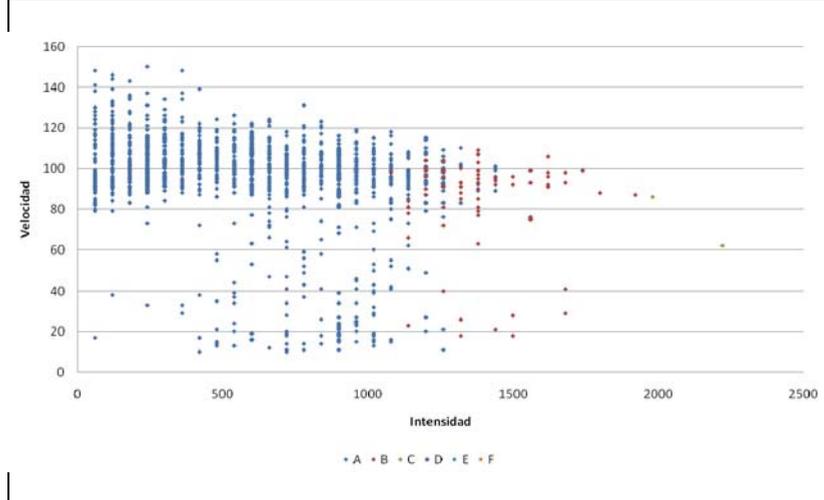
Velocidad – Ocupación



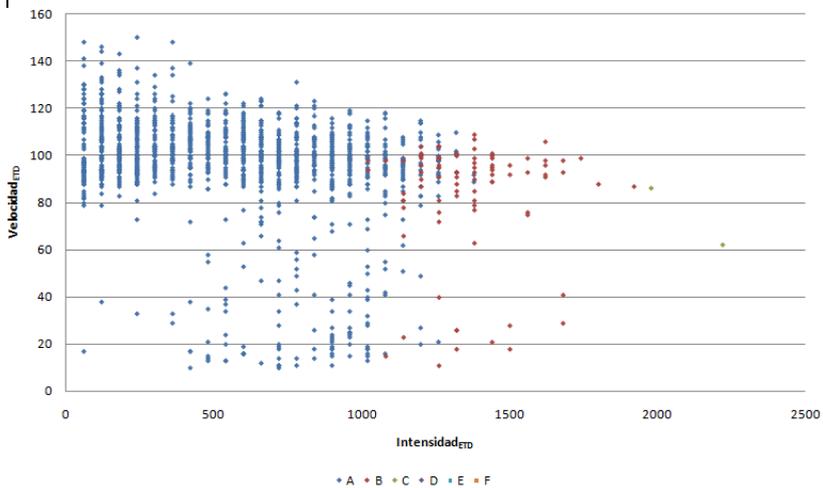
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



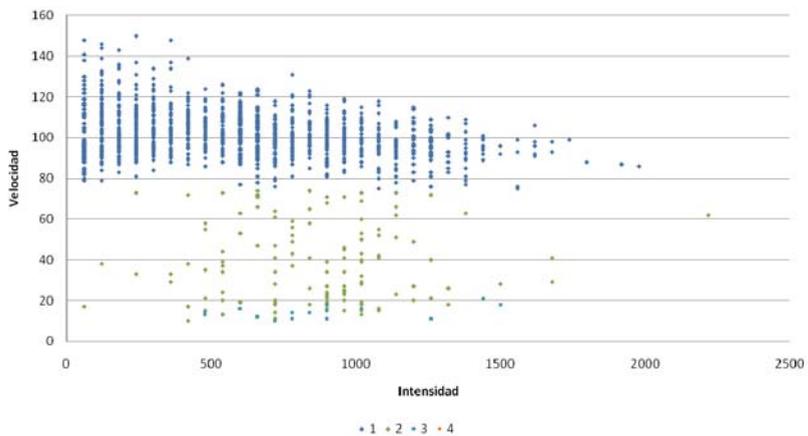
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



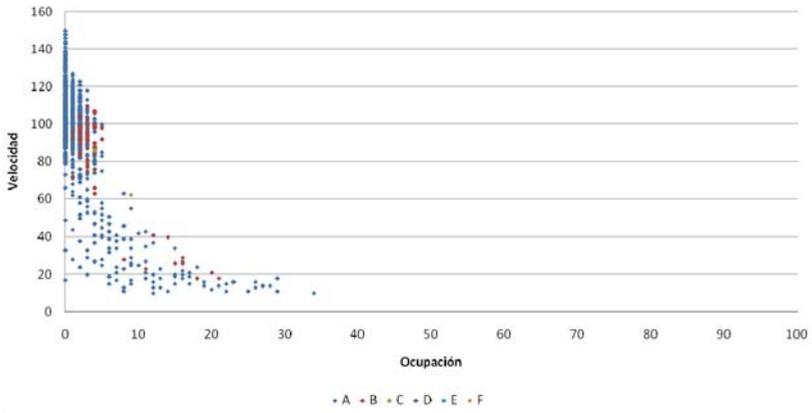
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



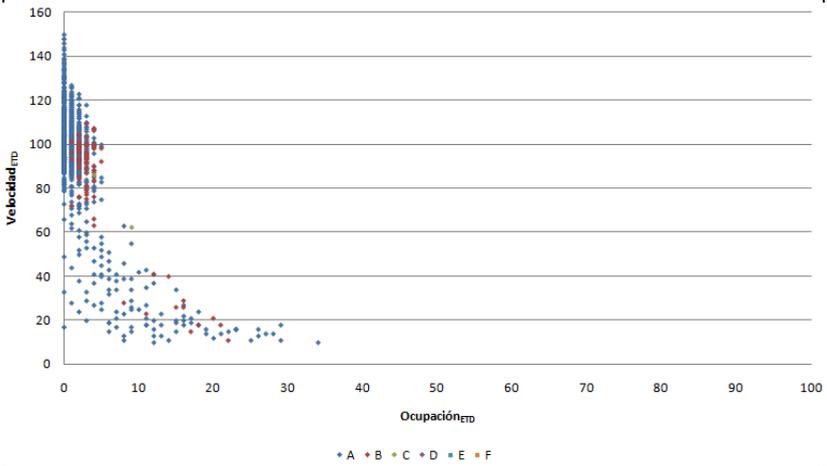
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

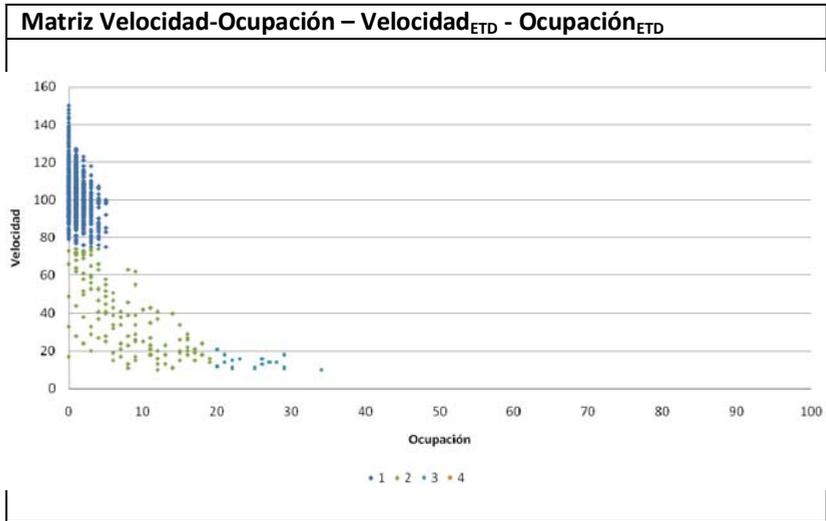


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}





El punto de medida siguiente, está ubicado en la A-3 en el punto kilométrico 291+450. El tramo está formado por tres carriles en sentido decreciente y dos carriles en sentido creciente, en cada carril hay instalada una espira doble, por lo que se recopila constantemente información de los cuatro carriles y ambos sentidos. Previo y posterior al punto de medición existen salidas y entradas de la vía, por lo que el punto de medición únicamente adquiere datos del tráfico unificado, no siendo modificado por aceleraciones o deceleraciones para la incorporación o salida de la vía. Los detalles gráficos de este punto de medición se pueden ver en la Ilustración 3.

Sobre este punto se han analizado un total de 9 mediciones en diversas fechas. El conjunto total de datos analizados ha sido de 12425, una vez filtrados, se han reducido quedándose en 7132, descartando 5293 datos por incumplir uno o varios requisitos de los filtros establecidos. A continuación puede verse detalladamente cada una de las mediciones con sus gráficas adjuntas.

A-3, PK.291+450

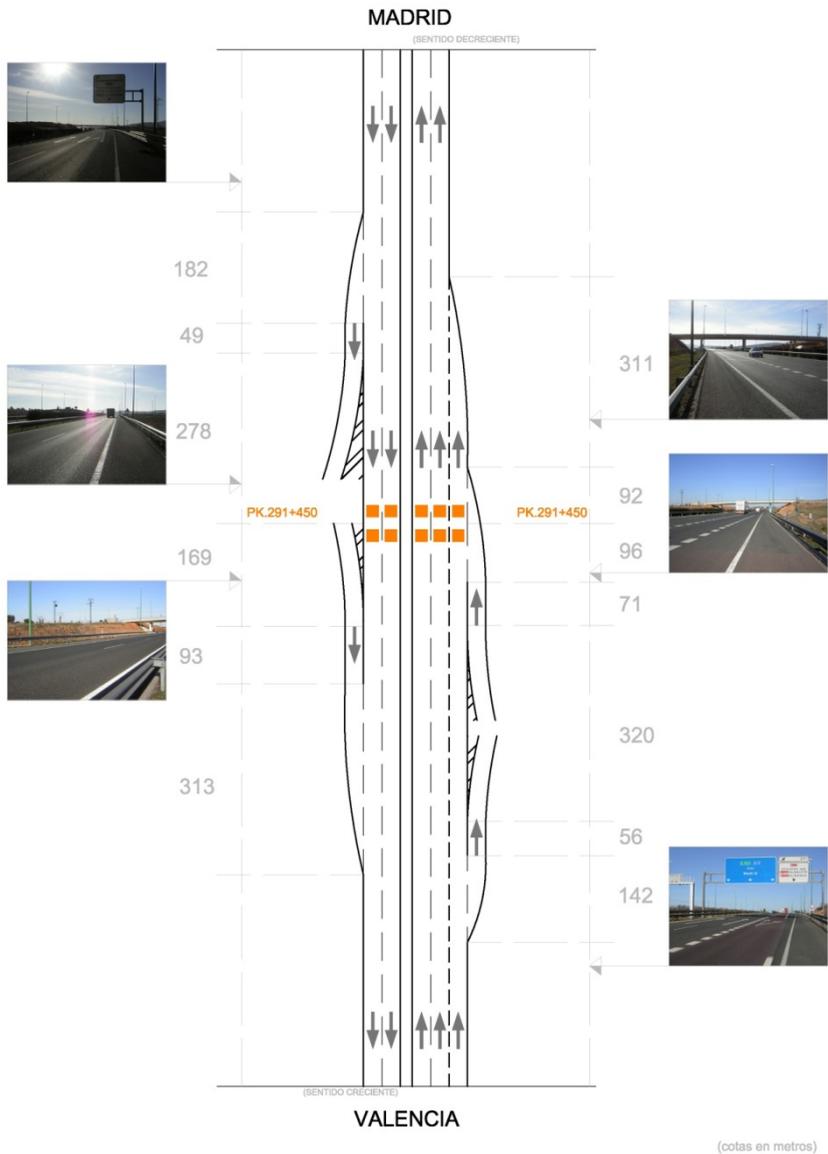
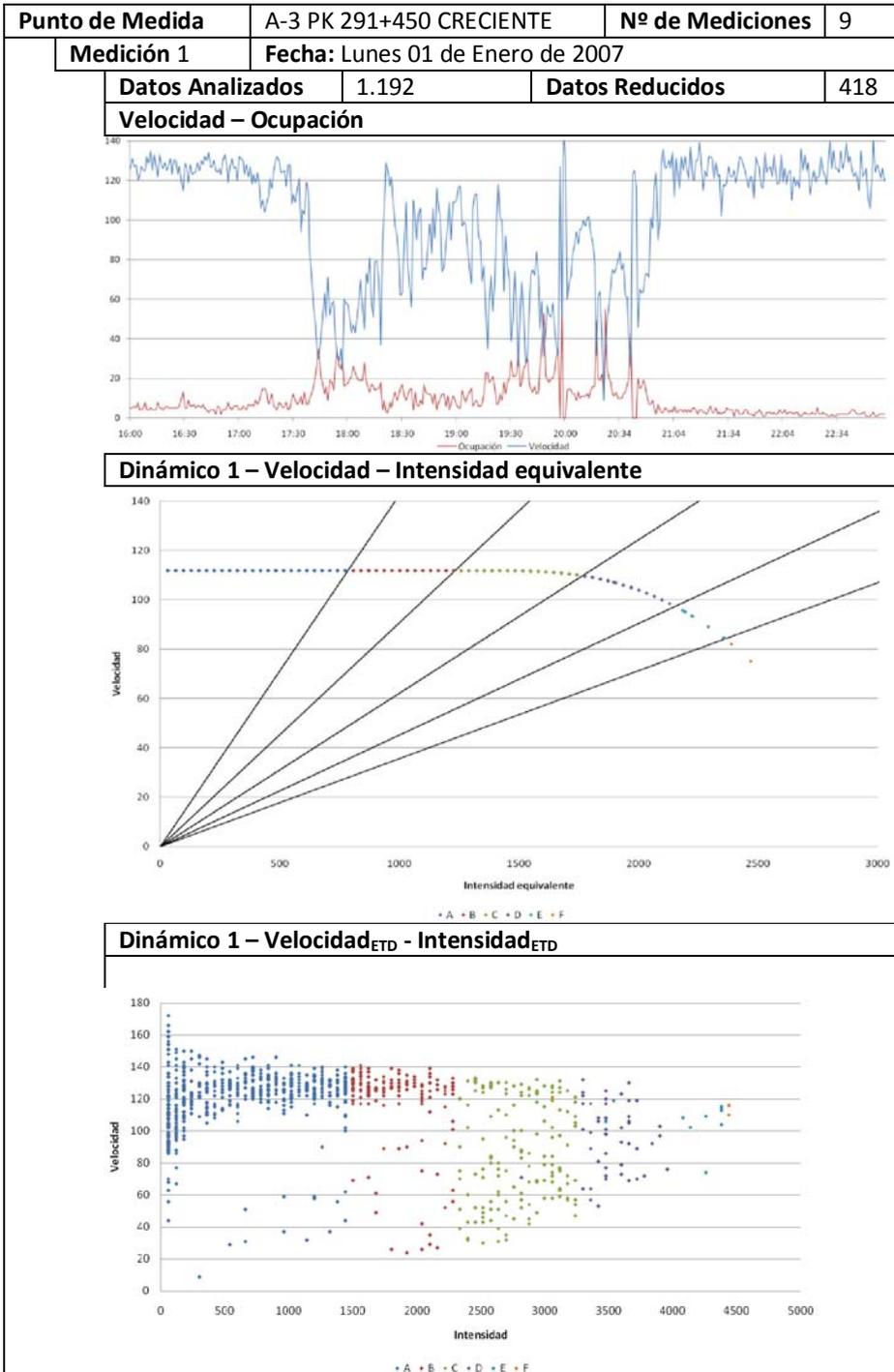
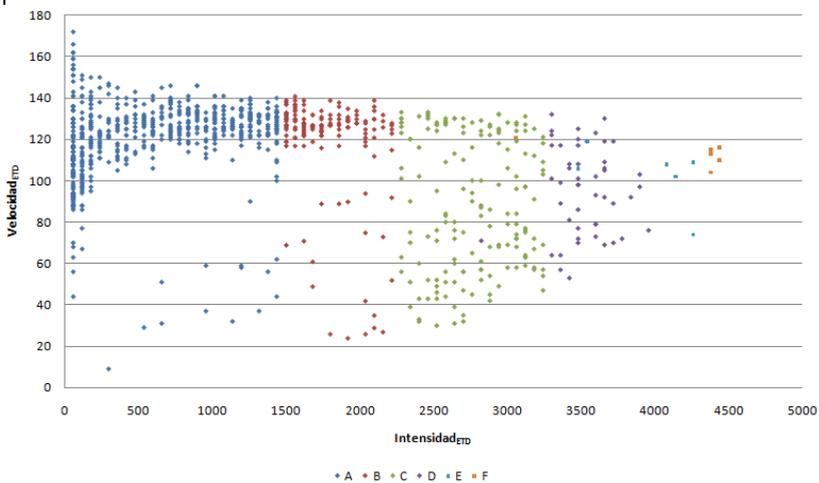


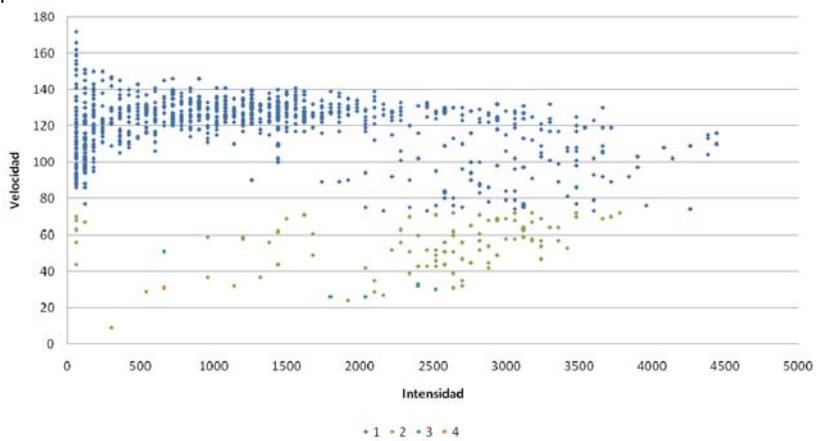
Ilustración 3: Esquema de la A-3 PK 291+450.



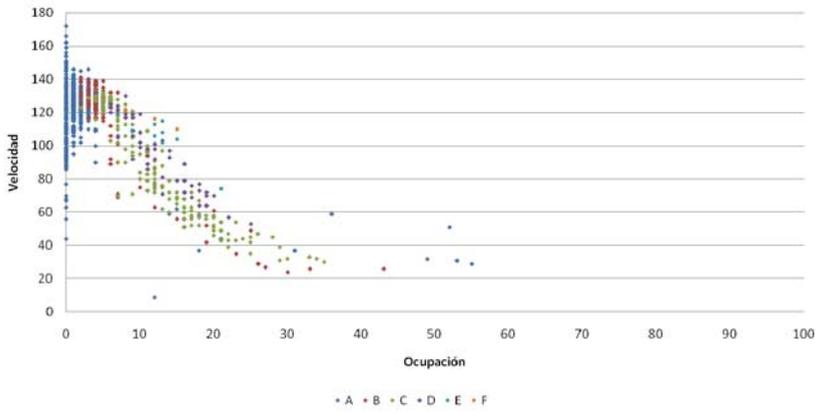
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



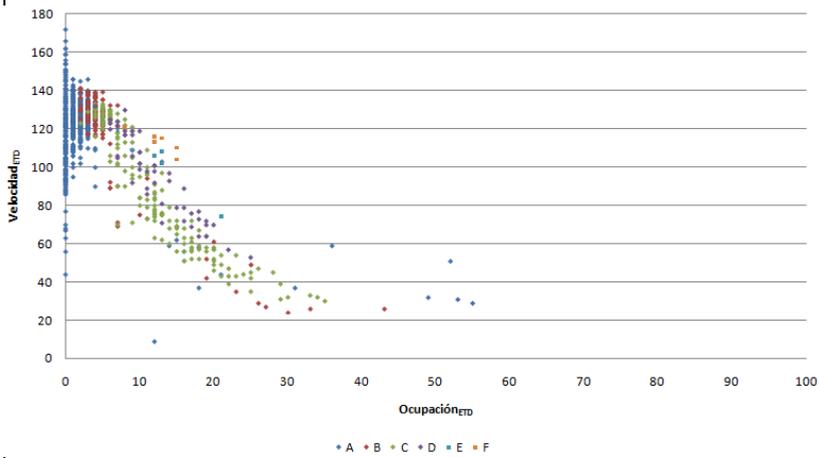
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

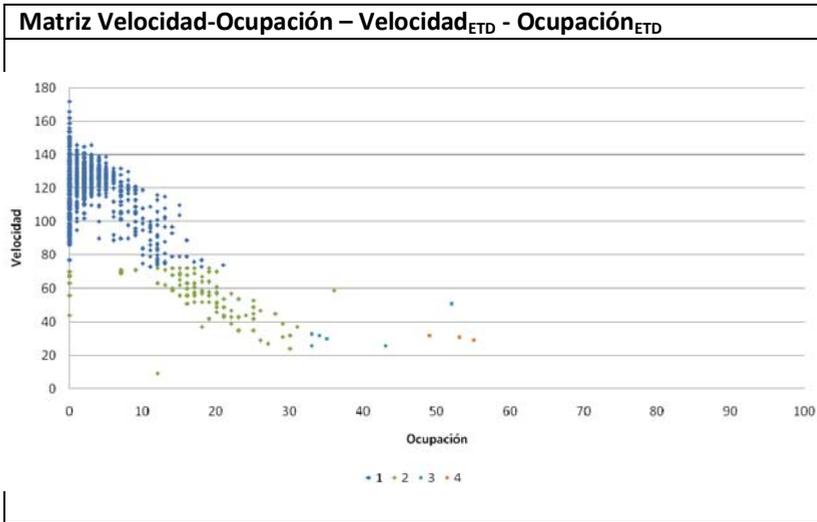


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

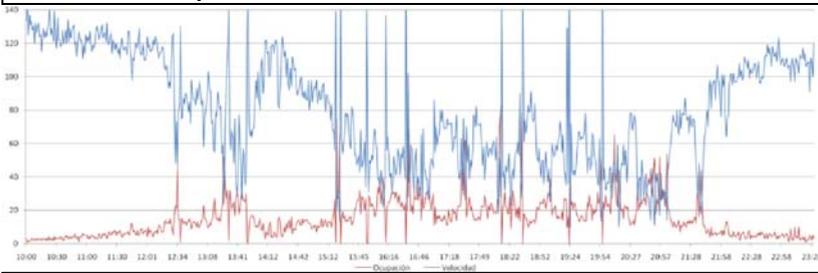




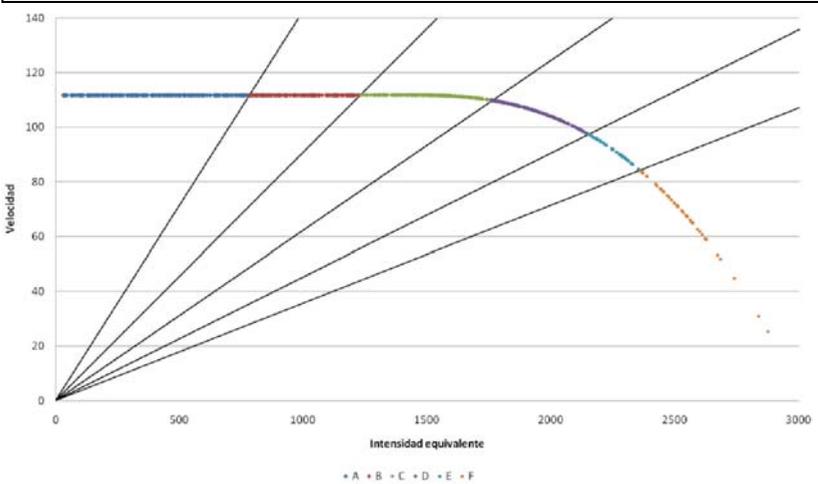
Medición 2	Fecha: Lunes 09 de Abril de 2007		
-------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.439	Datos Reducidos	449
-------------------------	-------	------------------------	-----

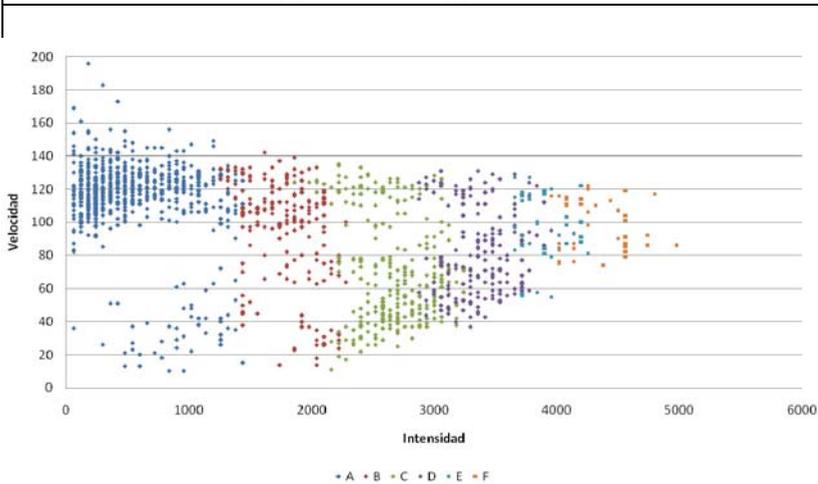
Velocidad – Ocupación



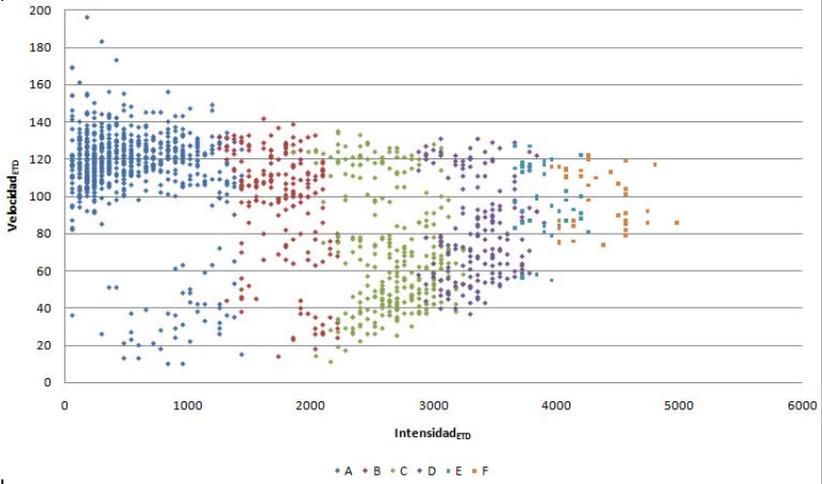
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



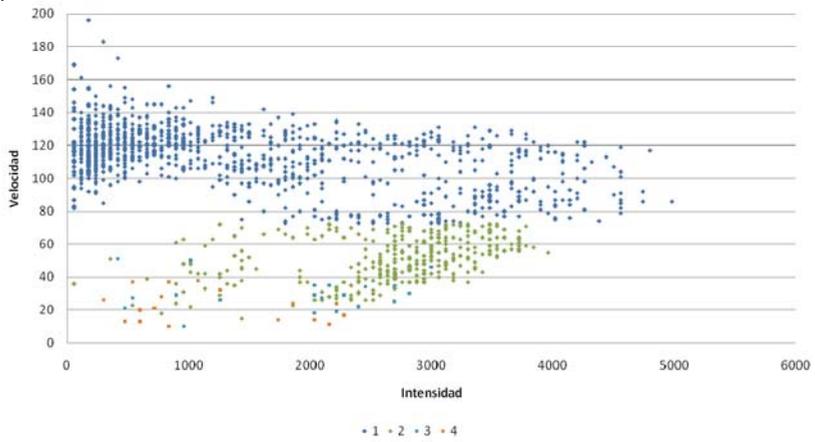
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



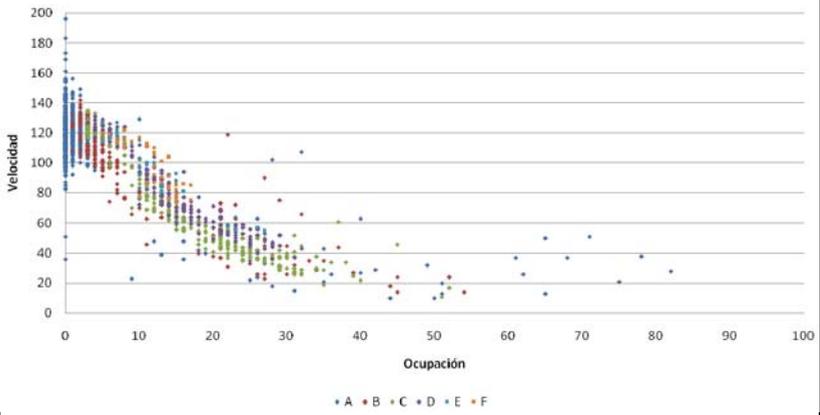
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



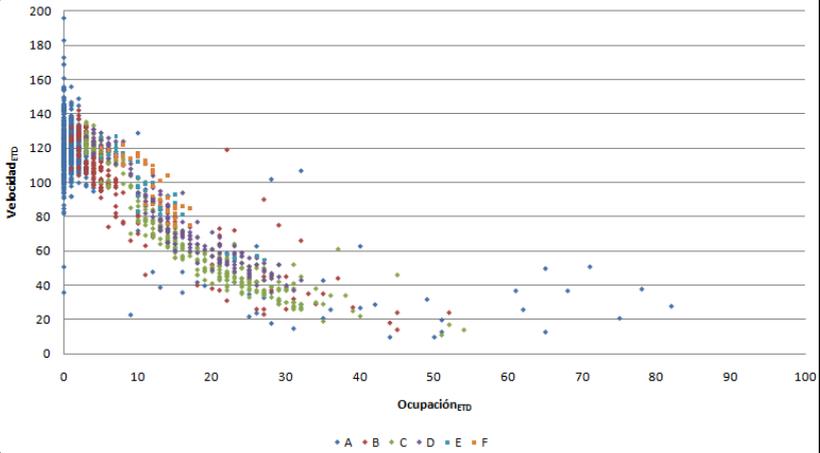
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

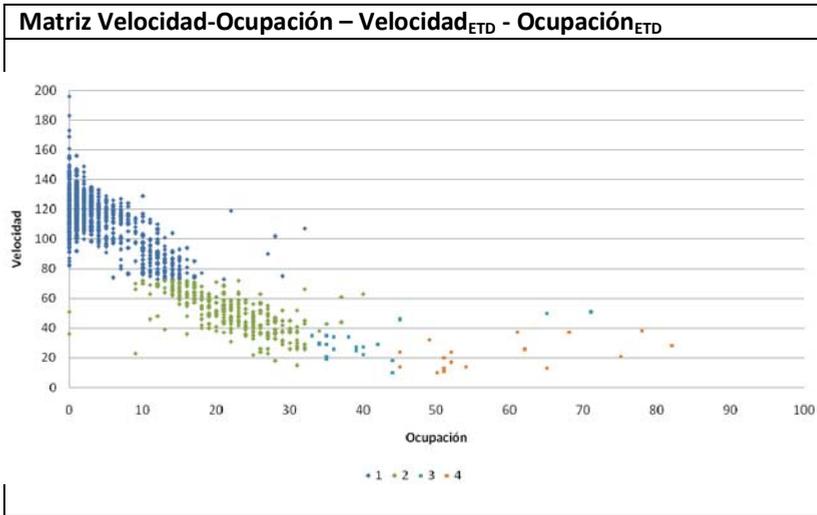


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

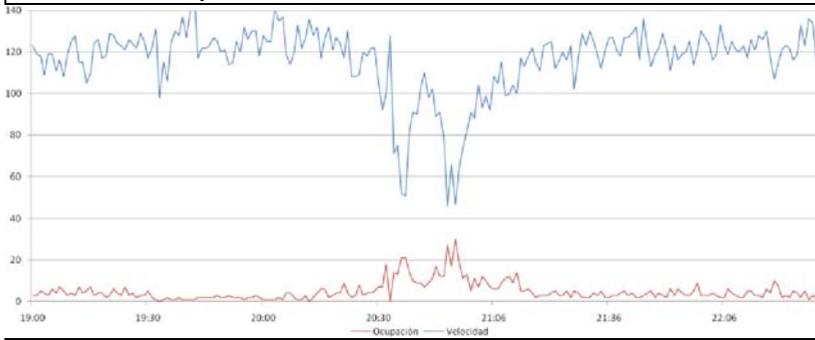




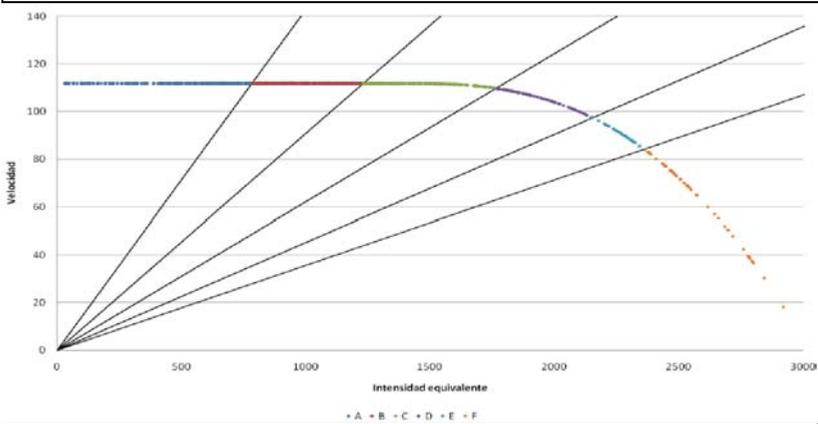
Medición 3	Fecha: Viernes 06 de Julio de 2007		
-------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.440	Datos Reducidos	748
-------------------------	-------	------------------------	-----

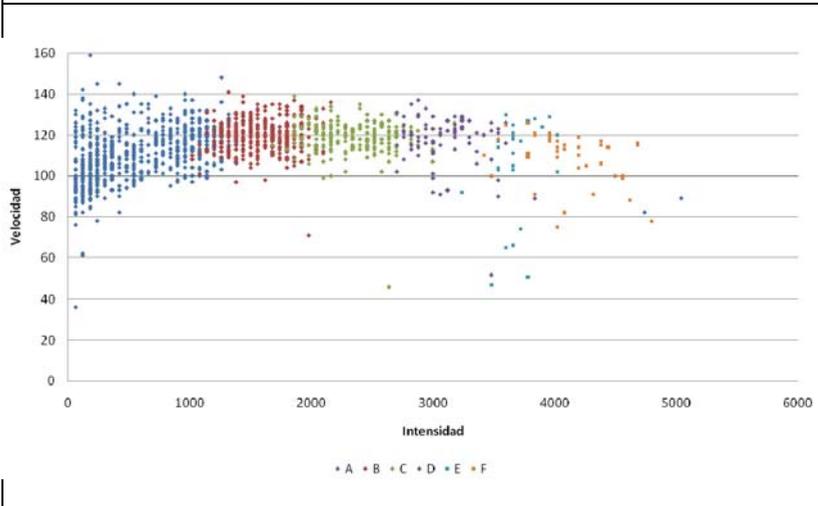
Velocidad – Ocupación



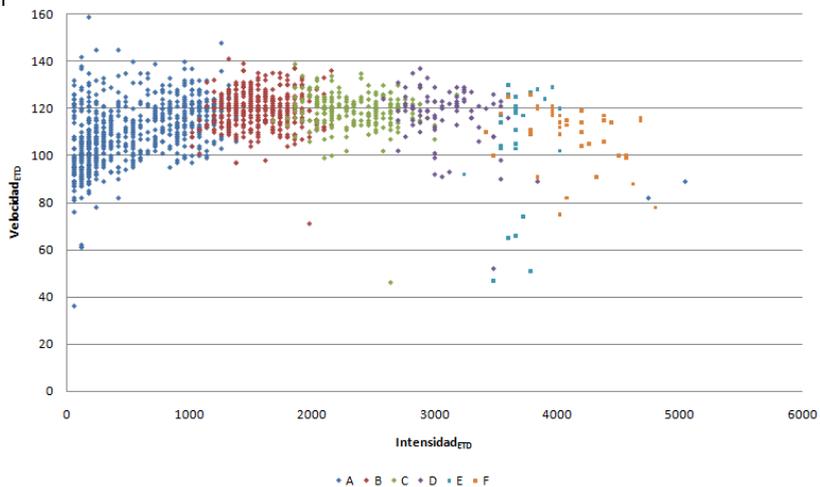
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



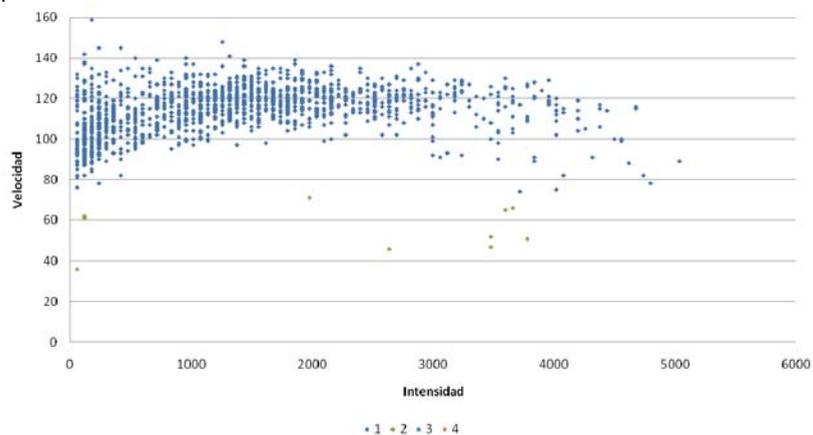
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



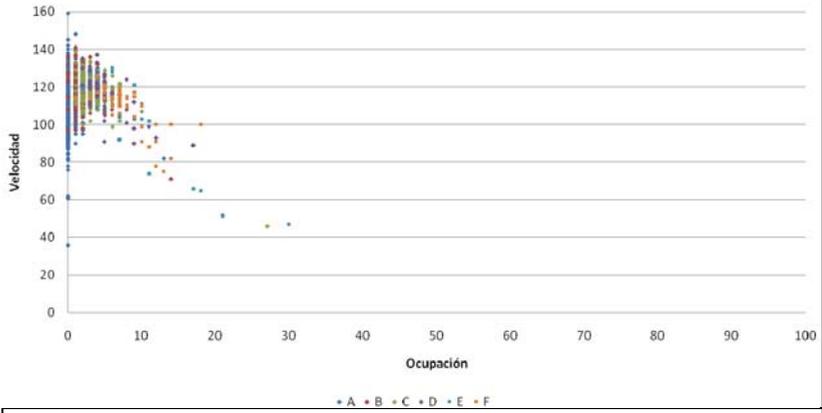
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



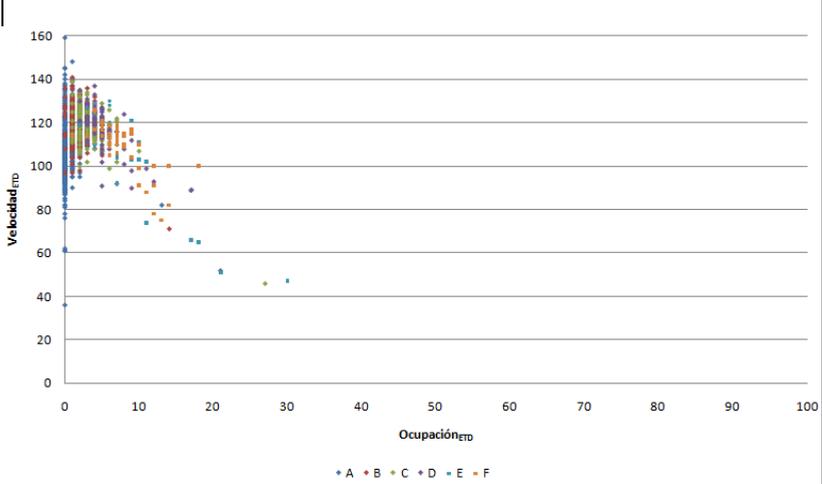
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

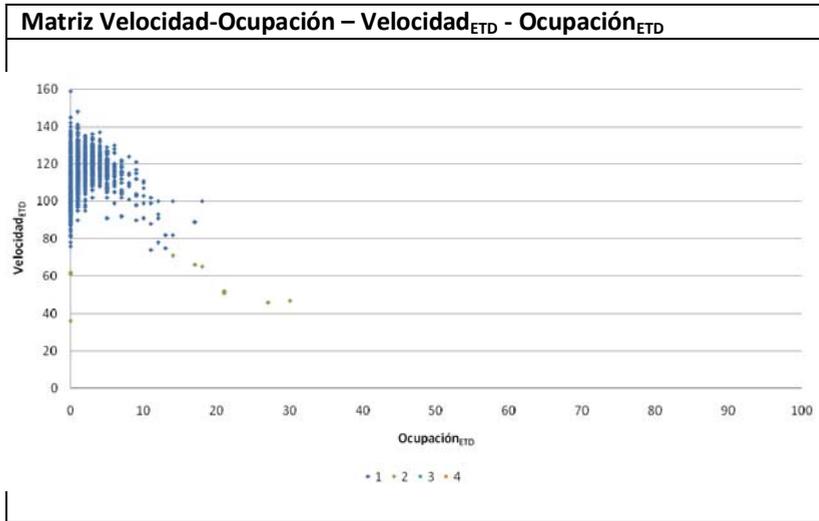


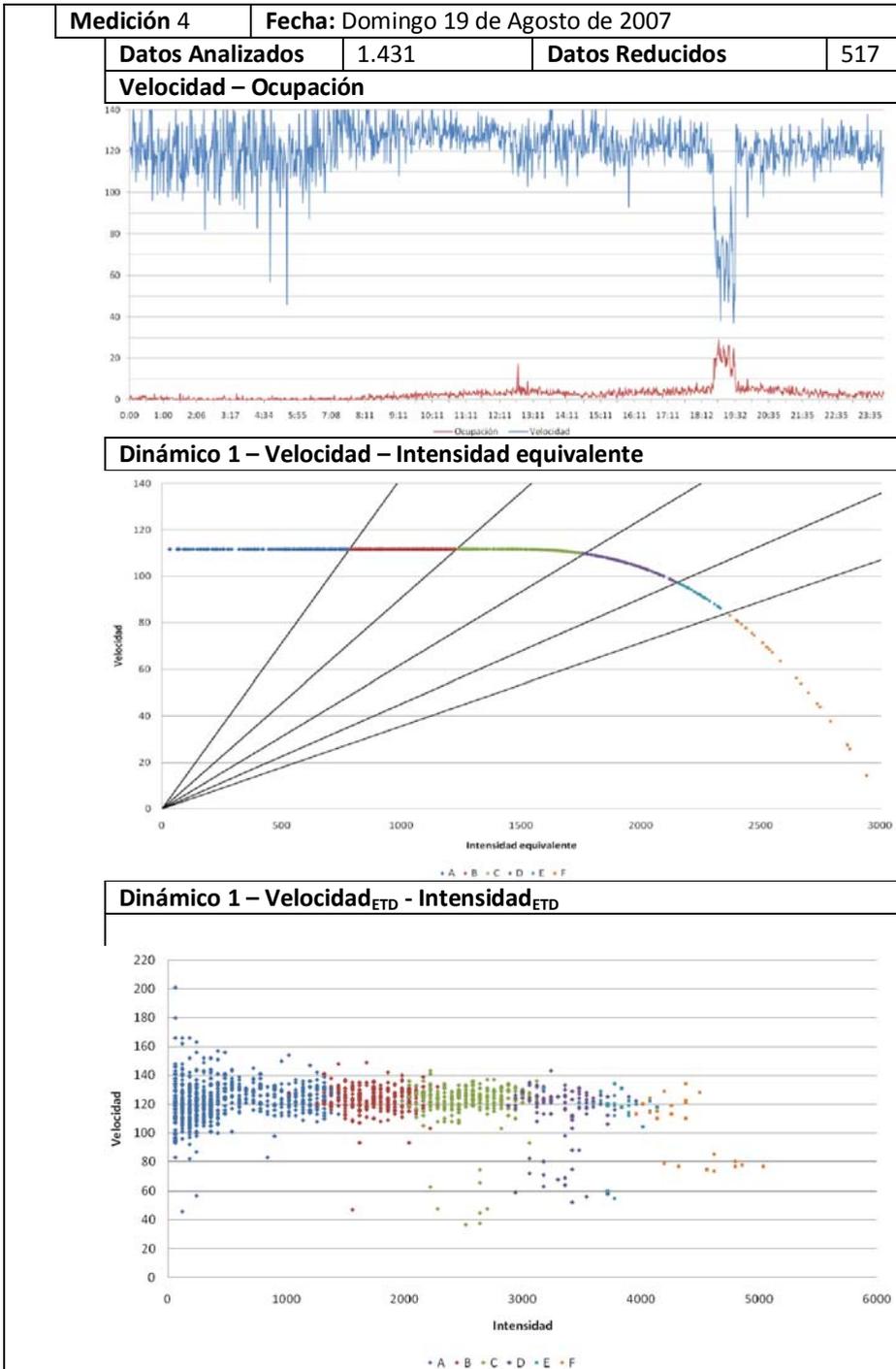
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



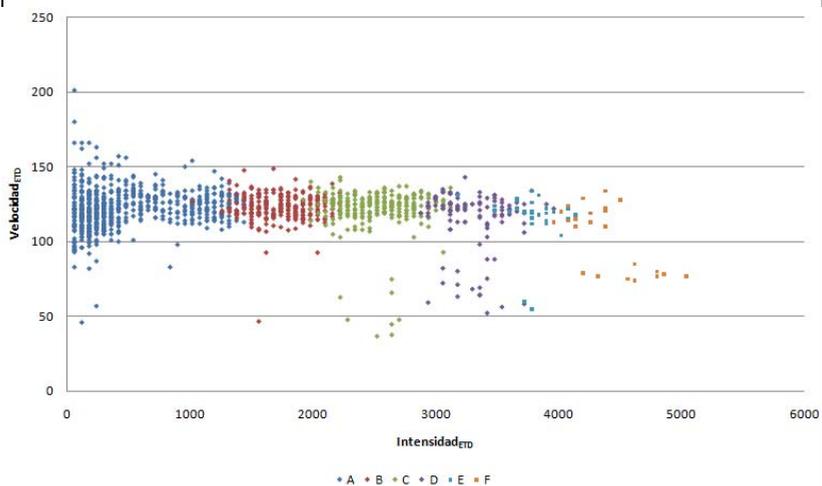
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



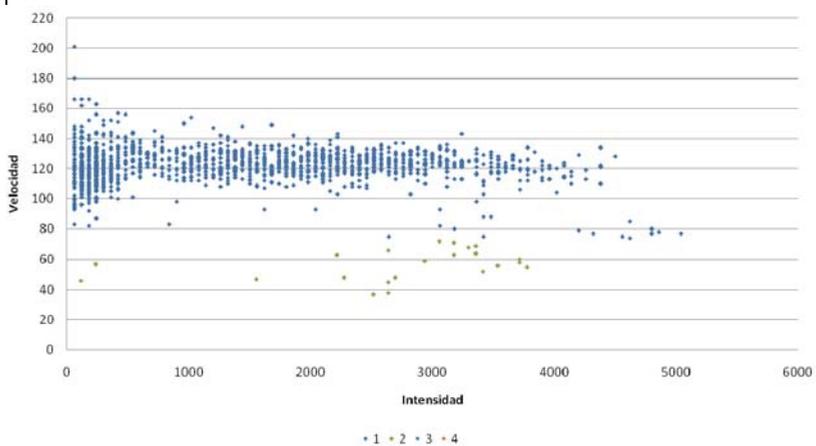




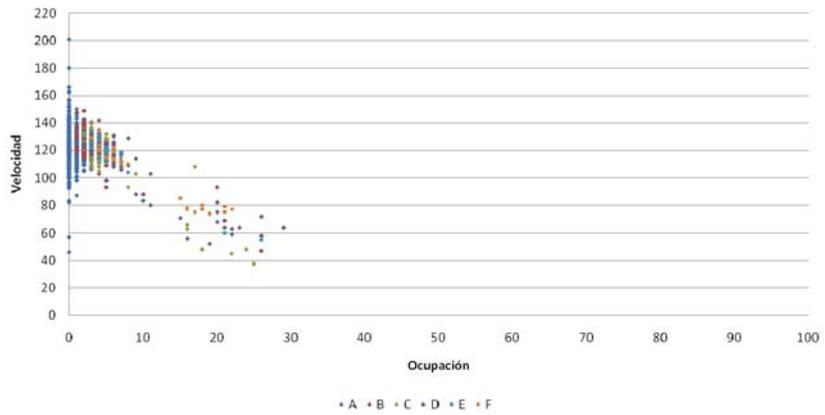
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



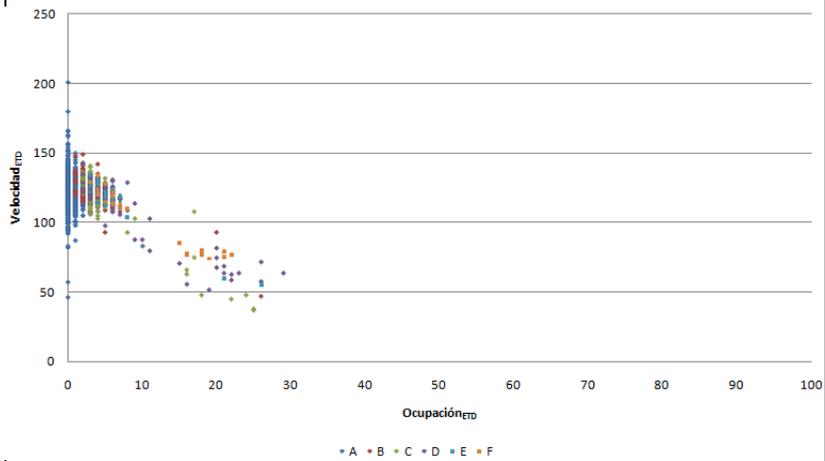
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

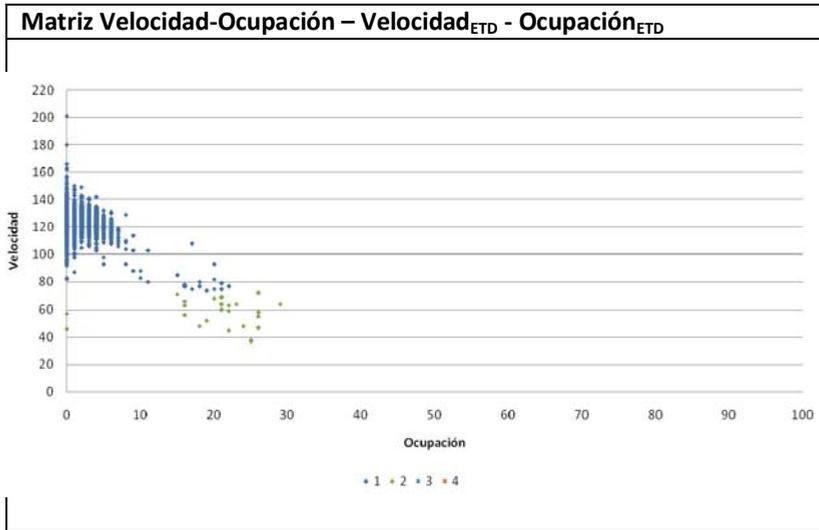


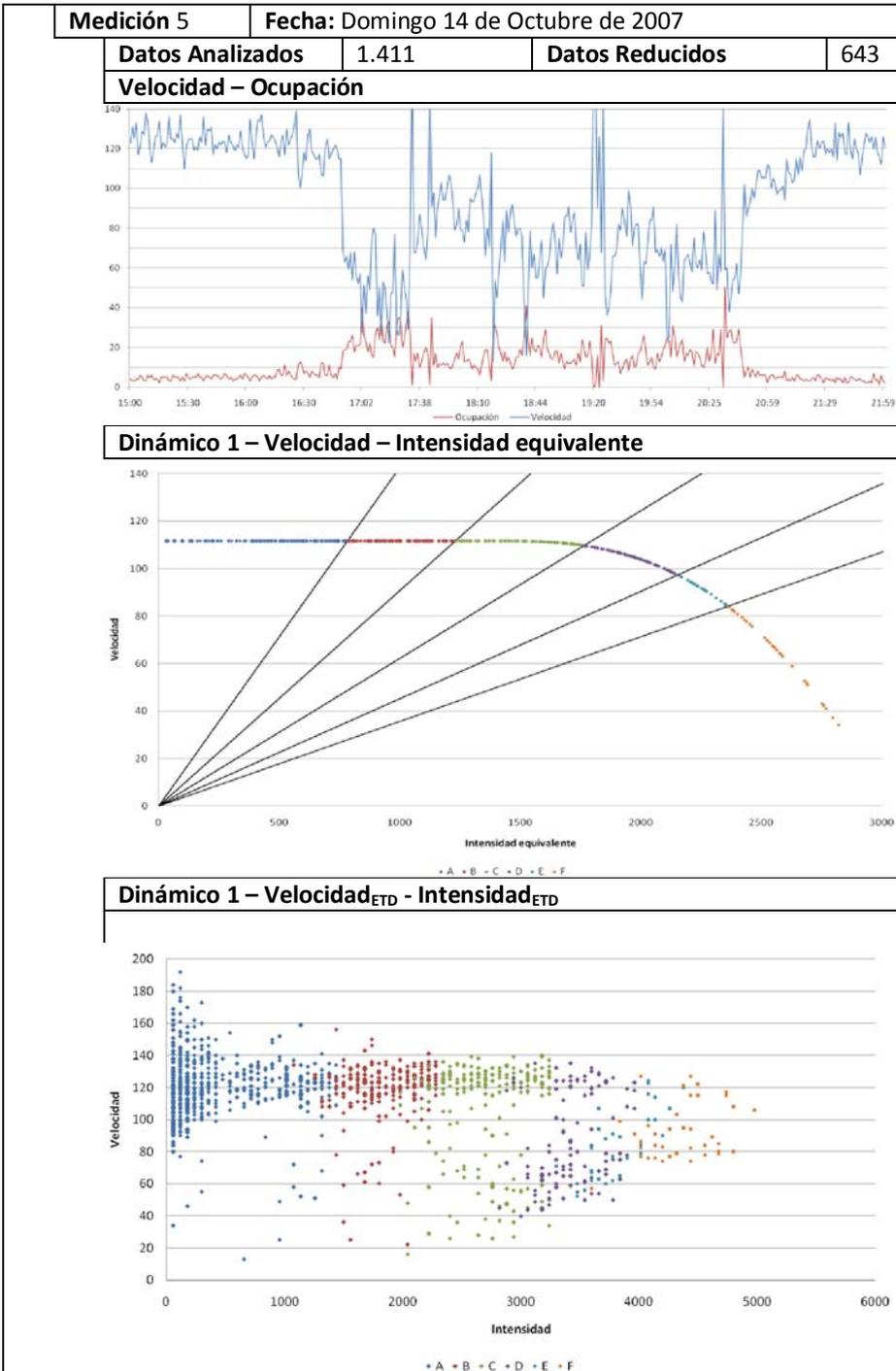
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



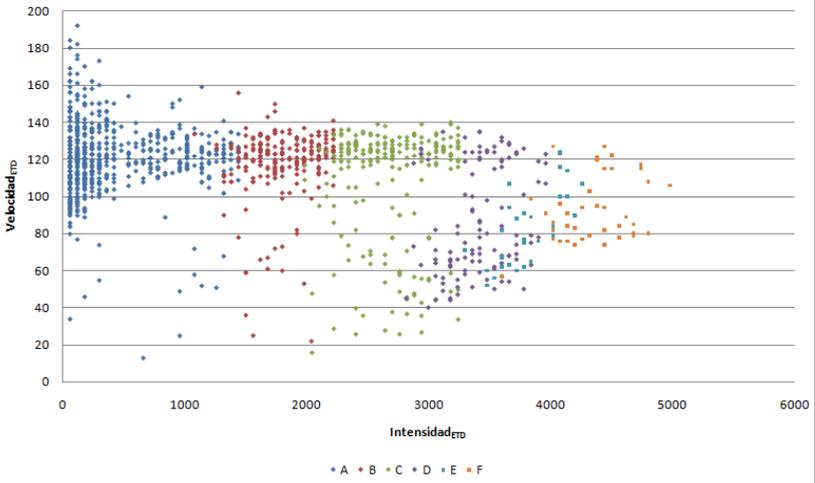
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



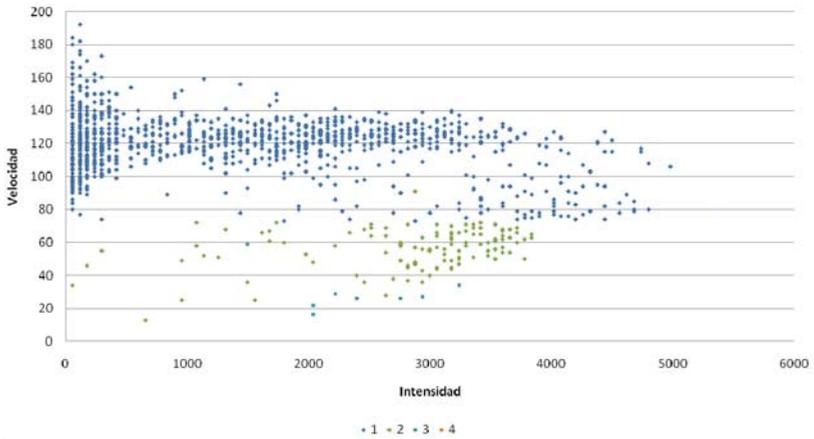




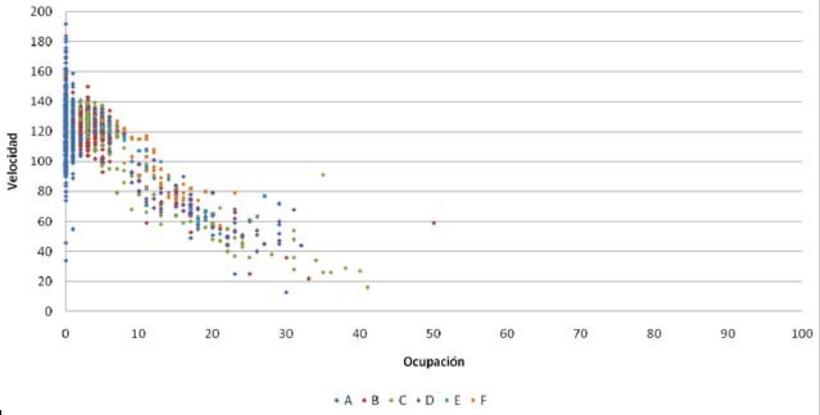
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



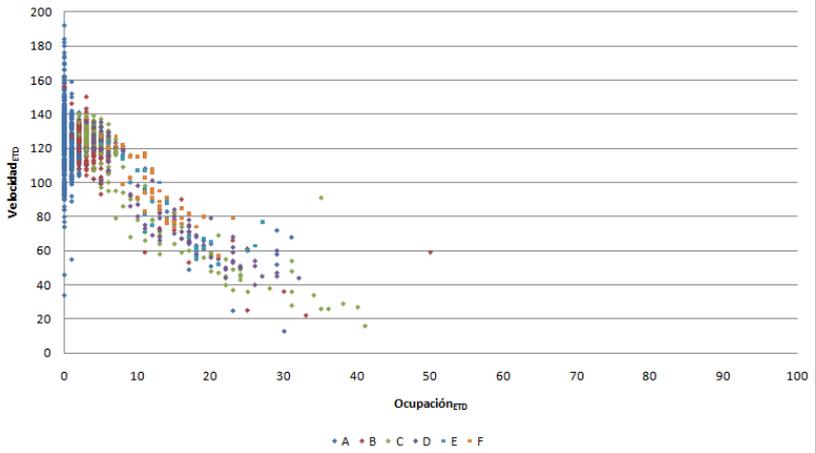
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

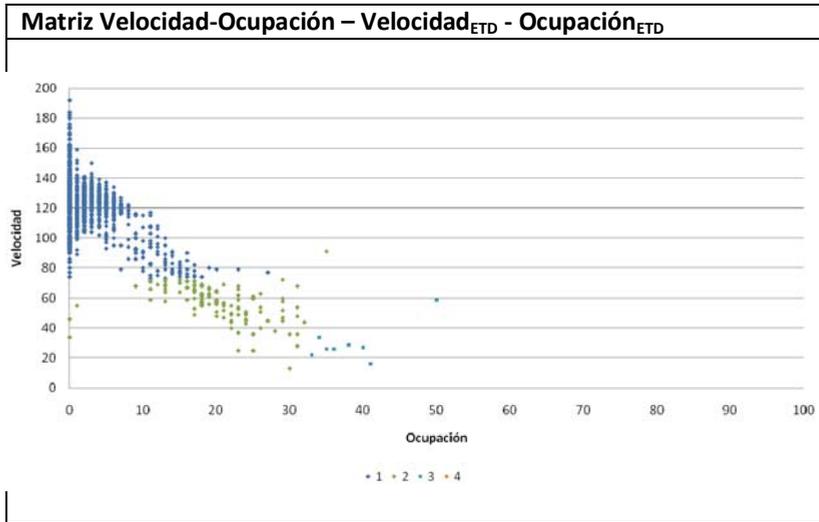


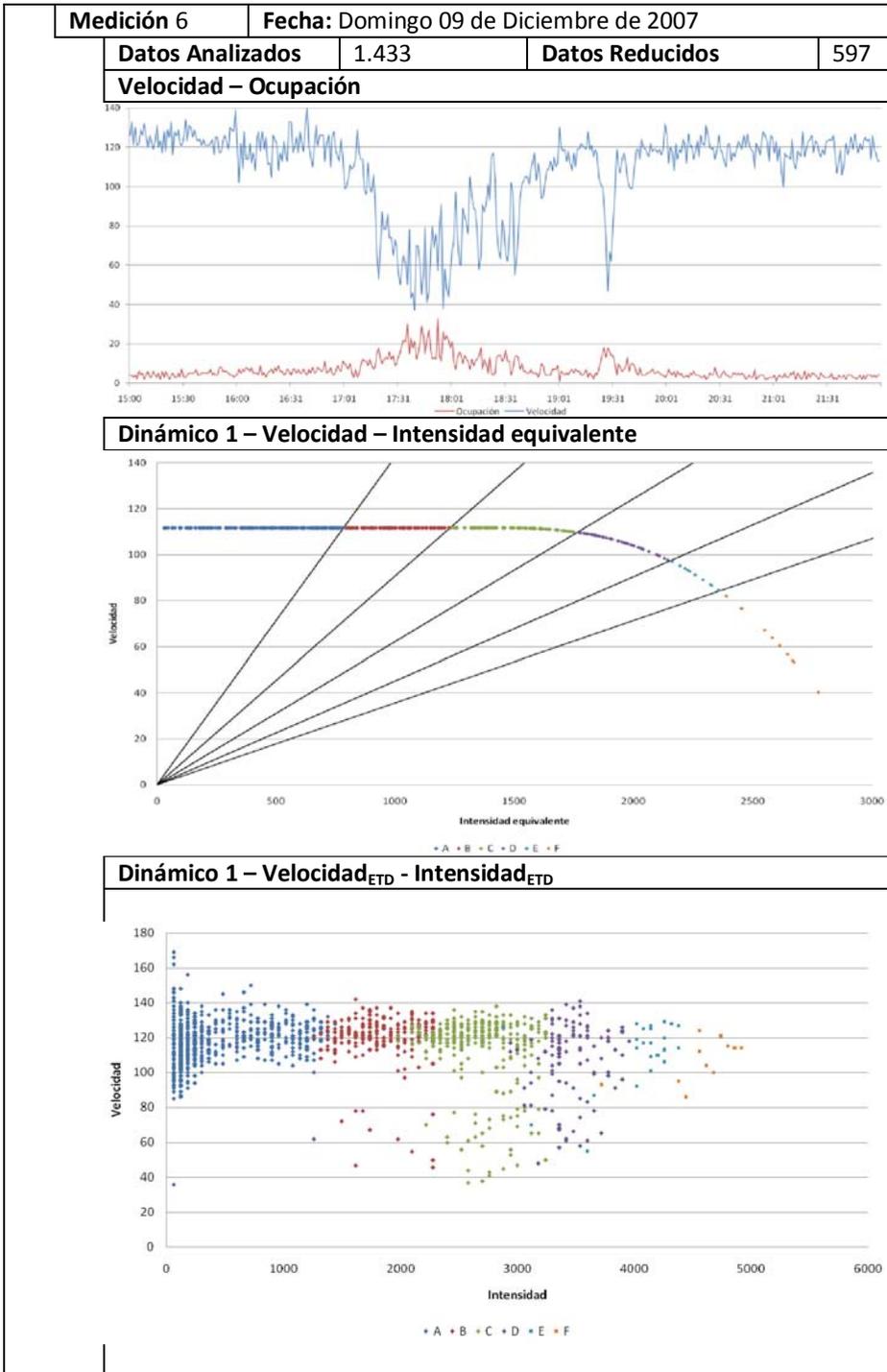
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



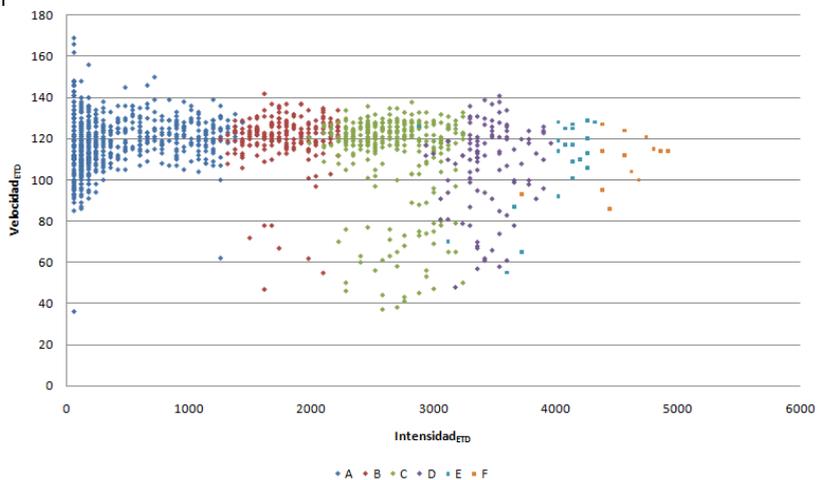
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



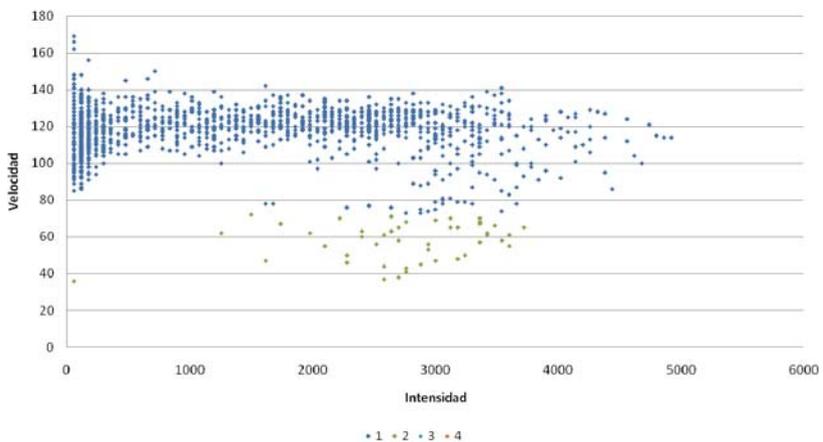




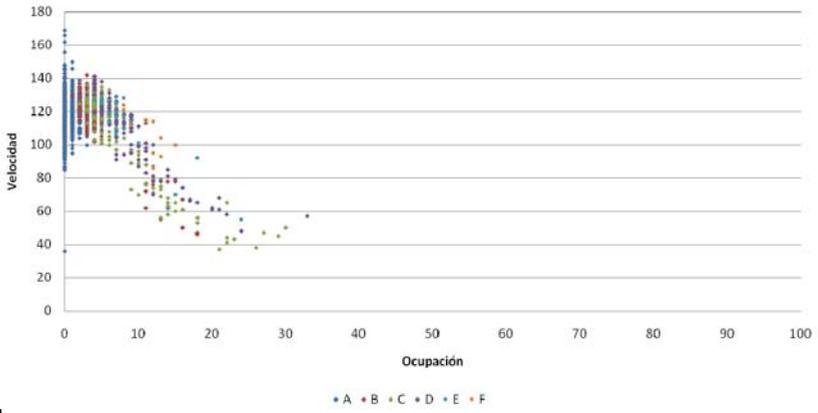
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



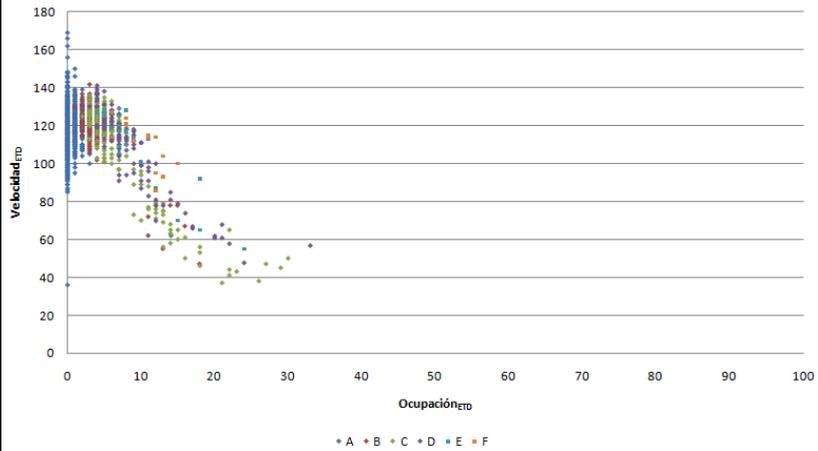
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

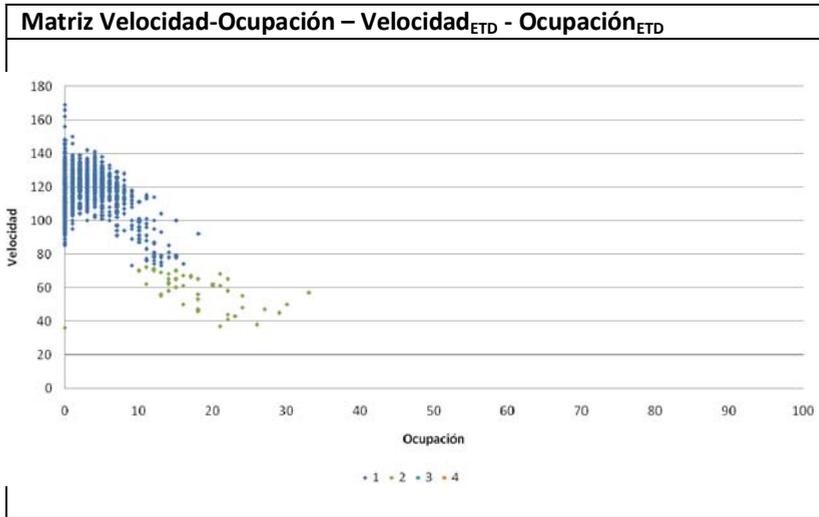


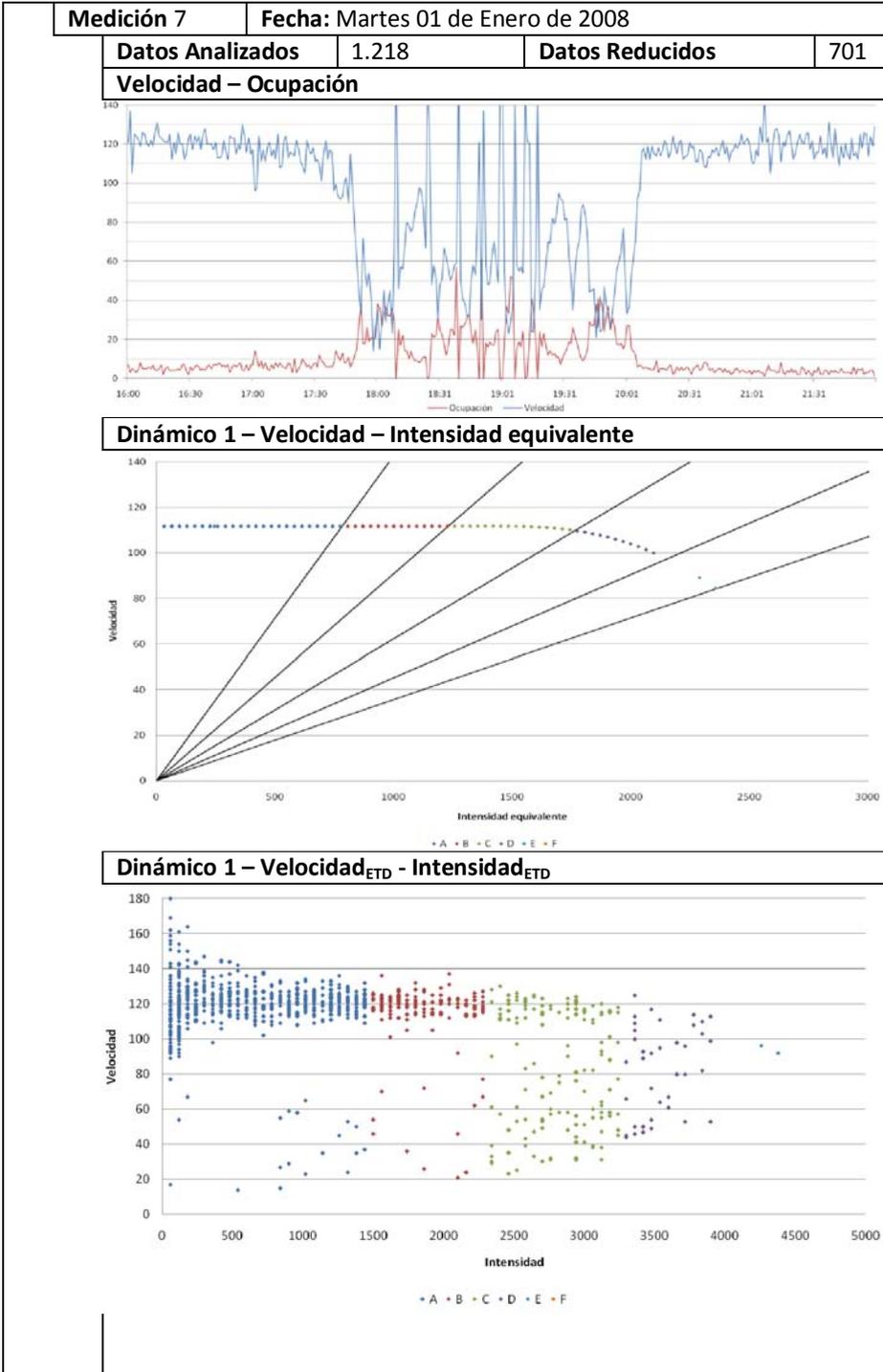
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



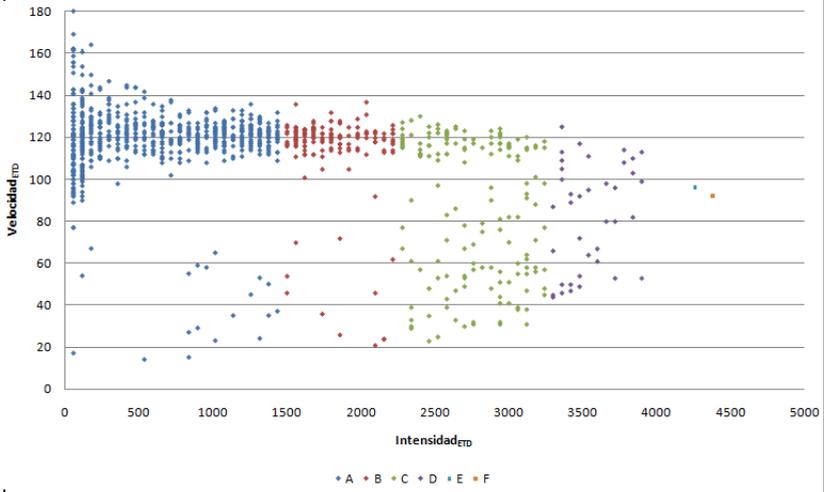
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



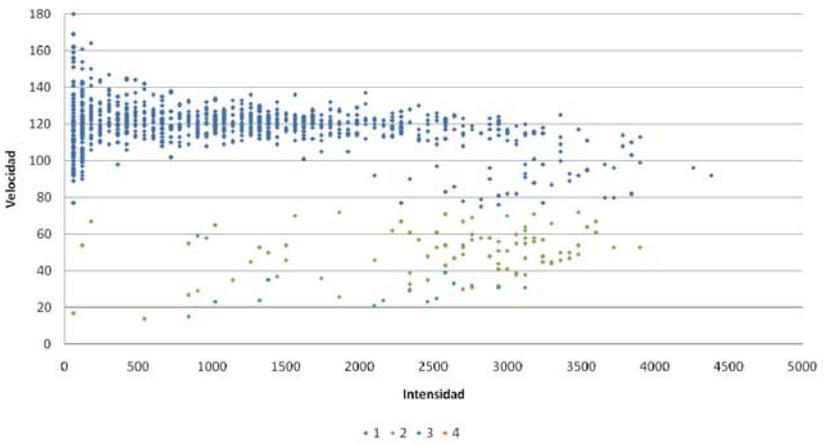




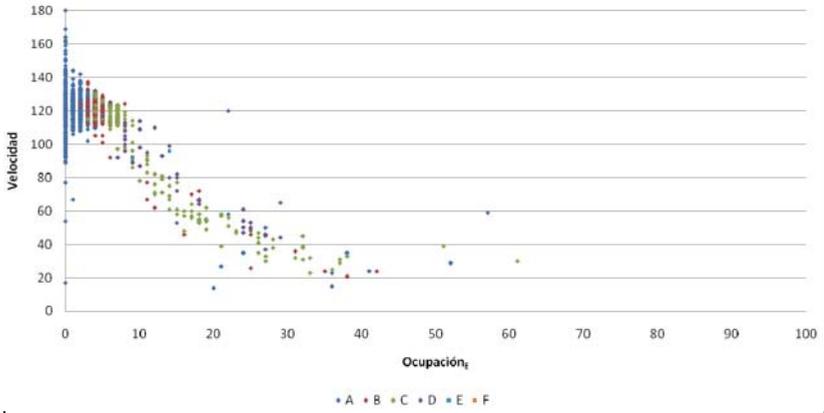
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



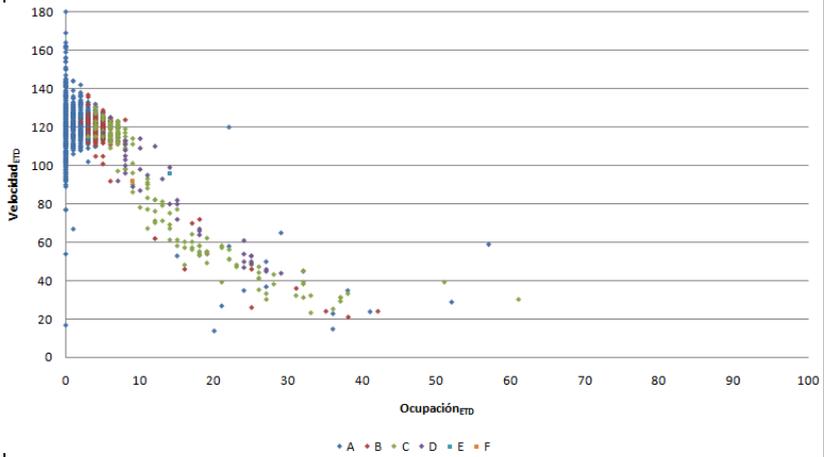
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

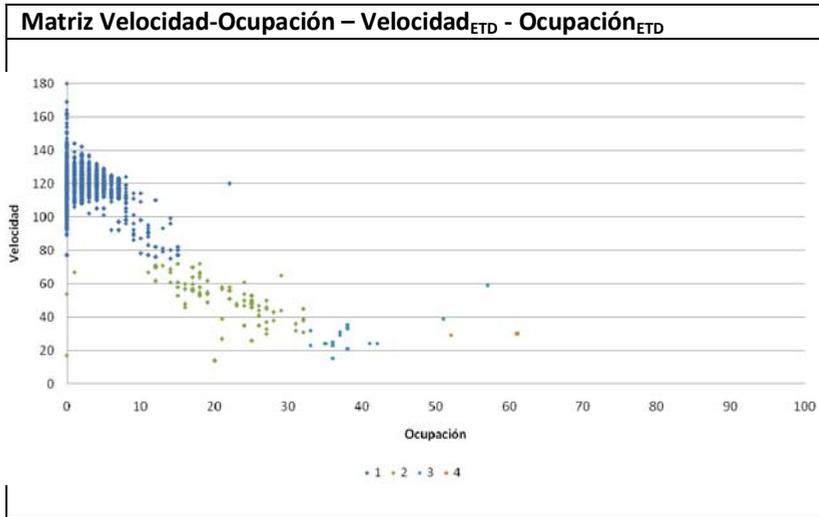


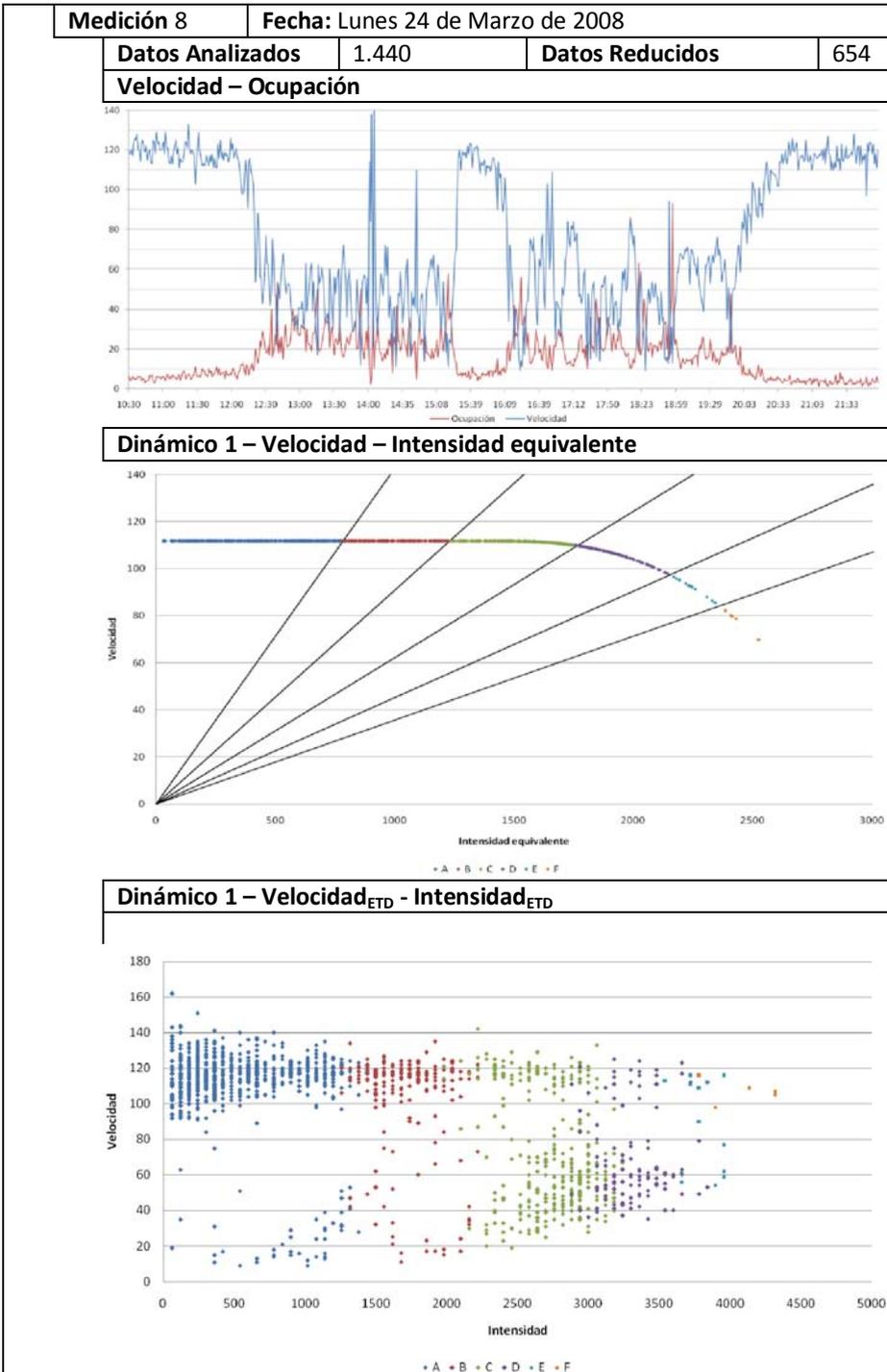
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



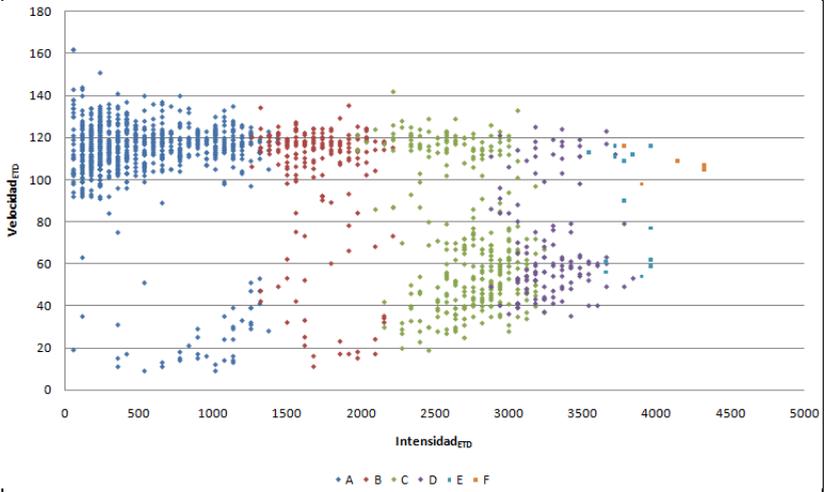
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



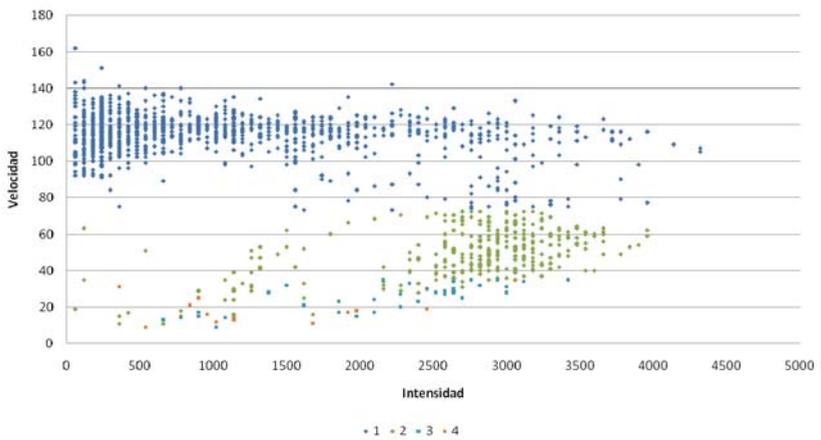




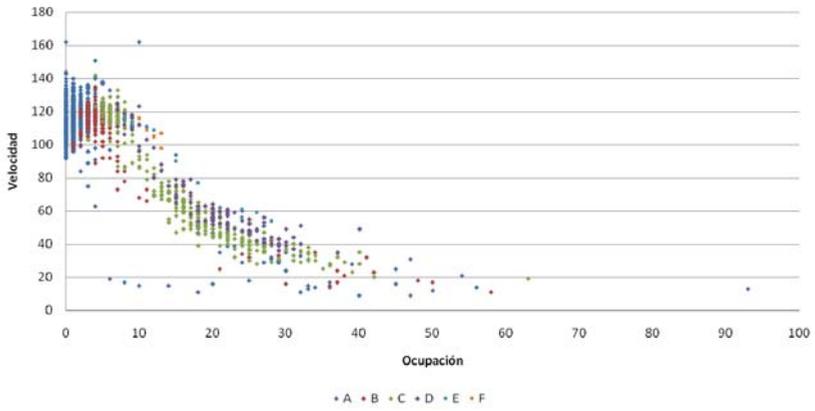
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



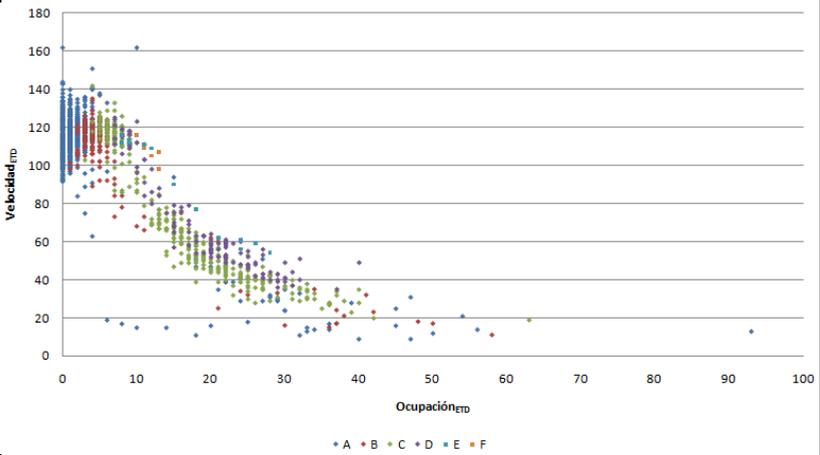
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

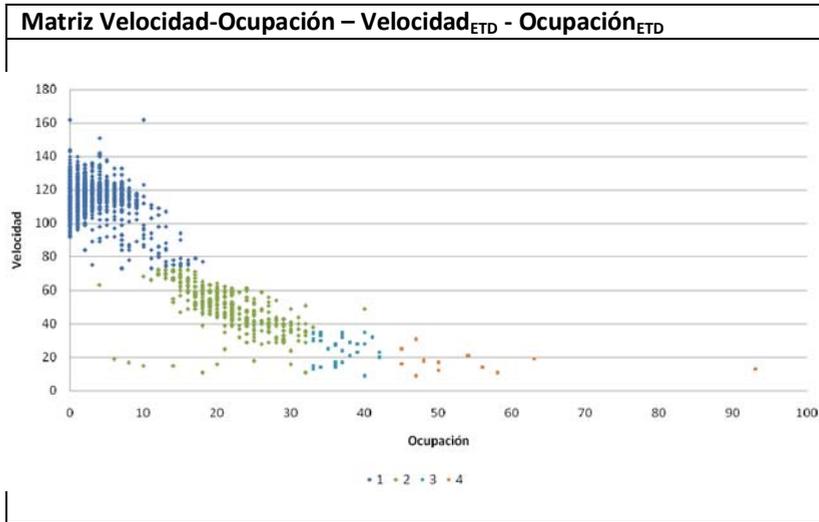


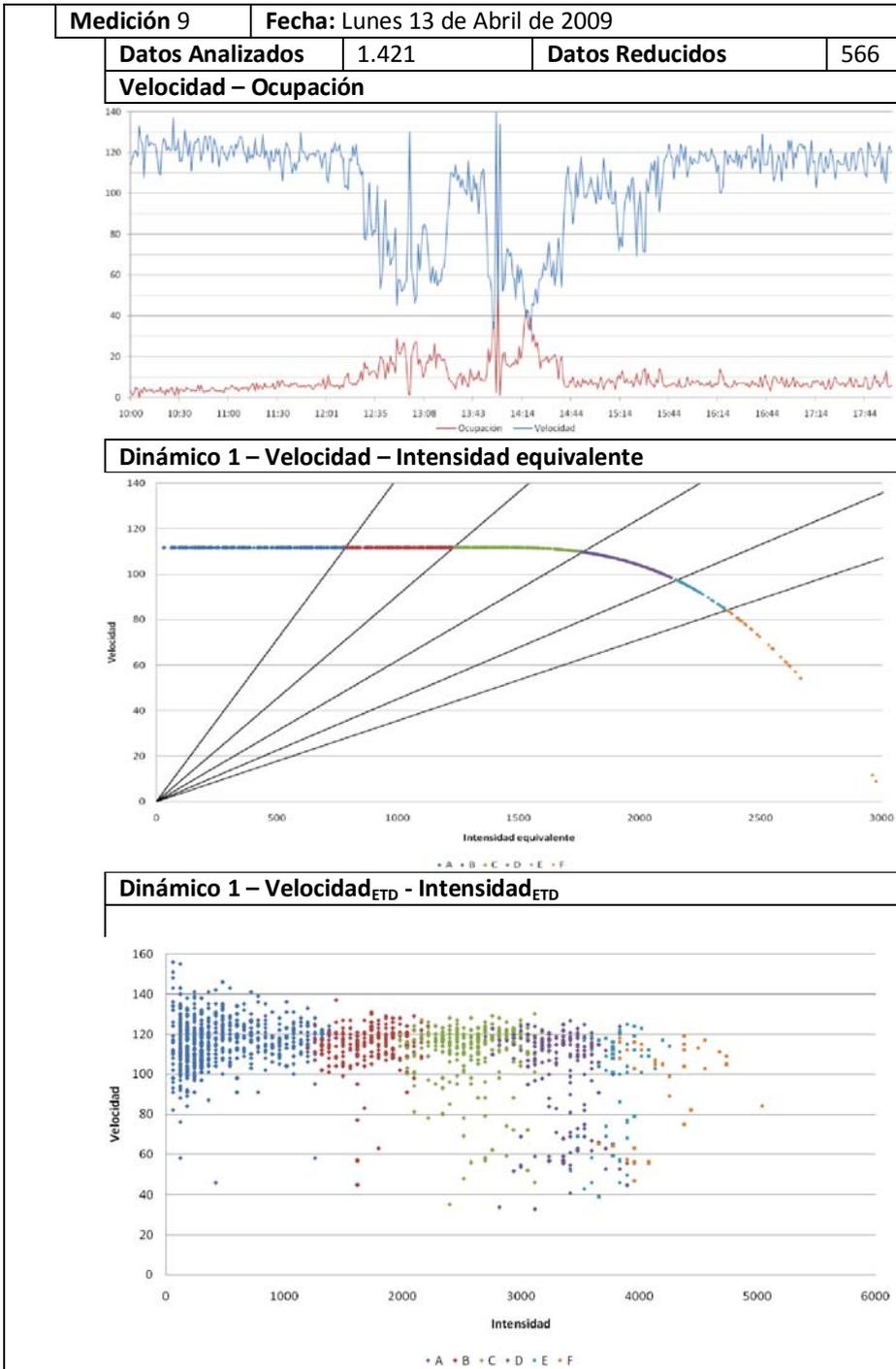
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



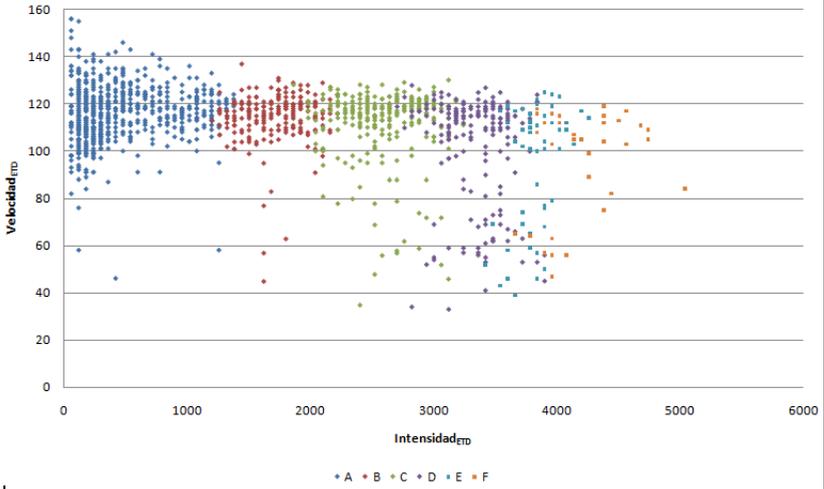
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



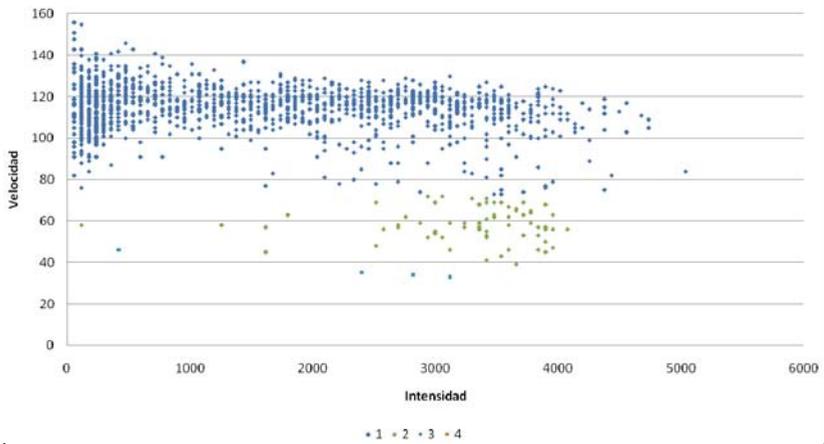




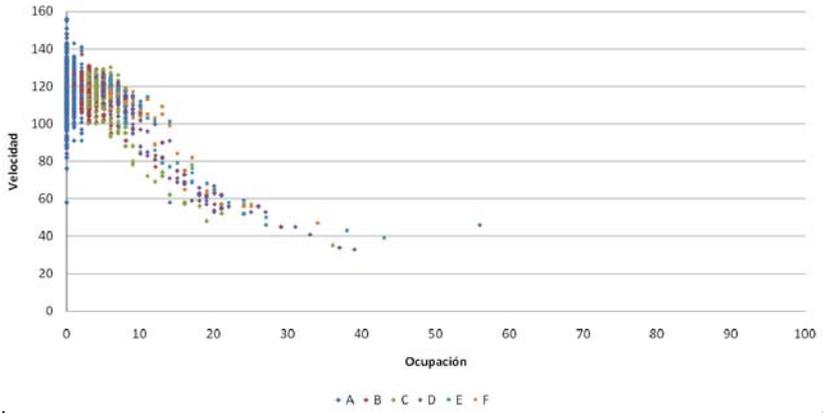
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



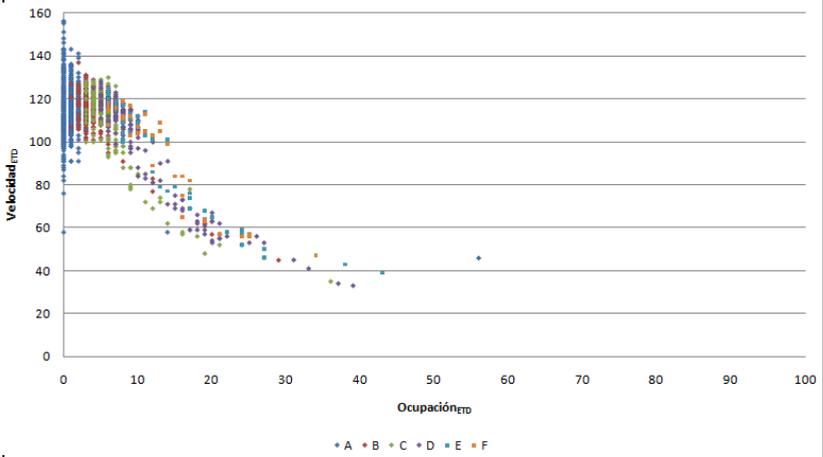
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

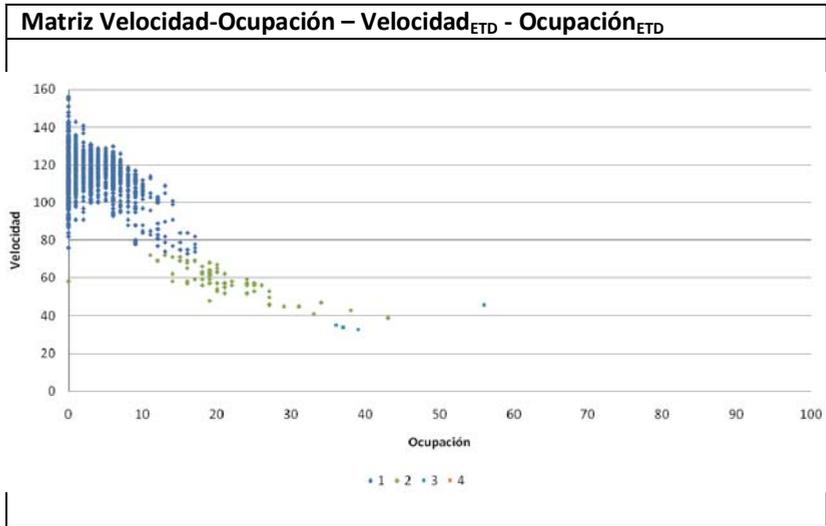


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}





El punto de medida siguiente, está ubicado en la A-3 en el punto kilométrico 296+475. El tramo está formado por dos carriles por sentido, en cada carril hay instalada una espira doble, por lo que se recopila constantemente información de los cuatro carriles y ambos sentidos. Previo y posterior al punto de medición existen salidas y entradas de la vía, por lo que el punto de medición únicamente adquiere datos del tráfico unificado, no siendo modificado por aceleraciones o deceleraciones para la incorporación o salida de la vía. Los detalles gráficos de este punto de medición se pueden ver en la Ilustración 4.

Sobre este punto se han analizado un total de 12 mediciones en diversas fechas. El conjunto total de datos analizados ha sido de 16709, una vez filtrados, se han reducido hasta quedarse en 9006, descartando 7703 datos por incumplir uno o varios requisitos de los filtros establecidos. A continuación puede verse detalladamente cada una de las mediciones con sus gráficas adjuntas.

A-3, PK.296+475

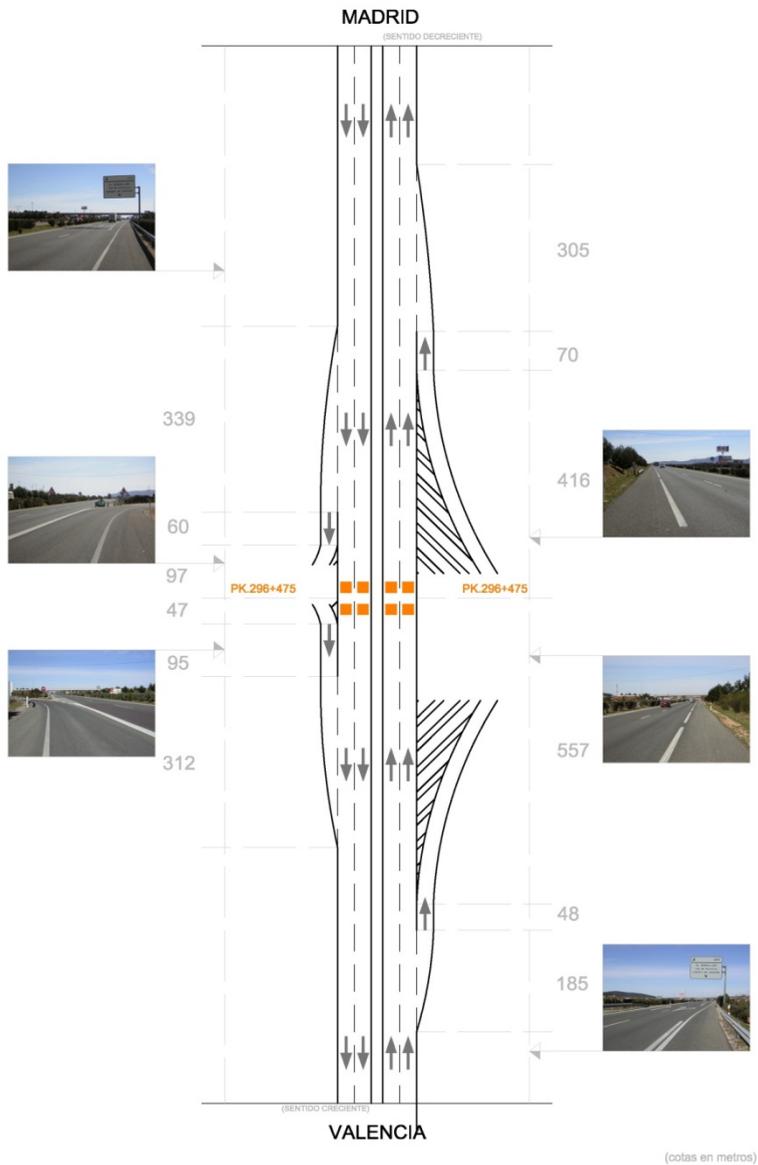
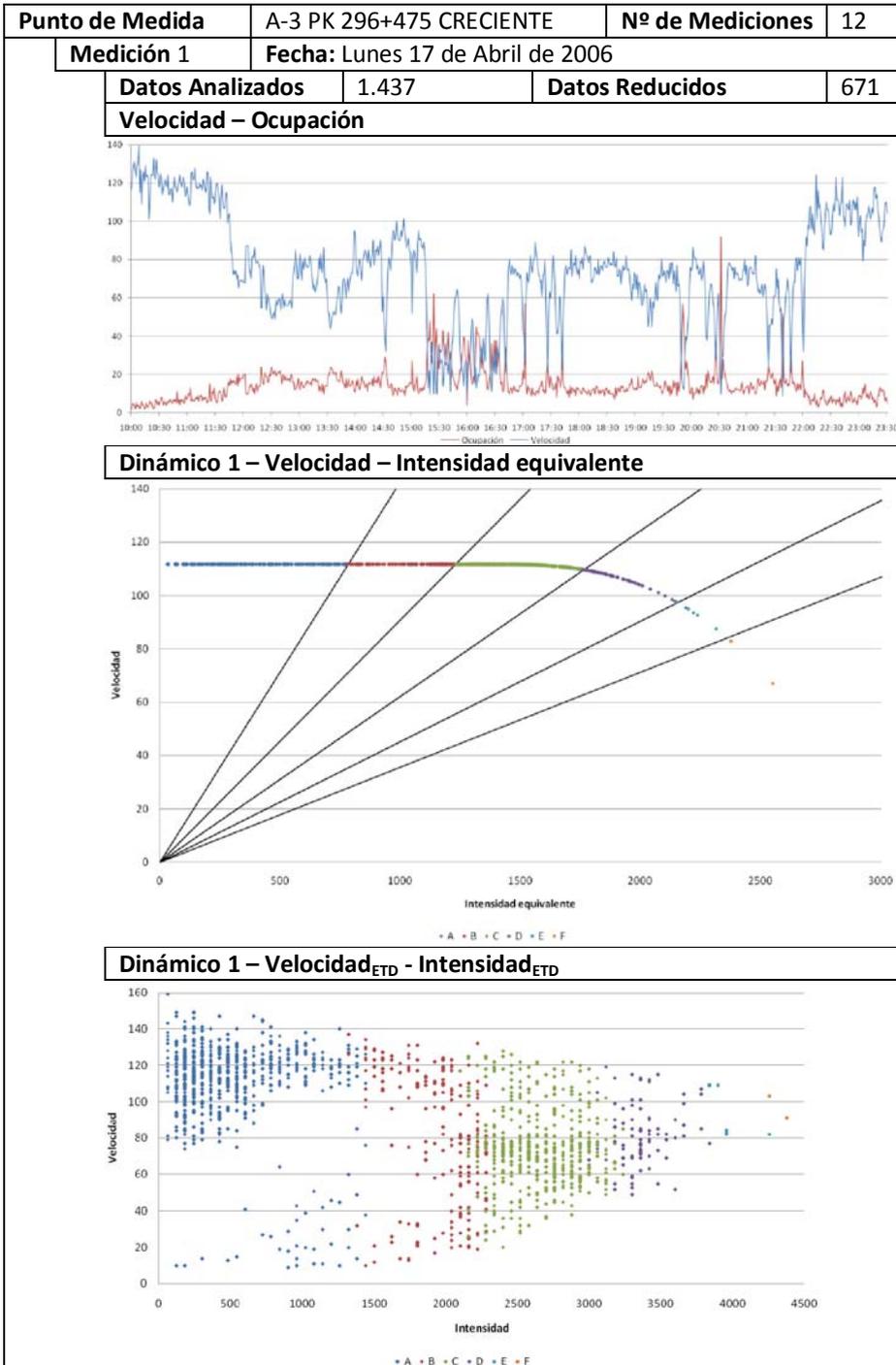
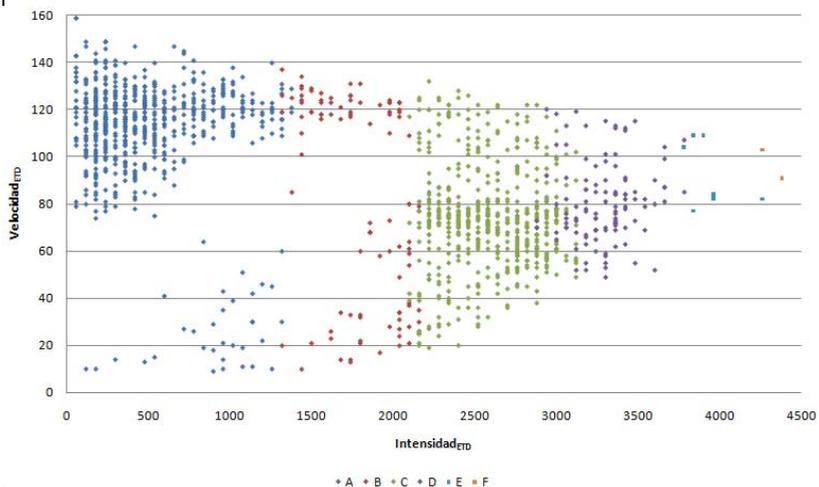


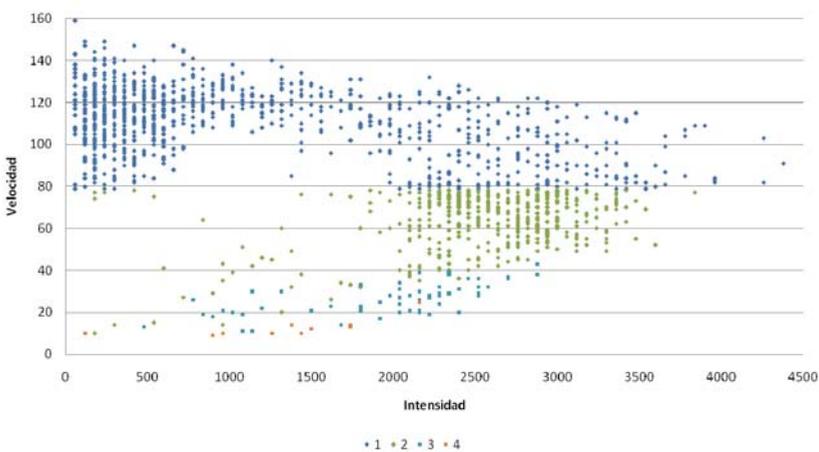
Ilustración 4: Esquema de la A-3 PK 296+475.



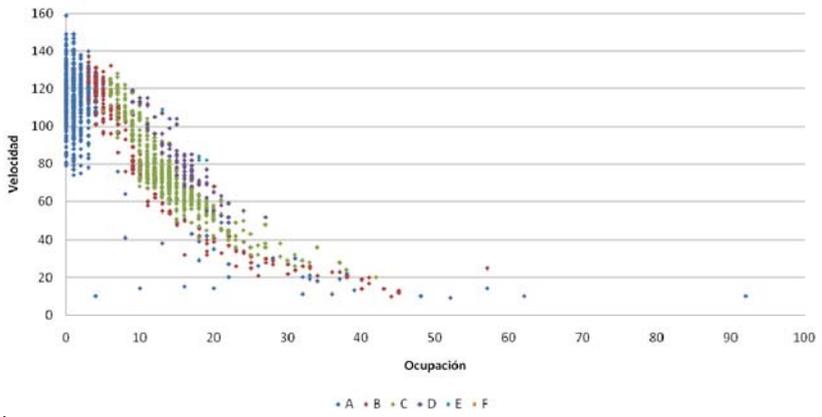
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



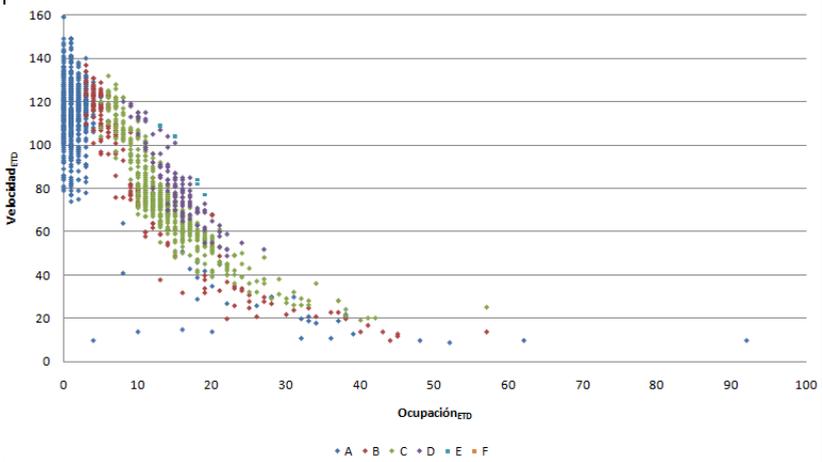
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

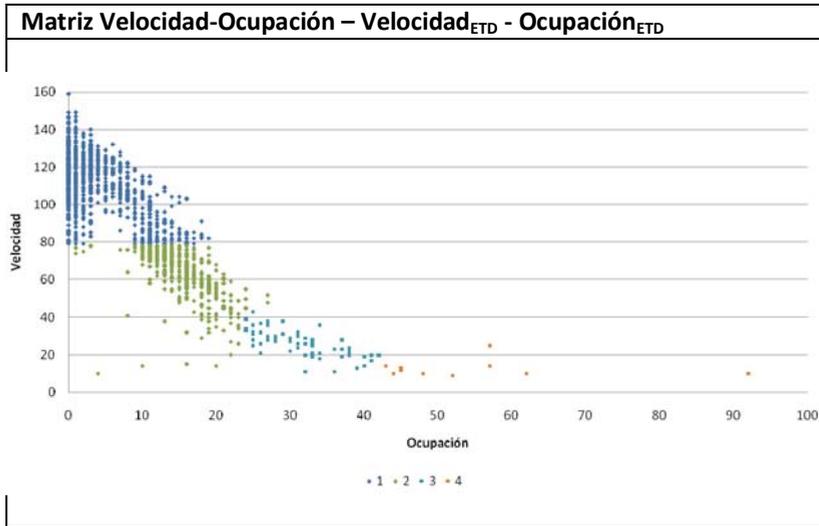


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}





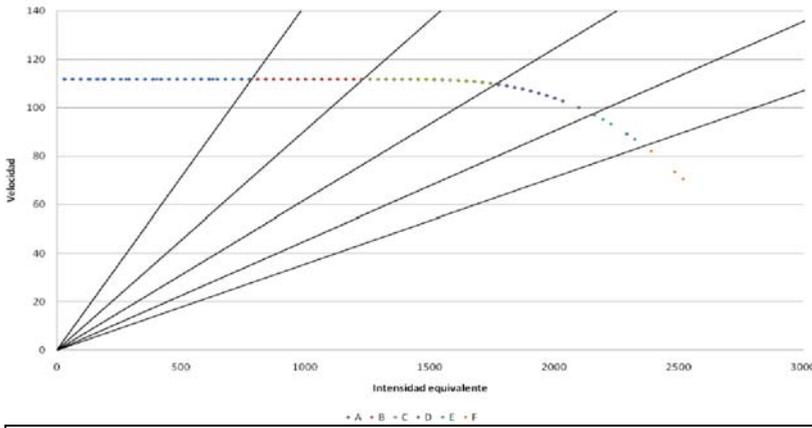
Medición 2	Fecha: Lunes 01 de Enero de 2007		
-------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.295	Datos Reducidos	719
-------------------------	-------	------------------------	-----

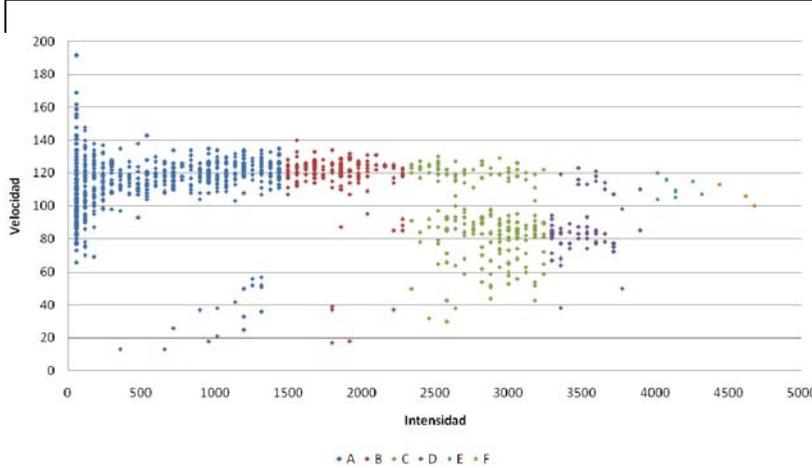
Velocidad – Ocupación



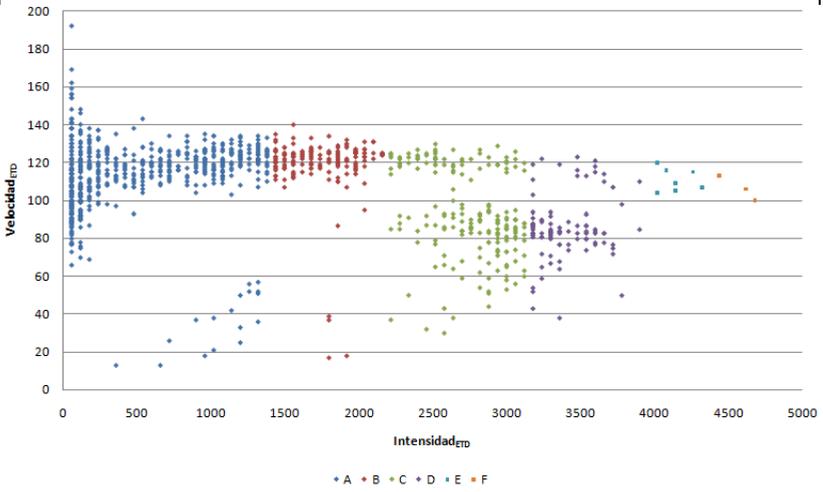
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



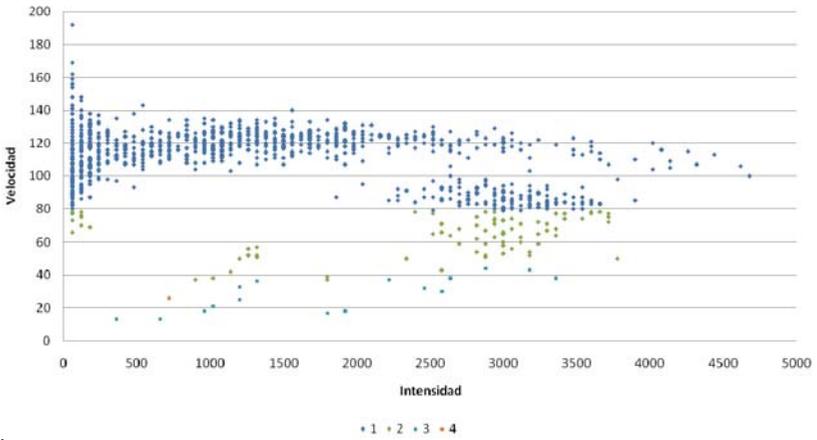
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



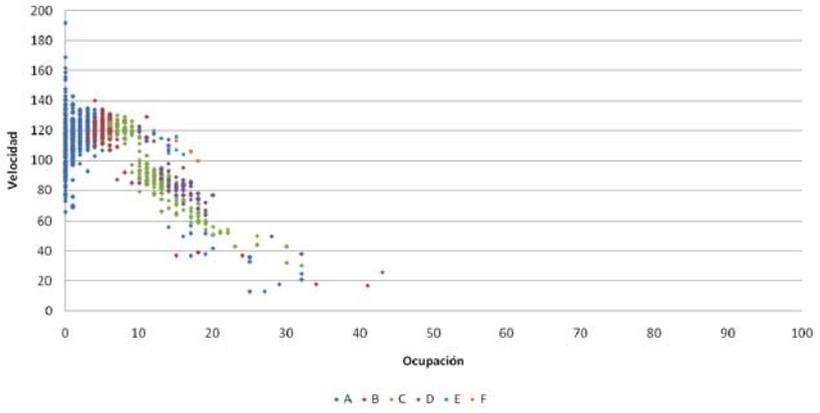
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



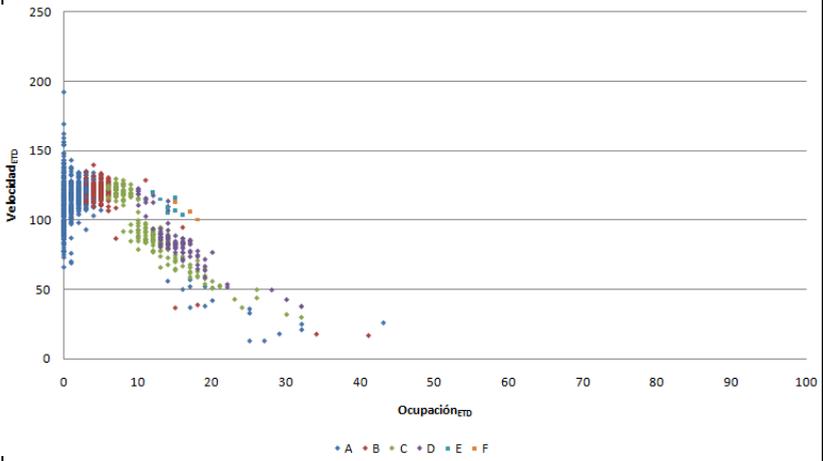
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

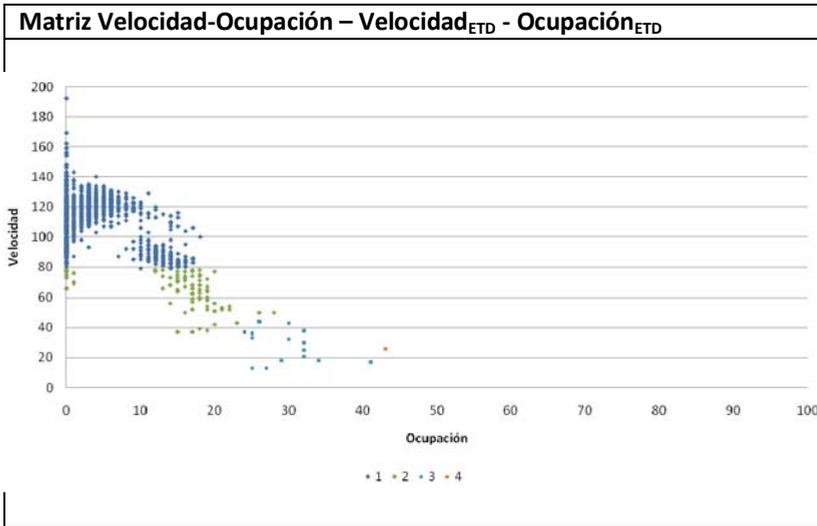


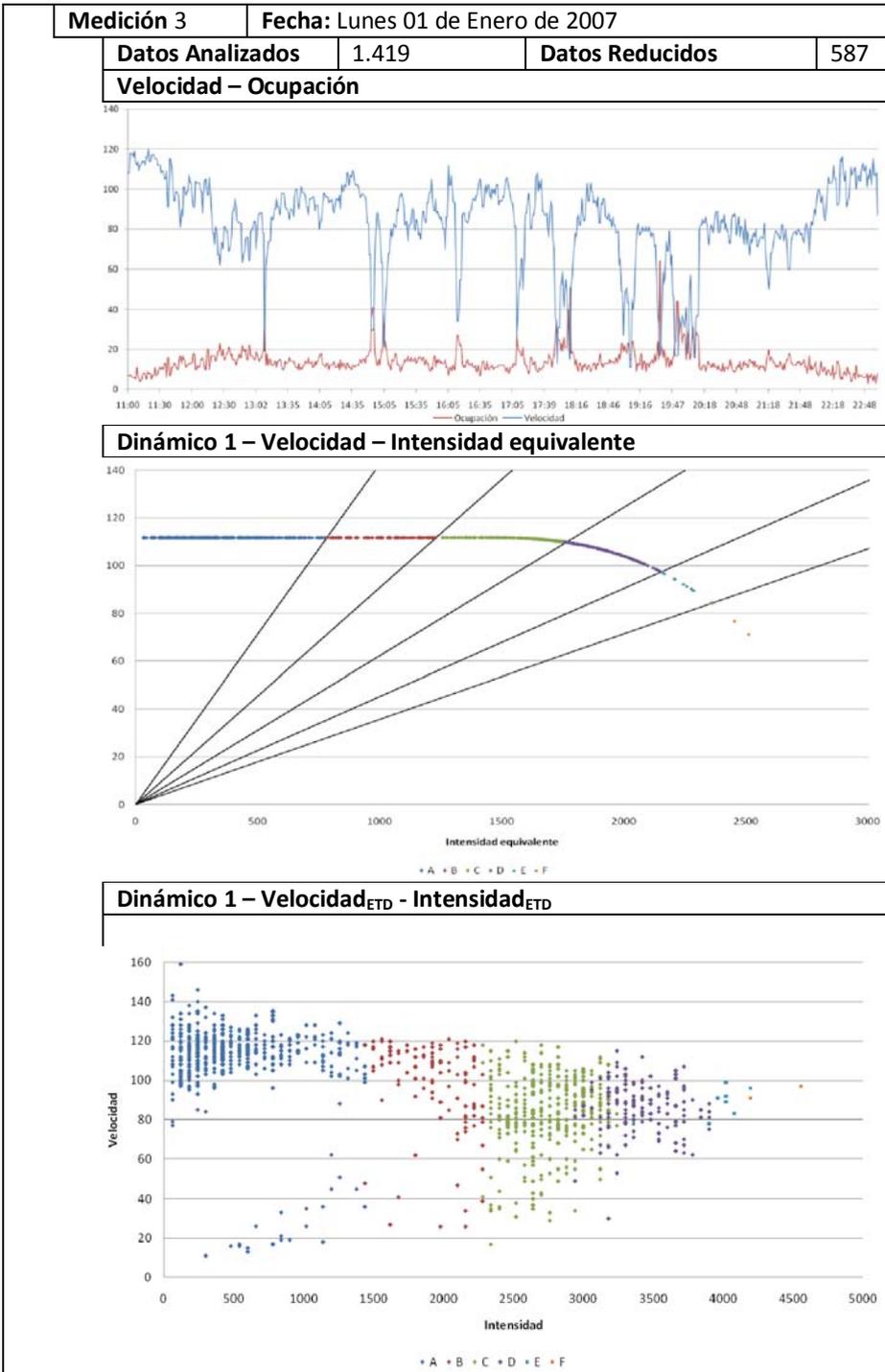
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



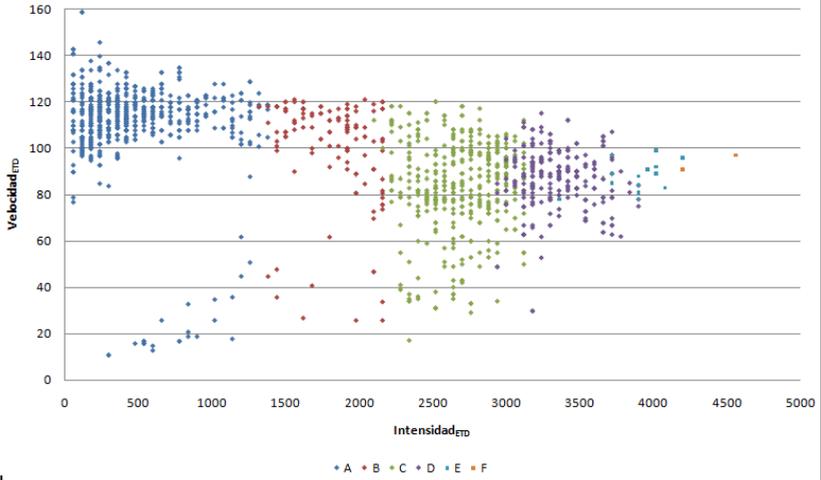
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



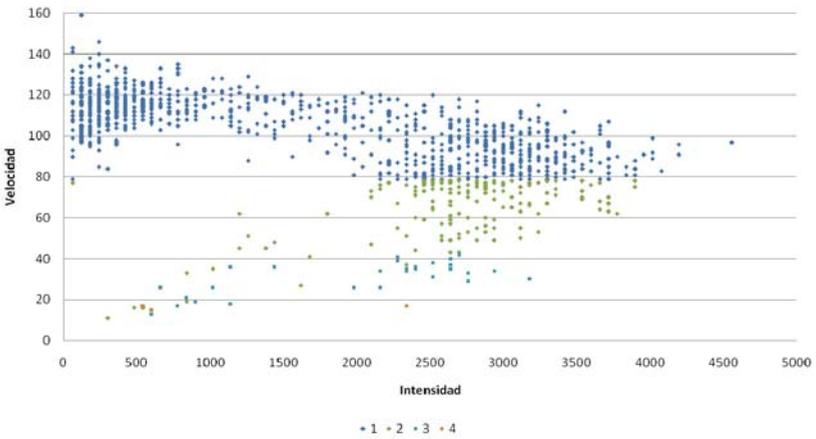




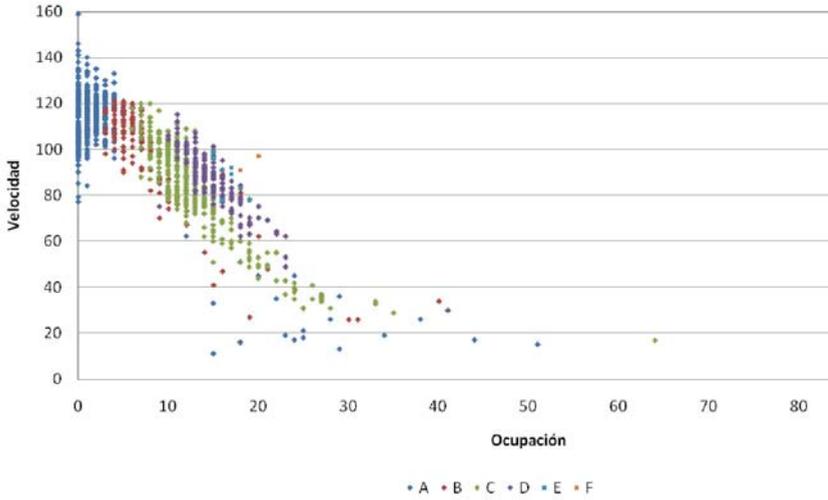
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



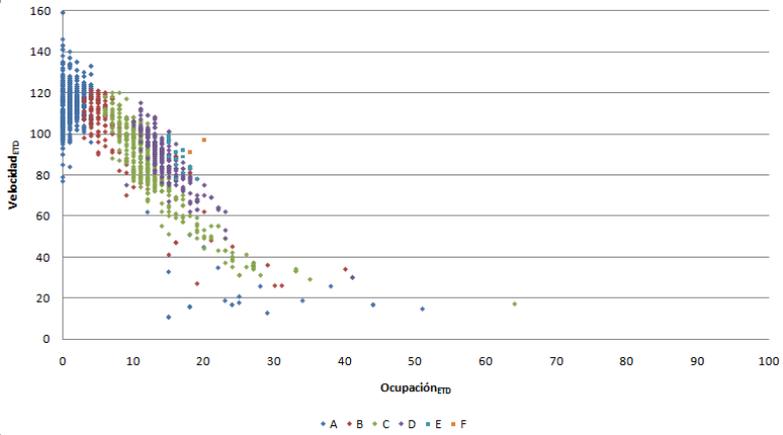
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

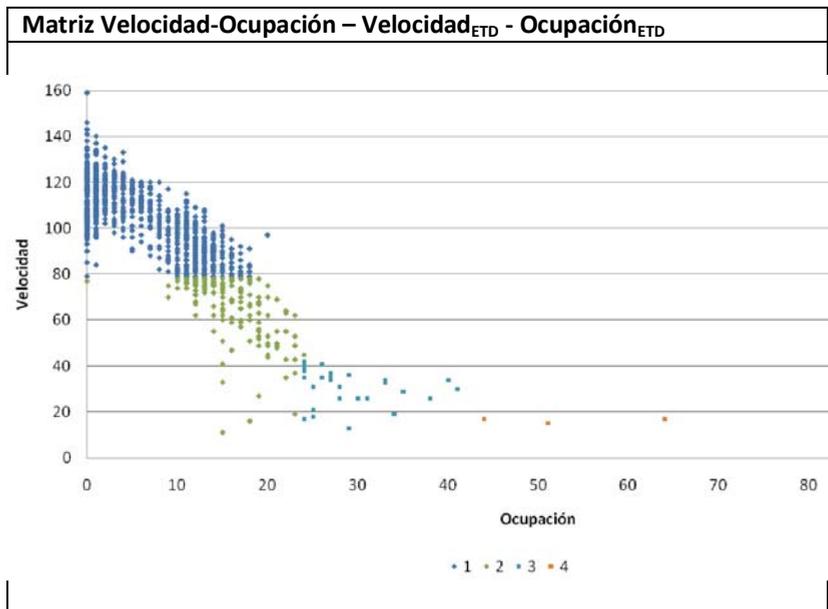


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

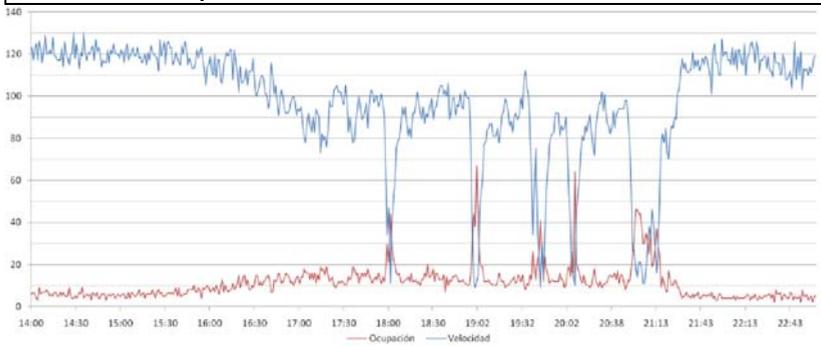




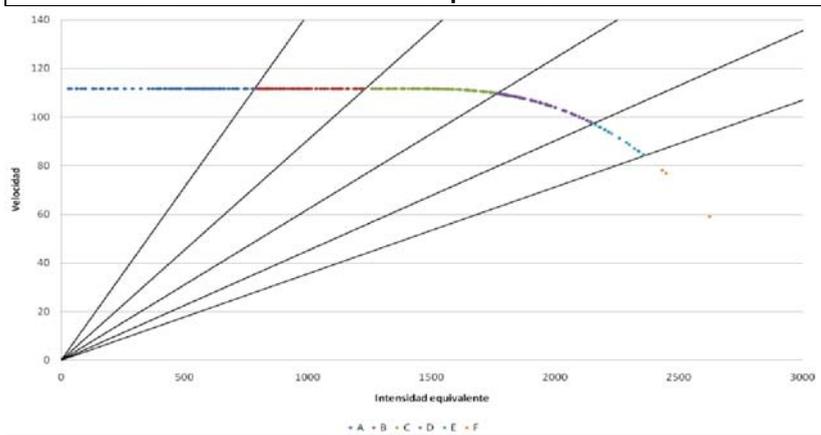
Medición 4	Fecha: Domingo 14 de Octubre de 2007		
-------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.429	Datos Reducidos	650
-------------------------	-------	------------------------	-----

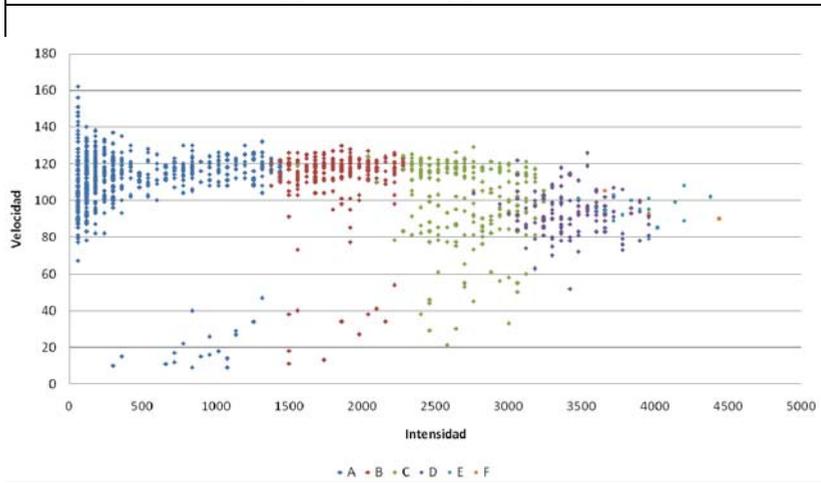
Velocidad – Ocupación



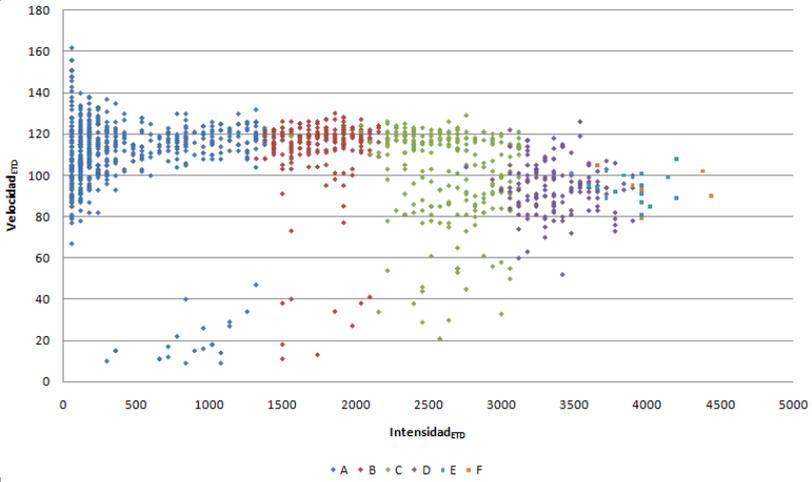
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



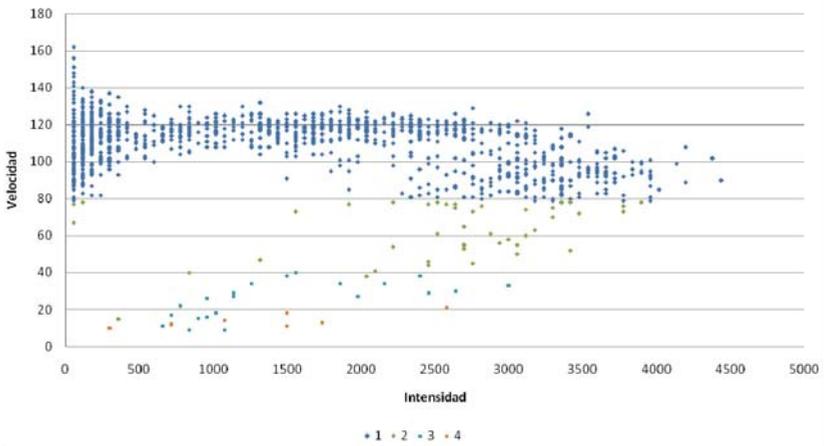
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



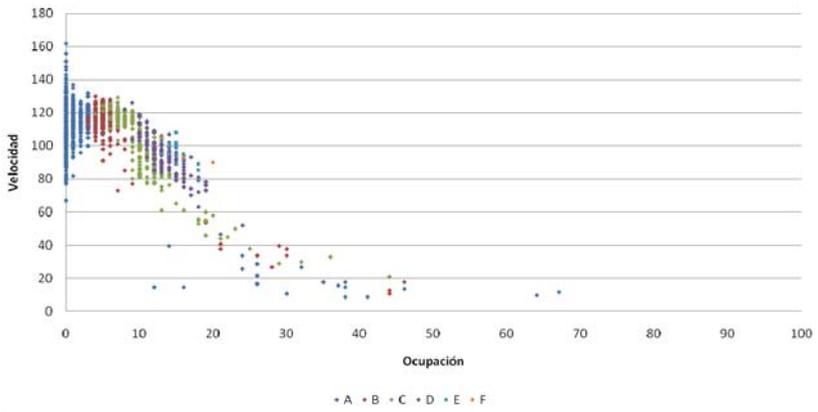
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



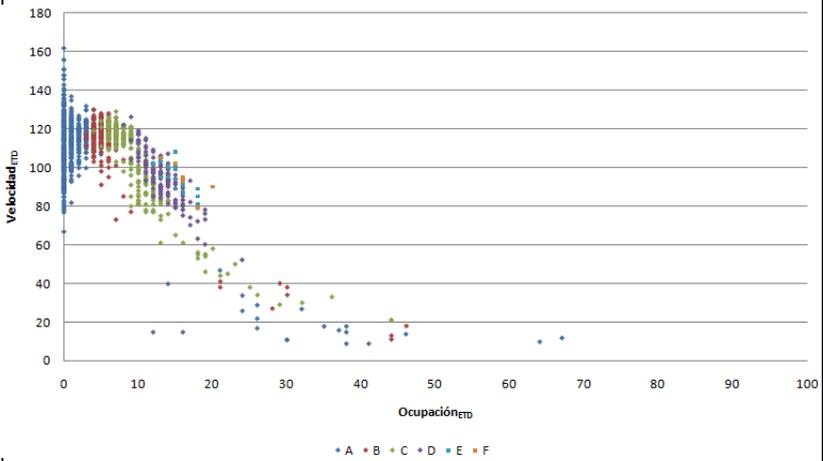
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

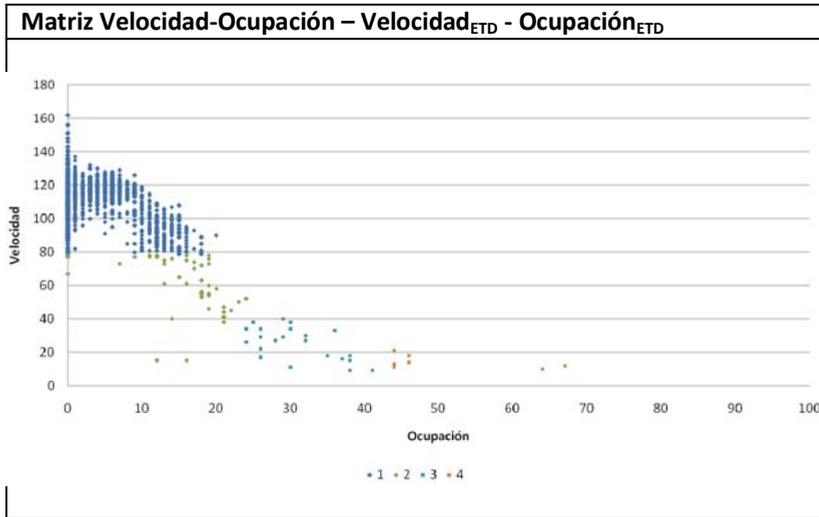


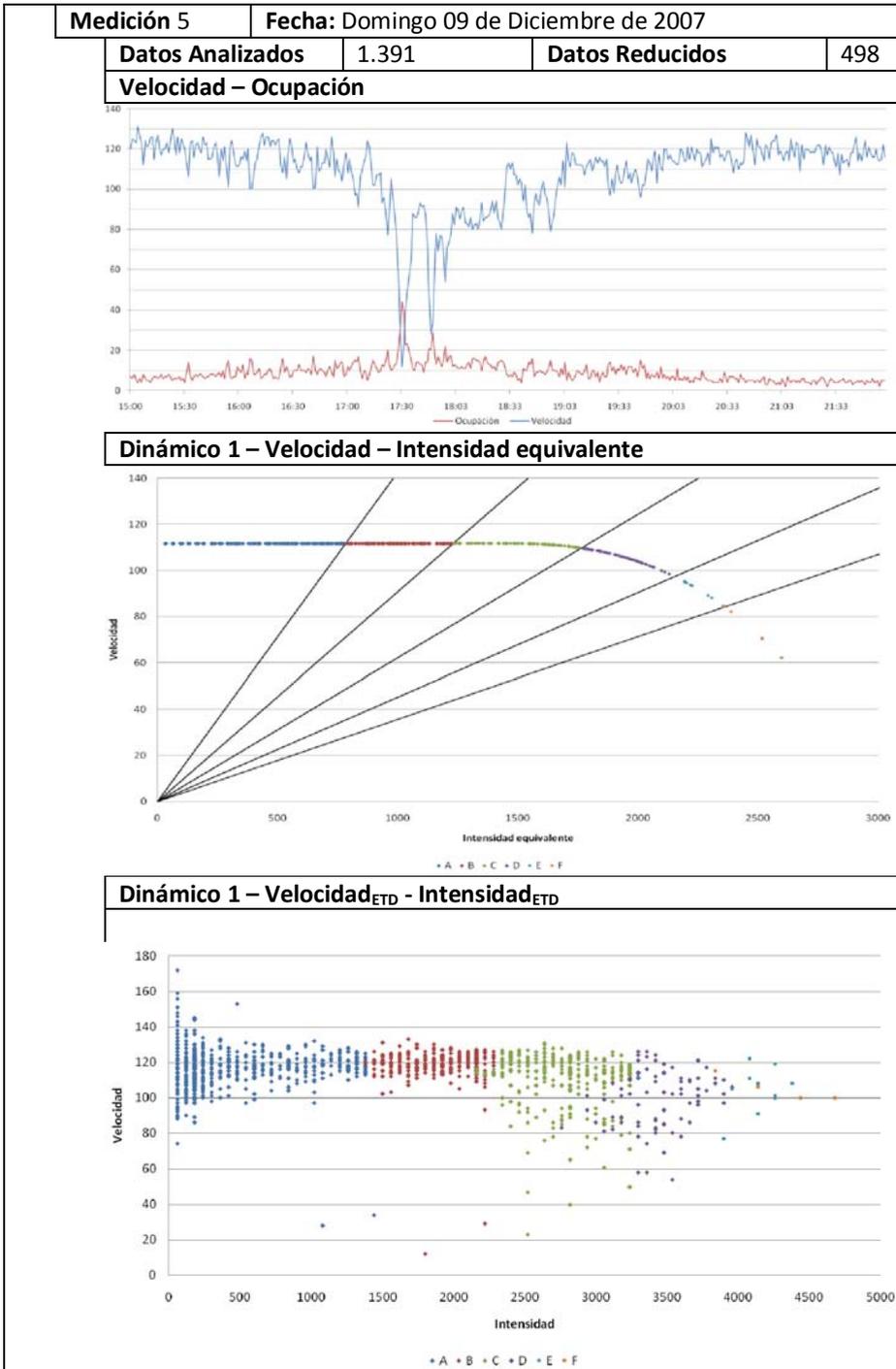
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



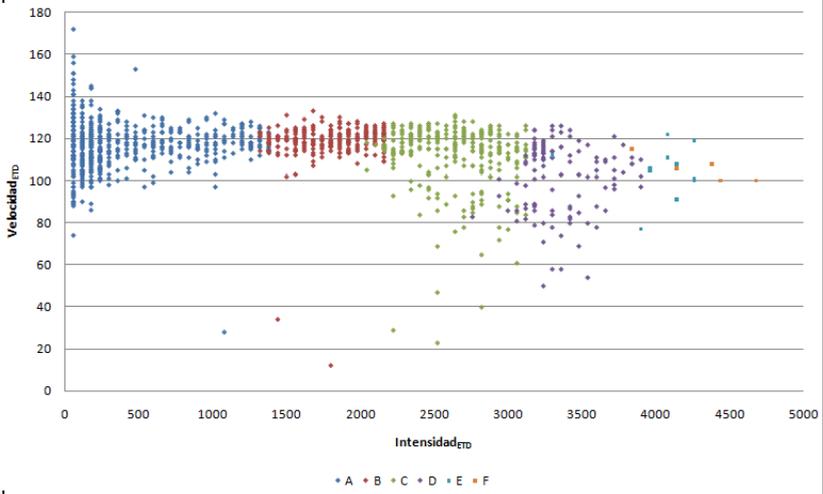
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



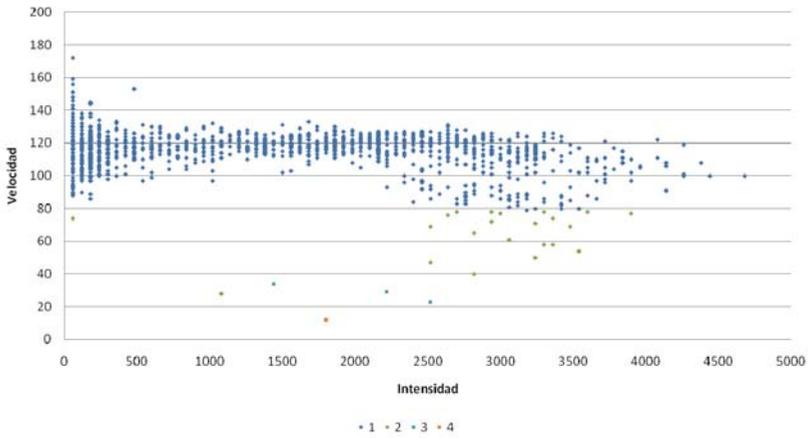




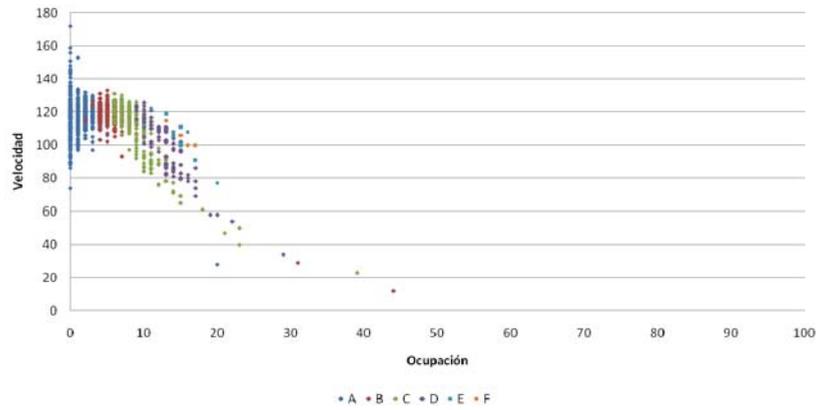
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



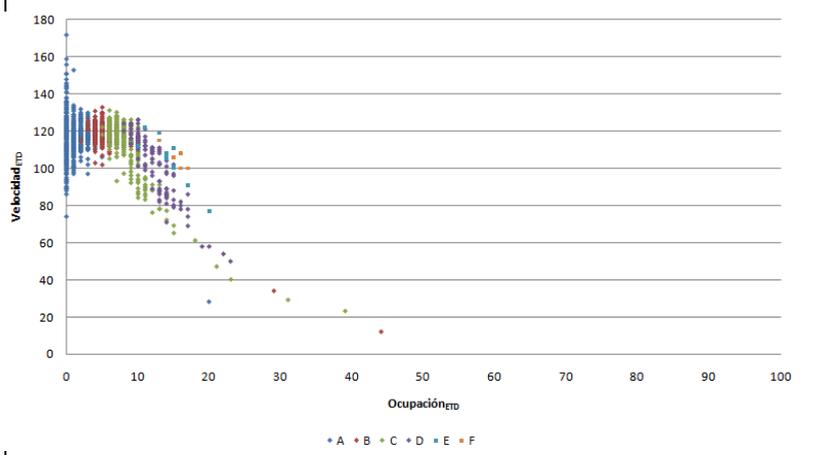
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

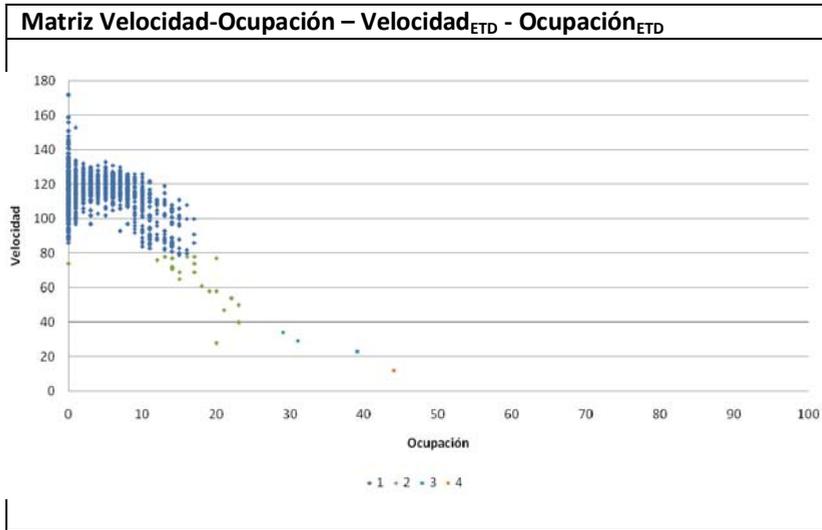


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

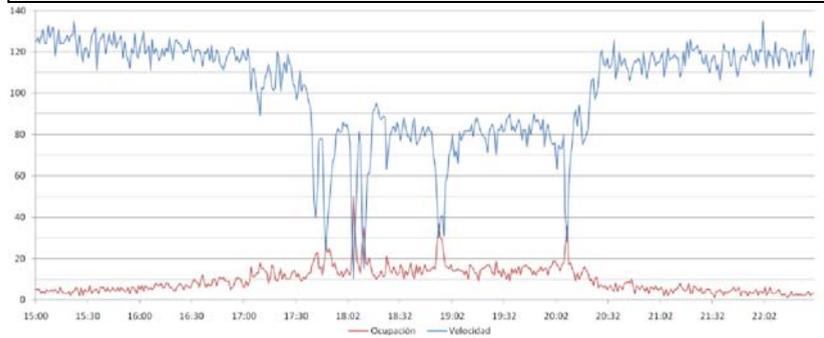




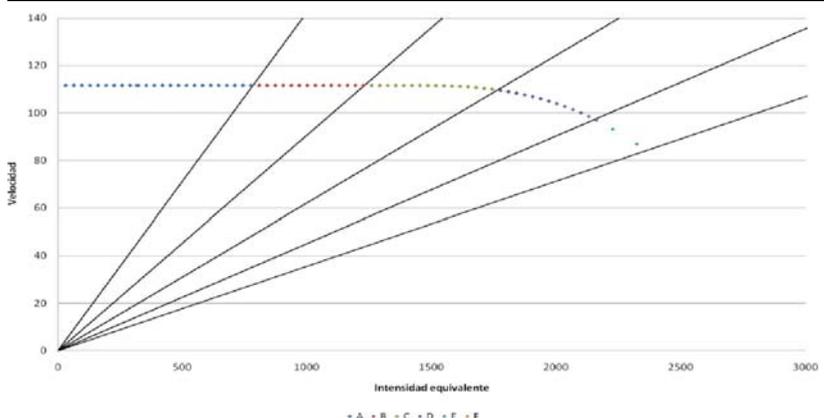
Medición 6	Fecha: Martes 01 de Enero de 2008		
-------------------	--	--	--

Datos Analizados	1.437	Datos Reducidos	766
-------------------------	-------	------------------------	-----

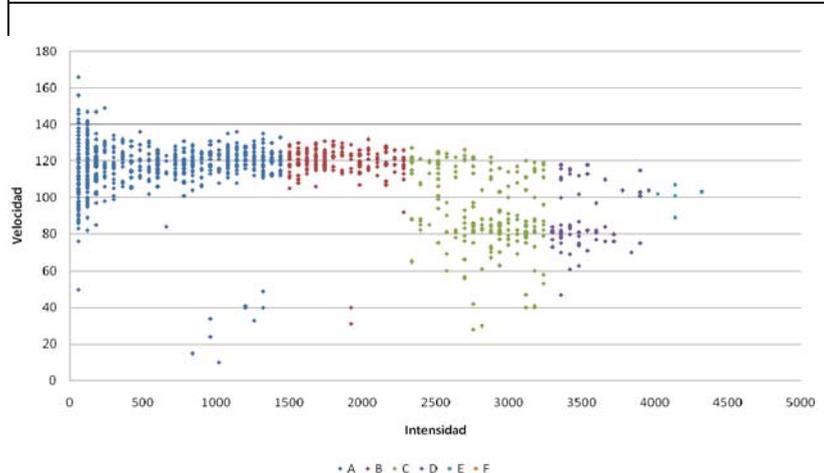
Velocidad – Ocupación



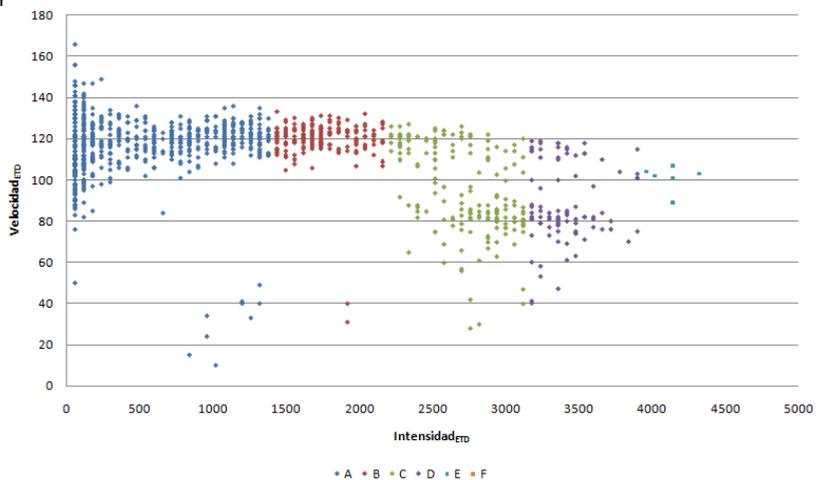
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



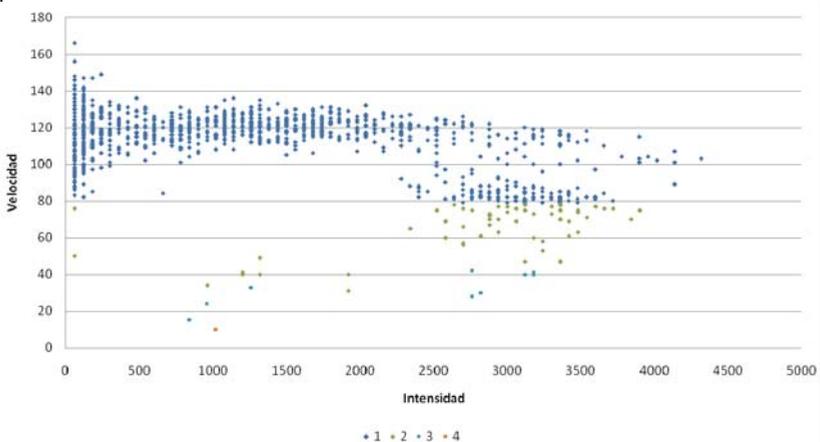
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



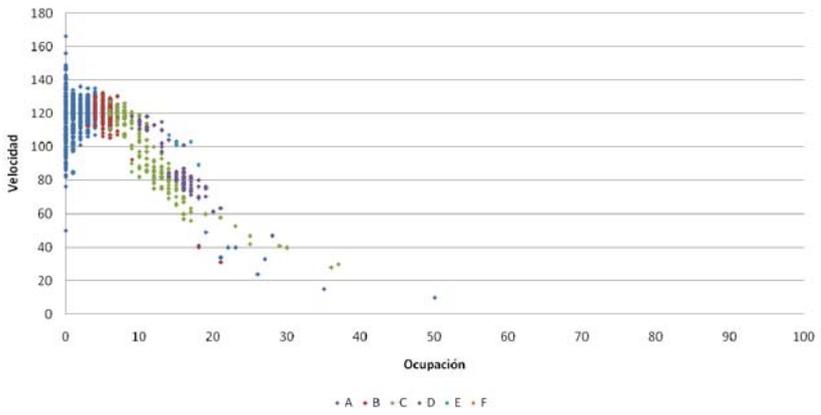
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



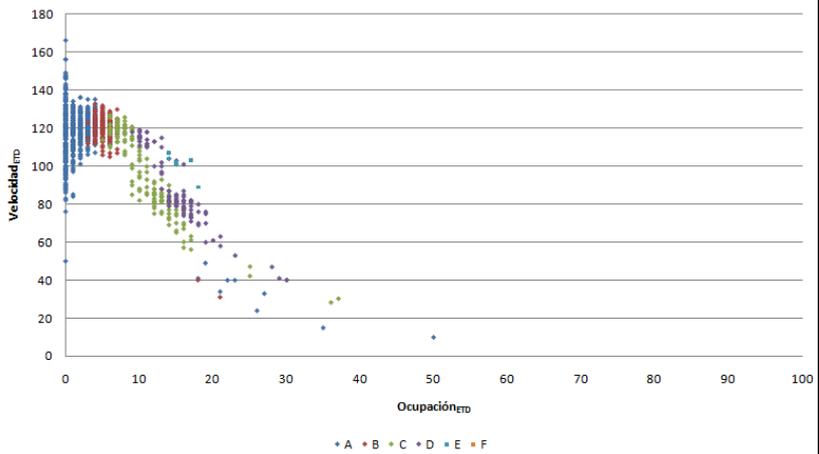
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

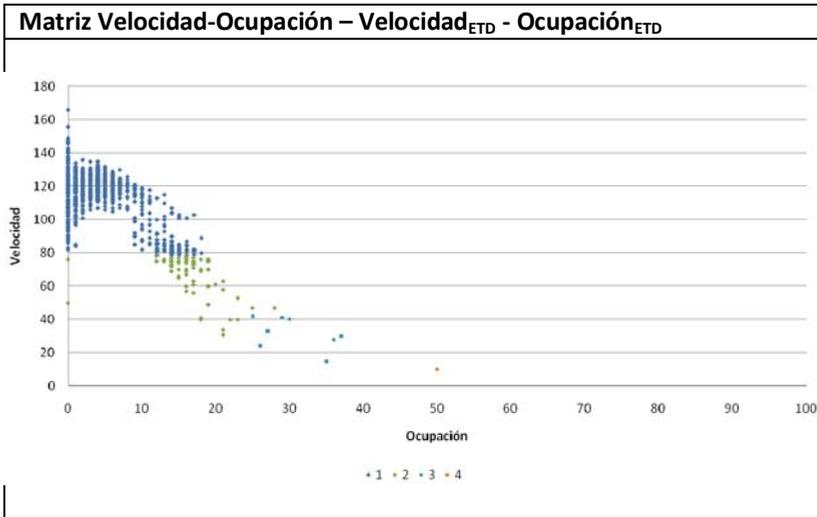


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

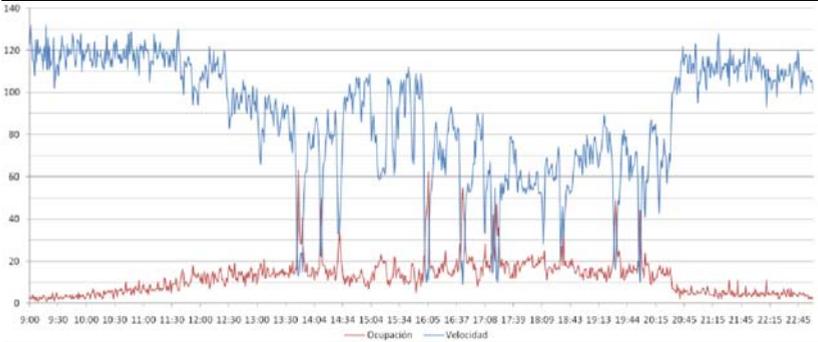




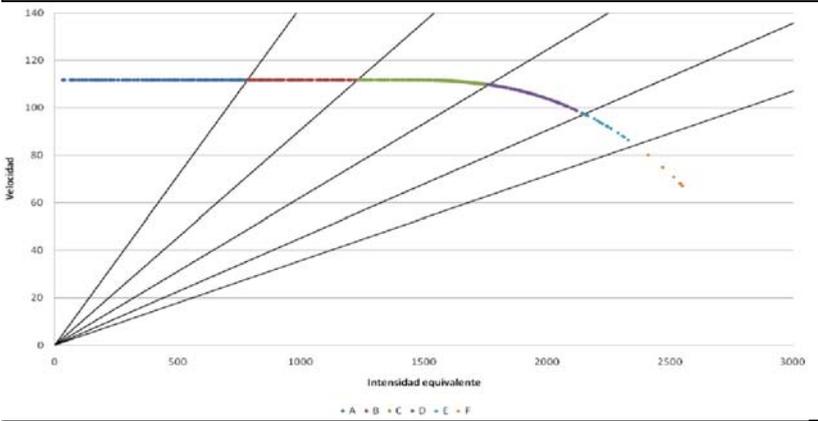
Medición 7	Fecha: Lunes 24 de Marzo de 2008		
-------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.432	Datos Reducidos	498
-------------------------	-------	------------------------	-----

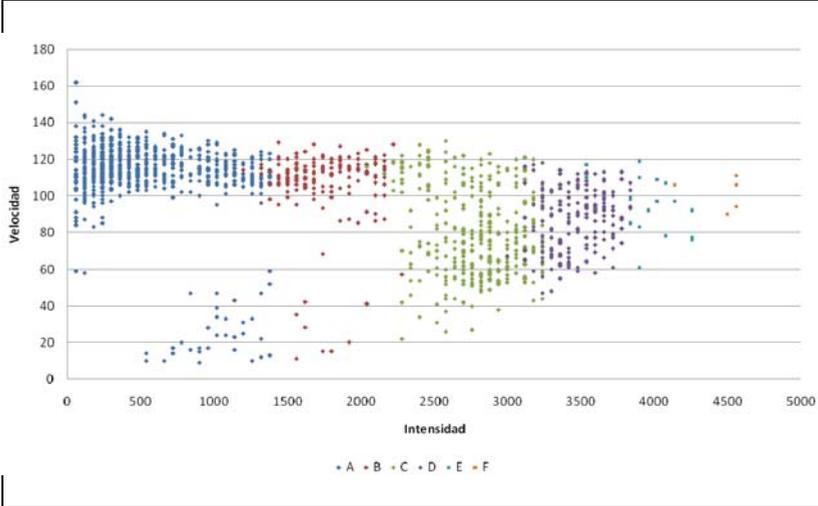
Velocidad – Ocupación



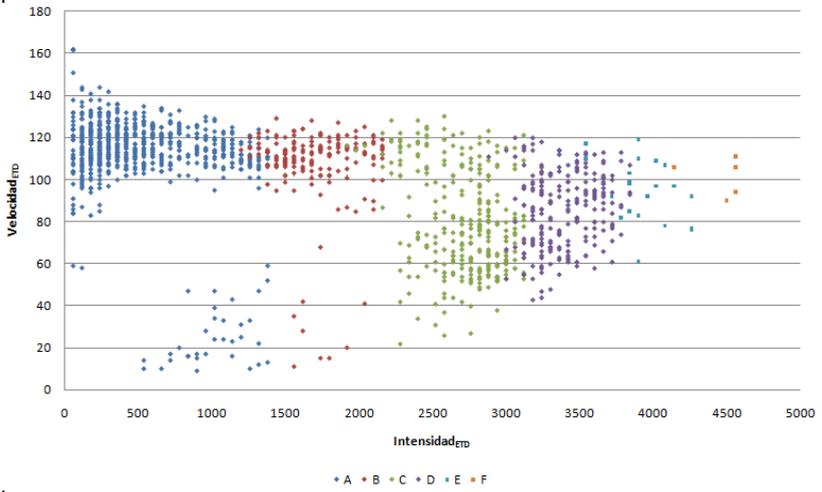
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



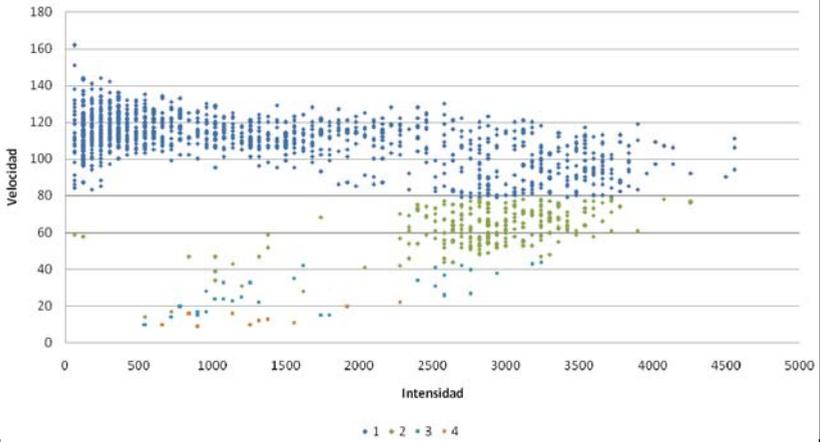
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

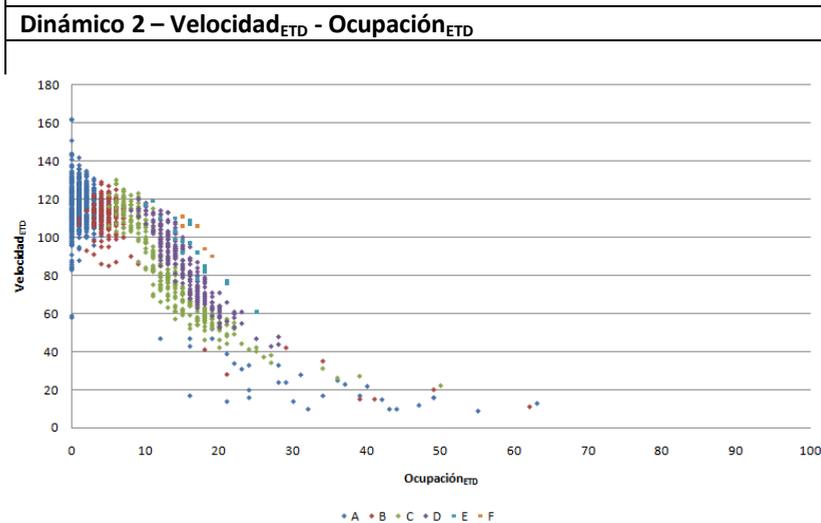
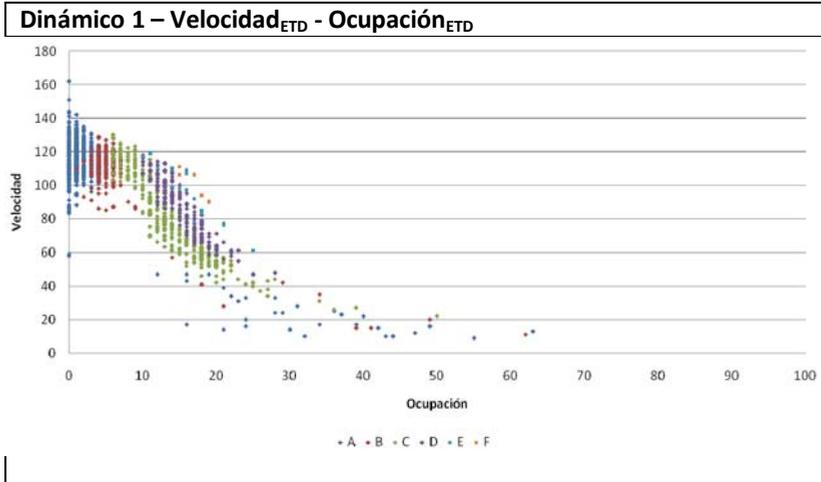


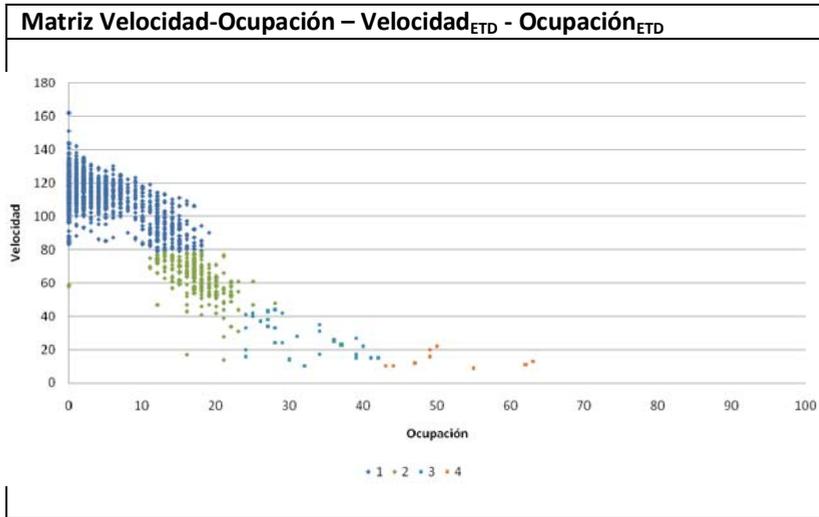
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

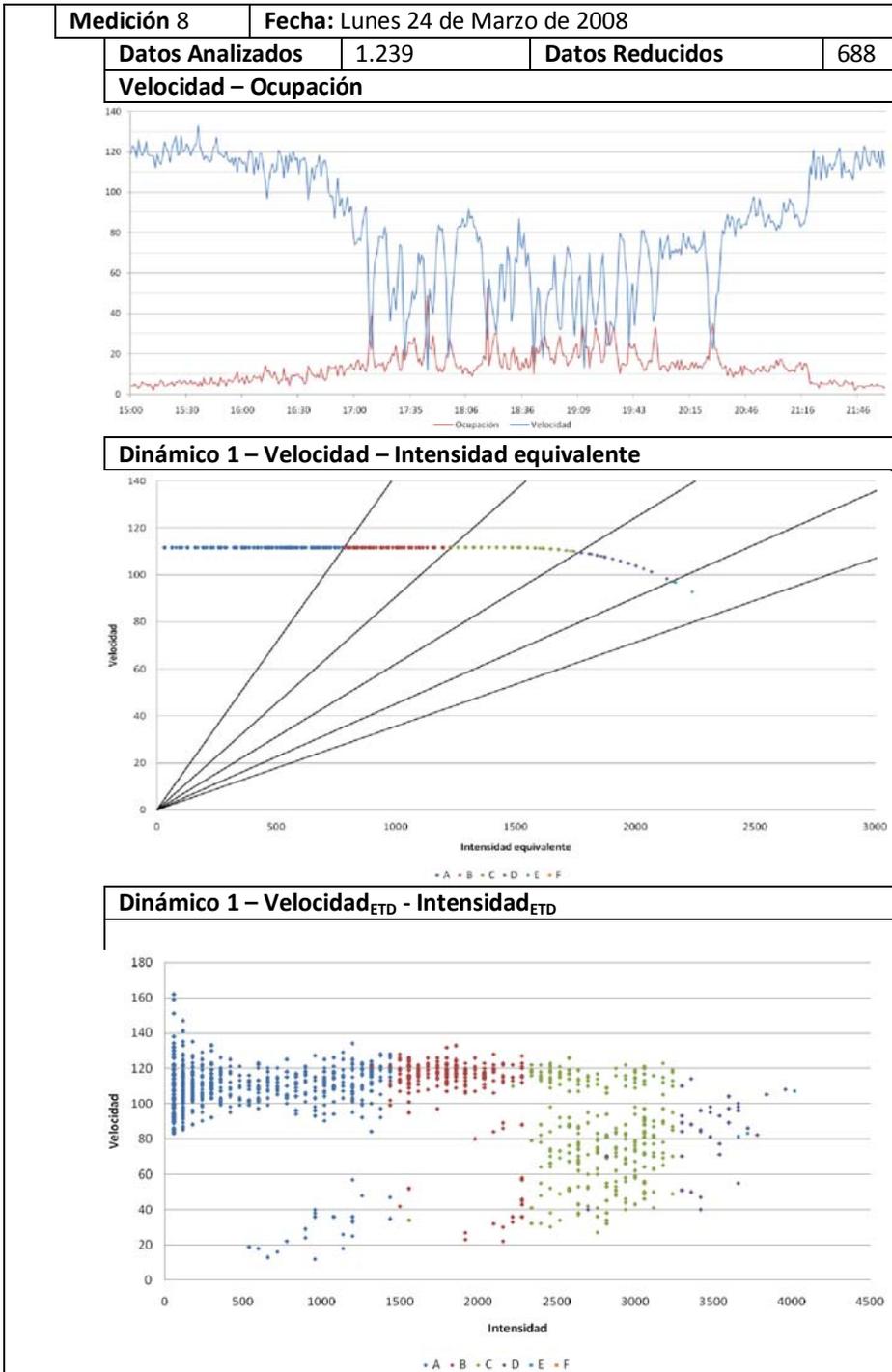


Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

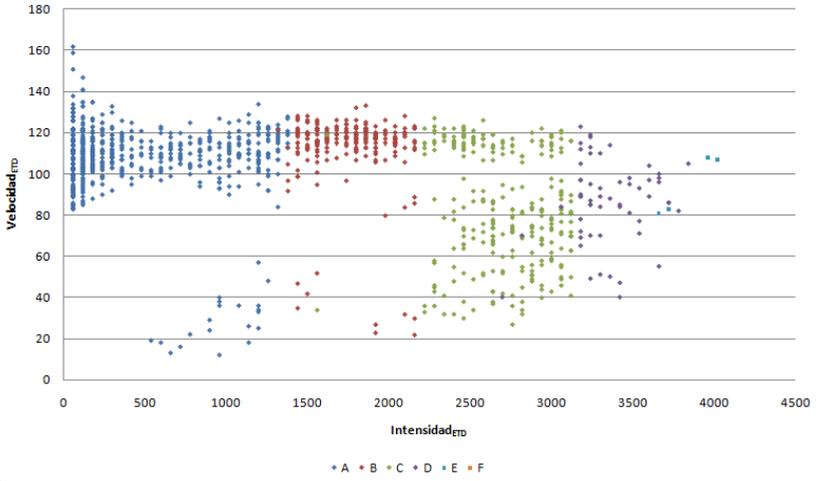




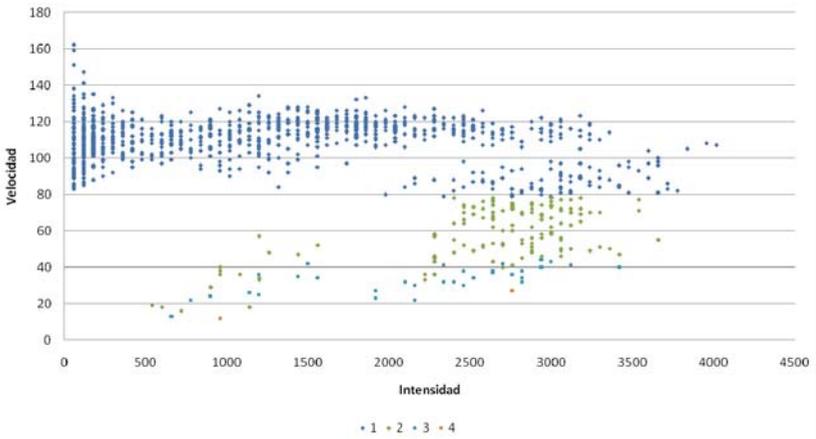




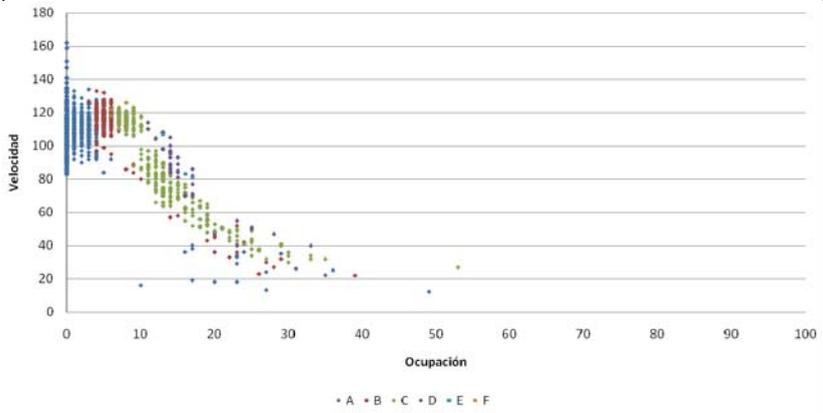
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



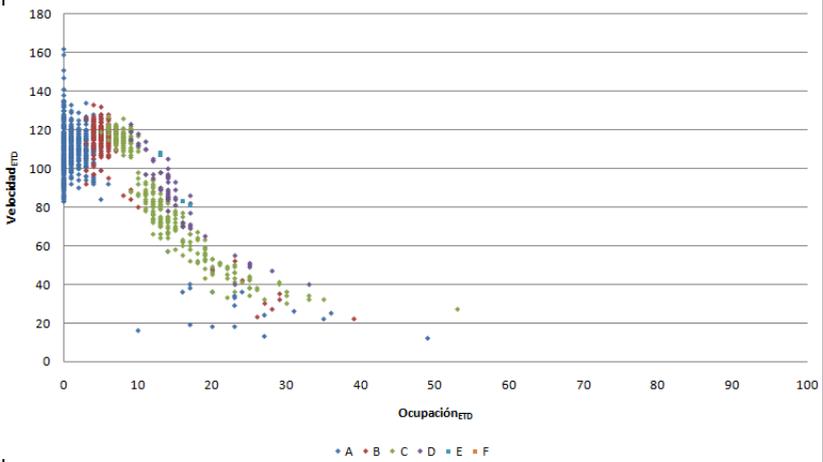
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

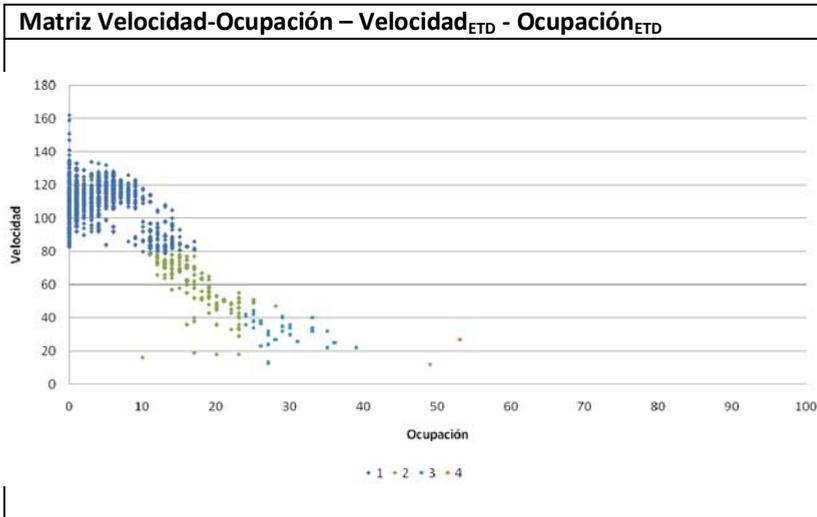


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

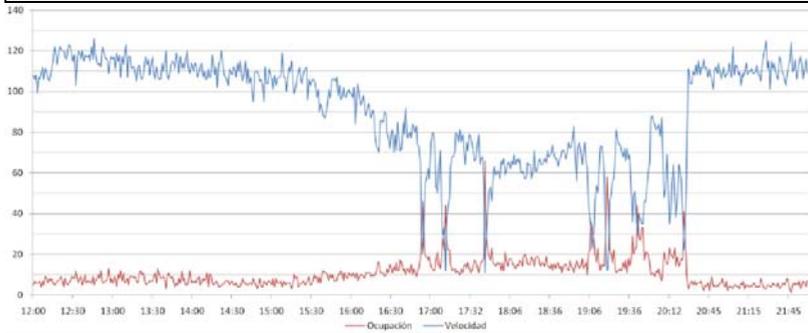




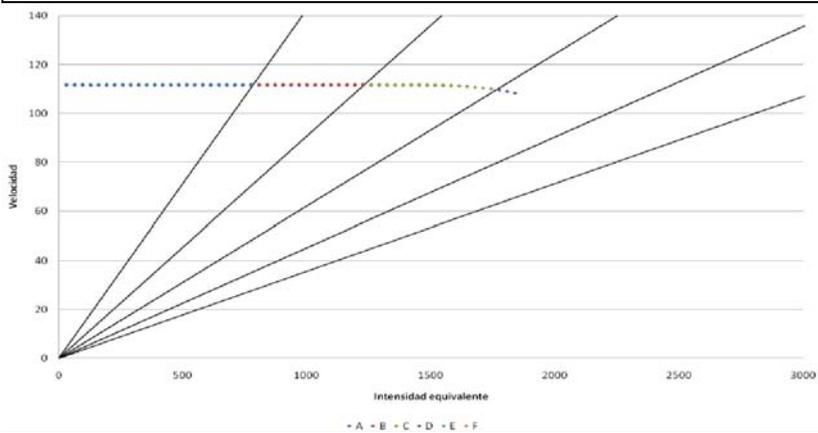
Medición 9	Fecha: Lunes 08 de Diciembre de 2008		
-------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.438	Datos Reducidos	702
-------------------------	-------	------------------------	-----

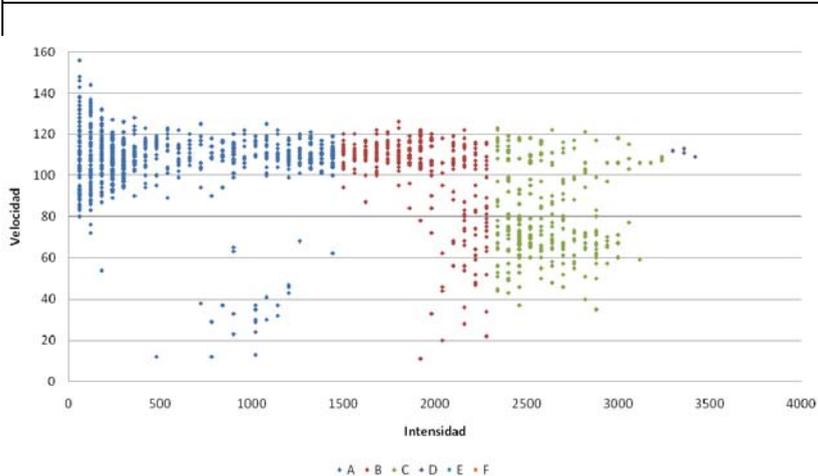
Velocidad – Ocupación



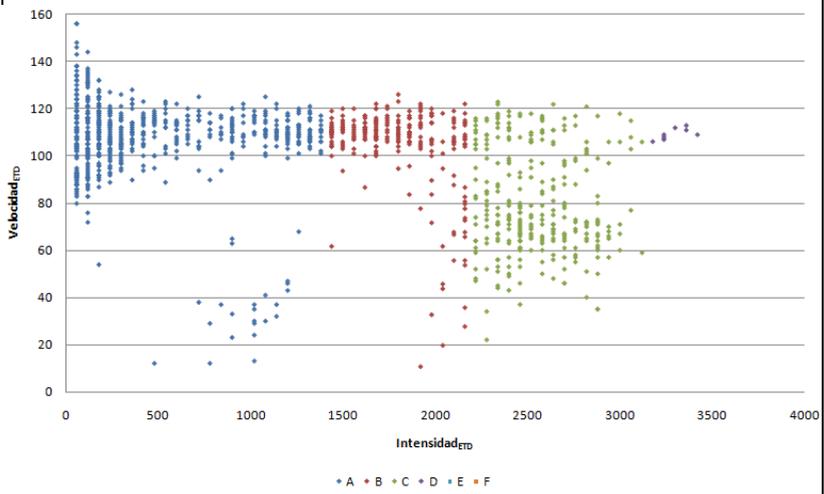
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



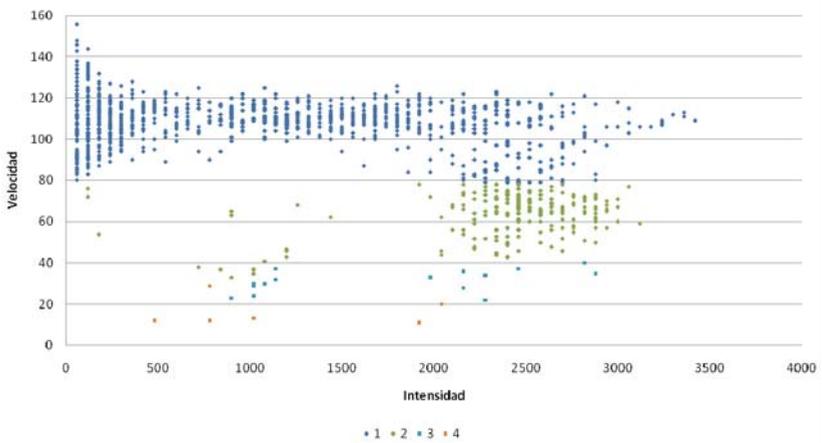
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



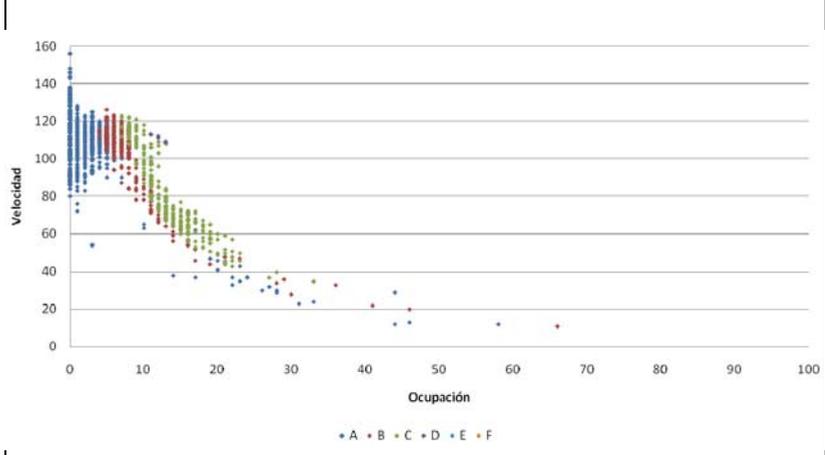
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



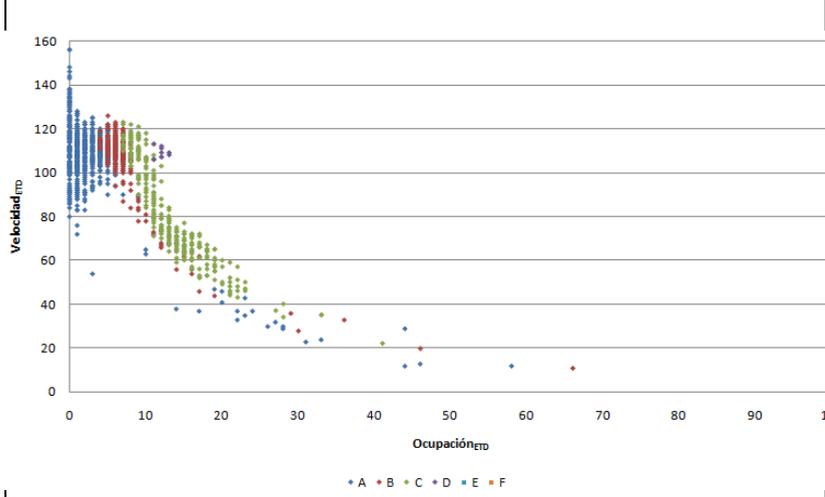
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

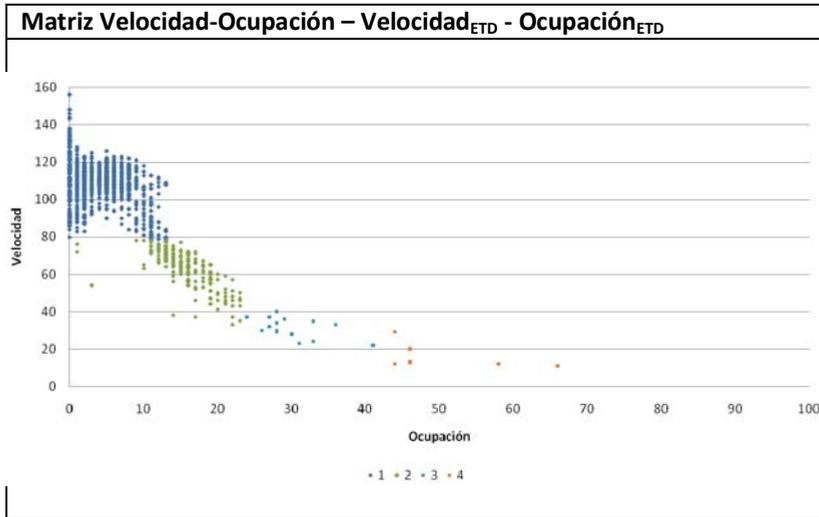


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

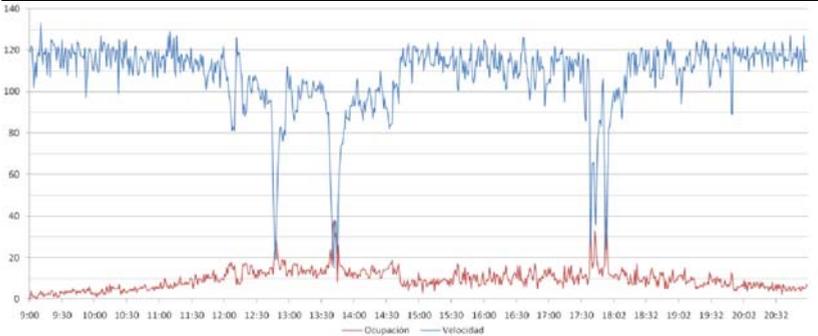




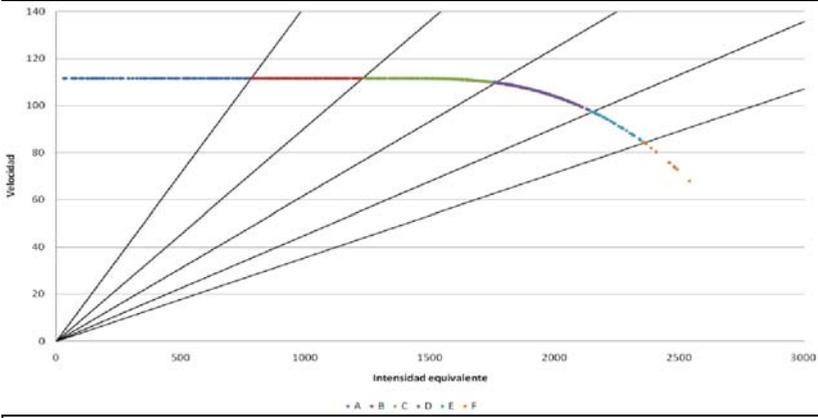
Medición 10	Fecha: Lunes 13 de Abril de 2009		
--------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.411	Datos Reducidos	487
-------------------------	-------	------------------------	-----

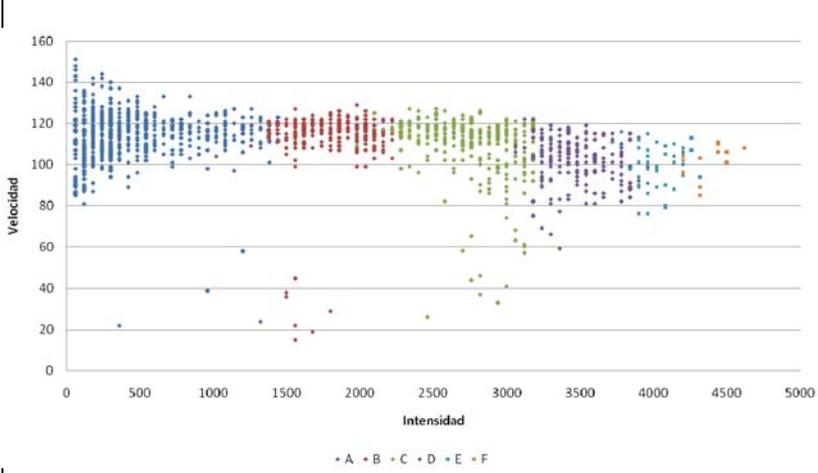
Velocidad – Ocupación



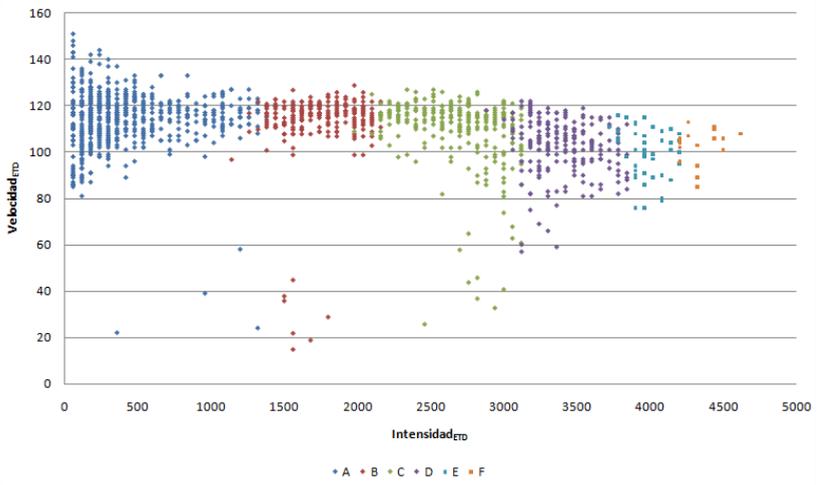
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



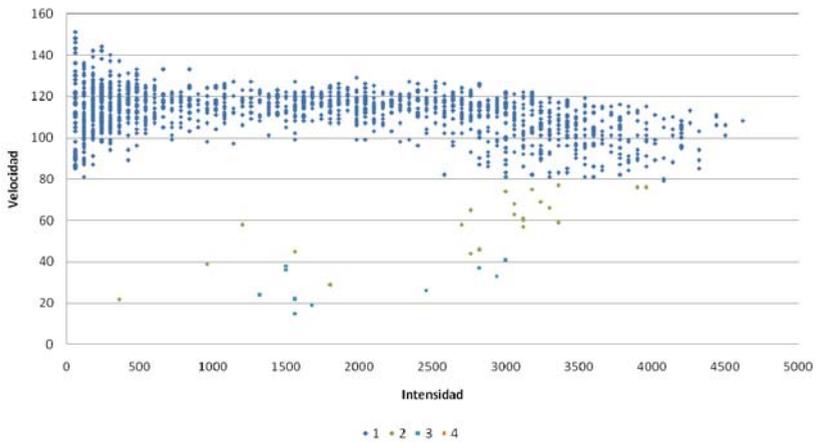
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



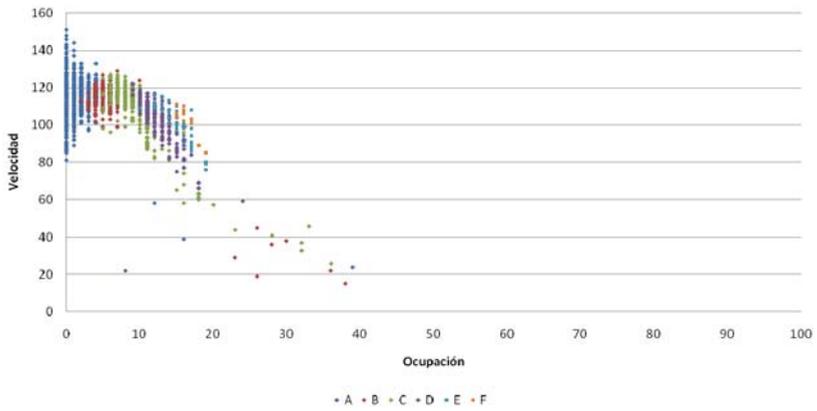
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



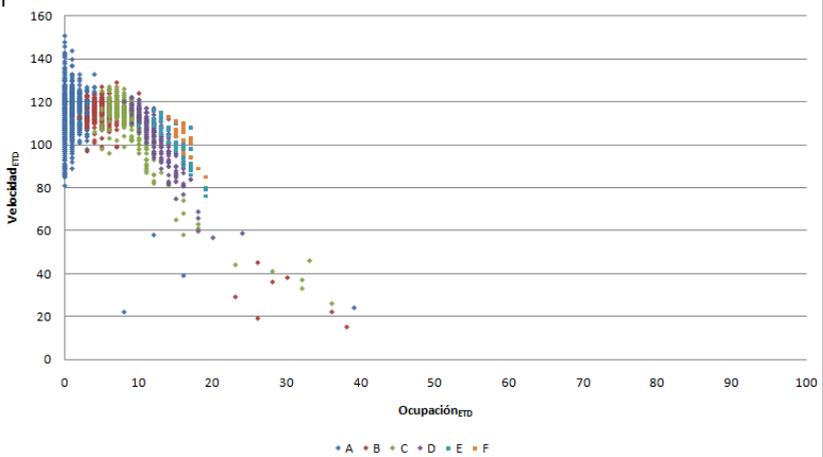
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

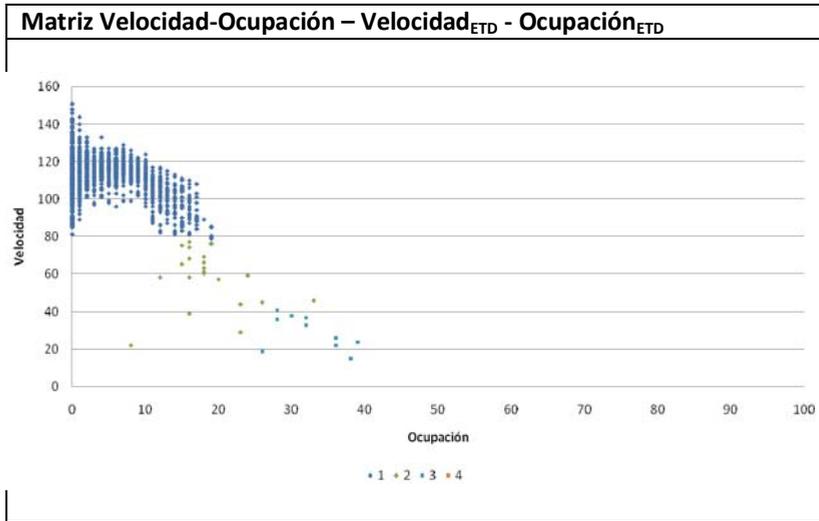


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



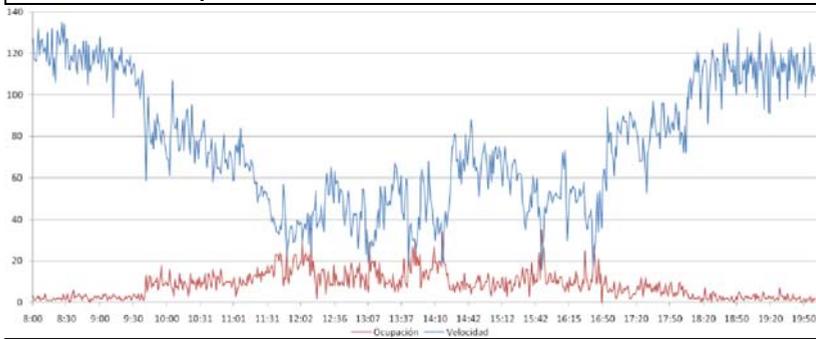
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



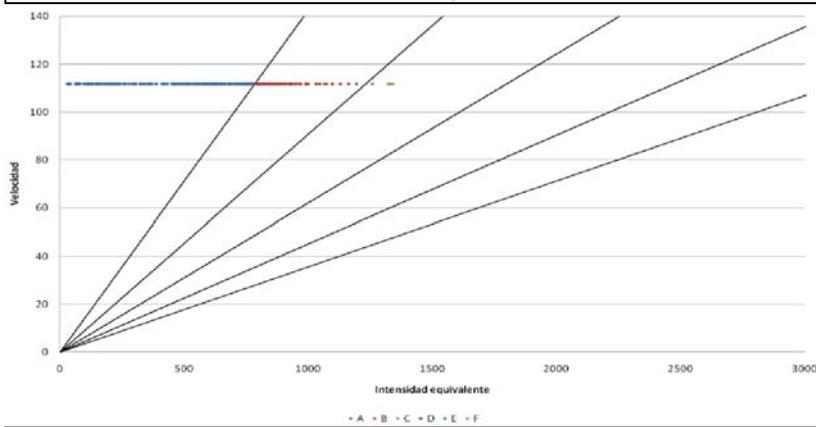


Medición 11	Fecha: Lunes 10 de Septiembre de 2007		
Datos Analizados	1.440	Datos Reducidos	671

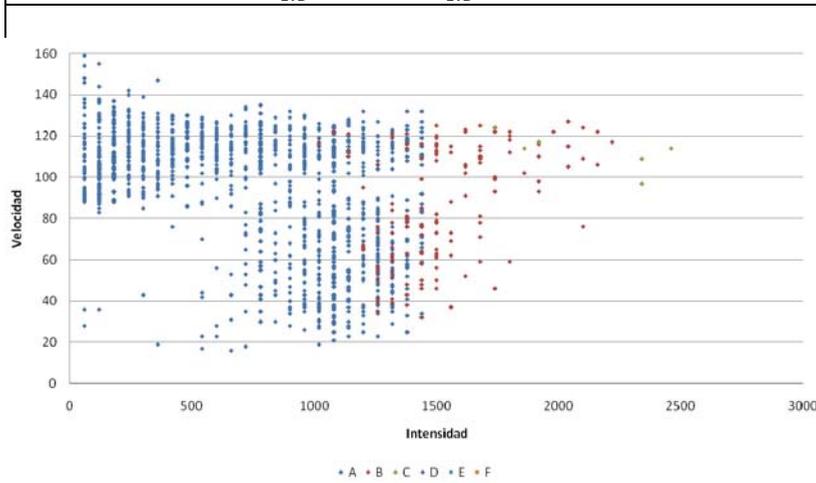
Velocidad – Ocupación



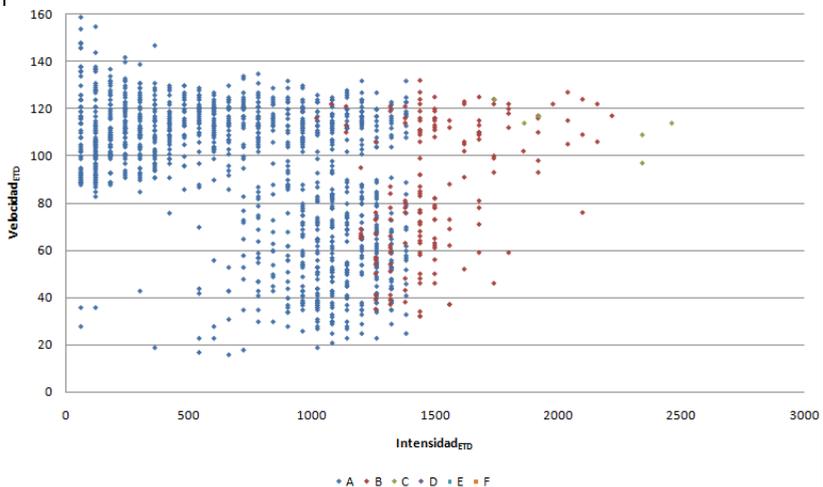
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



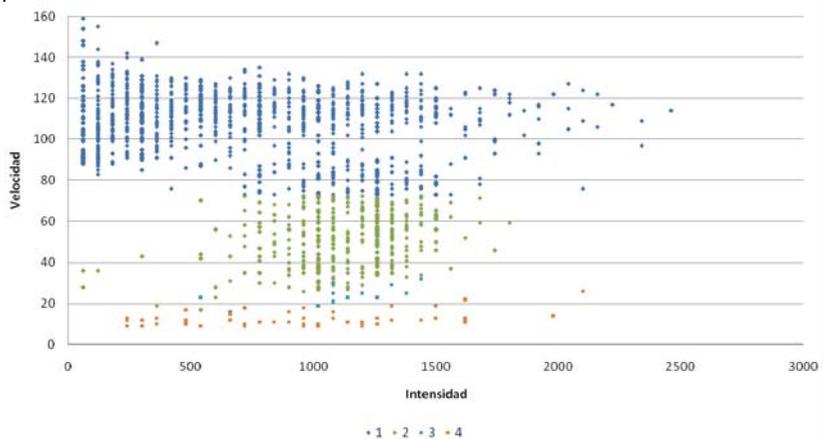
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



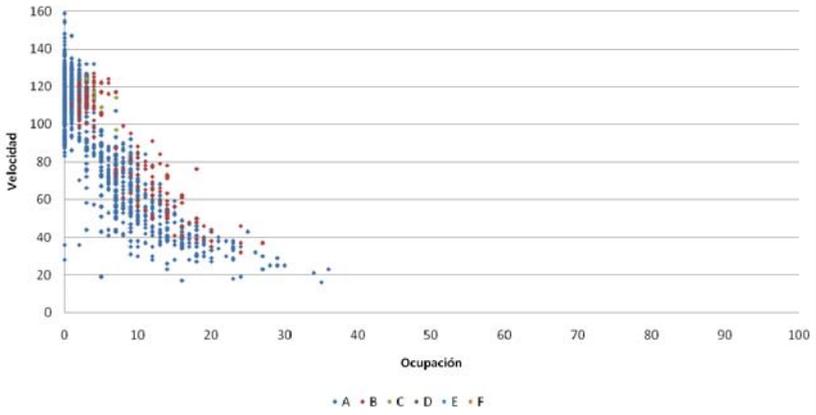
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



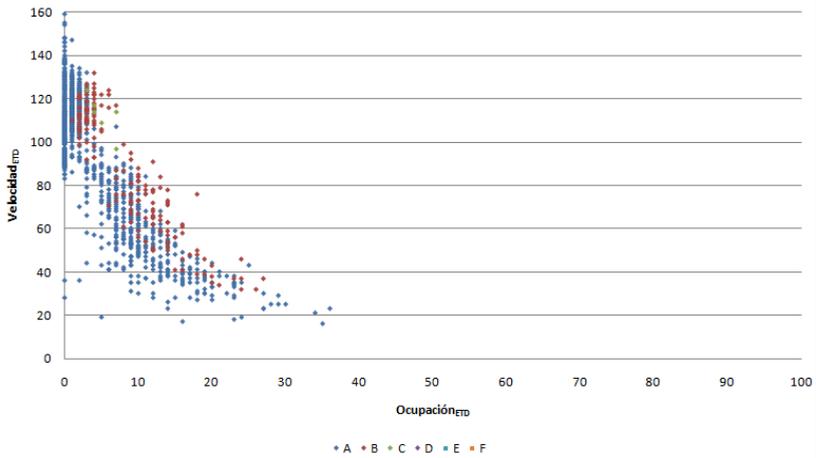
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

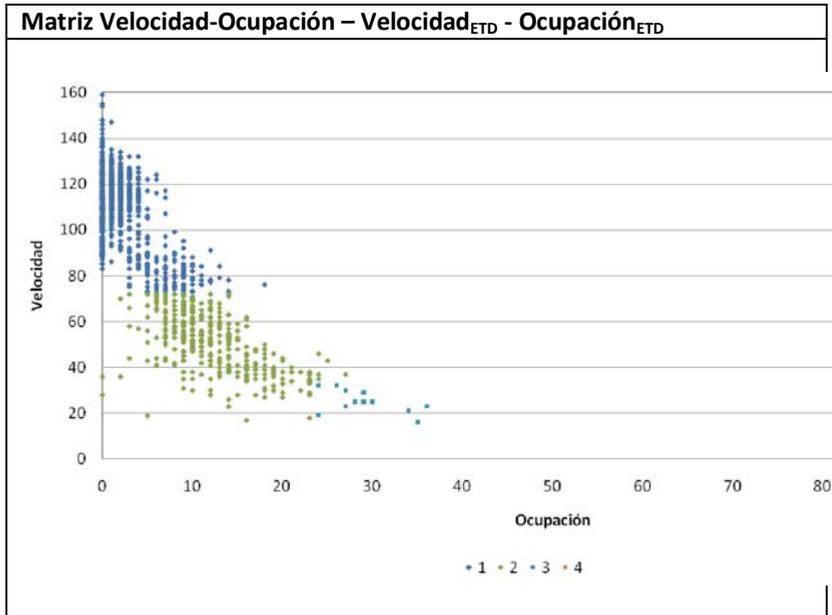


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}



Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

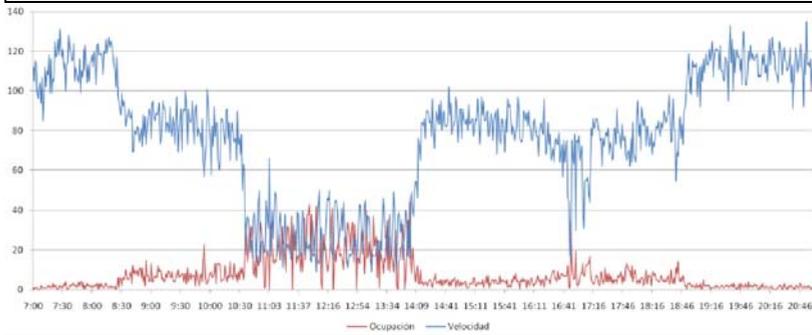




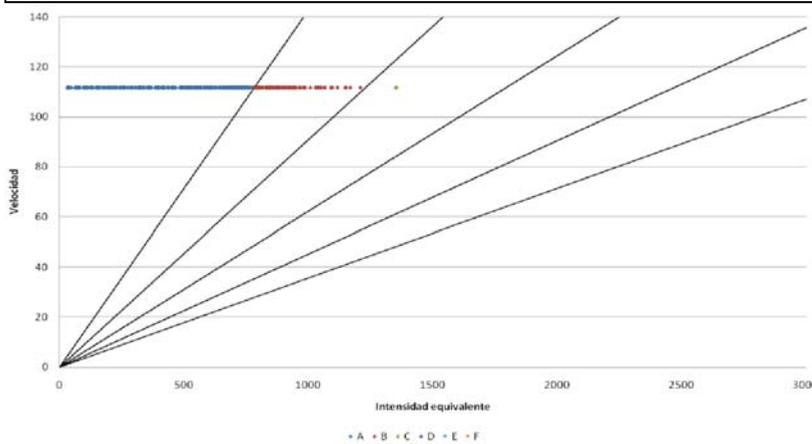
Medición 12	Fecha: Martes 11 de Septiembre de 2007		
--------------------	---	--	--

Datos Analizados	1.341	Datos Reducidos	766
-------------------------	-------	------------------------	-----

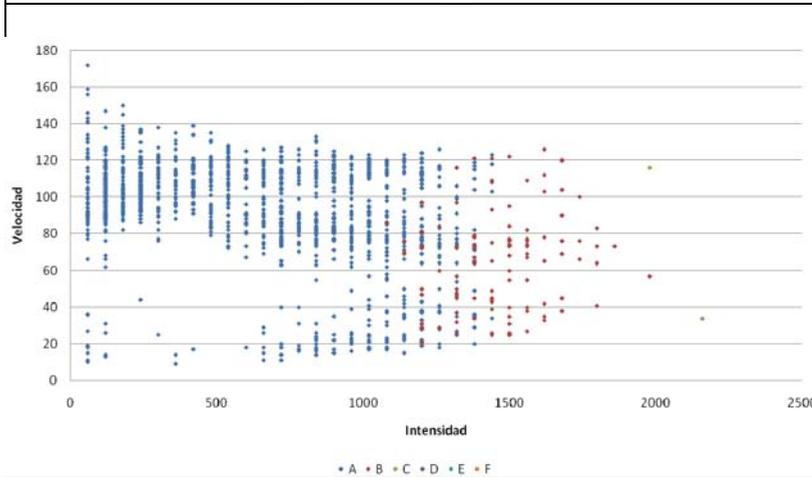
Velocidad – Ocupación



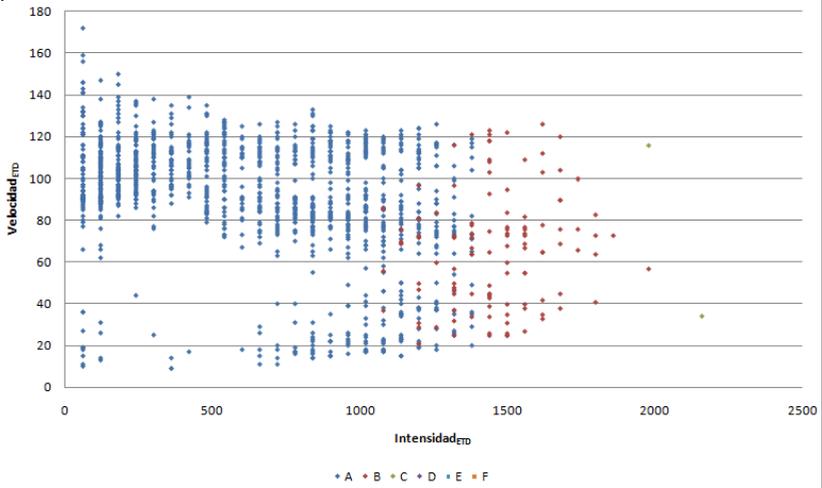
Dinámico 1 – Velocidad – Intensidad equivalente



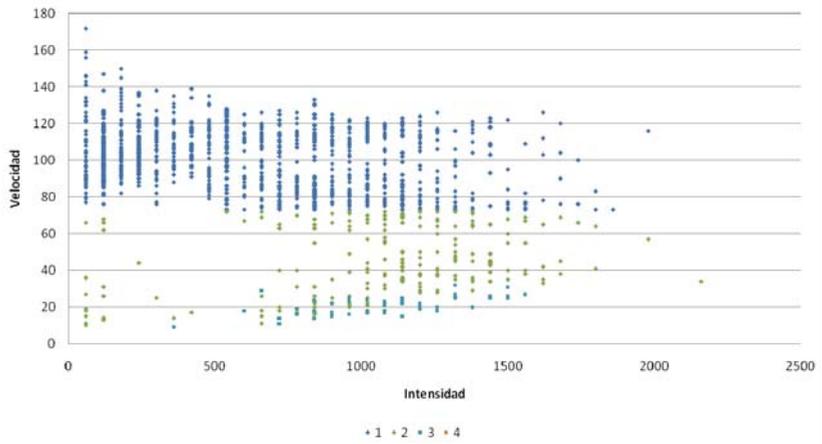
Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



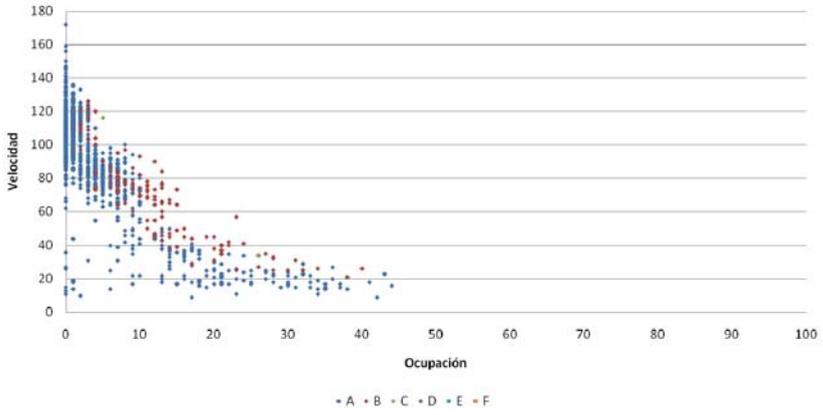
Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}



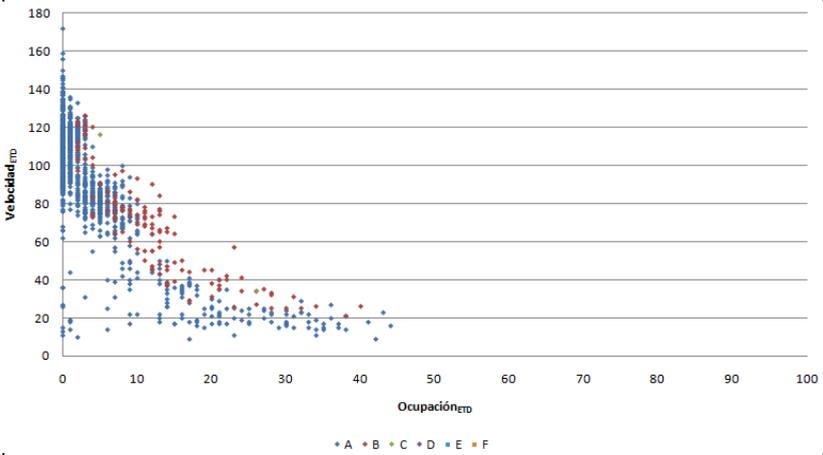
Matriz Velocidad-Ocupación – Velocidad_{ETD} - Intensidad_{ETD}

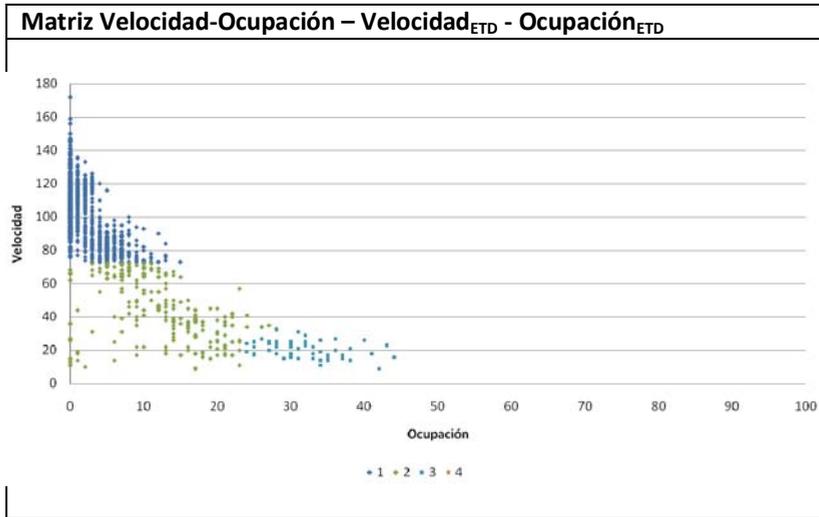


Dinámico 1 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

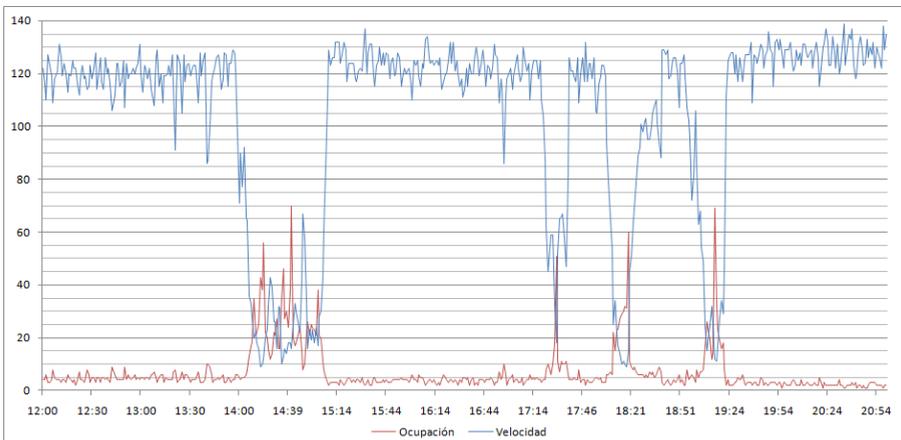
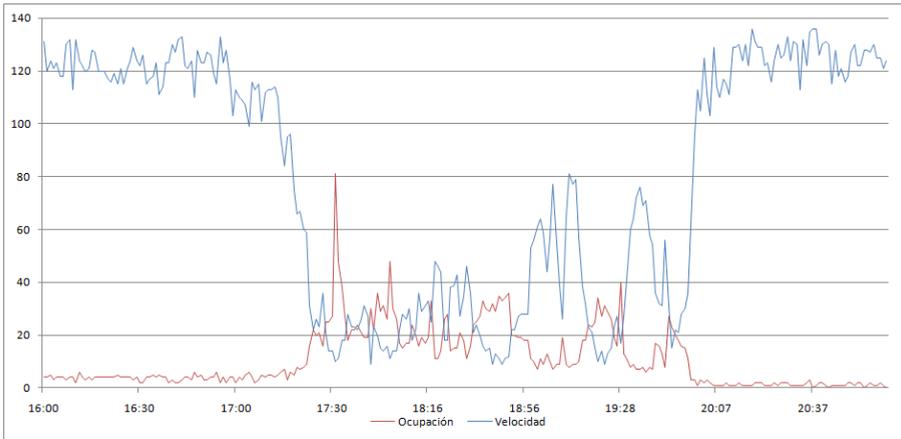


Dinámico 2 – Velocidad_{ETD} - Ocupación_{ETD}

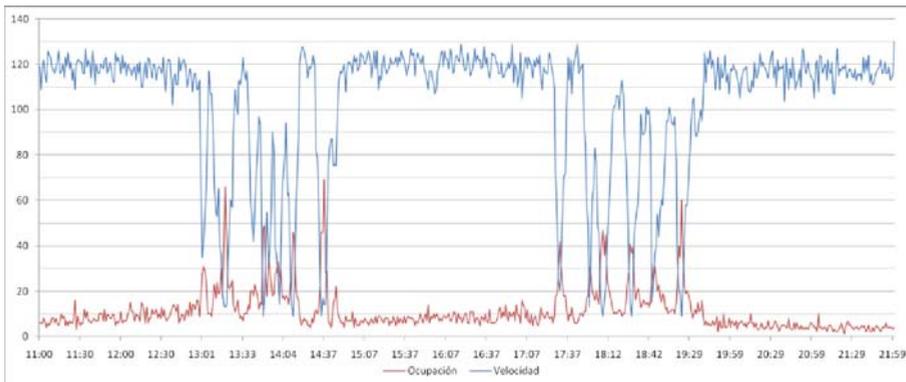
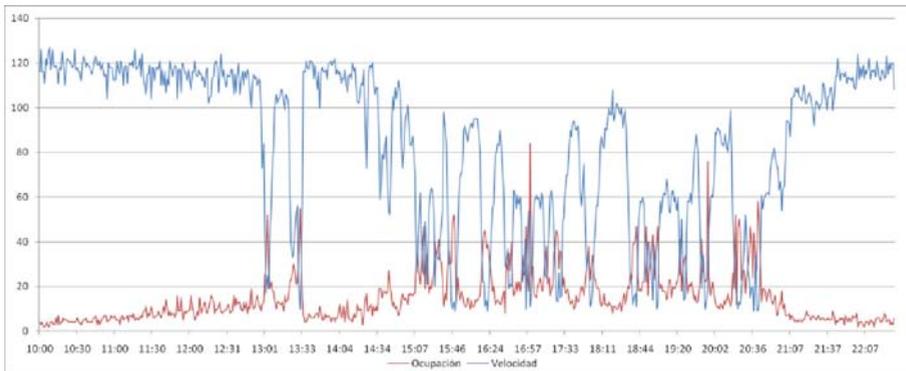
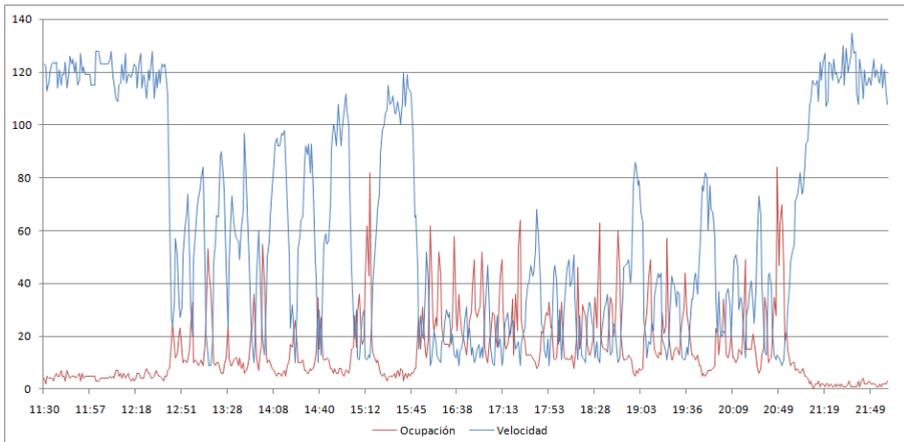


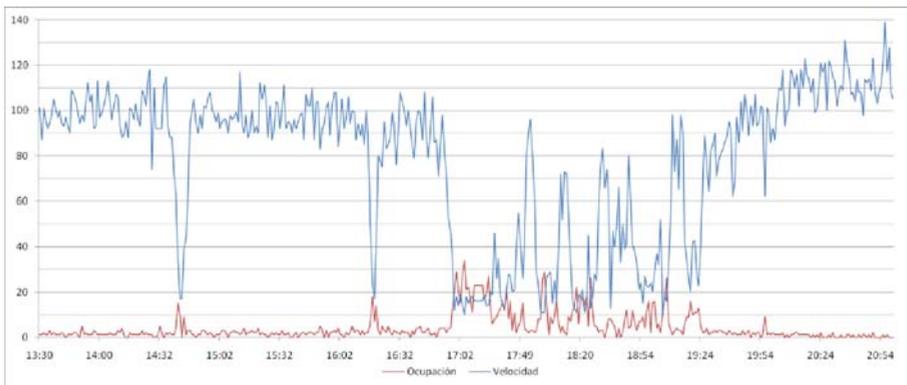
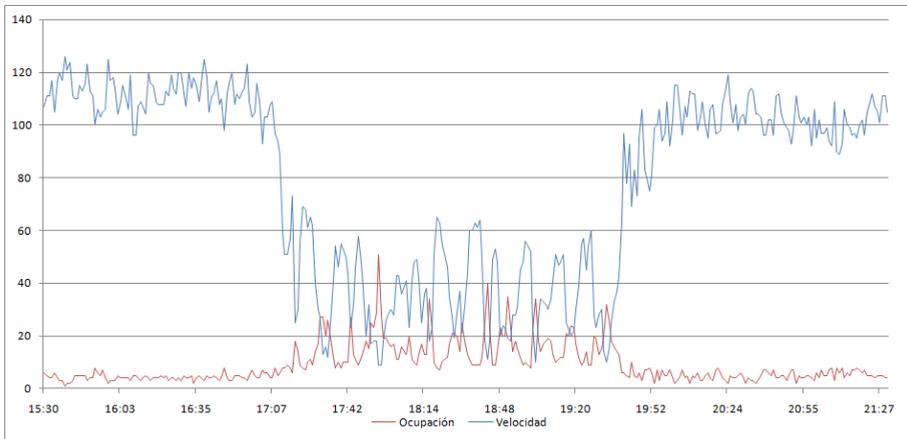
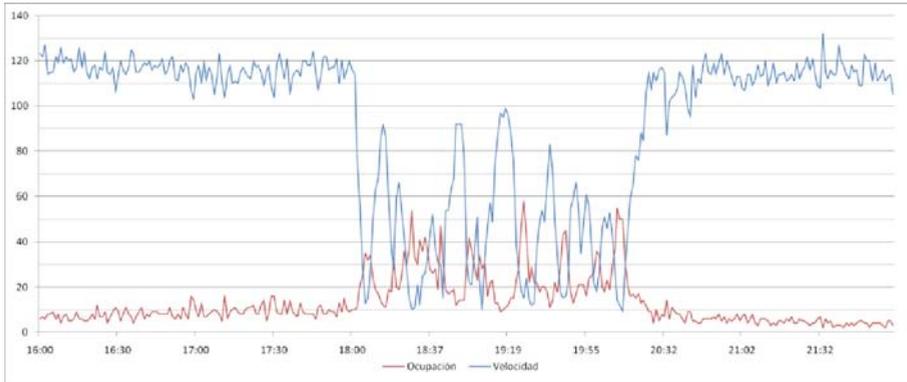


ANEXO 2. Gráficas Velocidad/Ocupación para la determinación de umbrales

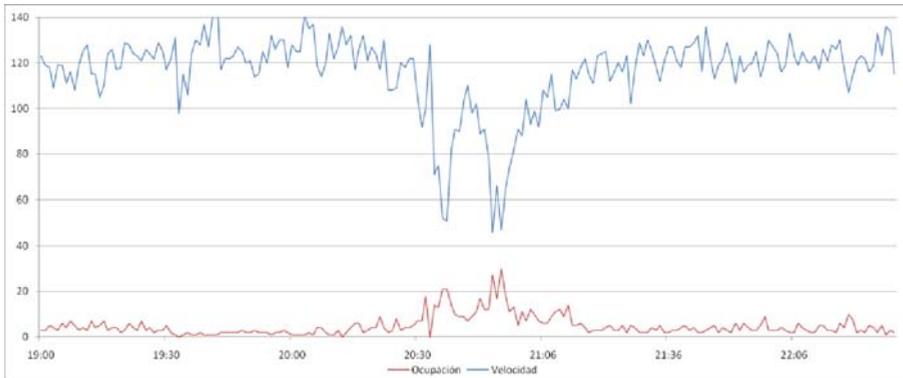
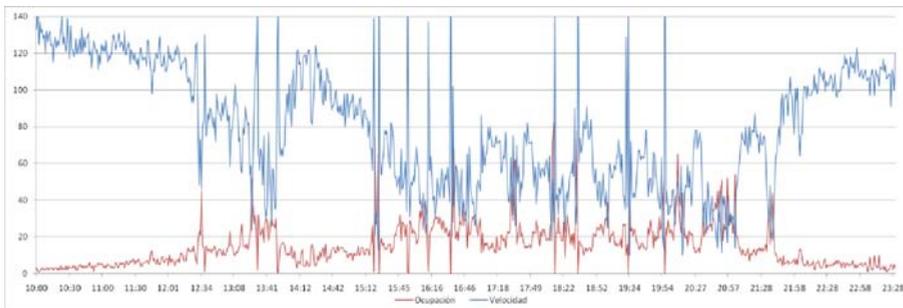
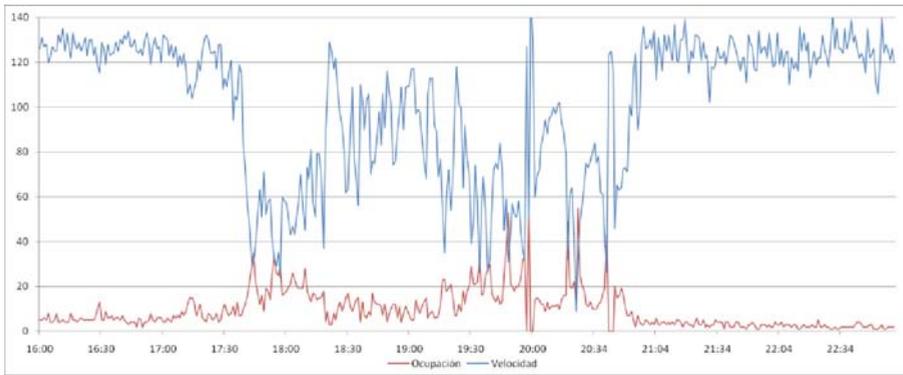


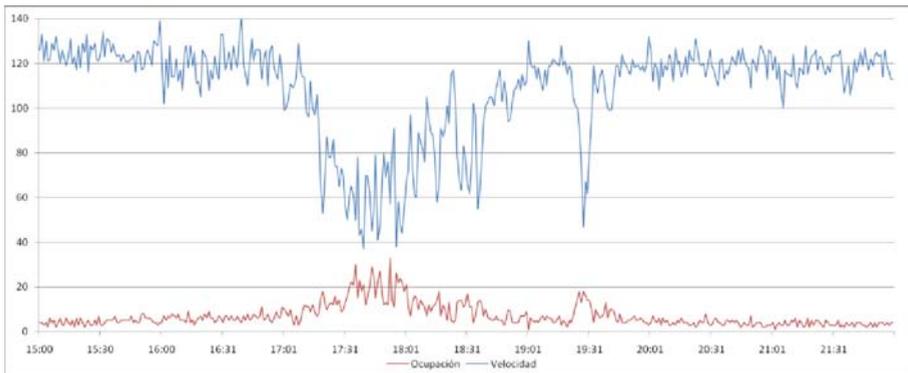
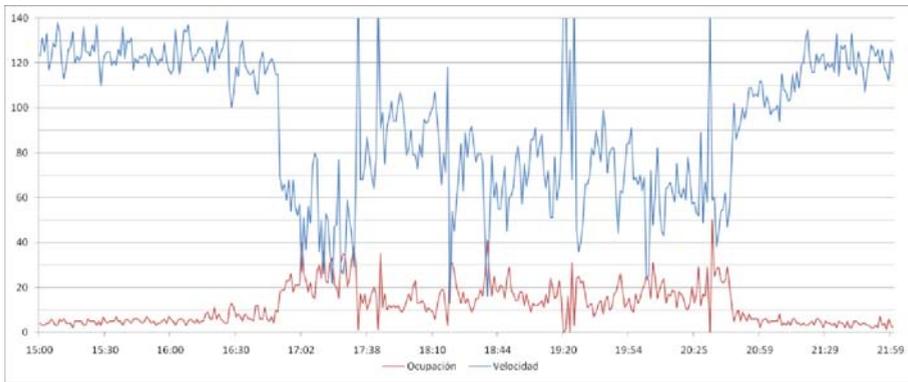
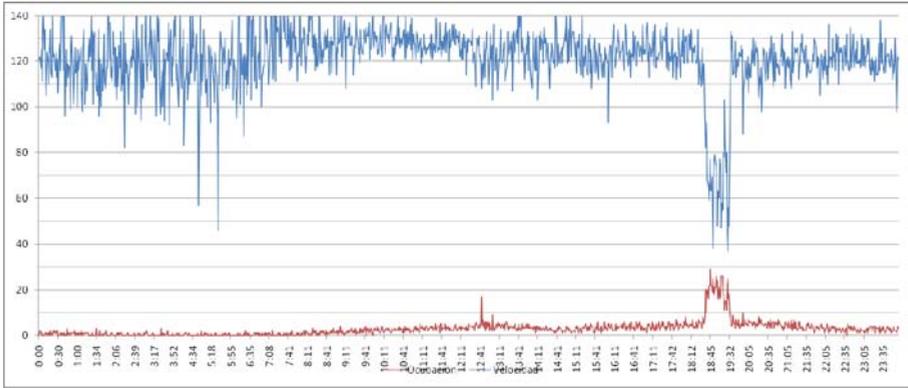
Anexo



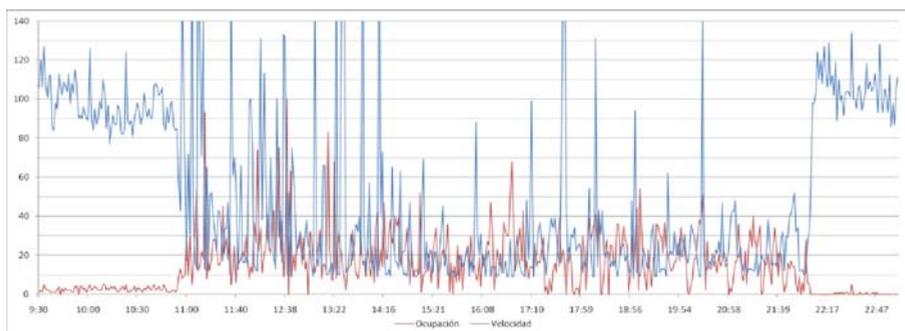
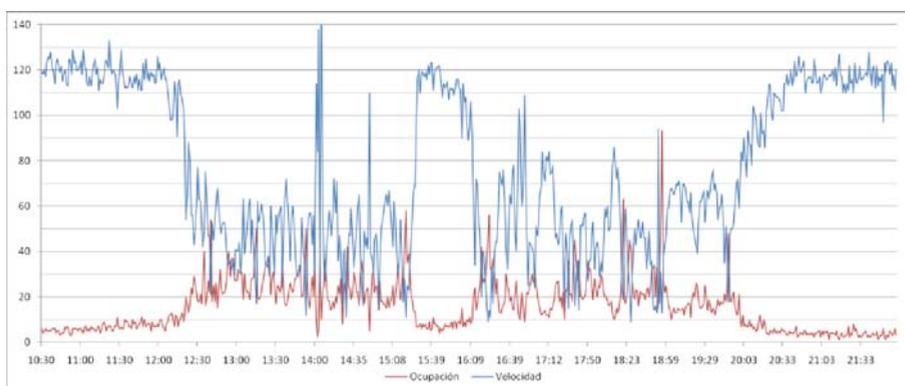
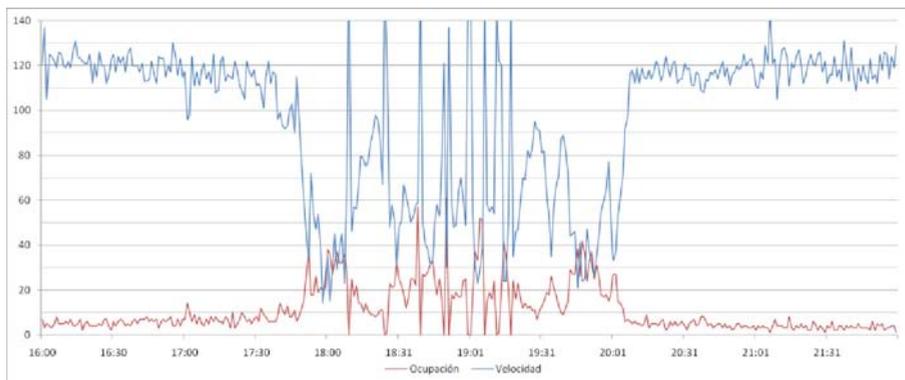


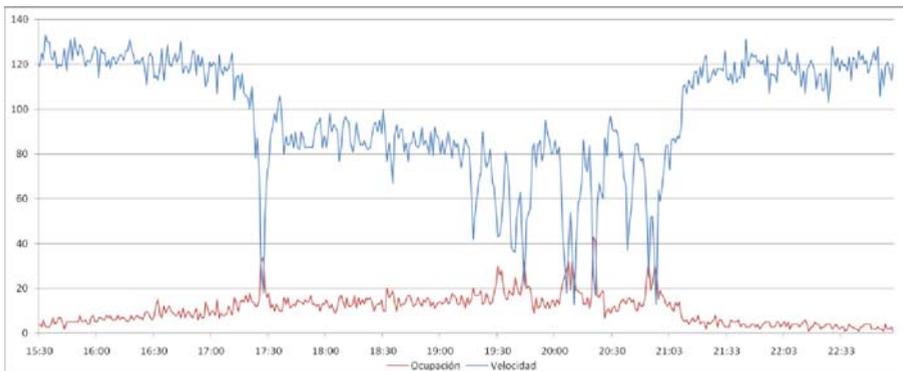
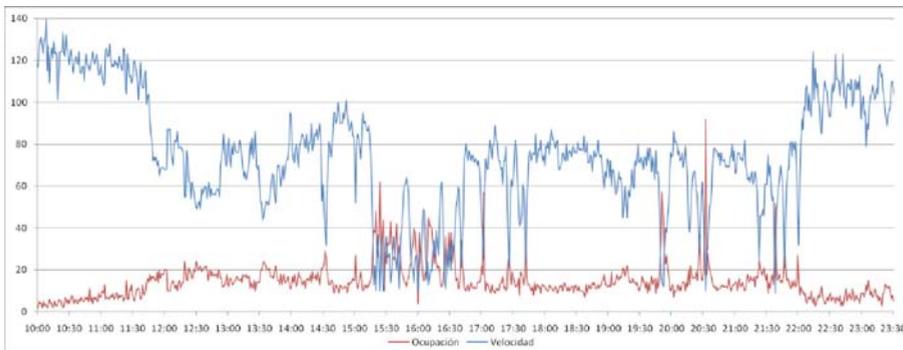
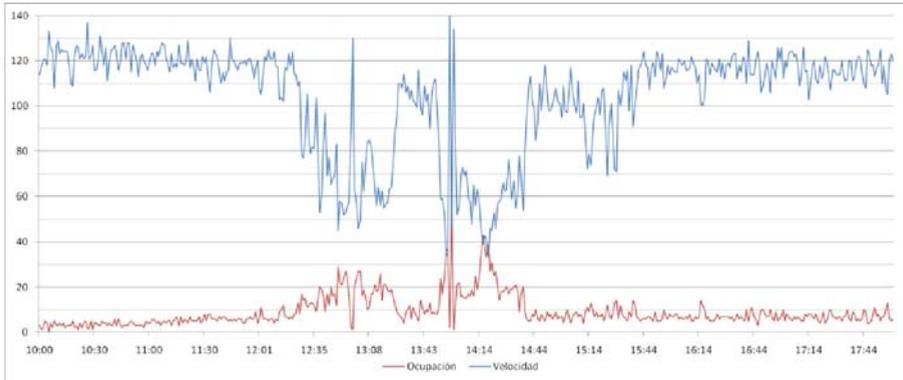
Anexo



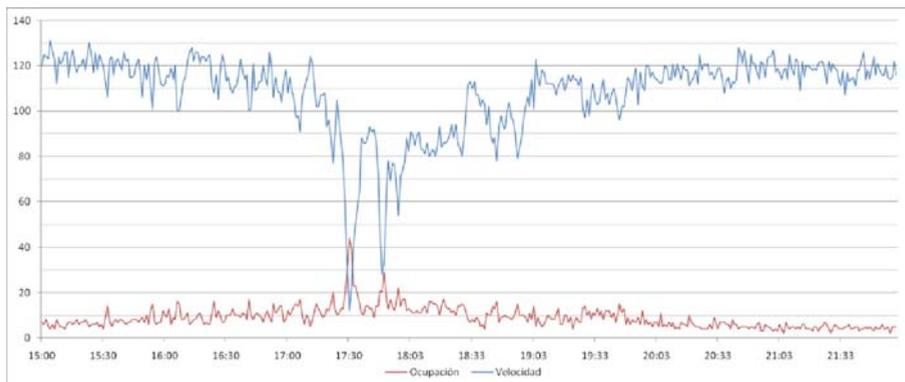
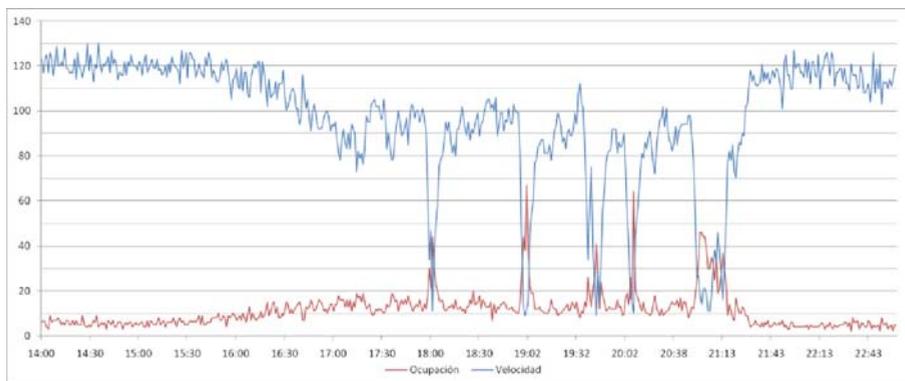
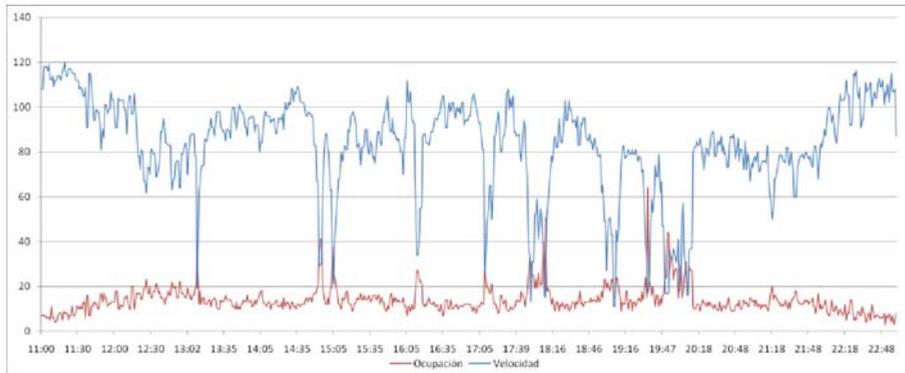


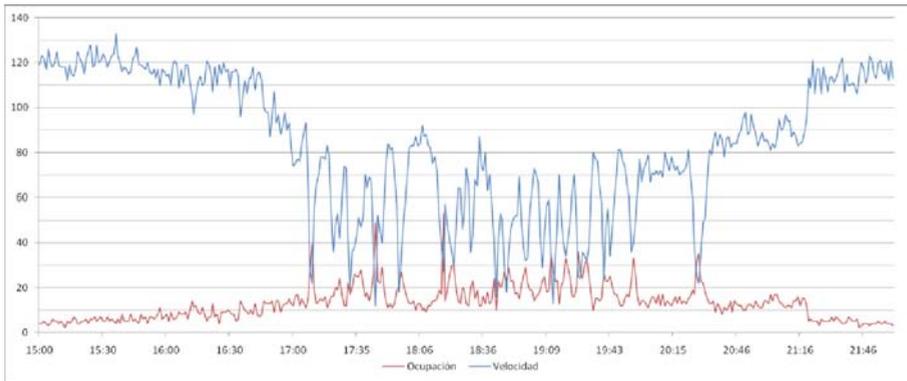
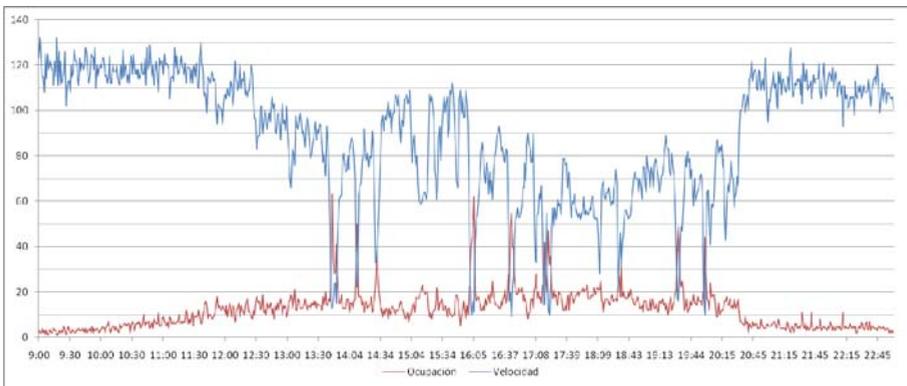
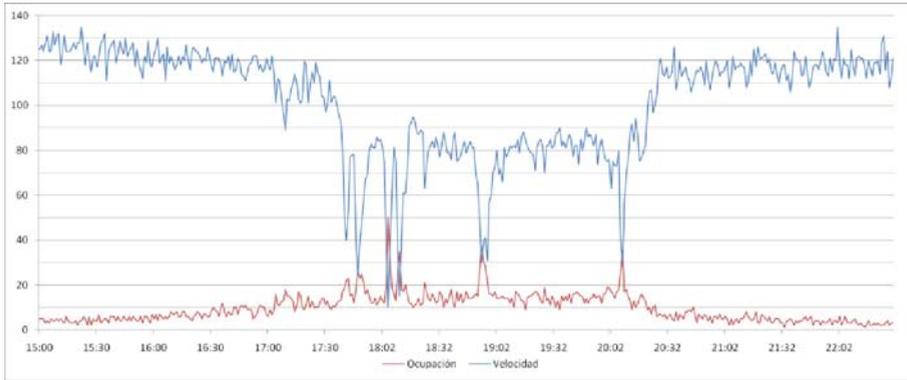
Anexo



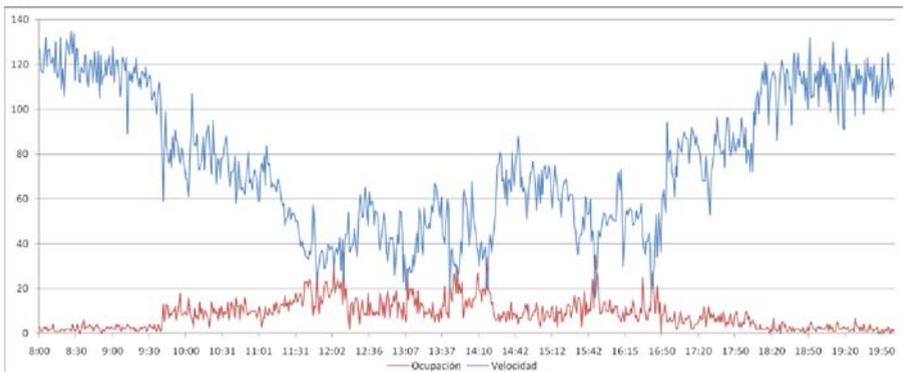
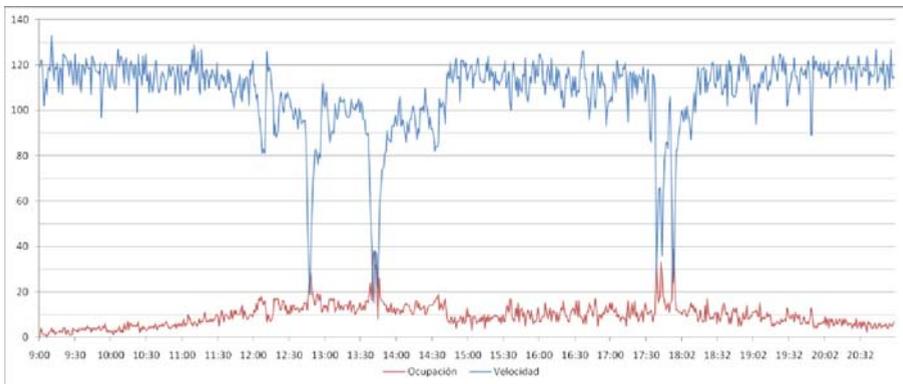
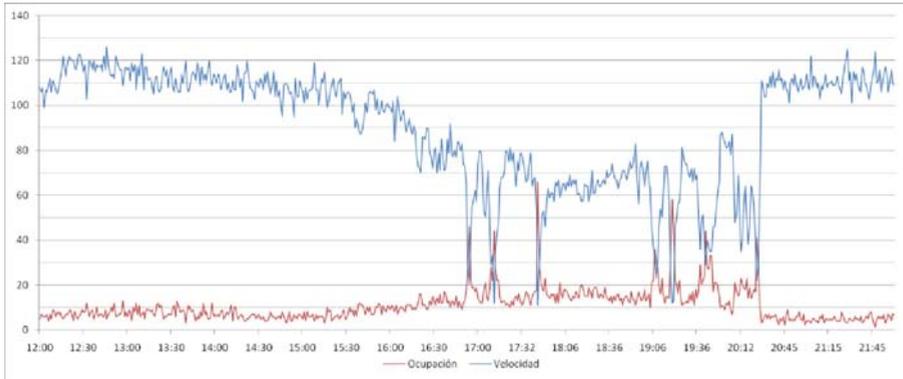


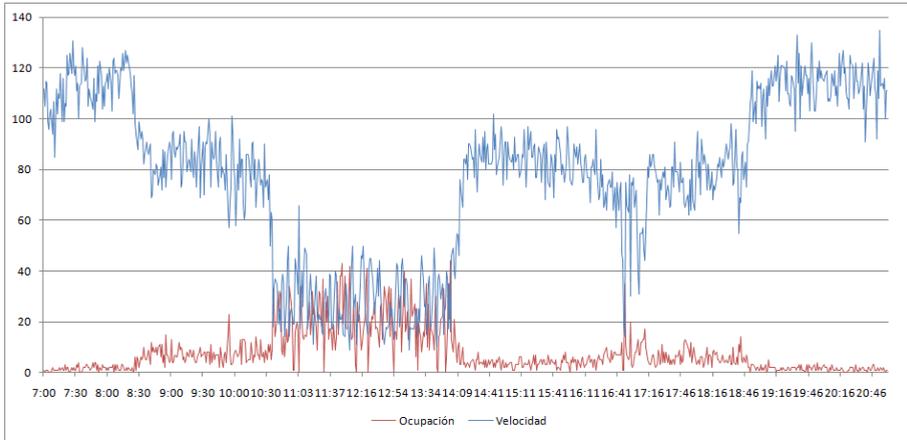
Anexo





Anexo





ANEXO 3. Análisis de conglomerados.

El análisis de conglomerados (en inglés, cluster analysis) es una técnica multivariante que permite agrupar los casos o variables de un archivo de datos en función del parecido o similitud existente entre ellos. Como técnica de agrupación de variables, el análisis de conglomerados es similar al análisis factorial; pero, mientras que la factorización es más bien poco flexible en algunos de sus supuestos (linealidad, normalidad, variables cuantitativas, etc.) y siempre estima de la misma manera la matriz de distancias, la aglomeración es menos restrictiva en sus supuestos (no exige linealidad, ni simetría, permite variables categóricas, etc.) y admite varios métodos de estimación de la matriz de distancias.

Como técnica de agrupación de casos, el análisis de conglomerados es similar al análisis discriminante. Sin embargo, mientras que el análisis discriminante efectúa la clasificación tomando como referencia un criterio o variable dependiente (los grupos de clasificación), el análisis de conglomerados permite detectar el número óptimo de grupos y su composición únicamente a partir de la similitud existente entre los casos; además, el análisis de conglomerados no asume ninguna distribución específica para las variables.

Dentro de los análisis de conglomerados se observan dos tipos de análisis: el análisis de conglomerados jerárquico y el análisis de conglomerados de K-medias. El método jerárquico es idóneo para determinar el número óptimo de conglomerados existente en los datos y el contenido de los mismos. El método de K-medias permite procesar un número ilimitado de casos, pero sólo permite utilizar un método de aglomeración y requiere que se proponga previamente el número de conglomerados que se desea obtener.

Ambos métodos de análisis son de tipo *aglomerativo*, en el sentido de que, partiendo del análisis de los casos individuales, intentan ir agrupando casos hasta llegar a la formación de grupos o conglomerados homogéneos. Pero existen también métodos divisivos que parten de la muestra global como un sólo grupo y la van dividiendo en subgrupos hasta llegar a la formación de grupos o conglomerados homogéneos con un número relativamente reducido de sujetos.

1.1. Análisis de conglomerados de K-medias

El análisis de conglomerados de K-medias es un método de agrupación de casos que se basa en las distancias existentes entre ellos en un conjunto de variables (este método de aglomeración no permite agrupar variables). Anteriormente el procedimiento comenzaba el análisis con la asignación de los K primeros casos a los centros de los K conglomerados (los centros multivariantes de los conglomerados se denominan centroides). Actualmente se comienza seleccionando los K casos más distantes entre sí, determinando inicialmente el número K de conglomerados que desea obtener, y a continuación se inicia la lectura secuencial del archivo de datos asignando cada caso al centro más próximo y actualizando el valor de los centros a medida que se van incorporando nuevos casos. Una vez que todos los casos han sido asignados a uno de los K conglomerados, se inicia un proceso iterativo para calcular los centroides finales de esos K conglomerados.

Este algoritmo obtiene una partición directa de un conjunto de valores por variables cuantitativas, tal y como se ha comentado requiere el número de clases por obtener. La propuesta de Lebart es utilizarlo para obtener una partición que minimice la inercia intraclases. Esto se logra localmente usando la distancia euclidiana canónica entre los individuos y los centros móviles utilizados para la agregación. En cada paso del algoritmo se actualizan los centros móviles calculando los centros de gravedad de la partición obtenida del paso anterior. Para una clase k , conformada por el conjunto de individuos I_k con pesos p_i y coordenadas sobre el eje s notadas $F_s(i)$, el término general de la coordenada de su centro de gravedad sobre un eje factorial s es:

$$g_s(k) = \sum_{i \in I_k} p_i F_s(i)$$

y su inercia intra en el subespacio de los S primeros ejes factoriales es:

$$InerciaIntra(k) = \sum_{i \in I_k} p_i \sum_{s=1}^S (F_s(i) - g_s(k))^2$$

El análisis de conglomerados de K medias es especialmente útil cuando se dispone de un gran número de casos. Existe la posibilidad de utilizar la técnica de manera exploratoria, clasificando los casos e iterando para encontrar la ubicación de los centroides, o sólo como técnica de clasificación, clasificando los casos a partir de centroides conocidos suministrados. Cuando se utiliza como técnica exploratoria, es

habitual que el usuario desconozca el número idóneo de conglomerados, por lo que es conveniente repetir el análisis con distinto número de conglomerados y comparar las soluciones obtenidas; en estos casos también puede utilizarse el método análisis de conglomerados jerárquico con una submuestra de casos.

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	,00	69,00	14,00	2,00
Velocidad	166,00	14,00	45,00	105,00

Tabla 37: Centros iniciales de los conglomerados.

Una vez introducidos los datos, se calculan los centros iniciales, es decir, los valores que corresponden, en las variables de clasificación utilizadas, a los casos que han sido elegidos como centros respectivos de los conglomerados solicitados. Una vez seleccionados los centros de los conglomerados, cada caso es asignado al conglomerado de cuyo centro se encuentra más próximo y comienza un proceso de ubicación iterativa de los centros.

En la primera iteración se reasignan los casos por su distancia al nuevo centro y, tras la reasignación, se vuelve a actualizar el valor del centro. En la siguiente iteración se vuelven a reasignar los casos y a actualizar el valor del centro, etc. La tabla 38 resume el historial de iteraciones (trece en este caso) con indicación del cambio (desplazamiento) experimentado por cada centro en cada iteración. Puede observarse que, conforme avanzan las iteraciones, el desplazamiento de los centros se va haciendo más y más pequeño, hasta llegar a la decimotercera iteración, en la que ya no existe desplazamiento alguno.

Iteración	Cambio en los centros de los conglomerados			
	1	2	3	4
1	24,835	23,244	9,111	10,956
2	7,078	5,487	7,305	,414
3	4,518	4,334	4,737	,898
4	3,085	2,927	2,883	1,577
5	1,840	1,657	1,539	1,684
6	1,220	,833	,622	1,569
7	,807	,000	,315	1,368
8	,713	,000	,349	1,475
9	,327	,000	,318	,798
10	,297	,000	,000	,671
11	,206	,000	,000	,537
12	,000	,000	,306	,060
13	,000	,000	,000	,000

Tabla 38: Historial de iteraciones.

El proceso de iteración se detiene, por defecto, cuando de una iteración a otra no se produce ningún cambio en la ubicación de los centroides (cambio = 0). En nuestro ejemplo, el proceso ha finalizado antes de alcanzar trece iteraciones porque en la decimotercera ya no se produce ningún cambio.

	Conglomerado			
	1	2	3	4
Ocupación	3,58	45,87	30,58	13,83
Velocidad	123,90	21,87	60,04	107,20

Tabla 39: Centro de los conglomerados finales.

La tabla 39 ofrece los centros de los conglomerados finales, es decir, los centros de los conglomerados tras el proceso de actualización iterativa. Comparando los centros finales (tras la iteración) de esta tabla, con los centros iniciales (antes de la iteración) de la tabla 37 se puede apreciar con claridad un desplazamiento de los centros de los conglomerados.

Esta tabla es de gran utilidad para interpretar la constitución de los conglomerados, pues resume los valores centrales de cada conglomerado en las variables de interés. Por último, la tabla 40 informa sobre el número de casos asignado a cada conglomerado. En este caso, los tamaños de los conglomerados no son demasiado

diferentes, pero dadas las características de la técnica es muy frecuente encontrarse con que alguno de los conglomerados finales contenga tan sólo un número muy reducido de casos atípicos.

Conglomerado	1	887,000
	2	53,000
	3	73,000
	4	366,000
Válidos		1379,000
Perdidos		2,000

Tabla 40: Distribución de casos por conglomerado.

Los conglomerados obtenidos parecen captar de manera bastante adecuada la fisonomía de los datos: se distingue con claridad un conglomerado inferior (poca ocupación y mucha velocidad), un conglomerado superior (mucha ocupación y poca velocidad) y entre ellos dos conglomerados con valores intermedios de velocidad y ocupación. Sin embargo, no necesariamente siempre que se utiliza el análisis de conglomerados se debe esperar resultados tan claros (grupos tan claramente definidos). En la frontera entre ambos conglomerados pueden encontrarse casos que aparenten estar más cerca del conglomerado al que no han sido asignados. Para entender lo que está sucediendo es muy importante saber cómo se están midiendo las distancias entre los casos.

Tampoco se debe olvidar el hecho que los valores obtenidos son los centroides, para determinar los límites se deben calcular los puntos medios entre cada uno de los centroides, así pues, de todos los valores resultantes se obtiene la tabla final, tabla 41, que determina los márgenes mediante los que determina a partir de qué valor se asigna uno u otro conglomerado.

	Umrales			
	1	2	3	4
Ocupación	38,23	38,23-22,20	22,20-8,71	8,71-0,00
Velocidad	0,00-40,95	40,95-83,63	83,63-115,60	115,60

Tabla 41: Umrales finales obtenidos, ordenados de menor a mayor velocidad.

De esta manera se determina que aquellos valores de velocidad entre 0 y 40,95 y ocupación superior a 38,23 están agrupados en el primer conglomerado. Los valores de velocidad entre 40,95 y 83,63 cuya ocupación esté entre 38,23 y 22,20 se corresponden con el conglomerado 2. Los valores de velocidad entre 83,63 y 115,60

cuya ocupación se encuentre entre 22,20 y 8,71 se agrupan en el conglomerado 3. Por último, aquellos valores de velocidad superiores a 115,60, cuya ocupación esté entre 0 y 8,71 pertenecen al conglomerado 4.

1.2. Medida de la distancia

El procedimiento Análisis de conglomerados de K-medias siempre utiliza, para medir la distancia entre los casos, la distancia euclídea: la longitud de la recta que une ambos casos. La distancia euclídea se calcula de la siguiente manera:

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_j (X_{ij} - X_{i'j})^2}$$

donde X se refiere a las puntuaciones obtenidas por el caso i y el caso i' ($i \neq i'$) en cada una de las $j = 1, 2, \dots, p$ variables incluidas en el análisis (el sumatorio de la expresión incluirá p términos, es decir, tantos como variables).

Esta distancia es conceptualmente fácil de entender y sirve tanto para variables cuantitativas continuas como para variables ordinales. Pero, como contrapartida, es muy sensible a la métrica de las variables.

Para eliminar del cálculo de las distancias el efecto debido a las diferencias en la métrica de las variables, se acostumbra a transformar las variables antes del análisis de manera que todas ellas tengan variabilidades similares. Entre las transformaciones disponibles, una bastante utilizada que permite igualar tanto la métrica como la variabilidad de las variables es la tipificación, es decir, la transformación en puntuaciones z con media 0 y varianza 1.

ANEXO 4. Normativa CTN135 y CTN199

Proyecto	Título	Fase	Fecha	Equivalencias	Anula/Mod. a
PNE 135411-6	Equipamiento para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 6: Métodos de prueba.	2400 - Visado TC por SCT	2006-02-20		Anula: UNE 135411-6:2003. Anula: UNE 135411-5:1:2006. Anula: UNE 135411-6:2:2006
PNE 135450-1	Equipamiento para la señalización vial. Protocolo de comunicaciones. Matrices de vídeo y telemandos.		2005-06-15	4200 - Recepción del proyecto para eción	
PNE 135460-1-4	Equipamiento para la señalización vial. Centros de gestión. Parte 1-4: Gestión de servicios de estaciones remotas. Servicio de control de entradas/salidas. Servicio de gestión de programas.	4200 - Recepción del proyecto para eción	2006-09-13		
PNE 135460-1-5	Equipamiento para la señalización vial. Centros de gestión. Parte 1-5: Gestión de servicios de estaciones remotas. Señalización automática de paneles, cambio automático de luminosidad de paneles y llamadas al centro de gestión.	4200 - Recepción del proyecto para eción	2006-09-13		
PNE 135460-3-2	Equipamiento para la señalización vial. Centros de gestión. Parte 3-2: Ingeniería de tráfico. Variación en la señalización automática de paneles por variables que reflejen el estado de las carreteras.	4200 - Recepción del proyecto para eción	2006-09-13		
PNE 135460-5-2	Equipamiento para la señalización vial. Centros de gestión. Parte 5-2: Sincronización horaria global.	4200 - Recepción del proyecto para eción	2006-09-13		
PNE 199021-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Reguladores de tráfico. Parte 1: Características funcionales	3650 - Fin IP	2011-03-07		Anula: UNE 135401-1:1999 EX
PNE 199021-2	Equipamiento para la gestión del tráfico. Reguladores de tráfico. Parte 2: Métodos de prueba	3650 - Fin IP	2011-03-07		Anula: UNE 135401-2:1999 EX
PNE 199021-3	Equipamiento para la gestión del tráfico. Reguladores de tráfico. Parte 3: Características eléctricas	3650 - Fin IP	2011-03-07		Anula: UNE 135401-3:2003
PNE 199021-4	Equipamiento para la gestión del tráfico. Reguladores de tráfico. Parte 4: Protocolo de comunicaciones. Tipo M	2400 - Visado TC por SCT	2010-10-20		Anula: UNE 135401-4:2003 IN
PNE 199021-7	Equipamiento para la gestión del tráfico. Reguladores de tráfico. Parte 7: Protocolo de comunicaciones tipo M. Métodos de prueba	2400 - Visado TC por SCT	2010-10-20		
PNE 199031-2	Equipamiento para la gestión del tráfico. Estaciones de toma de datos. Métodos de prueba y ensayo. Parte 2: Compatibilidad electromagnética	3650 - Fin IP	2011-01-16		
PNE 199031-4	Equipamiento para la gestión del tráfico. Estaciones de toma de datos. Métodos de prueba y ensayo. Parte 4: Métodos de prueba	3650 - Fin IP	2011-01-16		
PNE 199031-4-2	Equipamiento para la gestión del tráfico. Estaciones de toma de datos. Métodos de prueba y ensayo. Parte 4-2: Métodos de pruebas. Matriz de datos VxL	2400 - Visado TC por SCT	2010-10-20		
PNE 199032-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Estaciones de toma de datos. Funcionalidad y protocolos aplicativos. Parte 1: Norma funcional. Matriz de datos VxL	2400 - Visado TC por SCT	2010-10-20		
PNE 199051-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Paneles de mensaje variable. Parte 1: Equipamiento y especificaciones funcionales.	2400 - Visado TC por SCT	2009-10-20		
PNE 199051-2	Equipamiento para la gestión del tráfico. Paneles de mensaje variable. Parte 2: Protocolo de comunicaciones	2400 - Visado TC por SCT	2010-11-20		
PNE 199072-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Estaciones Medio Ambientales en Carreteras. Parte 1: Características funcionales.	3950 - Fin IP	2010-01-24		
PNE 199072-2	Equipamiento para la gestión del tráfico. Estaciones Medio Ambientales en Carreteras. Parte 2: Protocolo aplicativo	3950 - Fin IP	2010-01-24		
PNE 199072-3	Equipamiento para la gestión del tráfico. Estaciones Medio Ambientales en Carreteras. Parte 3: Equipamiento	3950 - Fin IP	2010-01-24		
PNE 199091-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Equipos de vídeo. Codificación de vídeo IP MPEG-2. Parte 1: Especificación funcional y protocolo de comunicaciones para codificadores en NCA y descodificadores en centros de control	3950 - Fin IP	2010-11-10		
PNE 199092-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Equipos de vídeo. Gestor de vídeo. Parte 1: Especificación funcional	3950 - Fin IP	2010-11-10		
PNE 199121-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Cinemómetros en instalación fija. Parte 1: Cabina lateral universal en cinemómetros fijas	2400 - Visado TC por SCT	2009-11-20		
PNE 199121-2	Equipamiento para la gestión del tráfico. Cinemómetros en instalación fija. Parte 2: Cabinas laterales universales sobre mástil para instalaciones fijas	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199121-3	Equipamiento para la gestión del tráfico. Cinemómetros en instalación fija. Parte 3: Cabinas sobre pórtico universales para instalaciones fijas	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199122-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Cinemómetros. Vídeo vigilancia y medidas antivandalicas. Parte 1: Vídeo vigilancia y medidas antivandalicas	2400 - Visado TC por SCT	2009-11-20		
PNE 199123-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Cinemómetros. Cabinas para flash exterior. Parte 1: Instalación en borde de calzada	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199123-2	Equipamiento para la gestión del tráfico. Cinemómetros. Cabinas para flash exterior. Parte 2: Instalación sobre mástil	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199124-4	Equipamiento para la gestión del tráfico. Cinemómetros de velocidad media en tramo. Parte 4: Especificación funcional y protocolos aplicativos	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199141-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Visión artificial. Lectores de matrículas. Parte 1: Especificaciones funcionales	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199141-2	Equipamiento para la gestión del tráfico. Visión artificial. Lectores de matrículas. Parte 2: Protocolos aplicativos	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199141-3	Equipamiento para la gestión del tráfico. Visión artificial. Lectores de matrículas. Parte 3: Equipamiento	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199141-4	Equipamiento para la gestión del tráfico. Visión artificial. Lectores de matrículas. Parte 4: Conservación y mantenimiento	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199142-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Visión artificial. Detección de vehículos infractores. Parte 1: Especificación funcional y protocolos aplicativos para semáforo rojo	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199143-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Visión artificial. Equipamiento para la detección de vehículos infractores. Parte 1: Sistemas de semáforo rojo	2300 - Tramitación TC por Técnico	2011-02-18		
PNE 199152-1	Equipamiento para la gestión del tráfico. Calidad de datos. Análisis de datos. Parte 1: Datos de tráfico	3950 - Fin IP	2010-11-10		
PNE-FprEN 50556	Sistemas de señalización del tráfico viano	1700 - Fin IPP	2010-05-03	FprEN 50556 (DGT)	Anula: UNE-HD 638:2001. Anula: UNE-HD 638:2001(A1):2007. Anula: UNE-HD 638:2001 ERRATUM:2009

Anexo

Norma	Título	Fecha	Anula a	Proyecto que la anula
UNE 135401-1:1999 EX	Equipo para la señalización vial. Reguladores de tráfico. Parte 1: Características funcionales.	1999-03-31		PNE 199021-1
UNE 135401-2:1999 EX	Equipo para la señalización vial. Reguladores de tráfico. Parte 2: Métodos de prueba.	1999-03-31		PNE 199021-2
UNE 135401-3:2003	Equipo para la señalización vial. Reguladores de tráfico. Parte 3: Características eléctricas.	2003-02-21		PNE 199021-3
UNE 135401-4:2003 IN	Equipo para la señalización vial. Reguladores de tráfico. Parte 4: Protocolo de comunicaciones. Tipo M.	2003-02-21		PNE 199021-4
UNE 135401-5:2003 IN	Equipo para la señalización vial. Reguladores de tráfico. Parte 5: Protocolo de comunicaciones. Tipo V.	2003-02-21		
UNE 135401-6:2003	Equipo para la señalización vial. Reguladores de tráfico. Parte 6: Compatibilidad electromagnética.	2003-02-21		
UNE 135411-1:2003	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 1: Características eléctricas.	2003-02-21		
UNE 135411-2:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 2: Compatibilidad electromagnética.	2004-02-20		
UNE 135411-3:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 3: Características funcionales.	2004-02-27		
UNE 135411-3-1:2005	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 3-1: Características funcionales. Servicio de vídeo.	2006-01-04		
UNE 135411-3-2:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 3-2: Características funcionales. Estaciones remotas de túnel.	2004-04-23		
UNE 135411-3-3:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 3-3: Características funcionales. Ampliación.	2004-07-09		
UNE 135411-4:2002	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 4: Armario de estaciones remotas.	2002-10-28		
UNE 135411-5:2003	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 5: Protocolo de servicios.	2003-02-21		
UNE 135411-5-1:2006	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 5-1: Protocolo de servicios. Servicio de vídeo.	2006-03-29		
UNE 135411-5-2:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 5-2: Protocolo de servicios. Servicio de control de entradas/salidas. Servicio de gestión de programas.	2004-07-09		
UNE 135411-5-3:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 5-3: Protocolo de servicios. Ampliación.	2004-07-09		
UNE 135411-6:2003	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 6: Métodos de prueba.	2003-02-21		PNE 135411-6
UNE 135411-6-1:2006	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 6-1: Métodos de prueba. Servicio de vídeo.	2006-01-25		PNE 135411-6
UNE 135411-6-2:2006	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 6-2: Métodos de prueba. Servicio de control de entradas/salidas. Servicio de control de gestión de programas.	2006-01-25		PNE 135411-6
UNE 135411-6-3:2005	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 6-3: Métodos de prueba. Nuevas funcionalidades.	2006-03-29		
UNE 135411-7:2006	Equipo para la señalización vial. Estaciones remotas. Parte 7: Terminal de mantenimiento para la estación remota ERL.	2006-04-26		
UNE 135421-1:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones de toma de datos. Parte 1: Requisitos eléctricos y de seguridad.	2004-02-27		
UNE 135421-3:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones de toma de datos. Parte 3: Requisitos funcionales y protocolos aplicativos.	2004-07-09		
UNE 135421-3-1:2004	Equipo para la señalización vial. Estaciones de toma de datos. Parte 3-1: Requisitos funcionales y protocolos aplicativos. Suministro de datos instantáneos.	2004-07-09		
UNE 135421-4-1:2007	Equipo para la señalización vial. Estaciones de toma de datos. Parte 4-1: Métodos de prueba y ensayo. Datos instantáneos.	2007-02-07		
UNE 135431:2006 IN	Equipo para la señalización vial. Redes de transporte para los sistemas de gestión de accesos.	2006-02-22		
UNE 135441-1:2005	Equipo para la señalización vial para carreteras. Sensores de variables atmosféricas en carreteras. Parte 1: Características funcionales.	2005-02-02		
UNE 135441-2:2005	Equipo para la señalización vial para carreteras. Sensores de variables atmosféricas en carreteras. Parte 2: Protocolo aplicativo.	2005-02-02		
UNE 135441-3:2005	Equipo para la señalización vial para carreteras. Sensores de variables atmosféricas en carreteras. Parte 3: Equipamiento.	2005-02-02		
UNE 135441-4:2005	Equipo para la señalización vial para carreteras. Sensores de variables atmosféricas en carreteras. Parte 4: Métodos de prueba.	2005-02-02		
UNE 135441-5:2006	Equipo para la señalización vial para carreteras. Sensores de variables atmosféricas en carreteras. Parte 5: Conservación y mantenimiento.	2006-01-25		
UNE 135460-1-1:2006	Equipo para la señalización vial. Centros de gestión de tráfico. Parte 1-1: Gestión de servicios de estaciones remotas. Servicios de comunicaciones y de configuración.	2006-07-19		
UNE 135460-1-2:2006	Equipo para la señalización vial. Centros de gestión de tráfico. Parte 1-2: Gestión de servicios de estaciones remotas. Servicio de tiempo real. Servicio de datos históricos.	2006-07-19		
UNE 135460-3-1:2006	Equipo para la señalización vial. Centros de gestión de tráfico. Parte 3-1: Funcionalidades de gestión y control del tráfico. Mecanismo para señalización multicentro.	2006-07-19		
UNE 135480-1:2006 IN	Equipo para la señalización vial. Mantenimiento. Parte 1: Recomendaciones para el inventario de equipos.	2006-11-08		
UNE 135480-2:2007 IN	Equipo para la señalización vial. Mantenimiento. Parte 2: Recomendaciones de mantenimiento preventivo.	2007-06-13		
UNE 135480-3:2006 IN	Equipo para la señalización vial. Mantenimiento. Parte 3: Codificación de averías.	2006-11-08		
UNE 135480-4:2006 IN	Equipo para la señalización vial. Mantenimiento. Parte 4: Recomendaciones sobre especificaciones del sistema de información geográfica para inventario de equipos de gestión de tráfico.	2006-11-08		
UNE 135490-1:2006 IN	Equipo para la señalización vial. Intercambio de información entre centros de control zonales y el centro de centros. Parte 1: Requisitos generales.	2006-06-28		
UNE 135490-1-1:2006 IN	Equipo para la señalización vial. Intercambio de información entre centros de control zonales y el centro de centros. Parte 1-1: Tratamiento de datos de tráfico en centros zonales.	2006-06-28		
UNE 135701-1:2004 EX	Equipo para la señalización vial. Sistemas de ayuda y transmisión de datos mediante postes S.O.S. Parte 1: Requisitos generales.	2004-07-09		
UNE 135701-2:2006	Equipo para la señalización vial. Sistemas de ayuda y transmisión de datos mediante postes S.O.S. Parte 2: Elementos, funciones y características técnicas del poste.	2006-09-20		

UNE 135701-4:2007	Equipamiento para la señalización vial. Sistemas de ayuda y transmisión de datos mediante postes S.O.S. Parte 4. Transmisión por fibra óptica. Especificación funcional y características técnicas.	2007-06-27	
UNE 199121-4:2010	Equipamiento para la gestión del tráfico. Cinemómetros. Cinemómetros en instalación fija. Parte 4. Especificación funcional y de protocolos.	2010-12-01	
UNE 199142-2:2010	Equipamiento para la gestión del tráfico. Visión artificial. Detección de vehículos infractores. Parte 2. Especificación funcional y protocolos aplicativos para telepeaje.	2010-12-01	
UNE-CLC/TS 50509:2009 EX	Uso de cabezas de semáforo de LEDs en sistemas semaforicos de la red viaria.	2009-04-29	
UNE-EN 12352:2007	Equipamiento de regulación del tráfico. Dispositivos luminosos de advertencia de peligro y balizamiento.	2007-03-28	UNE-EN 12352:2000
UNE-EN 12368:2008	Equipos de control de tráfico. Cabezas de semáforo.	2008-02-06	UNE-EN 12368:2000 EN 12368:2006
UNE-EN 12414:2000	Equipos de control del estacionamiento de vehículos. Parquímetros. Requisitos técnicos y funcionales.	2000-04-26	
UNE-EN 12675:2001	Semáforos. Requisitos funcionales de seguridad.	2001-07-13	
UNE-EN 12966-1:2006+A1:2010	Señales verticales de circulación. Señales de tráfico de mensaje variable. Parte 1. Norma de producto.	2010-05-05	UNE-EN 12966-1:2006
UNE-EN 12966-2:2006	Señales verticales de circulación. Señales de tráfico de mensaje variable. Parte 2. Ensayos de tipo inicial.	2006-02-15	PNE-prEN ISO 12966-2
UNE-EN 12966-3:2006	Señales verticales de circulación. Señales de tráfico de mensaje variable. Parte 3. Control de producción en fábrica.	2006-02-15	
UNE-EN 50293:2001	Compatibilidad electromagnética. Sistemas de señalización del tráfico por carretera. Norma de producto.	2001-06-28	
UNE-HD 636:2001	Sistemas de señalización del tráfico viario.	2001-09-21	PNE-FprEN 50556
UNE-HD 636:2001 ERRATUM:2009	Sistemas de señalización del tráfico viario.	2009-07-08	PNE-FprEN 50556
UNE-HD 638:2001/A1:2007	Sistemas de señalización del tráfico viario.	2007-10-31	PNE-FprEN 50556

ANEXO 5. Datos tratados, aplicación de reducción y comandos

Se adjunta el Anexo 5 en un CD.