

## NOTA EXPLICATIVA

La presente Tesis doctoral está en proceso de protección industrial y por lo tanto el proceso de depósito, evaluación y defensa se ha llevado a cabo según el artículo 10 del reglamento sobre el depósito, evaluación y defensa de tesis doctoral de la Universitat de València.

En este proceso la tesis debe ser cifrada con el objetivo de eliminar aquellos aspectos que están sometidos al proceso de protección industrial. Este cifrado se ha realizado de dos formas, utilizando XXX cuando el texto a cifrar era pequeño y eliminando el texto cuando la eliminación correspondía con una dimensión mayor a una línea.

A continuación se puede consultar la tesis doctoral en su versión cifrada.

En Valencia a 21 de diciembre de 2015

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above the name of the author.

Javier Martínez Plumé



VNIVERSITAT E VALÈNCIA

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA**

Programa: Informática y Matemática Computacional (240E)

**APLICACIÓN DE SISTEMAS XXXXXXXXXXXX PARA LA  
OBTENCIÓN DE MATRICES ORIGEN-DESTINO  
DINÁMICAS MEDIANTE EL EMPLEO DE SENSORES  
BLUETOOTH ADAPTADA AL EQUIPAMIENTO  
VIARIO EXISTENTE.**

**TESIS DOCTORAL**

Presentada por:

**Javier Martínez Plumé**

Dirigida por:

**Dr. Juan José Martínez Durá**

**Septiembre 2015**





**D. Juan José Martínez Durá**, Profesor Titular del Área de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial del Departamento de Informática de la Universitat de València,

CERTIFICA QUE:

La presente Tesis Doctoral original de D. Javier Martínez Plumé titulada "APLICACIÓN DE SISTEMAS XXXXXXXXXXXX PARA LA OBTENCIÓN DE MATRICES ORIGEN-DESTINO DINÁMICAS MEDIANTE EL EMPLEO DE SENSORES BLUETOOTH ADAPTADA AL EQUIPAMIENTO VIARIO EXISTENTE.", ha sido realizada bajo mi dirección y supervisión y, a mi juicio, reúne los requisitos para su lectura y obtención del grado de Doctor en Ingeniería Informática.

Y para que así conste a los efectos oportunos, firmamos el presente certificado en Valencia, a 23 de septiembre de 2015.

Prof. Dr. Juan José Martínez Durá



**A Toni, Javier, Guillermo, Esther y Pilar**



## Agradecimientos

En primer lugar tengo que agradecer a mi familia por la paciencia que han tenido durante este tiempo. Gracias Toni por haber hecho de madre y padre muchos días. Javier, Guillermo y Esther estoy orgulloso de vosotros, espero que vosotros también lo podáis estar de mí. A mi madre y hermanos porque siempre habéis estado apoyándome.

Tengo que agradecer de forma muy especial a mi director, compañero y amigo Juanjo, has sido siempre un ejemplo para mí de trabajo y esfuerzo, das cohesión a nuestro grupo, el LISITT. Has sido mi guía en este arduo trabajo que significa una tesis, juntos le hemos dado forma y tus consejos y correcciones le han dado mayor calidad al trabajo.

Quisiera agradecer la gran ayuda que he recibido de mis compañeros en el LISITT en especial a Federico, Rafa, Toni y Vicente, sois un equipo impresionante. Lorena y Jorge gracias por ayudarme con el modelo de simulación, ha sido una herramienta imprescindible para conseguir los objetivos que habíamos definido para esta tesis. Arturo y María gracias por haberos encargado de nuestro proyecto y por vuestra ayuda con la corrección del texto. También quiero agradecer a mis compañeros y amigos, Paco, Quique, Amparo, Cristina, Patricia y Juanjo, la hora del almuerzo siempre ha sido un bálsamo, ese rato en el que he podido aparcar un momento el trabajo y disfrutar de vuestra compañía. Ramón, juntos hemos podido, espero que pronto lo podamos celebrar. No puedo dejarme a Sento, Ana, Ximo, Silvia, David y Joan, tuve la suerte de que acabaseis trabajando en el despacho de al lado, gracias por vuestro apoyo y por aguantarme algunas tardes, a los “desertores”, os echamos de menos.

Jose María Aguirre, Carlos Estefanía, Javier Cobeaga de la Diputación Foral de Bizkaia gracias por ser mis maestros, mis amigos, mi formación en ingeniería os la debo a vosotros. Gracias por vuestro apoyo, siempre habéis puesto a mi disposición todo lo que he necesitado de la red de carreteras de Bizkaia para la realización de esta tesis. También quiero agradecer a Jon Delgado por su ayuda con los datos de aforos de Bizkaia.

También quiero agradecer a Salvador Llorenç y a Angel Rebolleda de la Direcció General d'Obres Públiques, Transports i Mobilitat de la Conselleria d'Habitatge, Obres Públiques i Vertebració del Territori de la Generalitat Valenciana y a Ruth Montesinos y a Ginés del Servei de Circulació, Transports i Infraestructures del Ajuntament de València porque siempre que os hemos propuesto probar el sistema habéis puesto vuestras instalaciones a nuestra disposición.

## Resumen

Una constante en la sensorización del tráfico ha sido la búsqueda de sensores no invasivos que ofrezcan datos fiables y de valor para la planificación y gestión del tráfico. El avance de las nuevas tecnologías inalámbricas, y principalmente el índice de penetración de los *Smartphone* y *tablets*, ha permitido plantear la posibilidad de usar los dispositivos móviles que lleva el usuario de los medios de transporte como elementos de sensorización del tráfico.

La introducción en los vehículos de la tecnología Bluetooth (BT), como protocolo de comunicaciones entre los elementos multimedia que tiene instalados y los dispositivos móviles que llevan los usuarios del vehículo, ha abierto una nueva línea de investigación con el objetivo de usar los dispositivos BT embarcados en un vehículo como fuente de información para la monitorización del tráfico y la movilidad.

Actualmente esta tecnología está siendo utilizada para la obtención del tiempo de viaje con muy buenos resultados. Sin embargo, su uso para la obtención de matrices O/D dinámicas ha planteado dudas a varios investigadores, ya que los sensores BT solo capturan una muestra de la población total y esa muestra no se mantiene constante en el tiempo.

El objetivo de esta tesis ha sido definir un procedimiento de validación de la tecnología BT, como fuente de información para realizar el cálculo de la matriz O/D dinámica, y diseñar e implementar un sistema de cálculo de la matriz O/D mediante la aplicación de sistemas XXXXXXXXXXXX que permita integrar esta tecnología en los sistemas ITS actuales.

La investigación desarrollada en la presente tesis se ha planteado en 4 fases. La primera fase ha consistido en el estudio de la viabilidad del uso de los sensores BT para calcular la matriz O/D. Este estudio se ha realizado mediante un modelo de simulación de la red metropolitana de Bilbao. El modelo ha sido creado con 41 entradas y 42 salidas, lo que nos ha permitido crear una red de 83 sensores BT virtuales con una gran variabilidad de valores de entrada y salida. Sobre este entorno de simulación se ha podido evaluar cómo influye el porcentaje de detección

del sensor en la precisión en de la matriz O/D calculada, modificando el porcentaje de detección de los sensores desde un 5% hasta un 100% con incrementos de 5 puntos, en comparación con la matriz O/D real obtenida con el 100 % de los vehículos. Los resultados han permitido fijar el umbral mínimo de vehículos en una entrada a la red por un punto sensorizado de 1.000 vehículos para obtener un error absoluto inferior a 10 puntos con un porcentaje de detección mínimo del 20%.

La segunda fase de esta tesis ha consistido en aplicar una arquitectura de procesamiento distribuida mediante el modelado e implementación de un sistema MultiXXXXXX capaz de obtener la matriz O/D dinámica. El despliegue del sistema MultiXXXXXX se ha realizado teniendo en cuenta el sistema ITS actual. Los resultados han demostrado que el sistema MultiXXXXXX propuesto permite reproducir la matriz O/D real con los datos que proporcionan los sensores BT definidos en SUMO.

La tercera fase ha consistido en definir el conjunto de datos que debe ofrecer el sensor BT, se ha creado un procedimiento de filtrado de los datos de los sensores BT en el que se ha incluido un algoritmo que ha permitido filtrar los dispositivos que van embarcados en un mismo vehículo. Una vez definido el conjunto de tránsitos entre los sensores se han evaluado los algoritmos existentes en la bibliografía, principalmente enfocados al cálculo del tiempo de viaje. Los resultados obtenidos al aplicarlos al cálculo de la matriz O/D sobre una instalación real de sensores BT han demostrado que presentan claras deficiencias.

Esto ha motivado la definición de dos algoritmos específicos para el cálculo de la matriz O/D dinámica. Estos dos algoritmos, que hemos denominado  $\alpha$  y  $\beta$ , se han comparado con el algoritmo que mejor se ha comportado, de los presentes en la bibliografía, y se ha podido demostrar que los resultados de ambos algoritmos eran similares y mejores que el que se ha tomado de referencia. Al aplicar los algoritmos a un corte de calzada, los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$  no se han ajustado correctamente a este tipo de situaciones, esto ha motivado que se haya propuesto una modificación al algoritmo  $\alpha$  que ha mejorado los resultados.

Como fase final se han realizado tres pruebas piloto, la primera de ellas en un entorno interurbano, esta instalación ha permitido probar y comparar los algoritmos

de filtrado y de cálculo de la matriz O/D. La segunda de ellas ha consistido en un estudio direccional en una rotonda situada en un polígono industrial en una carretera convencional, esta instalación ha permitido analizar la validez de los algoritmos en distancias muy cortas entre sensores y fijar las condiciones para la instalación de los sensores BT en este tipo de estudios. La tercera se ha realizado en un entorno urbano para analizar el uso del centro histórico de Valencia por los vehículos a motor, en esta prueba ha sido necesario definir un nuevo algoritmo de filtrado con el objetivo de clasificar los dispositivos BT detectados en función de si estaban embarcados en un vehículo o estaban asociados a un peatón.

Los resultados obtenidos han permitido concluir que es posible calcular la matriz O/D dinámica mediante el empleo de sensores BT asegurando un valor mínimo de vehículos en la entrada. Los algoritmos propuestos han permitido obtener matrices O/D dinámicas y se ha definido un nuevo procedimiento de filtrado que permite eliminar dispositivos embarcados en un mismo vehículo y un procedimiento de clasificación para diferenciar entre los dispositivos que van embarcados en un vehículo o corresponden con un peatón.



# ÍNDICE

1	Introducción .....	1
2	Motivación y Objetivos.....	7
2.1	Motivación .....	7
2.2	Objetivos .....	11
3	Estado de la Técnica .....	13
3.1	Evolución de los sensores en los sistemas de gestión de tráfico.....	14
3.2	Arquitectura de los sistemas de gestión de tráfico .....	17
3.3	Tecnologías para la identificación automática de vehículos.....	21
3.3.1	Pago automático de peajes (DSRC) .....	21
3.3.2	Reconocimiento automático de matrículas (ANPR) .....	23
3.3.3	Registro Electrónico de Vehículos (ERI) .....	27
3.3.4	Dispositivos Bluetooth y WIFI .....	29
3.3.5	Conclusiones .....	30
3.4	Sensores Bluetooth.....	31
3.4.1	Descripción de la tecnología Bluetooth .....	31
3.4.2	Aplicación de la tecnología BT a la sensorización de tráfico .....	37
3.4.3	Influencia de las antenas en la zona de detección.....	38
3.4.4	Privacidad (LOPD).....	42
3.4.5	Conclusiones .....	44
3.5	Matrices Origen-Destino .....	44
3.5.1	El cálculo de las matrices O/D.....	45
3.5.2	Conclusiones .....	51

3.6	Algoritmos de filtrado .....	51
3.6.1	Consideraciones generales de la tecnología BT .....	52
3.6.2	Reducción de duplicados de la dirección MAC .....	54
3.6.3	Algoritmos de cálculo de tiempo de viaje y matriz O/D .....	60
3.6.4	Conclusiones .....	64
3.7	Sistemas XXXXXXXXXXXX .....	65
3.7.1	XXXXXXXXs y Sistemas XXXXXXXXXXXX .....	65
3.7.2	Justificación del uso de la tecnología XXX .....	69
3.7.3	Arquitectura de un XXX .....	71
3.7.4	Modelado de los XXX .....	73
3.7.5	Plataforma de desarrollo de XXX .....	76
3.7.6	Aplicaciones de XXX a Tráfico y Transportes .....	77
3.7.7	Conclusiones .....	78
3.8	Simulación de Tráfico.....	79
3.8.1	Simulador AIMSUN.....	82
3.8.2	Simulador SUMO .....	84
3.8.3	Conclusiones .....	88
3.9	Sensores BT actuales .....	88
3.9.1	BLIDS.....	89
3.9.2	BlueTOAD.....	91
3.9.3	BluFAX.....	93
3.9.4	Post Oak .....	94
3.9.5	Waspmote.....	95
3.9.6	Bitcarrier.....	97
3.9.7	DeepBlue .....	98

3.9.8	BLISITT .....	99
3.9.9	Conclusiones .....	100
4	Metodología .....	101
5	Validación de los sensores BT para el cálculo de matrices O/D dinámicas ...	111
5.1	Procedimiento de validación .....	112
5.2	Elección del simulador .....	113
5.3	Definición del modelo de simulación.....	114
5.4	Obtención de la matriz O/D del modelo de simulación.....	120
5.5	Modificación del código del simulador .....	120
5.6	Generación de los datos base del estudio.....	121
5.7	Análisis de los resultados.....	122
5.7.1	Diagramas de Cajas ( <i>box plot</i> ) .....	122
5.7.2	Error absoluto medio .....	134
5.7.3	Coefficiente de Variación.....	136
5.7.4	Coefficiente de desigualdad de Theil .....	138
5.7.5	Cálculo del tamaño de la muestra mínima .....	141
5.7.6	Análisis de pares completos de la matriz O/D.....	148
5.8	Conclusiones del experimento.....	157
6	Aplicación de los Sistemas XXXXXXXXXXXX al cálculo de la Matriz O/D dinámica .....	159
6.1	Modelo de conocimiento .....	161
6.1.1	Subdominio de la carretera.....	162
6.1.2	Subdominio del equipamiento de la carretera .....	163
6.1.3	Subdominio del comportamiento del tráfico .....	164
6.2	Diseño del XXX para el cálculo matriz O/D en los sistemas ITS actuales	166
6.2.1	Modelo de la organización.....	166

6.2.2	Modelo del entorno .....	170
6.2.3	Modelo de XXXXXs.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.2.4	Modelo de Conocimiento: Relaciones entre conceptos .....	175
6.2.5	Modelo de interacción.....	176
6.3	Implementación del XXX.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.3.1	Modelo de datos .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.3.2	Diagrama de clases .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.3.3	Diagrama de componentes.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.3.4	Diagrama de despliegue.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6.4	Validación del XXX.....	187
6.4.1	Creación del modelo de simulación.....	187
6.4.2	Implantación del XXX sobre la red simulada.....	191
6.4.3	Resultados .....	191
6.5	Esquema de implantación del XXX en el anillo de circunvalación de Bilbao	193
6.6	Conclusiones.....	194
7	Algoritmos de filtrado, matching y de clustering.....	196
7.1	Mejora de los sensores BT .....	197
7.1.1	Influencia de la antena en la detección .....	198
7.1.2	Evolución del sensor utilizado .....	202
7.1.3	Entorno de pruebas .....	207
7.2	Algoritmo de reducción de los datos del sensor BT .....	208
7.2.1	Estudio del uso del RSSI para filtrado.....	209
7.3	Procedimiento de creación de tránsitos entre sensores.....	211
7.3.1	Análisis de los algoritmos de emparejamiento de direcciones MAC.	213
7.4	Algoritmo de filtrado de dispositivos embarcados en el mismo vehículo	215

7.4.1	Efectos del algoritmo de filtrado .....	218
7.5	Conclusiones.....	225
8	Algoritmos de cálculo de la Matriz O/D dinámica.....	229
8.1	Estudio de los algoritmos existentes en la bibliografía .....	230
8.1.1	Algoritmos existentes en la bibliografía .....	230
8.1.2	Adaptación y evaluación de algoritmos existentes al cálculo de la matriz O/D.....	232
8.1.3	Resultado de la evaluación de los algoritmos existentes.....	237
8.1.4	Conclusiones .....	241
8.2	Propuesta de nuevos algoritmos para el cálculo de la matriz O/D .....	242
8.2.1	Algoritmo ajuste continuo del tiempo de viaje (Algoritmo $\beta$ ) .....	243
8.2.2	Algoritmo adaptativo del tiempo de viaje (algoritmo $\alpha$ ) .....	244
8.3	Comparación de los algoritmos de cálculo de la matriz O/D .....	247
8.3.1	Evaluación en condiciones normales de circulación .....	248
8.3.2	Corte en un sentido de circulación .....	256
8.4	Modificación algoritmo $\alpha$ .....	260
8.5	Implementación en el sistema MultiXXXXXX .....	265
8.6	Conclusiones.....	266
9	Evaluación del sistema propuesto en condiciones reales.....	273
9.1	Estudio Matriz O/D en autovía .....	274
9.1.1	Definición de la prueba .....	274
9.1.2	Esquema de implantación del XXX .....	277
9.1.3	Resultados de la prueba.....	277
9.1.4	Conclusiones .....	282
9.2	Estudio direccional rotonda polígono de la Andana en Paterna.....	283
9.2.1	Definición de la prueba .....	283

9.2.2	Esquema de implantación del XXX en la rotonda .....	287
9.2.3	Resultados de la prueba .....	288
9.2.4	Conclusiones Preliminares .....	292
9.2.5	Comprobación de las hipótesis de mejora .....	293
9.2.6	Conclusiones .....	295
9.3	Análisis del uso del Centro Histórico de Valencia .....	296
9.3.1	Definición de la prueba .....	296
9.3.2	Esquema de implantación del XXX .....	299
9.3.3	Resultados de la prueba .....	300
9.3.4	Conclusiones .....	314
10	Conclusiones Finales .....	317
10.1	Aportaciones .....	317
10.2	Líneas de investigación y trabajos futuros .....	323
11	Bibliografía .....	325
12	Publicaciones .....	337
13	Anexo I: Ficheros simulación SUMO .....	339
14	Anexo II: Gráficas tamaño de la muestra .....	341
15	Anexo III: Gráficas algoritmos matriz O/D .....	347

# ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1: Tráfico de 24 horas en el interfaz 29 de Cruces, Trunk al NCL Santurce.	19
Imagen 2: Tráfico de 24 horas en el interfaz 30 de Cruces, Trunk al NCL MalXXXín	19
Imagen 3: Distribución ERU red metropolitana	20
Imagen 4. Ejemplo de instalación de sistema ANPR	24
Imagen 5. Ejemplo tratamiento imágenes sistema ANPR (Empresa EDS)	24
Imagen 6. Ejemplo sistema ANPR	25
Imagen 7: Esquema sistema ANPR aplicación peaje	25
Imagen 8: Relación entre el coste privacidad y precisión de las tecnologías de identificación automática de vehículos (Porter et al., 2011)	31
Imagen 9. Modelo simplificado del procedimiento de conexión de dos dispositivos Bluetooth.(Bhaskar & Chung, 2013)	35
Imagen 10: Formato de la clase de dispositivo y servicio (CoD)	37
Imagen 11. Ejemplo de tren de consultas del sensor Bluetooth	37
Imagen 12. Ejemplo de error temporal en la toma de datos sensor Bluetooth	38
Imagen 13. Ejemplo patrón 3D radiación antena omnidireccional bi-polar	39
Imagen 14. Ejemplo patrón 3D radiación antena direccional	39
Imagen 15: Detecciones repetidas de una dirección MAC en un sensor	55
Imagen 16: Opciones de emparejamiento de direcciones MAC	56
Imagen 17: Valores RSSI en función de la distancia (Parameswaran et al., 2009)	58
Imagen 18: Ejemplo algoritmo filtrado porcentaje media (Puckett & Vickich, 2010)	61
Imagen 19: Ejemplo algoritmo filtrado varianza de la media (Puckett & Vickich, 2010)	62

Imagen 20: Algoritmo filtrado MAC propuesto por Canon-Lozano et al., 2012 .....	63
Imagen 25 Diferentes modelos de simulador, de izq. a dcha. Macroscópico, microscópico y sub-microscópico, en círculo mesoscópico (DLR, 2013) .....	81
Imagen 26: Validación del modelo de simulación (D. Krajzewicz et al., 2012).....	87
Imagen 27: Validación del comportamiento del móvil en TrafficOnline (D. Krajzewicz et al., 2012).....	87
Imagen 28: Sensor BLIDS.....	90
Imagen 29: Ejemplo instalación BLIDS .....	90
Imagen 30: Sistema BlueTOAD .....	92
Imagen 31: Sensor BluFAX ("Traffax INC," 2015) .....	93
Imagen 32: Filtrado BluFAX ("Traffax INC," 2015).....	94
Imagen 33: Sensor Post Oak .....	94
Imagen 34: Ejemplo de waspmote .....	96
Imagen 35: Ejemplo de arquitectura Waspote .....	96
Imagen 36: Ejemplo de sensor de Bitcarrier .....	97
Imagen 37: Flujo de datos en Bitcarrier .....	98
Imagen 38: Ejemplo sensor Deepblue .....	99
Imagen 39: Ejemplo sensor BLISITT .....	100
Imagen 40: Estudio correlación muestras espiras y sensor BT (Jaume Barceló et al., 2010).....	103

Imagen 41: Análisis residual comparación entre el contaje por espiras y sensor BT (Jaume Barceló et al., 2010) ..... 103

Imagen 42: Red Simulada en SUMO ..... 115

Imagen 43: Detalle enlace de Cruces A-8 simulación SUMO..... 115

Imagen 44: Detalle enlace de Derio N-637 simulación SUMO ..... 116

Imagen 45: Detalle enlace de Basauri A-8 simulación SUMO..... 116

Imagen 46: Superposición red simulada con la red real ..... 118

Imagen 47: Plano situación par O/D Cruces – Avanzada..... 124

Imagen 48: Diagrama box plot par O/D Cruces – Avanzada ..... 124

Imagen 49: Plano situación par O/D Cruces – BEC ..... 125

Imagen 50: Diagrama box plot par O/D Cruces – BEC..... 125

Imagen 51: Plano situación par O/D ASM – Cruces Santander ..... 126

Imagen 52: Diagrama box plot par O/D ASM – Cruces Santander ..... 126

Imagen 53: Plano situación par O/D Miraflores – Cruces Santander ..... 127

Imagen 54: Diagrama box plot par O/D Miraflores – Cruces Santander ..... 127

Imagen 55: Plano situación par O/D Kadagua – ASM Bilbao ..... 128

Imagen 56: Diagrama box plot par O/D Kadagua – ASM Bilbao ..... 128

Imagen 57: Plano situación par O/D Derio Mungia – Cruces Santander..... 129

Imagen 58: Diagrama box plot par O/D Derio Mungia – Cruces Santander..... 129

Imagen 59: Plano situación par O/D Erletxes – El Gallo..... 130

Imagen 60: Diagrama box plot par O/D Erletxes – El Gallo..... 130

Imagen 61: Plano situación par O/D VSM Miraflores – Buia Vitoria ..... 131

Imagen 62: Diagrama box plot par O/D VSM Miraflores – Buia Vitoria ..... 131

Imagen 63: Plano situación par O/D Cruces – Galdakao ..... 132

Imagen 64: Diagrama box plot par O/D Cruces – Galdakao..... 132

Imagen 65: Plano situación par O/D Enekuri – Derio Mungia.....	133
Imagen 66: Diagrama box plot par O/D Enekuri – Derio Mungia.....	133
Imagen 67: Error absoluto medio en el cálculo de pares O/D en función del porcentaje de detección .....	135
Imagen 68: Error absoluto medio para porcentajes matriz O/D entre 20% y 30% .	135
Imagen 69: Error absoluto medio para porcentajes matriz O/D entre 30% y 45% .	136
Imagen 70: Coeficiente Variación en el cálculo de pares O/D en función del porcentaje de detección .....	137
Imagen 71: Coeficiente Variación de pares O/D entre 20% y 30% de contribución	138
Imagen 72: Coeficiente Variación de pares O/D entre 30% y 45 % de contribución	138
Imagen 73: Coeficiente desigualdad de Theil .....	140
Imagen 74: Coeficiente desigualdad Theil para porcentajes del 20% al 30% de contribución matriz O/D .....	140
Imagen 75: Coeficiente desigualdad Theil para porcentajes del 30% al 45% contribución matriz O/D .....	141
Imagen 76: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 90% y precisión 10%	145
Imagen 77: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 90% y una precisión del 10%.....	146
Imagen 78: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 95% y precisión 10%	147
Imagen 79: Plano situación matriz O/D entrada Larrabetxu sentido Santander .....	149
Imagen 80: Error Absoluto entrada Larrabetxu sentido Santander (282 veh) .....	150
Imagen 81: MAE entrada Larrabetxu sentido Santander (282 veh) .....	151
Imagen 82: Plano situación matriz O/D entrada Juan de Garai sentido Donostia..	151
Imagen 83: Error Absoluto entrada Juan de Garai sentido Donostia (403 veh) .....	152
Imagen 84: MAE entrada Juan de Garai sentido Donostia (403 veh) .....	153
Imagen 85: Plano situación matriz O/D entrada Barakaldo sentido Bilbao .....	153

Imagen 86: Error Absoluto entrada Barakaldo sentido Bilbao (606 veh) ..... 154

Imagen 87: MAE entrada Barakaldo sentido Bilbao (606 veh) ..... 155

Imagen 88: Plano situación matriz O/D entrada Kukularra sentido Santander..... 155

Imagen 89: Error Absoluto entrada Kukularra sentido Bilbao (2.236 veh)..... 156

Imagen 90: MAE entrada Kukularra sentido Bilbao (2.236 veh) ..... 157

Imagen 96: Ejemplo de tratamiento de tránsito en XXXXXX XXXXXXXX; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 97: Diagrama de relaciones de la ontología del XXX..... 176

Imagen 98: Protocolo de interacción Calcular parámetros movilidad red; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 99: Modelo de datos BD matrices O/D.....; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 100: Diagrama de clases de XXXXXXs .....; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 101: Diagrama de Componentes del sistema ; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 102: Diagrama de despliegue para el XXXXXX XXX; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 103: Diagrama de despliegue para el XXXXXX XXXXXXXX; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 104: Diagrama de despliegue para el XXXXXX XXXXX; **Error! Marcador no definido.**

Imagen 105: Esquema red simulada verificación XXX ..... 188

Imagen 106: Error Absoluto entrada I1 red implantación XXX ..... 189

Imagen 107: Error Absoluto entrada I2 red implantación XXX ..... 189

Imagen 108: Error Absoluto entrada I1, hora 8, red implantación XXX ..... 190

Imagen 109: Error Absoluto entrada I2, hora 8, red implantación XXX ..... 190

Imagen 110: Implantación XXX sobre red simulada ..... 191

Imagen 111: Valores repartos tráfico en SUMO .....	192
Imagen 112: Matriz O/D intervalo integración hora 8 al aplicar el XXX .....	192
Imagen 113: Matriz O/D intervalo integración hora 11 al aplicar el XXX .....	193
Imagen 114: Matriz O/D intervalo integración hora 18 al aplicar el XXX .....	193
Imagen 115: Esquema implantación del XXX en anillo de circunvalación de Bilbao	194
Imagen 116. Primera Zona de Fresnel.....	199
Imagen 117. Zona de detección con antena direccional.....	201
Imagen 118. Zona de detección con antena omnidireccional.....	201
Imagen 119: Sensor BLISITT versión Waspmote - Libelium .....	204
Imagen 120: Prototipo Cubieboard .....	204
Imagen 121: Sensor BLISITT actual .....	206
Imagen 122: Entorno de pruebas de laboratorio.....	206
Imagen 123: Mapa instalación sensores prueba autovía.....	207
Imagen 124: Patrón de cobertura de la antena utilizada en el sensor BT .....	209
Imagen 125: Ejemplos distribución RSSI captado para una MAC.....	210
Imagen 126: Clasificación tránsitos algoritmo $\sigma$ SBT 2 – SBT 1 .....	239
Imagen 127: Clasificación tránsitos algoritmo Canon-Lozano SBT 2 – SBT 1.....	240
Imagen 128: Clasificación tránsitos algoritmo $\sigma$ SBT 6 – SBT 7 .....	240
Imagen 129: Clasificación tránsitos algoritmo Canon-Lozano SBT 6 – SBT 7.....	241
Imagen 130: Clasificación tránsitos algoritmo $\beta = 0,02$ SBT 2 – SBT 1 .....	250
Imagen 131: Clasificación tránsitos algoritmo $\beta = 0,1$ SBT 2 – SBT 1 .....	250
Imagen 132: Clasificación tránsitos algoritmo $\alpha = 3$ Km/h SBT 2 – SBT 1.....	251
Imagen 133: Clasificación tránsitos algoritmo $\alpha = 5$ Km/h SBT 2 – SBT 1.....	251
Imagen 134: Clasificación tránsitos algoritmo $\sigma$ SBT 2 – SBT 1 .....	252
Imagen 135: Clasificación tránsitos algoritmo $\beta = 0,1$ SBT 7 – SBT 1 .....	253

Imagen 136: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h SBT 7 – SBT 1 .....253

Imagen 137: Clasificación tránsitos algoritmo  $\sigma$  SBT 7 – SBT 1 .....254

Imagen 138: Clasificación tránsitos algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 6 – SBT 7 .....255

Imagen 139: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h SBT 6 – SBT 7 .....255

Imagen 140: Clasificación tránsitos algoritmo  $\sigma$  SBT 6 – SBT 7 .....256

Imagen 141: Clasificación tránsitos algoritmo  $\beta = 0,02$  corte sentido SBT 1 – SBT 2258

Imagen 142: Clasificación tránsitos algoritmo  $\beta = 0,1$  corte sentido SBT 1 – SBT 2258

Imagen 143: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con corte sentido SBT 1 – SBT 2.....259

Imagen 144: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con corte sentido SBT 1 – SBT 2.....259

Imagen 145: Clasificación tránsitos algoritmo  $\sigma$  con corte sentido SBT 1 – SBT 2260

Imagen 146: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h modificado con corte sentido SBT 1 – SBT 2 .....262

Imagen 147: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h modificado con corte sentido SBT 1 – SBT 2 .....262

Imagen 148: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 6263

Imagen 149: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 6264

Imagen 150: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 1264

Imagen 151: Clasificación tránsitos algoritmo con ajuste  $\alpha = 3$  Km/h SBT 6 – SBT 1265

Imagen 152: Diagrama de actividad del proceso de filtrado algoritmo  $\alpha$  .....266

Imagen 153: Cadena de filtrados .....270

Imagen 154: Grafo de posición de los sensores BT en prueba piloto autovía .....274

Imagen 155: Esquema de implantación del XXX en prueba piloto autovía .....277

Imagen 156: Mapa situación sensores prueba direccional rotonda Andana .....284

Imagen 157: Instalación sensor 1 rotonda Andana.....285

Imagen 158: Instalación sensor 2 rotonda Andana.....	285
Imagen 159: Instalación aforadores con goXXX rotonda Andana .....	286
Imagen 160: Esquema implantación XXX en rotonda l'Andana .....	287
Imagen 161: Nueva localización sensores en rotonda Andana .....	293
Imagen 162: Plano emplazamiento sensores e itinerarios .....	298
Imagen 163: Esquema de implantación del XXX en la prueba de Valencia.....	299
Imagen 164: Tiempos de viaje del jueves 28 de mayo de 2015 recorrido 1-3 .....	303
Imagen 165: Tiempos de viaje del jueves 4 de junio de 2015 recorrido 1-3.....	304
Imagen 166: Tiempos de viaje del sábado 30 de mayo de 2015 recorrido 1-3.....	304
Imagen 167: Tiempos de viaje del domingo 31 de mayo de 2015 recorrido 1-3....	305
Imagen 168: Corte tráfico domingo 7 de junio de 2015 recorrido 1-3.....	306
Imagen 169: Corte tráfico domingo 7 de junio de 2015 recorrido 3-4.....	306
Imagen 170: Corte tráfico domingo 7 de junio de 2015 recorrido 2-3.....	307
Imagen 171: Corte tráfico domingo 7 de junio de 2015 recorrido 2-4.....	307
Imagen 172: Distribución horaria tránsitos viernes 29 mayo 2015 recorrido 1-3....	309
Imagen 173: Distribución horaria tránsitos sábado 30 mayo 2015 recorrido 1-3 ...	310
Imagen 174: Distribución horaria tránsitos viernes 29 mayo 2015 recorrido 2-3....	310
Imagen 175: Distribución horaria tránsitos sábado 30 mayo 2015 recorrido 2-3 ...	311
Imagen 176: Distribución horaria tránsitos viernes 29 mayo 2015 recorrido 2-4....	312
Imagen 177: Distribución horaria tránsitos sábado 30 mayo 2015 recorrido 2-4 ...	312
Imagen 178: Distribución horaria tránsitos domingo 31 mayo 2015 recorrido 2-4 .	313
Imagen 179: Distribución horaria reparto tráfico viernes 29 mayo 2015 recorrido 3-4	313
Imagen 180: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 90% y precisión 10%	342
Imagen 181: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 90% y una precisión del 10% .....	342

Imagen 182: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 95% y precisión 10% 343

Imagen 183: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 95% y una precisión del 10% ..... 343

Imagen 184: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 90% y precisión 5% 344

Imagen 185: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 90% y una precisión del 5% ..... 344

Imagen 186: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 95% y precisión 5% 345

Imagen 187: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 95% y una precisión del 5% ..... 345

Imagen 188: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 1 – SBT2 ..... 348

Imagen 189: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 1 – SBT2 ..... 348

Imagen 190: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  sin ajuste Km/h SBT 1 – SBT2 ..... 349

Imagen 191: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 1 – SBT2 ..... 349

Imagen 192: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 1 – SBT2 ..... 350

Imagen 193: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  con ajuste Km/h SBT 1 – SBT2 ..... 350

Imagen 194: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 1 – SBT2 ..... 351

Imagen 195: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  con ajuste Km/h SBT 2 – SBT1 ..... 352

Imagen 196: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  con ajuste Km/h SBT 2 – SBT1 ..... 353

Imagen 197: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 1 – SBT7 ..... 353

Imagen 198: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 1 – SBT7 ..... 354

Imagen 199: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 1 – SBT7 ..... 354

Imagen 200: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h con ajuste SBT 1 – SBT7 .....	355
Imagen 201: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h sin ajuste SBT 1 – SBT7 .....	355
Imagen 202: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h con ajuste SBT 1 – SBT7 .....	356
Imagen 203: Clasificación tránsitos con algoritmo $\sigma$ SBT 1 – SBT7 .....	356
Imagen 204: Clasificación tránsitos con algoritmo $\beta = 0,02$ SBT 7 – SBT 1 .....	357
Imagen 205: Clasificación tránsitos con algoritmo $\beta = 0,1$ SBT 7 – SBT 1 .....	357
Imagen 206: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 1 .....	358
Imagen 207: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 1 .....	358
Imagen 208: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 1 .....	359
Imagen 209: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 1 .....	359
Imagen 210: Clasificación tránsitos con algoritmo $\sigma$ SBT 7 – SBT 1 .....	360
Imagen 211: Clasificación tránsitos con algoritmo $\beta = 0,02$ SBT 2 – SBT 7 .....	360
Imagen 212: Clasificación tránsitos con algoritmo $\beta = 0,1$ SBT 2 – SBT 7 .....	361
Imagen 213: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h sin ajuste SBT 2 – SBT 7 .....	361
Imagen 214: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h con ajuste SBT 2 – SBT 7 .....	362
Imagen 215: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h sin ajuste SBT 2 – SBT 7 .....	362
Imagen 216: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h con ajuste SBT 2 – SBT 7 .....	363

Imagen 217: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 2 – SBT 7 .....363

Imagen 218: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 7 – SBT 2 .....364

Imagen 219: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 7 – SBT 2 .....364

Imagen 220: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 2.....365

Imagen 221: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 2.....365

Imagen 222: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 2.....366

Imagen 223: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 2.....366

Imagen 224: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 7 – SBT 2 .....367

Imagen 225: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 1 – SBT 6 .....367

Imagen 226: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 1 – SBT 6 .....368

Imagen 227: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 1 – SBT 6.....368

Imagen 228: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 1 – SBT 6.....369

Imagen 229: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 1 – SBT 6.....369

Imagen 230: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 1 – SBT 6.....370

Imagen 231: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 1 – SBT 6 .....370

Imagen 232: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 6 – SBT 1 .....371

Imagen 233: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 6 – SBT 1 .....371

Imagen 234: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 1.....372

Imagen 235: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h con ajuste SBT 6 – SBT 1.....	372
Imagen 236: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 1.....	373
Imagen 237: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h con ajuste SBT 6 – SBT 1.....	373
Imagen 238: Clasificación tránsitos con algoritmo $\sigma$ SBT 6 – SBT 1.....	374
Imagen 239: Clasificación tránsitos con algoritmo $\beta = 0,02$ SBT 2 – SBT 6.....	374
Imagen 240: Clasificación tránsitos con algoritmo $\beta = 0,1$ SBT 2 – SBT 6.....	375
Imagen 241: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h sin ajuste SBT 2 – SBT 6.....	375
Imagen 242: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h con ajuste SBT 2 – SBT 6.....	376
Imagen 243: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h sin ajuste SBT 2 – SBT 6.....	376
Imagen 244: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h con ajuste SBT 2 – SBT 6.....	377
Imagen 245: Clasificación tránsitos con algoritmo $\sigma$ SBT 2 – SBT 6.....	377
Imagen 246: Clasificación tránsitos con algoritmo $\beta = 0,02$ SBT 6 – SBT 2.....	378
Imagen 247: Clasificación tránsitos con algoritmo $\beta = 0,1$ SBT 6 – SBT 2.....	378
Imagen 248: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 2.....	379
Imagen 249: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 3$ Km/h con ajuste SBT 6 – SBT 2.....	379
Imagen 250: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 2.....	380
Imagen 251: Clasificación tránsitos con algoritmo $\alpha = 5$ Km/h con ajuste SBT 6 – SBT 2.....	380

Imagen 252: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 6 – SBT 2 .....381

Imagen 253: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 6 – SBT 7 .....381

Imagen 254: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 6 – SBT 7 .....382

Imagen 255: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 7 .....382

Imagen 256: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 6 – SBT 7 .....383

Imagen 257: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 7 .....383

Imagen 258: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 6 – SBT 7 .....384

Imagen 259: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 6 – SBT 7 .....384

Imagen 260: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 7 – SBT 6 .....385

Imagen 261: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 7 – SBT 6 .....385

Imagen 262: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 6 .....386

Imagen 263: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 6 .....386

Imagen 264: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 6 .....387

Imagen 265: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 6 .....387

Imagen 266: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 7 – SBT 6 .....388



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación equipos Bluetooth .....	33
Tabla 2. Alcance comunicación BT en función de la ganancia de la antena.....	40
Tabla 3: Precisión cálculo tiempo de viaje en función antena y algoritmo de reducción datos MAC (Porter et al., 2011) .....	57
Tabla 4: Pares O/D analizados con box plot .....	123
Tabla 5: Ejemplo cálculo tamaño muestra entrada Kukularra sentido Bilbao.....	143
Tabla 6: Ejemplo cálculo tamaño muestra entrada Lezama sentido Getxo.....	144
Tabla 7: Datos de la matriz O/D entrada Larrabetxu sentido Santander .....	150
Tabla 8: Datos de la matriz O/D entrada Juan de Garai sentido Donostia .....	152
Tabla 9: Datos de la matriz O/D entrada Barakaldo sentido Bilbao.....	154
Tabla 10: Datos de la matriz O/D entrada Kukularra sentido Bilbao .....	156
Tabla 11: Tabla de BD en Sensor BT .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 12: Tabla de BD en XXXXXX XXX.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

Tabla 23: Tiempos de viaje y tránsitos con algoritmos de emparejamiento de direcciones MAC .....	214
Tabla 24: Porcentaje máxima diferencia distintas opciones de emparejamiento ...	214
Tabla 25: Tránsitos candidatos a ser filtrados.....	218
Tabla 32: Clasificación tránsitos algoritmos presentes en la bibliografía .....	237
Tabla 33: Datos globales clasificación tránsitos presentes bibliografía .....	238
Tabla 34: Clasificación tránsitos algoritmos matriz O/D y tiempo de viaje .....	248
Tabla 35: Datos globales de algoritmo matriz O/D .....	248
Tabla 36: Datos algoritmo matriz O/D circulación normal SBT 1 – SBT 2.....	257
Tabla 37: Datos algoritmo matriz O/D corte sentido SBT 1 – SBT 2 .....	257
Tabla 38: Datos matriz O/D corte total SBT 1 – SBT 2 con modificación algoritmo $\alpha$ 261	
Tabla 39: Cadena de filtrado de los datos del sensor BT .....	270
Tabla 40: Distancia entre sensores BT y OCR en prueba autovía .....	275
Tabla 41: Matriz O/D OCR prueba autovía (veh) .....	278
Tabla 42: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo $\alpha$ = 3 (veh) .....	278
Tabla 43: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo $\alpha$ = 5 (veh) .....	278

Tabla 44: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo  $\beta = 0,02$  (veh) .....279

Tabla 45: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo  $\beta = 0,1$  (veh) .....279

Tabla 46: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo  $\sigma$  (veh) .....279

Tabla 47: Error absoluto algoritmo  $\alpha = 3$  frente a OCR y porcentaje de detección 280

Tabla 48: Error absoluto algoritmo  $\alpha = 5$  frente a OCR y porcentaje de detección 280

Tabla 49: Error absoluto algoritmo  $\beta = 0,02$  frente a OCR y porcentaje de detección280

Tabla 50: Error absoluto algoritmo  $\beta = 0,1$  frente a OCR y porcentaje de detección280

Tabla 51: Error absoluto algoritmo  $\sigma$  frente a OCR y porcentaje de detección .....281

Tabla 52: Error absoluto algoritmo Canon Lozano frente a OCR y porcentaje de detección .....281

Tabla 53: Resumen del error absoluto máximo y MAE.....281

Tabla 54: Resultados aforos rotonda Andana.....288

Tabla 55: Resultados tránsitos con sensores BT rotonda Andana.....289

Tabla 56: Porcentajes detección sensor BT frente aforador en rotonda Andana ...289

Tabla 57: Tasa de fallos y aciertos con dispositivos conocidos.....290

Tabla 58: Matriz O/D contraste rotonda Andana.....290

Tabla 59: Matriz O/D contraste rotonda Andana (%) .....291

Tabla 60: Matriz O/D sensor BT rotonda Andana .....291

Tabla 61: Matriz O/D sensor BT rodonda Andana (%) .....291

Tabla 62: Error absoluto matriz O/D rotonda Andana.....292

Tabla 68: Datos número detecciones por sensor .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 69: Ejemplo clasificación vehículo – peatón .....	301
Tabla 70: Porcentaje de detección calle La Paz .....	302
Tabla 71: Tasa de fallos y aciertos en prueba Valencia .....	302
Tabla 72: Repartos de los tránsitos por el centro histórico .....	308

# LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

**ACC:** Agent Communication Channel.

**ACL:** Agent Communication Language.

**ADAS:** Advanced Driver Assistance Systems.

**AID:** Agent Identifier.

**AIMSUN:** Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks.

**AMS:** Agent Management System.

**ANPR:** Automatic Number Plate Recognition.

**ANS:** Agent Name Service.

**API:** Application Programming Interface

**ATIS:** Advanced Traveller Information Systems.

**ATMS:** Advanced Traffic Management Systems.

**AVI:** Automatic Vehicle Identification.

**BT:** Bluetooth.

**CEN:** Comité Europeo de Normalización

**CENELEC:** European Committee for Electrotechnical Standardization

**CGT:** Centro de Gestión de Tráfico.

**CoD:** Code of Device/Service.

**Cv:** Coeficiente de Variación.

**DAI:** Detección Automática de Incidentes.

**dB<sub>i</sub>:** decibelios isotrópicos.

**DF:** Directory Facilitator.

**DFB:** Diputación Foral de Bizkaia.

**DSRC:** Dedicated Short Range Communications.

**ETD:** Estación de Toma de Datos.

**ETSI:** European Telecommunications Standards Institute

**ERU:** Estación Remota Universal.

**EUSTAT:** Instituto Vasco de Estadística.

**FHSS:** Frequency Hopping Spread Spectrum.

**GIS:** Geographic Information System.

**GPS:** Global Positioning System.

**GPL:** General Public License.

**GPRS:** General Packet Radio Service.

**GV:** Gobierno Vasco.

**IAC:** Inquiry Access Code.

**INTELVIA:** Sistema Integral de Control, Señalización y Comunicación para la Gestión Operacional Segura e Inteligente del Tráfico en Servicios e Infraestructuras

**IP:** Índice de Protección.

**ISM:** Industrial, Scientific and Medical.

**ITS:** Intelligent Transportation System.

**ITU:** International Telecommunication Union.

**I2I:** Sistemas Cooperativos con comunicaciones Infraestructura a Infraestructura.

**I2V:** Sistemas Cooperativos con comunicaciones Infraestructura a Vehículo.

**LGPL:** Lesser General Public License.

**LOPD:** Ley Orgánica 15/1999 de 13 de diciembre de Protección de Datos de Carácter Personal.

**MAC:** Media Access Control.

**MAE:** Mean Absolute Error.

**XXX:** XXXXXXXXX System.

**MTS:** Message Transport Service.

**NCL:** Nodo Concentrador Local.

**NFC:** Near field communication.

**OASIS:** Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles.

**OCR:** Optical Character Recognition.

**OBU:** On Board Unit.

**OMG:** Object Management Group.

**OSM:** Open Street Map.

**OUI:** Organizationally Unique Identifier.

**O/D:** Origen – Destino.

**Pk:** Punto Kilométrico.

**PoE:** Power over Ethernet.

**PMV:** Paneles de Mensaje Variable.

**RADAR:** RAdio Detection And Ranging.

**RFID:** Radio Frequency Identification.

**RSSI:** Received Signal Strength Indicator.

**SBTX:** Sensor Bluetooth X.

**SEM:** Standard Error of the Mean.

**SIG:** Special Interest Group de BT.

**SUMO:** Simulation of Urban MObility.

**TIC:** Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

**U:** Coeficiente de desigualdad de Theil.

**USB:** Universal Serial Bus.

**V2I:** Sistemas Cooperativos con comunicaciones Vehículo a Infraestructura.

**V2V:** Sistemas Cooperativos con comunicaciones Vehículo a Vehículo.

**WIFI:** Wireless Fidelity.

**3G:** Tercera Generación Móviles.

# 1 Introducción

---

Los primeros sistemas de gestión del tráfico se basaban en la instalación de elementos de sensorización, espiras magnéticas, que suministraban datos básicos de tráfico como son la intensidad y la velocidad, integradas en periodos predefinidos y clasificadas en varias categorías, además de la ocupación y la distancia entre vehículos.

Estos datos básicos fueron utilizados para estimar otros parámetros como el nivel de servicio o el tiempo de viaje de cada tramo de la red sensorizada (Lindveld & Thijs, 1999). Además, aplicando una serie de algoritmos a estos datos se realizaba la detección de congestiones o incidentes (Collins et al., 1979). Sin embargo, la estimación del tiempo de viaje no siempre era válida en congestión, justo cuando más útil podría ser (Coifman, 2002) ya que con este tipo de sensores no se podía realizar el seguimiento de la cola.

Otro parámetro de movilidad como es la matriz Origen/Destino (matriz O/D) de una red de carreteras, tan importante en la planificación y gestión del tráfico, era imposible calcularla directamente. Este parámetro se obtenía de modo *off-line*,

mediante la realización de entrevistas y aplicando métodos de estimación basados en diferentes modelos matemáticos aplicados a los datos proporcionados por los sensores (Abrahamsson, 1998) (Cascetta & Postorino, 2001).

Además, debido al alto coste económico de este tipo de instalaciones, donde era necesario disponer de una red cableada de comunicaciones, puntos con acceso a energía eléctrica y realizar cortes de tráfico para su instalación y mantenimiento, su cálculo se redujo inicialmente a las grandes conurbaciones para posteriormente extenderse a las vías de alta capacidad. Estos sistemas llegaron de forma muy limitada a carreteras convencionales o a tramos de carreteras principales con baja ocupación, tan solo en aquellos puntos que presentaban altos niveles de peligrosidad o problemas puntuales debidos a su uso estacional se justificaba su instalación.

Desde finales de los años 80, se han ido incorporando a los vehículos un conjunto de nuevos sistemas que han permitido mejorar la seguridad en la conducción de los vehículos, son los llamados sistemas ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) (Welch & Bishop, 2006). Estos sistemas fueron evolucionando desde el primer ABS creado por BOSCH y Mercedes Benz, que fue instalado en los clase S de 1978, a los modernos sistemas de aviso de punto ciego o el control de cruceo adaptativo, que actualmente disponen muchos modelos de vehículos, incluso de clase media.

También cabe destacar la evolución de los sistemas de comunicaciones inalámbricos, ya que han permitido que se haya dado un salto cualitativo respecto a los sistemas ADAS, pasándose de sistemas internos al vehículo, que se comunican entre sí a través del BUS CAN (ISO, 2003), a sistemas que se comunican con los vehículos que circulan por su área de influencia o con la propia infraestructura (Papadimitratos et al., 2009).

Toda esta evolución ha sido respaldada por las autoridades europeas, en el año 2009 la Dirección General de Industria y Empresas de la Comisión Europea publicó un mandato dirigido a los organismos de estandarización Europeos CEN, CENELEC y ETSI con objeto de que definieran las bases de las tecnologías de las comunicaciones y de la información que permitieran la interoperabilidad de los

sistemas cooperativos aplicados a los Sistemas Inteligentes de Transporte (EuropeanComission, 2009).

En este documento se definieron dos conceptos importantes, en primer lugar se definió un Sistema Inteligente de Transporte (ITS, del inglés Intelligent Transportation System) como aquel que aplica las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) al sector del transporte. También se declaró que los sistemas ITS pueden producir claros beneficios en términos de eficiencia, sostenibilidad y seguridad en el transporte.

En segundo lugar, se definió un Sistema Cooperativo como un ITS basado en comunicaciones Vehículo a Vehículo (V2V), Vehículo a Infraestructura (V2I), Infraestructura a Vehículo (I2V) o Infraestructura a Infraestructura (I2I) para el intercambio de información. Además se reconoció que los Sistemas Cooperativos tienen el potencial de aumentar aún más los beneficios que pueden ofrecer los servicios y aplicaciones ITS.

La investigación actual en sistemas cooperativos está centrándose principalmente en la definición de un estándar de comunicaciones (Kosch et al., 2009)(Yun et al., 2014) (Menéndez et al., 2015) que permita la interoperabilidad entre los distintos sistemas que se vayan desarrollando, tanto en modo prototipo como en productos comerciales. El enfoque se está fijando principalmente en el desarrollo de elementos embarcados que permitan avisar e informar al conductor del estado de su entorno, a través del intercambio de información I2V o V2V. Varios son los proyectos de investigación financiados públicamente a nivel europeo que han tratado estos temas, entre otros el Proyecto iTetris, 2013, y el Proyecto Safespot, 2013.

El problema que surge para la implantación de los sistemas cooperativos es que, si se basan en sistemas embarcados, es necesario que haya un índice de penetración importante y eso depende del papel que vayan a jugar los fabricantes de vehículos y de la implicación de la administración mediante su exigencia normativa.

La implantación de los *smartphones* y *tablets* ha supuesto en los últimos años que en la mayoría de los vehículos que circulan por las carreteras haya uno de estos

dispositivos embarcado. Así mismo, la mayoría de vehículos nuevos llevan de serie radio con conexión *Bluetooth* (BT) que permite el emparejamiento del teléfono móvil con la radio y así disponer de manos libres para hablar durante la conducción.

Esto ha planteado una nueva oportunidad centrada en la utilización de los dispositivos móviles (manos libres, *smartphone*, *tablets*, navegadores, etc...) que lleva el usuario del vehículo o el propio vehículo de serie como sensores casuales. De tal forma que a partir de estos dispositivos se podría realizar el seguimiento de una muestra de los vehículos que circulan por la red y permitiría empezar a explotar de forma rápida algunas de las posibilidades de los sistemas cooperativos.

Esta nueva línea de investigación ya lleva varios años siendo ampliamente estudiada, incluso hay en el mercado dispositivos que permiten obtener información de los equipos móviles presentes en los vehículos (Trafficnow, 2014) (Bitcarrier, 2014). La información que se obtiene a partir de los datos recabados de los equipos embarcados son la velocidad media y el tiempo de viaje entre los puntos sensorizados. La proliferación de estos sensores se ha producido por dos razones: el coste relativamente bajo del sensor y de su explotación, ya que el sensor se puede implementar mediante un pequeño sistema de procesamiento y un dispositivo USB BT, así como la alta implantación de dispositivos con tecnología BT.

Los datos proporcionados por estos sensores han permitido calcular tiempos de viaje de forma más precisa que la que se obtiene con los sensores clásicos, ya que permite realizar la identificación y seguimiento de los vehículos. Sin embargo, estos sistemas han planteado algunas dudas en los investigadores (Jaume Barceló et al., 2010) respecto a su uso para realizar el cálculo de las matrices O/D de una red de carreteras debido a que solo se obtiene una muestra, aunque en algunos casos sea cercana al 40% del total de vehículos.



La concepción de los sistemas ITS actuales de gestión de tráfico está cambiando y se están planteando dudas sobre el uso de algunos de los equipos tradicionales. Por ejemplo, la Dirección General de Tráfico decidió desmantelar la red de Postes SOS de las carreteras en el año 2010 (Fraile, 2011), Bidegi también los ha retirado en el año 2014 de la autopista AP-8. Sin duda, el ratio de penetración de los teléfonos móviles ha motivado el desuso de este equipamiento.

La aparición de nuevos sensores, entre ellos los sensores BT, la implantación de los sistemas cooperativos, las aplicaciones móviles para navegación como Google Maps o TomTom, comienzan a plantear dudas sobre los sistemas ITS que actualmente se instalan en la carretera para la gestión de tráfico. Sin embargo, la potencia de procesamiento y de comunicaciones que actualmente se dispone en la carretera debería ser aprovechada por estos nuevos sistemas. Una red de sensores BT debería integrarse en la arquitectura actual, integrándose en la arquitectura ERU-NCL-CGT.

## 2 Motivación y Objetivos

---

### 2.1 Motivación

El grupo de investigación LISITT (Laboratorio Integrado de Sistemas Inteligentes y Tecnologías de la información en Tráfico) del IRTIC (Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y de las Telecomunicaciones) de la Universitat de Valencia ha participado en los últimos años en varios proyectos de investigación y aplicación de los sistemas ITS, incluyendo sensores BT. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos:

- El proyecto **INTELVIA** (Sistema Integral de Control, Señalización y Comunicación para la Gestión Operacional Segura e Inteligente del Tráfico en Servicios e Infraestructuras) fue un proyecto de I+D+i financiado dentro del programa AVANZA 2 del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio entre los años 2008 y 2012 (Muñoz et al., 2010). El principal objetivo de este proyecto fue la creación de un sistema de gestión inteligente del tráfico desarrollando un Sistema Integral de Control, Señalización y Comunicación centrado en la introducción de nuevos sistemas ITS, principalmente sistemas cooperativos. Los sistemas cooperativos se basaban en la comunicación V2I y I2V. La base de la sensorización fueron los dispositivos BT. En ese momento del desarrollo, se simuló la sensorización mediante el

simulador SUMO, debido a que un despliegue de sensorización era demasiado costoso para el proyecto.

El doctorando fue el investigador principal de este proyecto, por parte de la Universitat de València, y las tareas que se desarrollaron fueron la simulación de los sensores BT, la definición de los algoritmos necesarios para la obtención de la matriz O/D de la red simulada (Tornero & Martínez, 2012), el desarrollo de la base de datos (BD) y la interconexión del software de cálculo con el sistema de gestión desarrollado.

- El proyecto Oasis (Operación de Autopistas Seguras, Inteligentes y Sostenibles) fue un proyecto de I+D+i financiado dentro del programa CENIT del CDTI del Ministerio de Industria e Innovación, entre los años 2008 y 2011. El principal objetivo de este proyecto fue la definición de la autopista del futuro, más segura y sostenible, que mejorase el servicio ofrecido, usando las nuevas tecnologías en todos los ámbitos del transporte. Este fue un proyecto de gran envergadura, de 30,5 M€, y en el que participaron 16 grandes empresas y 16 centros de investigación (García-Linares et al, 2010).

Dentro del proyecto, LISITT tuvo una participación destacada en el desarrollo de un nuevo concepto de eCall basado en la infraestructura, de modo que fuese la carretera la que generase una alarma ante un incidente y ésta fuese enviada automáticamente al centro de emergencias. También se desarrolló una aplicación para la obtención de matrices O/D en tiempo real en la que participó el doctorando en el desarrollo de los algoritmos de cálculo de las matrices O/D. Otro ámbito en el que se trabajó fue en la creación de un nuevo dispositivo de medida, basado en una mota con un sensor magnético, cuyo objetivo era tener la capacidad de definir la huella magnética de los diferentes vehículos que pasaban por los puntos de sensorización (Cirilo et al., 2013).

- Varios proyectos de asistencia técnica a la Diputación Foral de Bizkaia y a la Dirección de Tráfico de Gobierno Vasco, desde el año 1996, sobre la aplicación de los sistemas ITS en la gestión e información del tráfico y en la

seguridad en túneles. Estos proyectos permitieron crear el sistema de gestión de tráfico de la Diputación Foral de Bizkaia (DFB) y del Gobierno Vasco (GV). El doctorando ha sido el investigador principal de estos proyectos.

En estos proyectos se encontraron grandes limitaciones a los sistemas de sensorización e información de tráfico actuales, principalmente a la hora de poder ofrecer al usuario información relevante para su desplazamiento, o para poder tomar decisiones sobre los itinerarios alternativos ante una incidencia. Los tiempos de viaje que se obtenían con las espiras magnéticas no eran válidos cuando se producía una congestión, momento en el que eran más importantes, y no se podía calcular la matriz O/D en tiempo real de la red, ni siquiera se disponía de una matriz O/D estática.

La participación en estos proyectos permitió encontrar un nicho importante donde enfocar la investigación de esta tesis doctoral, motivando al doctorando a plantear el uso de los datos que proporcionan los sistemas cooperativos basados en sensores BT, para la obtención de parámetros de movilidad, como son la matriz O/D y el tiempo de viaje, utilizando la tecnología de sistemas XXXXXXXXXXXX. A continuación se presentan una serie de cuestiones que se plantearon en estos proyectos y que han servido para plantear los objetivos de esta tesis doctoral:

1. Los investigadores, que han centrado su investigación en el cálculo de matrices O/D mediante cálculos matemáticos a partir de los sensores clásicos, sugieren la necesidad de estudiar en qué condiciones podrían usarse los valores que proporcionan directamente los sensores BT para el cálculo de matrices O/D dependientes del tiempo. Jaume Barceló et al., 2010, resalta en su estudio que los datos obtenidos por los equipos BT no pueden ser expandidos al resto de la población, ya que estos sensores solo identifican los vehículos que llevan embarcado un equipo BT. Por lo tanto, no se puede asegurar que la distribución de éstos sea aleatoria, ni que la proporción de vehículos detectados con el dispositivo BT sea constante en el tiempo. Un itinerario puede verse favorecido por la presencia de un mayor número de vehículos que

disponen de estos dispositivos (normalmente de gama media – alta) frente a otros itinerarios, lo que podría sesgar el resultado final.

2. Los pocos estudios que han aplicado la tecnología BT al cálculo de las matrices O/D, Blogg et al., 2010 y Canon-Lozano et al., 2012, han planteado la necesidad de desarrollar algoritmos de filtrado que permitan, entre otros aspectos, identificar dispositivos que van embarcados en el mismo vehículo para eliminarlos de los cálculos. Además, En estos estudios no se ha analizado en detalle la validez o no del uso de los sensores BT en el cálculo de las matrices O/D.
  
4. Es necesario disponer de un entorno de prueba del que se conozca su matriz O/D dependiente del tiempo y en el que se puedan probar los algoritmos de cálculo de la matriz O/D mediante la modificación del porcentaje de vehículos que lleven dispositivos BT.
  
6. Otro aspecto que ha motivado la realización de esta tesis es la constante búsqueda de un sensor no invasivos, de bajo coste, de fácil instalación y mantenimiento, con pocas exigencias en cuanto a

comunicaciones y energía, y que permita obtener directamente parámetros de movilidad. El coste económico de un despliegue clásico que permita obtener estos parámetros con un nivel mínimo de fiabilidad es muy elevado. Las posibilidades que ofrecen el uso de los sistemas cooperativos basados en sensores BT son muy esperanzadoras en dos aspectos. Se reduce enormemente el coste de un despliegue de este tipo de sensores, entre 2.500 y 3.500 euros por sección de medida, frente a los más de 20.000 de otros sistemas. El otro aspecto es la facilidad de su instalación, configuración, mantenimiento y explotación de los datos.

## 2.2 Objetivos

El objetivo principal de la tesis es definir y validar un conjunto de algoritmos para la determinación de matrices O/D dinámicas en tiempo real en una red de carreteras extensa, mediante la detección de dispositivos Bluetooth embarcados en vehículos, desarrollando un sistema XXXXXXXX de procesamiento basado en la tecnología de sistemas XXXXXXXXXXXX, aprovechando la infraestructura de equipamiento y comunicaciones existente en las redes viarias actuales.

Para cumplir con este objetivo se deberán cumplir los siguientes subobjetivos:

- Demostrar la viabilidad de utilizar los datos proporcionados por sensores BT como base para la determinación de matrices O/D dinámicas, es decir, variables en el tiempo. Para ello se determinarán los ratios mínimos de penetración de los dispositivos BT y la intensidad mínima de vehículos necesarias para obtener valores con un porcentaje de error asumible.

Definir y validar un conjunto de algoritmos que permitan el filtrado y emparejamiento de los datos que proporcionan los sensores BT para poder

- Evaluar mediante técnicas de simulación, pruebas de laboratorio y pruebas piloto en condiciones reales, la eficacia de los algoritmos y de la propuesta. Como parte de este subobjetivo se pretende adaptar un simulador microscópico para que reproduzca vehículos con dispositivos BT y puntos de sensorización BT sobre una red de carreteras.
- Adaptar el modelo de despliegue propuesto para permitir aprovechar la infraestructura de sistemas ITS existente en España, y en la mayoría de países europeos, y poder extender su vida útil hasta que se produzca la transición de los sistemas de sensorización de la carretera a los vehículos

## 3 Estado de la Técnica

---

El objeto de esta tesis doctoral va a dirigir el estudio del estado de la técnica en aquellas materias que serán de interés para su posterior desarrollo en los capítulos siguientes, en los que se definirá la metodología de estudio y se diseñará e implementará el sistema de cálculo junto con los algoritmos de procesamiento de los datos de los sensores BT.

Por lo tanto, en la primera parte de este capítulo se ha realizado una sucinta descripción de los sistemas de gestión de tráfico avanzados (ATMS, del inglés Advanced Traffic Management Systems) en el que se enmarcarán las enormes posibilidades que ofrece el uso de sistemas de identificación de vehículos.

En la segunda parte del capítulo se han descrito los distintos sistemas existentes para la identificación de vehículos, analizando las ventajas e inconvenientes que presenta cada uno de ellos. Para continuar el capítulo se ha analizado el estándar BT en los aspectos de interés para el estudio y en su aplicación a los ATMS, y se ha realizado una revisión de los algoritmos utilizados para el tratamiento de los datos de los sensores BT, en su aplicación al cálculo de parámetros de movilidad.

En la parte final del capítulo se han analizado los simuladores de tráfico como base para definir los escenarios de pruebas que se utilizarán para validar el uso de los sensores BT para el cálculo de las matrices O/D y para comprobar la funcionalidad del que se desarrolle. Por último, se ha realizado un estudio de los principales sensores BT existen actualmente aplicados al transporte, con el objetivo de analizar la arquitectura que implementan y sus características físicas y funcionales.

### **3.1 Evolución de los sensores en los sistemas de gestión de tráfico**

Los sistemas de gestión de tráfico han sufrido una evolución muy importante en las últiXXX décadas, principalmente debido a los avances tecnológicos que se han desarrollado en la sociedad y que han encontrado su nicho de aplicación en la gestión del tráfico.

Desde la primera parte del siglo XX, los sistemas de gestión de tráfico fundamentaban toda la toma de datos de tráfico a un único sensor, las espiras de lazo de inducción magnética. Esta tecnología se instauró como un estándar en los sistemas de transporte de todo el mundo, y a día de hoy aún sigue aplicándose.

El funcionamiento de estos dispositivos es sencillo, una espira creada con un cable eléctrico se instala incrustada en la capa de rodadura de la carretera. Se le hace circular una corriente eléctrica por su interior y una tarjeta electrónica conectada en sus extremos detecta las variaciones del campo magnético de la espira que genera la XXXa metálica de los vehículos cuando pasa por encima de ella.

Este tipo de sensores permitieron realizar contajes de vehículos, clasificarlos según su longitud y tener una valoración de los tiempos de ocupación de la espira, lo que ofrecía una aproximación de la ocupación de la vía o nivel de congestión. El siguiente paso fue la instalación de pares de espiras por carril, de tal forma que además se podía calcular el tiempo que tardaba en pasar el vehículo por las dos espiras, al conocerse la distancia entre ellas, se obtenía la velocidad de los vehículos. Este último valor permitió la obtención de parámetros de tráfico, como fueron los niveles de servicio, muy útiles para la información a los usuarios. Además

permitió detectar incidencias de tráfico, normalmente por las consecuencias que estas producían.

A pesar de que las espiras magnéticas han sido un referente en la sensorización de la carretera, no están exentas de problemas en su instalación y conservación. Estos sensores son considerados de tipo invasivo, ya que para su instalación se requiere realizar un corte total del tráfico en los carriles o secciones en las que se instala, ya que normalmente, se requiere realizar un corte en las capas superiores de la calzada para su instalación. En la conservación, cuando se realiza el fresado de la capa de rodadura en las campañas de reasfaltado se rompe la espira y tiene que ser repuesta una vez extendida la nueva capa. Además, en carreteras con una alta intensidad de tráfico, y principalmente de vehículos pesados, genera roturas periódicas de las espiras.

Estas son algunas de las razones que han influido en que haya existido siempre un campo de investigación enfocado a la obtención de nuevos sensores de tráfico menos invasivos, más fáciles de instalar y mantener. De tal forma que cada nuevo avance de la tecnología se aplicaba a este campo y se estudiaba su uso y viabilidad.

Una de las primeras tecnologías en introducirse en este campo fue el procesamiento de imágenes de vídeo. El estudio de esta tecnología aplicada al tráfico fue muy potenciado por proyectos de investigación de la Unión Europea desde finales de los años 80 y principios de los años 90. Proyectos como INVAID, INVAID II y ARTIS tuvieron financiación para el desarrollo, prototipado e instalación de este tipo de sensores. Los estudios basados en procesamiento de imágenes se centraron en los siguientes tipos de aplicación:

- Contaje de vehículos intentando emular la funcionalidad de las espiras magnéticas (J. Blosseville et al., 1989).
- Detección Automática de Incidentes (DAI) cuyo objetivo era la detección de incidentes (parada de vehículo, peatones en calzada, congestión, vehículo lento, caída de carga) (Blosseville, 1994).

- Identificación de vehículos mediante el reconocimiento automático de la matrícula. Los primeros estudios de este tipo de sensores se realizaron para el cálculo de tiempos de viaje (Kanayama et al., 1991) o para el cálculo del precio del peaje de un recorrido en un tramo de autopista (Fahmy, 1992)

Los sensores basados en procesamiento de imágenes han ido evolucionando a la par que ha evolucionado el hardware de procesamiento y los algoritmos de tracking de objetos, así como los de Reconocimiento Óptico de Caracteres (OCR, del inglés Optical Character Recognition). Actualmente es una tecnología madura, presente en el mercado y que es ampliamente utilizada para diversas aplicaciones, como es la detección automática de incidentes en túneles, la identificación de vehículos para el pago de aparcamientos, peaje o para el cálculo de tiempos de viaje o la generación de matrices O/D.

Otra rama de estudio en la sensorización se ha basado en el análisis de la variación que produce la XXXa metálica del vehículo en el campo magnético terrestre en el punto de medida, de esta forma se puede contar el número de vehículos que pasan por el sensor. La aplicación es muy similar a la que puede realizarse con las espiras magnéticas. Actualmente, la investigación en este campo se está centrando en conseguir obtener la huella magnética del vehículo y la identificación unívoca de cada vehículo por su huella, con lo que se conseguiría un seguimiento del mismo por diferentes puntos de medida. Este tipo de aplicación tendría resultados similares a los que se obtienen con un ANPR.(Cirilo et al., 2013) (Taghvaeeyan et al., 2014)

La aplicación de la tecnología RADAR (RADio Detection And Ranging) al tráfico se viene realizando desde la aparición de los primeros equipos para la sanción de infracción por exceso de velocidad. Sin embargo, posteriormente se ha estudiado su aplicación como sensor, siendo su aplicación algo limitada a los productos comerciales, ya que es una tecnología con un alto coste de implantación. Estos sensores permiten obtener el contaje de vehículos, su clasificación por la longitud, su velocidad y la ocupación, pero no pueden identificar de forma unívoca los vehículos, ni tampoco detectar un vehículo parado. Actualmente se utilizan radares láser que permiten una mayor precisión en la detección al ser más direccionales.

También se han investigado con cierto detalle la aplicación de sonido e infrarrojos en la sensorización de tráfico. En todos los casos, estas tecnologías han obtenido resultados similares a los que se obtienen con las espiras magnéticas, pero introduciendo la mejora que supone que no sean elementos invasivos y que pueden ser instalados sobre elementos situados en el lateral o sobre la propia calzada. También se han desarrollado aplicaciones comerciales en las que los sensores combinan varias de estas tecnologías, complementándose y mejorando los resultados obtenidos por las espiras.

Actualmente la evolución de los sistemas inalámbricos ha permitido la incorporación de los dispositivos BT y WIFI embarcados en los vehículos como base para la detección, identificación y seguimiento de los vehículos. Este tipo de sensores será ampliamente descrito en apartados posteriores.

## **3.2 Arquitectura de los sistemas de gestión de tráfico**

La arquitectura de los sistemas de gestión de tráfico actuales está basada en una red de sensores, de equipos de información, y equipos de procesamiento y comunicaciones instalados en la carretera, conectados con un Centro de Gestión de Tráfico (CGT).

Los sensores que mayoritariamente hay instalados en las carreteras son espiras magnéticas, basadas en lazos de inducción magnética, que se suelen instalar a pares por carril. Estos elementos están conectados a una placa detectora que genera un pulso cada vez que detecta un vehículo sobre cada una de las espiras que controla. Esta información se envía a un equipo de procesamiento que está situado en la carretera junto a los detectores, que se denomina Estación de Toma de Datos (ETD). Este equipo está estandarizado por AENOR(AENOR, 2004).

La ETD procesa los pulsos que le llegan desde los detectores y en función de la distancia entre las espiras y el tiempo de ocupación de cada espira proporciona información básica de tráfico:

- Contaje de vehículos clasificados en varias categorías.
- Velocidad media de los vehículos clasificados en varias categorías.

- Ocupación.
- Sentido de circulación.
- Detección de vehículo kamikaze.
- AlarXXX por congestión al aplicar algoritmos.

La información básica es integrada en periodos configurables, este periodo de integración suele ser configurado entre 1 y 5 minutos, y enviada al CGT. La ETD normalmente se encuentra integrada en un equipo de nivel superior denominado Estación Remota Universal (ERU), equipo a través del cual envía la información hasta el CGT.

Las funcionalidades que tiene asignada la ERU es de gestionar y controlar los equipos sensores y de señalización instalados en la carretera, como son las espiras magnéticas, los paneles de mensaje variable, las estaciones meteorológicas, etc.

También realiza la gestión de las alarXXX que pueda generar el propio equipo así como los sistemas conectados a ella, principalmente hace de concentrador de datos y señales, y XXXXXXXXr de órdenes a los equipos instalados en la carretera. También adapta los protocolos de los equipos conectados a ella para su comunicación con el CGT.

La ERU está formada por un PC industrial, cuyas características pueden variar en función de la antigüedad, pudiendo encontrar en la actualidad equipos con procesadores Pentium, a los más modernos que montan i3 o i5. Dispone de memoria RAM que va de 512 Mb a varios Gb, disco duro de cientos de Mb y algo muy importante una conexión de comunicaciones con el CGT de 10/100/1000Mbps. Esta comunicación se suele realizar través de un switch que se conecta a la red de comunicaciones de tráfico.

El sistema operativo de la ERU es normalmente un sistema operativo para sistemas embebidos en tiempo real tipo QNX o similar.

Normalmente las remotas funcionan a 100/1000Mbps hasta un elemento de conmutación de fibra que se instala en un Nodo Concentrador Local (NCL) que conecta la red de ERU a la red troncal de fibra del sistema de control de tráfico, cuyo ancho de banda suele ser de 1/10 Gbps.

El ancho de banda que consumen las remotas es muy pequeño, ya que la información que envían y reciben es tipo texto y muy reducida. Los paquetes que se intercambian de datos, alarXXX y ordenes entre la ERU y el CGT son muy pequeños, pocos bytes y con una frecuencia muy baja.

En la Imagen 1, se representa el tráfico real de la red troncal entre dos NCL de la red de tráfico de Bilbao, donde se puede observar que el tráfico es siempre menor de 0,9 Kbps.

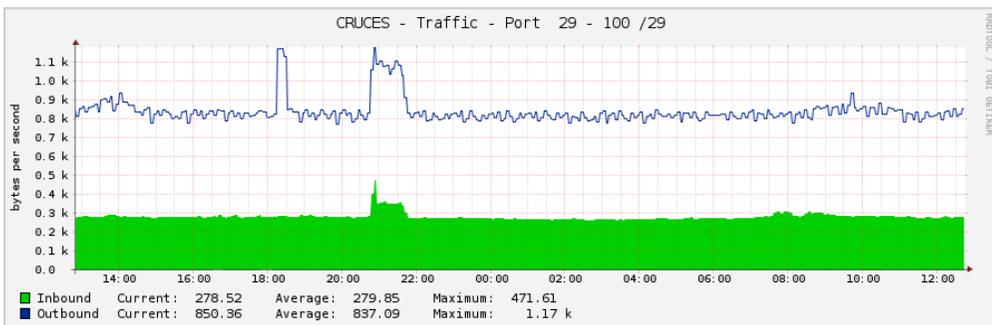


Imagen 1: Tráfico de 24 horas en el interfaz 29 de Cruces, Trunk al NCL Santurce.

En la Imagen 2 se muestra el tráfico entre dos de los enlaces más importantes de la red de tráfico de Bilbao, el enlace de Cruces y el CGT de MalXXXín. El tráfico medio no supera 1,2 Kbps y el valor máximo detectado fue de 1,93 Kbps

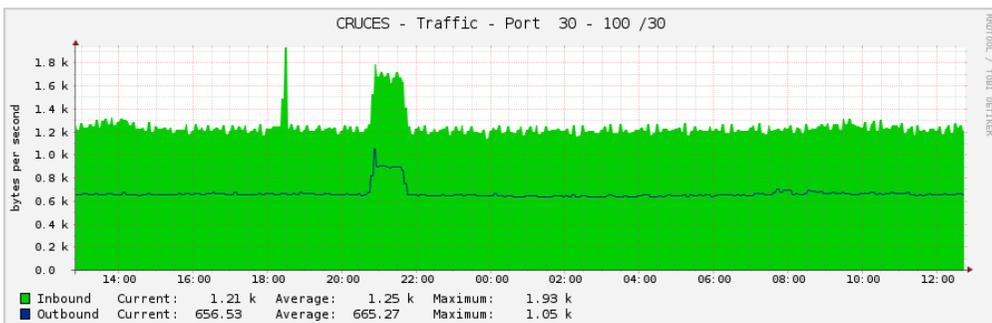


Imagen 2: Tráfico de 24 horas en el interfaz 30 de Cruces, Trunk al NCL MalXXXín



### **3.3 Tecnologías para la identificación automática de vehículos**

En este punto del estado del arte, se ha considerado que es necesario hacer una sucinta descripción de las distintas tecnologías existentes que permiten la Identificación Automática de Vehículos (AVI, del inglés Automatic Vehicle Identification), analizando sus semejanzas y diferencias con la tecnología utilizada en este estudio. Ya que en el análisis de los algoritmos y de la validez de la solución se ha considerado que era importante no circunscribirse solo a los relacionados con la tecnología inalámbrica BT, y extenderlo a aquellos estudios que usen tecnologías que generen datos equivalentes.

Todos ellos tienen un aspecto en común que no se va a tratar de forma individual, como es el hecho de que se basan en la instalación de sensores en la infraestructura o próxima a ella para poder obtener la identificación del vehículo.

Lo que diferencia a estos sistemas entre sí es la tecnología usada para seleccionar el identificador del vehículo, como puede ser la lectura automática de la matrícula, la obtención de su huella magnética, o identificadores únicos de dispositivos embarcados como son los On Board Unit (OBU) de peaje automático, la MAC de dispositivos BT o WIFI.

En todos estos casos se registra un identificador que hace referencia a un vehículo junto a un tiempo de detección, lo que permite realizar el seguimiento del vehículo a lo largo de su recorrido por la red de carreteras sensorizada. El tratamiento de estos datos permite una gestión e información de tráfico más eficiente y también se puede afirmar que veraz.

#### **3.3.1 Pago automático de peajes (DSRC)**

Los sistemas de pago automático de peaje basados en tecnología Dedicated Short Range Communications (DSRC) funcionan en la banda de 5.8 Ghz. Para poder usar este tipo de tecnología, es necesaria la instalación en los vehículos de un dispositivo llamado OBU, que intercambia información con una antena situada

sobre cada carril. Cada OBU tiene un identificador único, lo que permite realizar el seguimiento del vehículo que lo lleva instalado.

Los aspectos más relevantes de esta tecnología en relación a su uso como sensor para el cálculo de parámetros de movilidad son:

- No todos los vehículos llevan embarcado un OBU para el pago de peaje automático.
- El índice de penetración suele ser bajo, muy ligado a la presencia de autopistas cercanas a los puntos de medida.
- Normalmente si un vehículo lleva un OBU de peaje, este es único.
- Es un sistema que requiere una instalación compleja, alimentación eléctrica, pórtico, una antena por carril, etc.
- Es un sistema cuyo coste de instalación se puede considerar alto.
- La privacidad del usuario se puede ver comprometida, ya que se puede establecer la relación entre cada OBU con su propietario.

Los datos que proporciona este tipo de sensor:

- Contaje de vehículos que portan el dispositivo.
- Identificador único de vehículo y hora asociada al momento de la medida.
- Punto Kilométrico de la medida.
- Sentido de circulación.

Los problemas que presenta este tipo de sistemas son:

- Se requiere de una instalación importante, con un coste alto de instalación.
- Requiere la instalación de un dispositivo en el vehículo.

- Problemas asociados con la privacidad, ya que existe la posibilidad de asociar el vehículo y el itinerario con una persona o entidad concreta, el propietario del OBU.
- No todos los vehículos van a ser detectados.

Por el contrario esta tecnología presenta las siguientes ventajas:

- La identificación unívoca del vehículo, asociado a su propietario, puede resultar una ventaja si se desarrollan aplicaciones de seguridad, sanción o de pago (peaje, listas negras de vehículos robados, vehículos sin ITV o seguro, etc).
- La precisión en el cálculo del tiempo de viaje es alta.

### 3.3.2 Reconocimiento automático de matrículas (ANPR)

A diferencia de los sensores clásicos, que solo pueden proporcionar velocidades, contaje y volumen de tráfico, estos sensores son totalmente adecuados para la obtención de matrices O/D y tiempos de viaje, ya que realizan la identificación de cada uno de los vehículos que pasan por un punto de medida y permite realizar el seguimiento de su trayectoria a la largo de la red de carreteras donde están instalados estos sistemas.(Friedrich & Schlaich, 2008)

Estos sistemas se basan en la identificación automática de la matrícula de cada vehículo mediante las imágenes que proporciona una o varias cámaras de televisión instaladas en un pórtico en la carretera, ver Imagen 4. Las imágenes son enviadas a un equipo de procesamiento local, situado normalmente en el arcén de la carretera, en el que se procesa la señal de video y se obtiene la información asociada a cada vehículo: datos de la matrícula, hora y fecha del registro y localización del sensor.

Estos datos se almacenan en una base de datos central y son usados por los algoritmos de gestión de tráfico, desarrollados en el CGT, para extraer de ellos el tiempo de viaje de la red de carreteras que tiene instalados los sistemas ANPR, así como las matrices O/D.



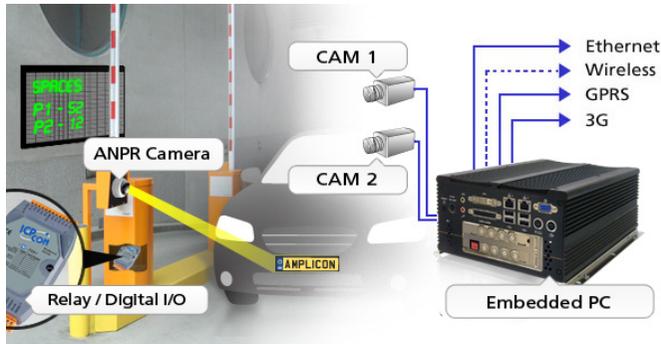


Imagen 6. Ejemplo sistema ANPR

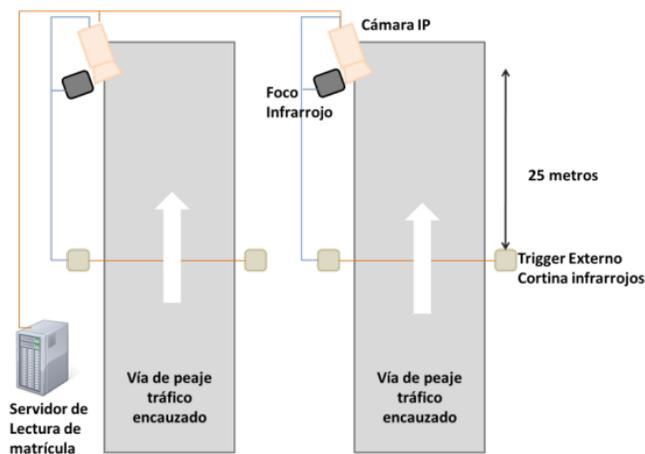


Imagen 7: Esquema sistema ANPR aplicación peaje

Los aspectos más relevantes de esta tecnología en relación a su uso como datos para el cálculo de los parámetros de movilidad son:

- Normalmente solo existe una matrícula en el vehículo, salvo vehículos articulados que disponen de dos matrículas, la de la cabina tractora y la del remolque. También existen placas para los transportes de mercancías peligrosas que permiten identificar el tipo de material transportado. Esto supone la necesidad de implementar algoritmos de filtrado específicos.
- El índice de detección es muy alto. El estudio realizado por Friedrich demuestra que en la mayoría de las muestras los valores son superiores al 90% (Friedrich & Schlaich, 2008). Estudios más recientes obtienen valores entre el 95 y 97% (Sun et al., 2014). Algunas matrículas sucias o

deterioradas, así como parcialmente ocultas por la carga, provocan problemas en la detección.

- La identificación de matrículas extranjeras puede presentar problemas si tiene una estructura o tipografía distinta, lo que para la aplicación que se estudia en esta tesis no sería un inconveniente. Sin embargo, para las aplicaciones de sanción o de peaje sí supondría un problema.

Los datos que proporciona este tipo de sensor son:

- Contaje de vehículos totales.
- Lectura de la matrícula y hora asociada al momento de la medida.
- Punto Kilométrico de la medida.
- Sentido de circulación.

Los problemas que presenta este tipo de sistemas son:

- Dificultades asociadas al procesamiento de imágenes en exterior.
- Se requiere de una instalación importante, se utiliza para grandes corredores debido a su alto coste de instalación (Schlaich, 2010). No parece viable su uso para cubrir todas las entradas y salidas de una red de cierto tamaño.
- Problemas asociados con la privacidad, ya que existe la posibilidad de asociar el vehículo y el itinerario con una persona o entidad concreta, la propietaria del vehículo.
- No existe un standard internacional que regule este sistema (Gurney et al., 2012).

Por el contrario esta tecnología presenta las siguientes ventajas:

- Permite la detección de prácticamente todos los vehículos que circulan por la zona de detección. Hay varios estudios que demuestran la validez de este sistema para el seguimiento de vehículos, tanto en urbano como en interurbano. En el estudio realizado por Jie (Jie et al., 2011) se compara con GPS.
- La identificación unívoca del vehículo, asociado a su propietario, puede resultar una ventaja si se desarrollan aplicaciones de seguridad, sanción o de pago (peaje, listas negras de vehículos robados, vehículos sin ITV o seguro, etc).

### 3.3.3 Registro Electrónico de Vehículos (ERI)

La identificación de vehículos mediante la matrícula electrónica de vehículos se basa en la identificación unívoca de un vehículo a través de un identificador asociado al vehículo y que el vehículo puede comunicar, mediante un medio inalámbrico, a un dispositivo externo.

El identificador del vehículo sería asignado por la administración pública, tal y como se hace con la matrícula física que lleva cada vehículo que circula por la carretera. Esto permitiría la identificación unívoca de cada vehículo y se podría asociar la información con el propietario del vehículo, de forma similar a como se haría con un sistema ANPR.

Las ventajas e inconvenientes son similares a los que se encuentran con los sistemas ANPR, sin embargo se eliminarían los problemas asociados al procesamiento de imágenes.

Los aspectos más relevantes de esta tecnología en relación a su uso como datos para el cálculo de los parámetros de movilidad son:

- Identificación unívoca del vehículo.
- El índice de penetración dependerá de la exigencia normativa.

Los datos que proporcionará este tipo de sensor son:

- Contaje de vehículos.
- Lectura de la matrícula y hora asociada al momento de la medida.
- Punto Kilométrico de la medida.

Los problemas que presenta este tipo de sistemas son:

- El índice de penetración dependerá de la exigencia normativa. Es necesario que se tomen decisiones políticas a nivel europeo, ya que su implantación debe ser promovida por la administración pública, que es la responsable de la gestión y administración de los identificadores. Actualmente no se dispone de una fecha en firme de la posible implantación en el ámbito europeo o mundial.
- Problemas asociados con la privacidad, ya que existe la posibilidad de asociar el vehículo y el itinerario con una persona o entidad concreta, la propietaria del vehículo.

Por el contrario, esta tecnología presenta las siguientes ventajas:

- Permitirá la detección de prácticamente todos los vehículos que circulan por la zona de detección.
- La identificación unívoca del vehículo, asociado a su propietario, puede resultar una ventaja si se desarrollan aplicaciones de seguridad, sanción o de pago (peaje, listas negras de vehículos robados, vehículos sin ITV o seguro, etc).
- Los estándares de este sistema han sido definidos a nivel mundial por ISO y AENOR, siendo algunos de ellos idénticos al resto de sistemas de identificación automática de vehículos (normas ISO 14814 a 14816) y otras específicas a este sistema concreto (ISO 24534-1 al 24534-5). En estos estándares se fijan la arquitectura, estructuras de datos y funcionalidad,

requisitos operacionales, interfaces, datos relacionados con el vehículo y seguridad (usando técnicas simétricas y asimétricas).

Para la comunicación entre el dispositivo embarcado y el equipo externo se pueden usar diferentes tecnologías, resaltar el estudio realizado en el Instituto de Robótica en el que se analizaron 3 tecnologías distintas para la transacción, (Soriano et al., 2007) RFID, BT y WIFI. El sistema físico propuesto en esta tesis, podría ser usado para la lectura de la matrícula electrónica implementando los protocolos fijados en la norma.

### 3.3.4 Dispositivos Bluetooth y WIFI

En este apartado solo se van a analizar las ventajas e inconvenientes de estas tecnologías para su uso como sensor de tráfico, con objeto de poder comparar el estudio realizado con el resto de tecnologías. Ya que la descripción detallada de esta tecnología se realiza en los apartados siguientes.

Los aspectos más relevantes de esta tecnología en relación a su uso como datos para el cálculo de los parámetros de estudio son:

- No todos los vehículos llevan embarcado un dispositivo que tenga activado en modo escucha el BT o activado el WIFI.
- El índice de penetración es cada vez más alto.
- Pueden detectarse varios dispositivos BT/WIFI por vehículo.
- La instalación de este sistema es muy sencilla y de bajo coste.

Los datos que proporciona este tipo de sensor son:

- Contaje de dispositivos en la zona de alcance del sensor.
- Identificador único de dispositivo (MAC) y *timestamp* asociado al momento de la medida.

Los problemas que presenta este tipo de sistemas son:

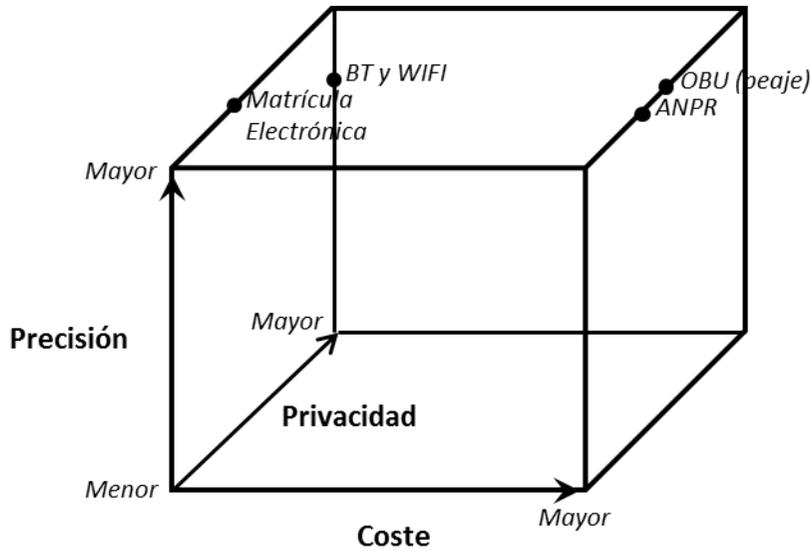
- El índice de penetración no está estabilizado y no es constante.
- No se identifica directamente al vehículo.
- Detecta tanto dispositivos embarcados en los vehículos como fuera de ellos.

Por el contrario, esta tecnología presenta las siguientes ventajas:

- Coste bajo del equipo y de su instalación.
- Se instala muy rápidamente.
- No se requiere instalar equipos en el vehículo.
- Se asegura la privacidad de los usuarios de la vía.
- Permite obtener tiempos de viaje y matrices O/D.

### 3.3.5 Conclusiones

Las principales ventajas que plantea la tecnología BT frente al resto de tecnologías existentes son: el bajo coste, la sencillez de la instalación y la mayor privacidad. Por el contrario, las principales desventajas son: que no todos los vehículos van a ser detectados y se detectarán dispositivos que no corresponden con un vehículo. En la Imagen 8 se muestra la relación entre el coste, privacidad y precisión existente entre las distintas tecnologías para la identificación automática de vehículos.



*Imagen 8: Relación entre el coste privacidad y precisión de las tecnologías de identificación automática de vehículos (Porter et al., 2011)*

### 3.4 Sensores Bluetooth

El objetivo de esta tesis es utilizar la tecnología BT como fuente de datos para la obtención de matrices O/D, por lo tanto es necesario entender cómo funciona esta tecnología y cómo se aplicaría al problema planteado. En este apartado se estudia la tecnología BT, el proceso de comunicación entre dos dispositivos BT, principalmente la fase inicial del emparejamiento, la aplicación de la tecnología BT a la toma de datos en un sistema de transporte y aquellos aspectos del sensor BT que pueden influir en una mejor tasa de detección.

#### 3.4.1 Descripción de la tecnología Bluetooth

Bluetooth es un protocolo de comunicaciones de corto alcance (802.15.1) que trabaja en una de las bandas Industrial, Scientific and Medical (ISM) definida por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, del inglés International Telecommunication Union), organismo especializado en Telecomunicaciones de las Naciones Unidas.

Este protocolo fue diseñado para dispositivos electrónicos de bajo consumo y para comunicaciones de corto alcance, inicialmente se diseñó para eliminar los cables de

comunicaciones entre dispositivos electrónicos próximos entre sí. La comunicación entre los dispositivos se realiza mediante microondas, lo que permite que se pueda establecer comunicación entre equipos aunque no haya visión directa entre ellos.

El rango de comunicaciones entre dos dispositivos BT depende de varios parámetros: la potencia de emisión del equipo transmisor, la sensibilidad del equipo receptor y el porcentaje de absorción del medio de transmisión.

La banda en la que trabaja BT está definida entre 2,4 GHz y 2.485 GHz. Esta banda de frecuencia puede ser usada sin necesidad de licencia y es común a todo el mundo. La frecuencia que usa BT está compartida con otras tecnologías inalámbricas, como WIFI, NFC, etc. Para evitar interferencias entre los distintos dispositivos que comparten este ancho de banda y así conseguir una transmisión más eficiente, los dispositivos BT implementan la técnica de modulación de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS, del inglés Frequency Hopping Spread Spectrum).

En la mayoría de países esta banda de frecuencias está dividida en 79 frecuencias o canales distintos. Sin embargo, en España solo se dispone de 23 canales. El ancho de banda de cada uno de estos canales está fijado en 1 Mhz. Un dispositivo BT salta de una frecuencia a otra hasta que encuentra una libre, sobre la que recibe y transmite la información. La frecuencia de salto es de 1600 veces por segundo, lo que permite un slot de tiempo de  $625\mu\text{s}$  por canal, de esta forma, si se produce un problema de comunicaciones en un canal, debido a la pérdida de la señal o a interferencias, se pasa a otro canal mejorando la transmisión de datos entre los equipos.

Para que dos dispositivos BT establezcan comunicación, primero se realiza el emparejado o sincronización de los dispositivos, a partir de ese momento los dos dispositivos van saltando de un canal a otro siguiendo el patrón que fija uno de los dispositivos que recibe el nombre de dispositivo maestro, el resto de dispositivos que se conectan con él reciben el nombre de esclavos.

Los dispositivos BT se suelen conectar creando pequeñas redes (Piconets) formadas por un dispositivo que hace de maestro y hasta 7 dispositivos esclavos.

Estos dispositivos se clasifican en 3 clases, tal y como se muestra en la Tabla 1, cuya característica diferenciadora es la potencia máxima permitida de emisión y por lo tanto de su alcance aproximado.

	Potencia máx emisión (mW)	Potencia máx emisión (dBm)	Alcance (Aproximado)
Clase 1	100 mW	20 dBm	≈100m
Clase 2	2.5 mW	4 dBm	≈10m
Clase 3	1 mW	0 dBm	≈1m

*Tabla 1. Clasificación equipos Bluetooth*

Los dispositivos de las 3 clases son totalmente compatibles entre sí. Los rangos de comunicaciones son los valores mínimos a los que tiene que trabajar cada clase. Los trabajos que realizaron Murphy et al., 2002 demostraron que todos los equipos probados, de las clases 1 y 2, cumplían los rangos fijados en la norma y que llegaban incluso a establecer comunicación a distancias máxiXXX de 250 m para la clase 1 y de 122 m para la clase 2.

Los equipos portátiles como móviles, *smartphones*, navegadores, manos libres, pensados para comunicarse con otros dispositivos situados en el interior del vehículo o de una habitación, son de clase 2. Los equipos que se usan para escanear equipos BT embarcados son de tipo 1, por lo tanto, pueden llegar a detectar un equipo BT a una distancia de 250 m desde su posición, permitiendo la detección de equipos embarcados en vehículos que circulan a alta velocidad.

Cada dispositivo BT dispone de una dirección MAC. Esta dirección es única y está formada por un identificador de 48 bits. La dirección la forman 6 octetos, en los que los 3 primeros se utilizan para identificar al fabricante llamados OUI (Organizationally Unique Identifier) y los 3 restantes son usados por el fabricante para asignar una dirección única para cada uno de los equipos que fabrica.

El escáner puede leer el Identificador MAC del dispositivo BT, pero no dispone de información sobre en qué punto de su rango de alcance se encuentra el dispositivo. En función de la velocidad de los vehículos, del alcance del sensor BT y de la sensibilidad del dispositivo BT, en muchas ocasiones se realizarán varias lecturas de la misma dirección MAC con tiempos de paso muy próximos. Es decir, no se

dispone de información de la distancia entre el equipo BT y el escáner BT que lo ha detectado. El error máximo que se comete en este caso es la distancia máxima a la que puede realizar una detección, alrededor de 250m, que no siempre es igual ni para el mismo dispositivo, ya que entre otras aspectos también influye el coeficiente de absorción del medio que es cambiante.

La conexión de los dispositivos BT se hace siguiendo una jerarquía maestro-esclavo. Un dispositivo BT tiene dos estados principales, estado de espera, *standby*, y estado de conexión en el que hay siete modos o subestados:

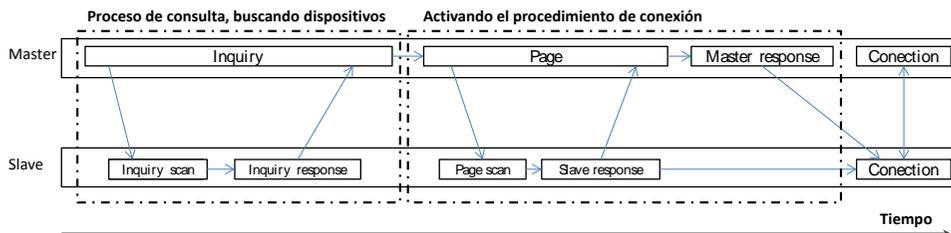
- Estado espera: estado en el que no hay interacción con otro dispositivo.
- Estado de conexión: estado en el que el dispositivo está transfiriendo datos con otro dispositivo. Los modos dentro de este estado son:
  - Inquiry.
  - Inquiry-scan.
  - Inquiry – response.
  - Page.
  - Page scan.
  - Slave – response.
  - XXXter – response.

En la Imagen 9 se muestra el modelo simplificado del procedimiento de conexión de dos dispositivos BT:

1. El dispositivo Maestro, el sensor BT, activa el modo *Inquiry* para encontrar todos los dispositivos, dentro de su alcance, que estén en modo *Inquiry scan*, enviando un paquete que contiene su MAC y hora.
2. Si existe un dispositivo Esclavo, un manos libres, un *smartphone*, etc., en modo *Inquiry scan*, recibe el paquete enviado por el Maestro. Entonces el

Esclavo cambia al modo *Inquiry response* y envía un paquete con su información al Maestro, entre la información que envía se encuentra el valor de su dirección MAC, el *timestamp* de la detección y el *Inquiry Access Code* (IAC). Una vez enviado el paquete pasa al modo *page scan*.

3. El Maestro, al recibir la información del Esclavo pasa a modo *Page* y remite la información de la secuencia de salto entre las frecuencia, entre otra información, al dispositivo Esclavo encontrado y cambia al modo *XXXter-response*.
4. El Esclavo que está en modo *page scan* recibe la información de la llamada desde el Maestro y cambia su estado al modo *slave-response* para enviar al Maestro su respuesta, el código de acceso del dispositivo.
5. Finalmente, el Maestro que estaba en modo *XXXter-response* al recibir la información del Esclavo remite la información al Esclavo para acabar de establecer la conexión entre los dos dispositivos. A partir de ese momento los dos equipos están emparejados y se puede comenzar a intercambiar información.



*Imagen 9. Modelo simplificado del procedimiento de conexión de dos dispositivos Bluetooth. (Bhaskar & Chung, 2013)*

El proceso de consulta es el que más tiempo dura y también el que más consumo de energía tiene, aspecto muy importante, de todo el proceso de conexión. Hay que destacar que la línea de tiempos no está a escala. El proceso por defecto que sigue un dispositivo BT esclavo es mantener el estado *Inquiry-scan* durante 11,25 ms y si no recibe información de un dispositivo Maestro, pasa a estado *standby* durante un periodo de 1,28 s. Este proceso se repite 8 veces hasta alcanzar los 10,24s.

Los sensores BT, el dispositivo Maestro, solo necesitan identificar de forma unívoca un equipo en una posición y hora determinada. Por lo tanto, solo es necesario de todo el proceso de conexión el proceso de *Inquiry* para que se pueda identificar o detectar a los dispositivos embarcados, es decir los dispositivos esclavos, existentes en su zona de cobertura.

El proceso simplificado que se ha descrito anteriormente se realiza por el sensor BT en una determinada frecuencia de las disponibles en el rango de frecuencias definidas para este protocolo. Una vez finalizado el proceso, salta a otra frecuencia y así sucesivamente, realizando un barrido por todas las frecuencias disponibles. Los saltos entre las distintas frecuencias se realizan a una frecuencia de 1.600 veces por segundo.

El proceso de establecer la comunicación entre el Maestro y el Esclavo no es instantáneo, tal y como se ha visto en la descripción del mismo. El *Special Interest Group* (SIG) de BT recomienda que los dispositivos estén en el modo *Inquiry* durante 10,24 s (SIG, 2014). Sin embargo, varios son los estudios que se han realizado que permiten asegurar que ese tiempo se puede reducir para conseguir resultados muy aceptables, así Langheinrich & Kasten, 2001 realizaron 1.500 pruebas con el objetivo de determinar la distribución en función del tiempo del proceso de *Inquiry*, los resultados demostraron que el 50% de los dispositivos lo completaban en 1,910 s, el 95% a los 4,728s y el 99% a los 5,449 s, lo que reduce casi a la mitad el tiempo propuesto por el SIG. Otro estudio realizado por Peterson et al., 2006, confirmó estos resultados, encontrando que el 99% de los dispositivos eran encontrados por el dispositivo Maestro en 5,12 s y el 99,98% a los 6,4 s.

En el proceso de *Inquiry*, el sensor y el dispositivo intercambian, a parte de la dirección MAC, el valor del *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) y el *timestamp*, información sobre el tipo de servicio y la clase del dispositivo. Esta información está definida en el *Inquiry Access Code* que está formado por 3 octetos, los 11 últimos bits hacen referencia a la clase de servicio, los bits del 8 al 12 a la clase del dispositivo y los bits del 2 al 7 hacen referencia a la subclase del dispositivo. Este código recibe el nombre de Clase de Servicio/Dispositivo (CoD, del inglés code of Device/Service) (SIG, 2014). La descripción del formato del CoD se muestra en la Imagen 10. Esta información es utilizada para filtrar dispositivos BT

que se encuentren en el alcance del dispositivo maestro y así solo intenta conectar con aquellos que son compatibles con el servicio que busca el dispositivo.

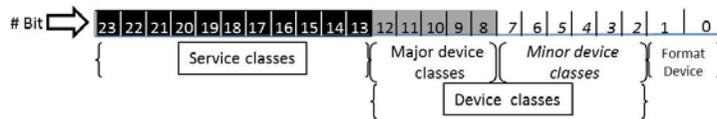


Imagen 10: Formato de la clase de dispositivo y servicio (CoD)

### 3.4.2 Aplicación de la tecnología BT a la sensorización de tráfico

El objetivo de los sensores BT aplicados al transporte es obtener un listado de las MAC de cada dispositivo BT existentes en su zona de detección junto al *timestamp* de la detección.

En esa captura se incluirán, tanto los dispositivos que están embarcados en vehículos, como aquellos que no siendo de interés para el estudio estén en el rango de comunicaciones del sensor, por ejemplo en edificios cercanos. Esto llevará a la necesidad de plantear un filtrado de los datos obtenidos para reducir el ruido que producen estas medidas en los resultados finales.

De todo el proceso de emparejamiento de dos dispositivos BT, tan solo interesa la fase de *Inquiry*, que es donde se obtiene la información antes descrita, MAC y hora. Esta es la razón por la que el Sensor BT se configura para estar en modo *Inquiry* de forma continua durante un periodo prefijado de tiempo que se llama ciclo de *Inquiry*  $C_i$ . En este ciclo el sensor está enviando mensajes de *Inquiry* y está escaneando la respuesta de los potenciales dispositivos que se encuentren en su alcance. El ciclo de *Inquiry* se repite de forma ininterrumpida, creando un tren de consultas, para así asegurar que se detectan el mayor número de dispositivos.

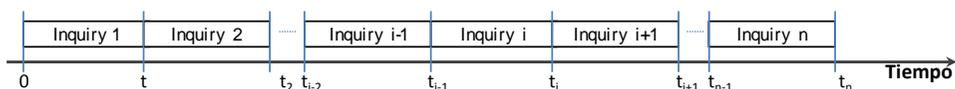
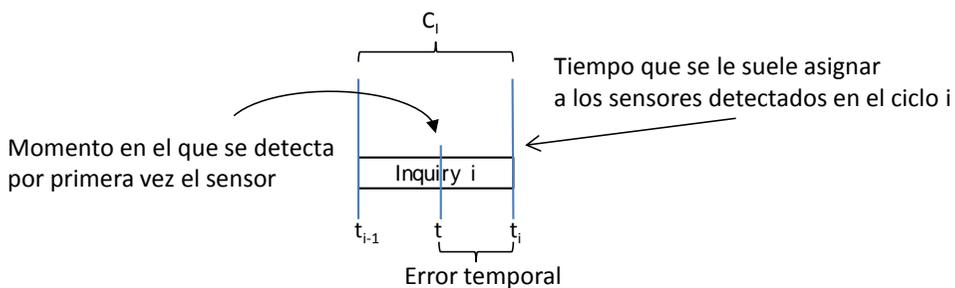


Imagen 11. Ejemplo de tren de consultas del sensor Bluetooth

El protocolo BT está preparado para poder capturar la MAC y la hora exacta en la que se realiza la detección del sensor. Sin embargo, generalmente los sensores

comerciales solo capturan la MAC de los dispositivos BT que detectan, dentro del mismo *Inquiry*, asignándole posteriormente la hora y fecha de comienzo o final del ciclo, ver Imagen 12, normalmente el tiempo de final del ciclo. Esta práctica también se sigue en los sensores clásicos, los detectores basados en espiras magnéticas, a pesar de poder hacerlo, no ofrecen datos individualizados de cada vehículo, los datos que proporcionan normalmente están integrados en periodos prefijados, normalmente entre 1 y 5 minutos. En este último caso, tiene cierta explicación el asumir ese error ya que los datos que proporcionan las espiras son utilizados para cálculos que siempre integran los datos de los sensores como son la ocupación, el conteo de vehículos o los niveles de servicio.



*Imagen 12. Ejemplo de error temporal en la toma de datos sensor Bluetooth*

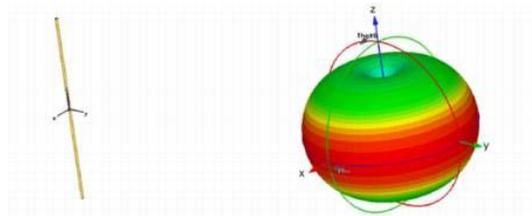
Sin embargo, para los sensores BT no es aceptable esta simplificación para algunas soluciones, por ejemplo para calcular los tiempos de viaje entre sensores próximos, ya que además de este error temporal, se une otro error debido a la imposibilidad de saber en qué punto de la zona de detección se encuentra el sensor del que se ha obtenido su MAC.

### 3.4.3 Influencia de las antenas en la zona de detección

La forma y el tamaño de la zona de detección en la que un sensor BT puede captar dispositivos BT dependen directamente del tipo de antena que se use. En este apartado se ha analizado la influencia de la direccionalidad, la polarización, la ganancia y la posición de la antena en la detección.

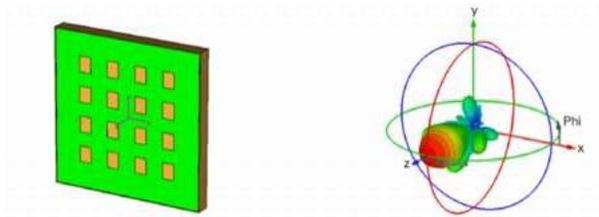
### 3.4.3.1 Direccionalidad de la antena

La direccionalidad de la antena determina la forma de la zona de detección (Raymaps, 2014), así las antenas omnidireccionales transmiten y reciben uniformemente en la dirección horizontal con la misma calidad, creando una zona, ver Imagen 13, alrededor de la misma con las mismas características, el patrón de radiación tiene forma toroidal.



*Imagen 13. Ejemplo patrón 3D radiación antena omnidireccional bi-polar*

Sin embargo, las antenas direccionales maximizan la señal a lo largo de una dirección y suprimen la señal en el resto de direcciones, de esta forma se consigue focalizar sobre una zona muy concreta la recepción y envío de señales.



*Imagen 14. Ejemplo patrón 3D radiación antena direccional*

Los ejemplos expuestos son teóricos, en las instalaciones reales estos patrones se ven afectados por aspectos como la atenuación y las reflexiones de la señal que se producen por la presencia de árboles, edificios, equipamiento, etc., situados en la zona de radiación.

### 3.4.3.2 Polarización de la antena

La polarización de la antena puede ser horizontal, vertical o circular y está definida por la orientación del campo eléctrico radiado por la antena. Varios son los estudios que se han realizado para analizar cómo influye la polarización en la detección, en

el estudio realizado por Porter et al., 2011, se determinó que los mejores resultados se obtenían con antenas con polarización vertical en lugar de las circulares.

### 3.4.3.3 La ganancia

La ganancia de la antena determina en gran medida el alcance de la zona de detección de un sensor BT. Se define el alcance de un sensor BT como la máxima distancia, en una dirección dada, a la que el sensor puede comunicarse con un dispositivo BT de forma eficiente. En los estudios realizados por Bhaskar & Chung, 2013 se obtuvieron los siguientes valores de alcances en función de la ganancia de la antena:

Ganancia antena (dBi)	Alcance (m)
3	35
9	100
20	150

*Tabla 2. Alcance comunicación BT en función de la ganancia de la antena*

Los estudios realizados por Porter et al., 2013, analizaron 5 tipos diferentes de antenas para determinar de qué manera influía la ganancia y la polarización de la antena en la cantidad y calidad de los datos obtenidos. En su caso, para el cálculo de tiempos de viaje usando la MAC de los dispositivos BT. Los resultados que obtuvieron indicaban que estos parámetros sí afectaban a los resultados, obteniéndose que las antenas que mejores resultados proporcionaron fueron las antenas de ganancias entre 9 y 12 dBi y con polarización vertical.

### 3.4.3.4 La localización de la antena

Los estudios realizados por Malinovskiy et al., 2010 para evaluar la influencia de la separación horizontal de las antenas, en la determinación de los tiempos de viaje de un tramo de 1,6 Km, determinaron que para reducir errores aleatorios en los resultados se necesitaría que los sensores estuviesen instalados a distancias mayores. Sin embargo, este problema no sería de aplicación a las matrices O/D.

También realizaron una propuesta sobre la posición vertical de la antena, argumentando que los materiales del vehículo producen una atenuación diferente

de la señal BT, provocando mayor atenuación los elementos metálicos que los plásticos o cristales, por lo tanto propusieron la instalación de las antenas a la altura de las ventanillas de los vehículos.

Respecto a la localización vertical de la antena, Brennan et al., 2010, realizaron un estudio posicionándola en un poste de 3 m a diferentes alturas, a intervalos de 75 cm. El experimento demostró que los mejores resultados se presentaban entre los 2,25 m y los 3 m, siendo la posición óptima los 2,5 m. También se analizó como influía la posición de la antena respecto a los carriles de circulación, instalando la antena a 5,5 m del primer carril y a 34,7 m del último carril y modificando su posición vertical. Los resultados demostraron que cuando la antena se situaba a la altura de la calzada, la mayoría de las MAC se detectaban de los carriles más próximos, un 64%. También se comprobó que cuando se instalaba la antena a mayor altura sobre el poste, a 3 m, se conseguía equilibrar estos datos llegando a valores del 52%.

En los experimentos realizados por Puckett & Vickich, 2010, la antena del sensor se encontraba integrada con el sensor dentro de una maleta y se instaló solo en dos posiciones, a nivel del suelo detrás de la NewJersey y sobre ella, los resultados demostraron que la detección mejoraba sustancialmente sobre la barrera de hormigón.

Otro aspecto que se ha estudiado es el relativo a la instalación de varias antenas en un mismo punto de detección, Wieck, 2011, probó a situar dos sensores para cubrir una calzada en el mismo punto de una autopista y sus resultados indicaban que no se mejoraba de forma significativa la detección respecto a los valores que se obtenían de forma individual. Sin embargo, en el experimento realizado por Malinovskiy et al., 2011 determinaron que se mejoraba la detección, pasando de un 9,37% con una única antena a 15,35 % con dos antenas. Además se mejoraba el porcentaje de emparejamiento de MACs, pasando de un 3,43% a un 7,92%, así mismo se obtuvieron menores errores. Los mejores resultados se obtuvieron combinando antenas direccionales con omnidireccionales.

En el caso de Wieck, se podría explicar que no influyera la instalación de varias antenas debido a que las pruebas se realizaron en tramos urbanos en los que las

velocidades de aproximación de los vehículos eran pequeñas y por lo tanto resulta más fácil poder detectar la MAC de los dispositivos. Tal y como determinaron Stevanovic et al., 2014 en su estudio, donde se demostró que se mejora el porcentaje de emparejado de direcciones MAC entre diferentes puntos de detección cuando las velocidades de los vehículos son bajas.

### 3.4.4 Privacidad (LOPD)

Un aspecto a considerar en el uso de las direcciones MAC de los dispositivos BT para la obtención de medidas de parámetros de movilidad y tráfico es la necesidad de garantizar la privacidad de los usuarios propietarios de los dispositivos BT.

Al ser la MAC del dispositivo BT única, teóricamente se podría llegar a asignar la dirección MAC a un usuario. Sin embargo, en la práctica no existen registros donde se registren la dirección MAC del dispositivo con su propietario.

No obstante, como cabría la hipotética posibilidad de que esto ocurriese, en los estudios realizados con sensores BT se han tomado medidas para asegurar la privacidad de los usuarios propietarios de los dispositivos BT usados en la toma de datos.

En los estudios realizados por Porter (Porter et al., 2011) se analizan en detalle las principales tecnologías usadas para el cálculo de tiempos de viaje y se determina que la tecnología BT es la que menos compromete la privacidad de los usuarios frente a sistemas basados en el reconocimiento de matrículas o el tracking GPS. Además establece que la posibilidad de usar la dirección MAC del dispositivo para poder realizar el seguimiento de los usuarios es mínima, ya que:

- El propietario o persona que compra el dispositivo puede ser diferente al que lo está usando.
- Normalmente la compra del dispositivo se realiza sin identificar al propietario, en muchos casos se usa dinero en efectivo para la compra de estos dispositivos.

- No es habitual que exista un registro en el que se asocie la MAC al dispositivo.

En el estudio de Porter se establece el siguiente principio: *“Una aplicación ITS que usa información de los sistemas de los usuarios será válida si el proveedor de servicios sabe que los datos que recibe son exactos y el usuario final sabe que su privacidad está asegurada”*.

Para conseguir este principio, propone cumplir las siguientes condiciones:

- Se deben proteger los datos que se adquieran, se almacenen o se transmitan.
- El usuario debe estar seguro de que su privacidad está asegurada y para conseguir esto propone que los usuarios tengan acceso a los registros (logs) y repositorios de los datos de los usuarios.

En la bibliografía investigada se han encontrado dos propuestas, en el tratamiento de los datos, encaminadas a asegurar la privacidad de los usuarios. La primera de ellas realiza la eliminación de parte de la dirección MAC (Porter et al., 2011). La eliminación de una pequeña parte de la dirección MAC no pone en peligro el seguimiento de la parte de la dirección que se almacena en la red en estudio. La probabilidad de que dos dispositivos en un itinerario compartan la misma parte de la dirección MAC que no ha sido eliminada es mínima.

La otra manera de abordar este problema es mediante la aplicación de un algoritmo de encriptado que haga anónimo el dato con el que se trabaja. Puckett & Vickich, 2010, proponen realizar la encriptación de la dirección MAC en el momento de leerla, antes de almacenarla o procesarla. Como método de encriptación proponen el uso del algoritmo MD5 de encriptación, que proporciona como resultado un número de tamaño fijo, 32 dígitos hexadecimales, y que no proporciona el mismo valor para dos cadenas distintas.

### 3.4.5 Conclusiones

Los estudios realizados hasta el momento con el uso de sensores BT aplicados al transporte han permitido fijar que los mejores resultados se obtienen con antenas direccionales de polarización vertical con ganancias entre 9 y 12 dBi. Respecto a la localización de la antena se mejoran los resultados con alturas superiores a los 2,5 m y si las velocidades de los vehículos son altas es mejor instalar sensores con dos antenas.

El uso de la tecnología BT en la sensorización no pone en peligro la privacidad de los usuarios, ya que no se dispone de registros que relacionen las direcciones MAC con la identidad del portador del dispositivo BT.

En el caso de tener que aplicar alguna medida para preservar la privacidad se optaría por el encriptado de las direcciones MAC ya que ofrece más garantías.

## 3.5 Matrices Origen-Destino

Las matrices O/D permiten caracterizar la demanda de tráfico o de movilidad en un área de una red definida. Esta caracterización normalmente se realiza mediante la obtención de la distribución espacial asociada al movimiento de vehículos entre los distintos pares O/D que se encuentran en dicha región de estudio, en un periodo de tiempo dado (Zhang et al., 2002). La matriz O/D en su forma más simplificada es esencialmente una matriz, en la que si se denota a la matriz O/D de un periodo de integración como  $M(k)$ , entonces:

$$M(k) = \begin{pmatrix} M_{00} & \cdots & M_{0S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{E0} & \cdots & M_{ES} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde,  $M_{ij}$  representaría al número de vehículos que han entrado por la entrada  $i$  y que han salido por la salida  $j$  o a la proporción de los vehículos que entrando por la entrada  $i$  salen por la salida  $j$  respecto al resto de salidas. Siendo  $S$  el número de salidas y  $E$  el número de entradas presentes en la red sensorizada.

La distribución de los viajes entre los orígenes y destinos de una red son una fuente fundamental de información para la gestión y control de tráfico, así como para la planificación y diseño del sistema de transporte.

Las matrices O/D normalmente se clasifican en dos tipos, las matrices estáticas, que representan los tránsitos en la región de estudio, sin centrarse en la distribución temporal. Para ello, toman como base de datos los valores de los flujos de vehículos integrados en largos periodos de tiempo (horas punta, día laboral, día festivo, etc.). Por otro lado, las matrices O/D dinámicas que describen los patrones de tráfico en periodos cortos de tiempo entre pares O/D específicos dentro de una red de estudio.

Las matrices O/D estáticas se han empleado tradicionalmente para tareas de planificación del sistema de transporte, tanto en su construcción como en su gestión. Por otro lado, las matrices O/D dinámicas junto con los modelos de simulación son la base de la gestión dinámica de tráfico, es decir, son la base de los Sistemas de Información de Tráfico Avanzada (ATIS, del inglés Advanced Traveller Information Systems) y de los Sistemas de Gestión de Tráfico Avanzados (ATMS, del inglés Advanced Traffic Management Systems).

### 3.5.1 El cálculo de las matrices O/D

El cálculo de las matrices O/D nunca ha sido una tarea sencilla, hasta la aparición de los primeros sensores de tráfico que permitieron obtener datos de tráfico de forma automática, el procedimiento que se seguía para obtener la matriz O/D era la realización de campañas de encuestas a los usuarios de la red, con encuestas en su domicilio, puesto de trabajo, estaciones de servicio, etc. Este método era muy costoso tanto económica como temporalmente.

Con la instalación de los primeros sensores de tráfico, se empezó a disponer de información automática en puntos XXXXXXXXs por la red viaria. En cada punto donde se instalaba el sensor se disponía de información del número de vehículos y de su velocidad. Esta nueva fuente de información permitió a los investigadores desarrollar métodos de cálculo de las matrices O/D basados en la asignación de tráfico. La base principal de estos métodos era el uso de los datos que

proporcionaban los sensores, espiras magnéticas, XXXXXXXXs de forma estratégica para sensorizar el mayor número de puntos posible de la red de estudio.

El método de asignación de tráfico consiste básicamente en realizar una distribución de la demanda de tráfico en forma de matriz O/D de tal forma que la matriz propuesta reproduzca el tráfico observado. El problema que presentan estos métodos es que el número de pares O/D de la matriz suele ser mayor que el número de puntos de contaje y por lo tanto el sistema de ecuaciones que permitiría obtener la matriz O/D es indeterminado. Incluso aun siendo el mismo número, no sería un sistema independiente, lo que significa en la práctica que no existe una solución única para la matriz O/D que reproduce la demanda de tráfico observada. Para solucionar este problema, los investigadores han propuesto una serie de métodos de estimación cuyo objetivo es encontrar la mejor matriz O/D, de todas las posibles, que reproduzca la demanda de tráfico observado.

Con la evolución de la tecnología, se han desarrollado sistemas que permiten la identificación o localización automática de los vehículos, ya descritos en el apartado 3.3: "Tecnologías para la identificación automática de vehículos". También se ha producido un gran avance en las telecomunicaciones, principalmente en las comunicaciones inalámbricas, lo que ha permitido la entrada de nuevos sensores basados en este tipo de comunicaciones. Los sistemas AVI, ANPR, la localización GPS o uso de los dispositivos de pago de peaje, teóricamente deberían permitir obtener la matriz O/D de forma directa, pero en la práctica su implantación es muy costosa y solo se realiza en tramos muy específicos. Sin embargo, por un lado han servido para verificar los modelos de estimación de matrices O/D y por otro, los nuevos sensores inalámbricos han permitido crear mejores modelos de estimación.

### 3.5.1.1 Métodos de estimación de matrices O/D

Son muchos los estudios presentes en la bibliografía sobre la estimación de matrices O/D. A continuación se describen, de manera no exhaustiva, varios estudios presentes en la bibliografía referidos a los métodos utilizados para la estimación de las matrices O/D. En primer lugar se analizarán los métodos encaminados a la estimación de matrices O/D estáticas para en un segundo paso centrarse en los de estimación de matrices O/D dinámicas.

Entre los métodos de estimación de matrices O/D estáticas más utilizados se encuentran los basados en el principio de máxima entropía (Van Zuylen & Willumsen, 1980), en la inferencia bayesiana (Maher, 1983) y en la generalización de mínimos cuadrados (Cascetta, 1984), etc.

Estos métodos parten de una matriz inicial, que van refinando en función de los datos que disponen y de las hipótesis que se definen en cada método, esto les permite en cada iteración ir obteniendo una matriz que se va ajustando mejor al tráfico observado. Estos métodos tuvieron la gran ventaja de que fueron capaces de ofrecer una matriz O/D con la información de los sensores magnéticos.

La propuesta de Van Zuylen & Willumsen, 1980, basada en el principio de máxima entropía, presenta como ventajas el uso del conjunto completo de datos observados, la posibilidad de incorporar estimaciones de matrices O/D previas, la posibilidad de producir estimaciones incluso cuando se disponía de poca información sobre la distribución de los viajes y su potencial para cumplir con una asignación equilibrada. La desventaja que presentaba era que se asumía que las mediciones de tráfico no tenían errores.

En la propuesta de Maher, 1983, basada en la inferencia bayesiana, se asume que la matriz inicial y el tráfico observado siguen una distribución normal multivariada y que se realiza una asignación de tráfico proporcional. Las ventajas de este método es que permitían establecer el nivel de confianza de la estimación resultante.

En la propuesta realizada por Cascetta, 1984, basada en la generalización de mínimos cuadrados, se asumía la misma hipótesis hecha por Maher, en la que la selección de la ruta sigue un procedimiento proporcional de asignación. La ventaja que introdujo este método es que podía manejar errores producidos al medir los parámetros de tráfico.

La principal desventaja de estos métodos era el sesgo de la matriz estimada debido a los posibles errores existentes en la matriz inicial y al modelo de asignación de demanda.

A pesar de las desventajas que presentan estos métodos de estimación, hay que destacar que fueron pioneras y tuvieron una enorme importancia en la evolución de

los sistemas de transporte, ya que fueron capaces de estimar matrices O/D estáticas usando métodos matemáticos complejos y la información del tráfico que proporcionaban los sensores de tráfico existentes. Estas matrices han sido y siguen siendo fundamentales para las tareas de planificación del sistema de transporte.

Los procedimientos seguidos en el cálculo de las matrices O/D estáticas fueron mejorados y se dio un paso importante al introducir la componente temporal en los cálculos, lo que permitió la obtención de estimaciones de las matrices O/D dinámicas.

La introducción de la variable tiempo en el modelo de asignación de tráfico permitió ajustarse a rutas y flujos de tráfico dinámicos o dependientes del tiempo, obteniendo así las matrices O/D dinámicas o dependientes del tiempo.

En algunos casos, las metodologías usadas para el cálculo de las matrices O/D fueron modificadas para introducir la variable temporal y también se aplicaron nuevos métodos. Los más utilizados han sido las técnicas de optimización matemática (Sherali & Park, 2001)(Tavana, 2001) y más recientemente la aplicación de filtros de Kalman, (Wang & Papageorgiou, 2005), (Antoniou et al., 2007), (Jaume Barceló et al., 2010).

Tal y como ya se ha comentado en el apartado anterior, el avance producido en las TIC ha proporcionado nuevas fuente de datos para la estimación en tiempo real de matrices O/D. El uso de estos nuevos sensores ha ayudado en el proceso de estimación de las matrices O/D dinámicas, ya que se consigue reducir el número de variables a determinar en el sistema de ecuaciones resultante.

Como ejemplo de ello, Kwon & Varaiya, 2005, propuso un método estadístico para estimar matrices O/D dinámicas usando los datos de los OBU del sistema de peaje de una autopista en San Francisco.

Otro ejemplo destacable es el estudio realizado por Jaume Barceló et al., 2010, en el que se analizó la posibilidad de usar los sensores BT para determinar la matriz O/D dinámica y los tiempos de viaje. El estudio no fue concluyente respecto al uso exclusivo de los datos proporcionados por los sensores BT para el cálculo directo de la matriz O/D dinámica. Sin embargo, la precisión que ofrecían los datos del

sensor BT para calcular la velocidad y el tiempo de viaje permitió un uso más eficiente de los filtros de Kalman, ya que simplificaban las ecuaciones necesarias para la estimación de las matrices O/D dinámicas de la red sensorizada, respecto a las que se obtenían usando solo los datos de las espiras magnéticas.

### 3.5.1.2 Cálculo directo de la matriz O/D

La aparición de los sistemas AVI ha supuesto, sin duda, un gran avance en el cálculo directo de las matrices dinámicas O/D. Ya que si se dispone de un sensor que permite identificar de forma directa los vehículos, haciendo un seguimiento por la red del vehículo, se obtendrá la matriz O/D directamente.

Sin embargo, varios factores están influyendo negativamente en su implantación como método habitual de sensorización. El primero de ellos es sin duda el coste económico que requieren estos sistemas, algunos solo a nivel de infraestructura, ANPR, otros incluso precisan de equipos embarcados específicos en el vehículo, OBU peaje. Otro factor es sin duda la complejidad y alcance de la instalación.

Estos factores han influido en que solo se hayan realizado instalaciones en tramos pequeños o en redes con un alto grado de penetración de los dispositivos. Estos sistemas se están utilizando principalmente para estudios direccionales en zonas muy específicas y con instalaciones puntuales.

Por otro lado, el comportamiento de estos sistemas aún no ofrece los resultados esperados. Los estudios realizados con los sistemas ANPR demuestran que su fiabilidad es muy variable, en el estudio realizado por Blogg et al., 2010, se han reportado porcentajes de detección que van desde un 30 a un 90%, según el emplazamiento. Estos sistemas se ven muy influenciados por la meteorología y por las condiciones ambientales de iluminación.

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, los sensores basados en comunicaciones inalámbricas, principalmente BT, se están utilizando cada vez más para determinar los tiempos de viaje y las velocidades medias. Algunos investigadores han planteado estudios para determinar el uso de estos sensores para el cálculo directo de la matriz O/D. El estudio realizado por Jaume Barceló et

al., 2010, planteó dudas sobre su posible uso sin un estudio exhaustivo que determine bajo qué condiciones sería aceptable su uso.

Actualmente solo se tiene constancia de dos estudios que han planteado la posibilidad de usar esta tecnología para el cálculo de la matriz O/D. La investigación realizada por Blogg et al., 2010, en la que se analiza los resultados obtenidos mediante la captura de datos con sensores BT y se comparan los resultados con un sistema ANPR instalado en los mismos emplazamientos. El primer paso que realiza en su investigación es determinar el porcentaje de detecciones de los dispositivos BT respecto al sistema ANPR, del cual se reportaron porcentajes de detección que iban desde el 30% al 90%. Una vez filtrados los datos del sensor BT, en el estudio no se explican los métodos seguidos para el filtrado, se realiza un proceso de expansión del volumen obtenido de los datos, para ello sigue una metodología de dos pasos:

- Cada par O/D dispone de dos estaciones con dos porcentajes de detección distintos. Los porcentajes de detección de ambos emplazamientos se normalizan respecto al que tiene menor porcentaje de captura y ajustado para que represente el porcentaje del 15% de la media de captura de la red de estudio.
- Cada celda de la matriz se expande con un factor  $6,66 * (1/0,15)$  para incrementar el valor normalizado a una estimación del volumen.

Al analizar los datos, comparándolos con los obtenidos por el sistema ANPR, se observaron sobre estimaciones en la expansión. En el estudio se analizaron otras técnicas de expansión con resultados no aceptables. También se indica que hay varios factores que no se han tenido en cuenta, como son problemas en el filtrado de los datos o cómo influye la direccionalidad de la detección para mejorar el proceso de expansión. Como conclusión a su estudio plantean la necesidad de estudiar en mayor detalle la posibilidad del uso de los datos de BT para el cálculo de las matrices O/D. Sin embargo, los datos de la matriz O/D calculada por el sistema BT o por el sistema ANPR siempre tenía una diferencia máxima del 10%.

La segunda investigación existente es la realizada por Canon-Lozano et al., 2012, enfocada a calcular la matriz O/D de los usuarios del sistema de transporte público de Bogotá. En este estudio analizaron un par O/D y analizaron dos rutas para éste par O/D, en ambos sentidos. Los resultados obtenidos de los sensores, una vez filtrados, se consideraron válidos y no se realiza ninguna comparación con otro sistema o método de referencia.

### 3.5.2 Conclusiones

Los métodos de estimación de las matrices O/D han sido y seguirán siendo una pieza fundamental en los sistemas ATIS y ATMS. Sin embargo, necesitan una sensorización muy importante y con un alto coste de instalación y de mantenimiento. Además, la estimación realizada introduce un sesgo que puede ser mayor o menor en función de la calidad de la matriz inicial y de las hipótesis realizadas para aplicar los métodos de estimación.

Los sistemas AVI requieren de una instalación muy costosa y compleja, en algunos casos incluso es necesario que los vehículos lleven embarcados equipos específicos, lo que ha supuesto que su implantación para realizar cálculos de matrices O/D no se haya consolidado. Además, los resultados obtenidos no son tan satisfactorios como teóricamente cabría esperar, ya que los resultados de los sistemas ANPR están muy influenciados por la meteorología o por las condiciones ambientales.

Los nuevos sensores inalámbricos como los sensores BT, han abierto nuevas posibilidades al cálculo de las matrices O/D. Sin embargo, será necesario un estudio que permita definir las condiciones en las que sería aceptable usar estos datos para una estimación directa de la matriz O/D.

## 3.6 Algoritmos de filtrado

En este apartado se han analizado los algoritmos utilizados en la bibliografía para el tratamiento de los datos obtenidos por los sensores BT, principalmente para el cálculo de tiempos de viaje de una red viaria. Inicialmente se describen una serie de consideraciones generales necesarias para entender la aplicación de la tecnología

BT. Posteriormente se analizan las diferentes tendencias a la hora de registrar el dispositivo BT en el sensor y se describen los algoritmos de emparejamiento para crear los tránsitos de los dispositivos BT detectados por los sensores. Para finalizar con la evaluación de los algoritmos de cálculo de tiempos de viaje y de las propuestas de cálculo de matrices O/D.

### 3.6.1 Consideraciones generales de la tecnología BT

Hay varios aspectos, derivados del modo de funcionamiento de los sensores BT, que hay que tener en cuenta a la hora de realizar el filtrado de los datos.

El primero de ellos es intrínseco a la tecnología inalámbrica BT, ya que la toma de datos no se hace en un punto de la vía bien definido, como pasaría en un sistema de identificación de matrículas o de huellas magnéticas, donde la detección se realiza en un punto de la vía donde está situado el sensor. El sensor BT realiza la lectura de las direcciones MAC de todos los dispositivos BT activos que se encuentren en su área de detección.

El área de detección es una zona de tamaño y forma no controlada, que depende de varios aspectos tales como la direccionalidad, la polarización y la ganancia de la antena del sensor, de la sensibilidad del dispositivo BT, los obstáculos, las condiciones ambientales, etc. Sus dimensiones pueden ir desde unos pocos metros hasta 250 m (Murphy et al., 2002), con forma de lóbulo, toroidal, etc.

La dirección MAC de un mismo dispositivo será detectado en muchas ocasiones varias veces. Por lo tanto, es necesario plantear algoritmos de reducción de datos que permitan eliminar las detecciones repetidas de una misma MAC que hagan referencia a un mismo paso por el sensor BT (Abbott-jard et al., 2013).

Hay que tener en cuenta que la zona de detección no solo se va a circunscribir a la calzada de la vía, también cubrirá zonas colindantes con la vía. Por lo tanto, es posible la detección de dispositivos que no estén asociados al tráfico, principalmente cuando se instalen los sensores en zonas urbanas o periurbanas. Así mismo, podrían ser detectados dispositivos que lleven personas en otros medios de transporte, peatones o ciclistas.

Otro aspecto a tener en cuenta en el tratamiento de los datos del sensor BT está asociado a que no se detecta el vehículo, si no a los equipos que lleva embarcados, como sería el dispositivo de manos libres de telefonía móvil BT, o dispositivos que llevan los ocupantes del vehículo, principalmente dispositivos móviles con BT (*smartphone, tablet, auriculares, etc.*). Esto significa que hay cierta probabilidad de que un vehículo lleve activados varios dispositivos BT y por lo tanto se detecten varias direcciones MAC asociadas a un mismo vehículo. Este hecho se llevaría al extremo en el caso de un autobús en el que muchos de sus ocupantes llevaran dispositivos con el BT activado.

Las averías o problemas que puedan surgir en uno o varios de los sensores BT existentes en la red de estudio también van a suponer un reto y tienen que ser estudiados para eliminar emparejamientos incorrectos debidos a detecciones periódicas de la misma MAC.

Por último, las decisiones que toman los conductores en la red de estudio también pueden influir en los datos. Por ejemplo, vehículos que se detengan dentro de la zona de estudio durante un periodo largo de tiempo podrían ser filtrados.

Las situaciones que pueden producirse y que deberían ser filtradas se resumen a continuación:

- El sensor puede detectar varias veces el mismo equipo embarcado en el área de detección del sensor.
- Un sensor puede detectar equipos BT que no estén embarcados en vehículos y por lo tanto no deberían ser incluidos en los cálculos.
- Un vehículo puede llevar varios dispositivos BT embarcados, lo que podría suponer que un vehículo tenga asociados varias direcciones MAC diferentes.
- Un vehículo o conjunto de ellos puede que no siga una trayectoria continua, que realicen una parada intermedia (gasolinera, área de descanso o servicio, etc...) lo cual puede distorsionar los cálculos, principalmente en el cálculo del tiempo de viaje.

- El fallo de un sensor puede generar itinerarios incorrectos debidos a un tránsito periódico del vehículo.

En función del parámetro de movilidad que se desee calcular, estas situaciones afectarán en mayor o menor medida. Por ejemplo, que un vehículo se detenga en una gasolinera habría que filtrarlo en el cálculo del tiempo de viaje, ya que distorsionaría la medida. Sin embargo, para el cálculo de la matriz O/D sería válido y no debería ser filtrado.

A continuación se describen los algoritmos y métodos de filtrado que han sido utilizados en los diferentes estudios realizados con sensores BT. Hay que destacar que la mayoría de ellos se han aplicado para la obtención del tiempo de viaje. Sin embargo, muchos de ellos podrían ser de aplicación para el cálculo de la matriz O/D. En los siguientes apartados se describirán los algoritmos encontrados en la bibliografía para la eliminación de repeticiones de la misma dirección MAC en el ámbito de un sensor y los algoritmos de emparejamiento para definir tránsitos válidos entre dos sensores.

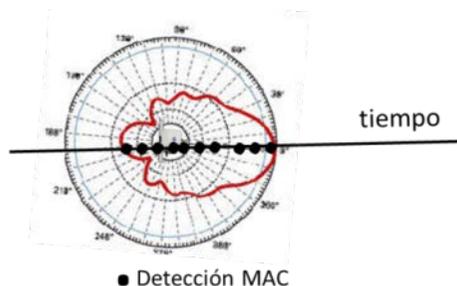
Hay que destacar que en bastantes de los casos de estudio no se mencionan el tipo de algoritmos que se han aplicado, tratando este proceso como si se tratase de una caja negra tal y como describen en su estudio Day et al., 2012.

### 3.6.2 Reducción de duplicados de la dirección MAC

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores, los sensores BT realizan la detección de la dirección MAC de los dispositivos BT que entran en el alcance del sensor, pudiendo producirse varias detecciones de la misma MAC en el intervalo de tiempo que el dispositivo permanece en esa área. Pero también se pueden detectar repeticiones de la misma MAC debidas a un paso periódico del dispositivo, por ser un itinerario habitual del usuario. Además, se realizan detecciones de direcciones MAC asociadas a dispositivos que no están embarcados en vehículos, pero que se encuentran en la zona de detección del sensor.

En la Imagen 15, se ilustra como la dirección MAC de un dispositivo BT puede ser detectada repetidas veces mientras el vehículo que lo transporta se encuentra en el

alcance del sensor, marcado por la zona en rojo (ejemplo antena polarización horizontal).

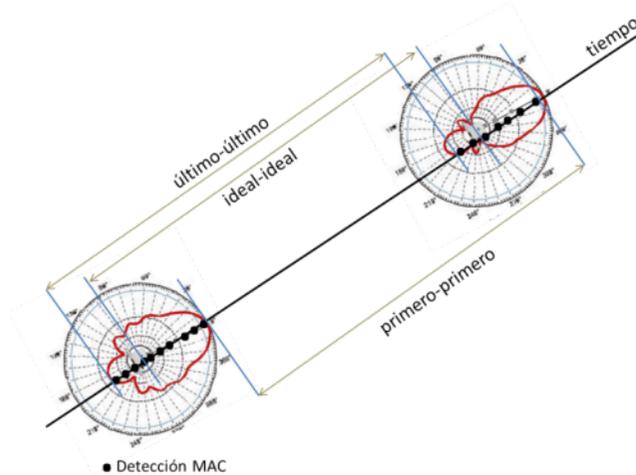


*Imagen 15: Detecciones repetidas de una dirección MAC en un sensor*

Existen varias tendencias en este tipo de proceso de reducción de datos. Hay que tener en cuenta que la mayoría de los estudios se han realizado para el cálculo del tiempo de viaje, y por lo tanto es muy importante reducir el error espacial en la detección. La solución ideal sería poder quedarse con una única MAC por dispositivo y que ésta correspondiese con la posición del sensor, así la diferencia entre los tiempos de detección registrados en cada sensor permitiría obtener el tiempo de viaje.

Los estudios realizados han evaluado como afecta al cálculo del tiempo de viaje las diferentes opciones existentes en lo relativo a la reducción de las detecciones de la MAC en el sensor, seleccionando como el *timestamp* de la detección una de las siguientes opciones de entre todos los registros de la misma MAC, ver Imagen 16:

- Primera aparición en cada sensor.
- Última aparición en cada sensor.
- Valor medio de las dos primeras.
- Combinaciones de las dos primeras (primero-último, último-primero).
- Utilizando el valor máximo del RSSI.



*Imagen 16: Opciones de emparejamiento de direcciones MAC*

En el estudio planteado por Porter et al., 2011 se realizó una comparativa para diferentes tipos de antenas, aplicando los siguientes tipos de algoritmos de emparejamiento, siendo SBT1 el primer sensor y SBT2 el segundo:

- Valor medio del *timestamp* de todas las detecciones en el SBT1 y en el SBT2.
- *Timestamp* de la primera detección en SBT1 con *timestamp* de la primera detección en SBT2.
- *Timestamp* de la primera detección en SBT1 con *timestamp* de la última detección en SBT2.
- *Timestamp* de la última detección en SBT1 con *timestamp* de la primera detección en SBT2.
- *Timestamp* de la última detección en SBT1 con *timestamp* de la última detección en SBT2.

En la Tabla 3 solo se muestran los mejores resultados que se obtuvieron, aplicando estos 5 algoritmos de reducción de direcciones MAC, para cada tipo de antena. Los valores que se tomaron como referencia fueron los que se obtuvieron con un conjunto de vehículos de prueba en los que se registraba el tiempo de viaje. Tal y

como se puede observar en la Tabla 3, los mejores resultado se obtienen cuando se selecciona como *timestamp* de la detección de la MAC el valor medio del *timestamp* de la primera y última detección.

Calculation Method	180 Degree		Omni		Dual		Circular		Yagi	
	8/17 -	7/27 -	7/30 -	8/27 -	8/8 -	8/20 -	8/31 -	9/7 -	8/24 -	9/10 -
Avg-Avg	Avg-Avg	Avg-Avg	Avg-Avg	Avg-Avg	First-First	Avg-Avg	Avg-Avg	Last-Last	Avg-Avg	Avg-Avg
Absolute Average Error	6,38%	6,06%	3,26%	6,61%	4,02%	4,08%	4,38%	5,88%	8,05%	7,82%
Maximum	15,7	16,4	8,16	13,2	11,3	7,94	9,84	15,2	21,0	16,4
Minimum	0,00	0,00	0,00	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00	1,27	0,94
Standard Deviation	5,25%	5,55%	2,51%	3,69%	3,25%	2,96%	3,53%	5,15%	6,74%	5,24%
Combined Absolute Avg Error	6,22%		4,91%		4,06%		5,02%		7,91%	
Relative Average Error	0,08%	-3,63%	-1,21%	-7,08%	0,17%	-2,86%	-3,22%	-6,02%	-1,10%	-7,68%
Standard Deviation	8,20%	8,03%	4,13%	3,83%	5,38%	4,27%	4,95%	4,51%	11,67%	6,64%

Tabla 3: Precisión cálculo tiempo de viaje en función antena y algoritmo de reducción datos MAC (Porter et al., 2011)

Otro método que se ha utilizado en la bibliografía, para la reducción de datos del sensor BT, es el uso del valor del RSSI.

El RSSI se define como:

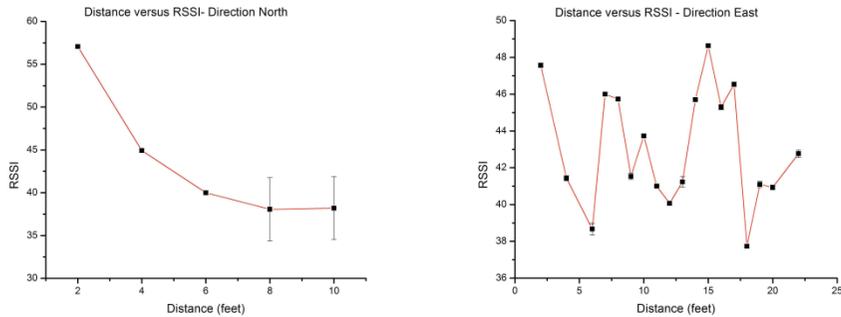
$$\text{RSSI} = 10 \log(P/P_{\text{ref}}) \quad (2)$$

Dónde:

- $P$  es la potencia en el punto de recepción de la señal.
- $P_{\text{ref}}$  es la potencia de referencia.

Teniendo en cuenta que la  $P$  es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, el valor de RSSI teóricamente podría ser utilizado como una forma de mediar la distancia del dispositivo BT a la antena.

Los estudios realizados por Parameswaran et al., 2009, para demostrar si el valor del RSSI se podría usar para medir la distancia entre motas con comunicaciones Zigbee, concluyeron que no puede ser usado para calcular la distancia métrica entre el sensor y el dispositivo, ver Imagen 17.



*Imagen 17: Valores RSSI en función de la distancia (Parameswaran et al., 2009)*

El estudio realizado por Awad et al., 2007, demostró que el valor del RSSI estaba influenciado por varios factores:

- La potencia de transmisión.
- La frecuencia de radio.
- Las características de la antena.
- La calidad de las medidas de referencia.
- Los algoritmos de localización.
- La presencia de obstáculos en la zona de detección.

En las pruebas de laboratorio se obtuvieron errores medios de localización de 0,5 m sobre un área de estudio de 3,5 x 4,5m.

En la aplicación de la tecnología BT a la sensorización del tráfico hay algunos factores que son controlables, pero otros que tienen difícil control como son la

obtención de medidas de referencia de calidad, los obstáculos, las condiciones ambientales, etc.

En el estudio realizado por Araghi et al., 2012, se analizan tres tipos de filtrado, primero-primero, último-último y el mayor-mayor, referido este último al *timestamp* asociado al valor de mayor señal RSSI de todas las detecciones de una MAC en el sensor.

El experimento se realiza en un tramo muy corto de tan solo 550m, con una zona de cobertura del sensor que variaba entre los 75 y 200m a ambos lados del sensor. En sus conclusiones plantearon que el filtrado, teniendo en cuenta el RSSI proporcionaba mejores resultados estadísticos. Sin embargo, los datos presentados generan algunas dudas sobre la validez de los resultados, ya que se perdían casi la mitad de las muestras respecto al filtrado de la primera aparición o la última y no se da ninguna explicación a este hecho. El aplicar un método de filtrado u otro no debería producir la pérdida de tránsitos de forma tan significativa, solo debería influir en la precisión de la medida del tiempo de viaje. Además hay que tener en cuenta que en el estudio realizado por Malinovskiy et al., 2010, aconsejaban separaciones superiores a los 1,6 Km entre sensores para reducir errores en los resultados.

Otra aspecto que se ha estudiado es el lugar donde realizar la eliminación de las repeticiones, así cuando este proceso se realiza en el sensor BT, el envío de información se reduce significativamente, tal y como demuestran en su estudio Puckett & Vickich, 2010, donde obtuvieron una reducción media del 90%.

Cuando se afirma que una dirección MAC puede ser registrada repetidas veces por un mismo sensor, normalmente se refiere a un número reducido de detecciones que se producen en unos pocos segundos, los que el vehículo tarda en atravesar la zona de detección del sensor. Sin embargo, en caso de congestión o de que un vehículo se detenga en la zona de detección el número de repeticiones puede ser mucho mayor.

También se pueden tener detecciones de una misma MAC que aparezca en intervalos distintos. Por ejemplo, un vehículo que sigue el mismo trayecto para ir al

trabajo puede generar repeticiones de la MAC en cuatro o más intervalos distintos. En estos casos solo debería existir un registro de la MAC, por cada intervalo de detección.

Para solucionar este problema, Wasson & Bullock, 2012, aplican un algoritmo de reducción de datos que se basa en establecer ventanas fijas de tiempo. De tal forma que solo se quedan con la primera aparición de una dirección MAC en la ventana de tiempo fijada. Respecto a la elección del tamaño de la ventana, proponen que se debe fijar analizando el tipo de problema a estudiar, teniendo en cuenta que no se filtren direcciones que podrían ser válidas por trayectos periódicos. En el estudio publicado la ventana se fijó en 3.600 s. Al aplicar esta ventana de tiempo reducen la muestra de datos de los sensores BT en un 86%. Este algoritmo realiza un segundo refinamiento que consiste en analizar las zonas cercanas a los límites de la ventana para eliminar direcciones repetidas que se hayan tomado en ambas zonas. Para ello fijan un desplazamiento a ambos lados de la frontera analizando que no hayan MAC repetidas, en el caso de encontrar una repetición se quedan con la primera aparición. En este refinamiento se realiza la eliminación del 0,012% de las muestras obtenidas.

### 3.6.3 Algoritmos de cálculo de tiempo de viaje y matriz O/D

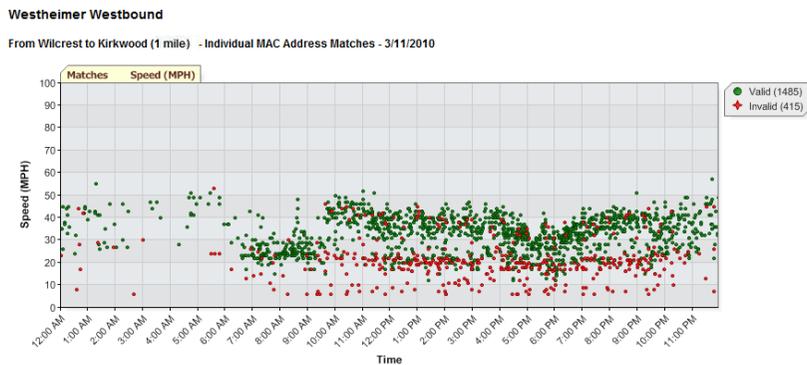
Una vez se han aplicado los algoritmos de reducción de datos, el siguiente paso que se realiza es el emparejamiento de direcciones MAC para crear los tránsitos o viajes y así obtener el parámetro de movilidad (tiempo de viaje, velocidad media, matrices O/D).

En el estudio realizado por Wasson & Bullock, 2012, se emparejan las direcciones MAC del sensor agua abajo con la aparición más próxima en el tiempo en el sensor agua arriba. En este estudio se envían todos los datos captados en el sensor al servidor, donde se aplican todos los filtros y se realizan todos los cálculos.

En el estudio realizado por Tsubota et al., 2011, donde se estudia el uso de los sensores BT para el estudio de tramos de red urbana congestionada y regulada por semáforos, una vez creados los tránsitos con la última detección de dos sensores, se establecieron dos tipos de filtrado:

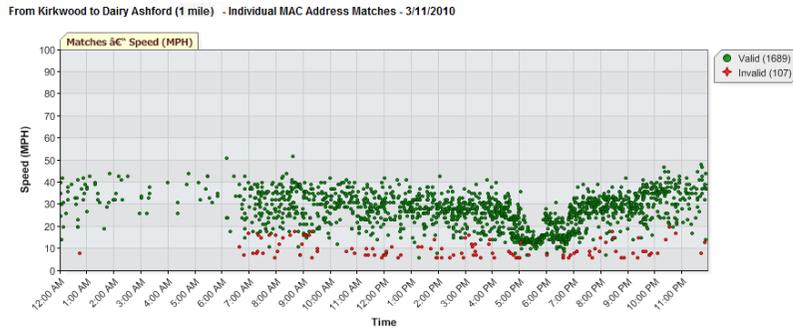
- Uno, para eliminar tránsitos con tiempos de viaje no reales, es decir, que su tiempo de viaje entre dos puntos sucesivos de detección con separación máxima de 3,6 Km era superior a 30 minutos.
- El otro, para seleccionar los tránsitos válidos, aplicando un filtro por movimiento, se consideraron válidos para el cálculo del tiempo de viaje aquellos tránsitos cuya MAC se registró en al menos 3 sensores consecutivos.

En el estudio de Puckett & Vickich, 2010, solo se envía el primer registro de cada MAC realizado en el sensor al servidor, donde se realizó el filtrado de los tránsitos mediante la comparación del tiempo de viaje del tránsito con la media calculada en los últimos 15 minutos, eliminando del cálculo aquellos tránsitos cuyo tiempo de viaje difería de la media más de un 25%, ver Imagen 18.



*Imagen 18: Ejemplo algoritmo filtrado porcentaje media (Puckett & Vickich, 2010)*

Este algoritmo fue posteriormente modificado y mejorado mediante el uso de la varianza como parámetro que definía el umbral de clusterización, siendo los resultados los que se presentan en la Imagen 19.



*Imagen 19: Ejemplo algoritmo filtrado varianza de la media (Puckett & Vickich, 2010)*

El estudio realizado por Malinovskiy et al., 2011 usó la última aparición en cada sensor. Hay que destacar que este estudio se realizó en una red semaforizada y se instalaron los sensores en las intersecciones. De esta forma se contabilizaba el tiempo de viaje una vez se abandonaba la primera intersección y se había sobrepasado la segunda intersección. En este estudio y en el estudio realizado por Quayle et al., 2011 se utilizó como método de filtrado, para determinar que emparejamientos de MAC son válidos, la desviación típica de los tránsitos obtenidos en periodos de 15 minutos, descartando aquellos tránsitos que diferían de la media una desviación típica.

Otro algoritmo para el emparejamiento de direcciones MAC BT para crear tránsitos es el propuesto por Canon-Lozano et al., 2012, en el que se realizó un primer filtrado de las direcciones MAC en función del tipo de dispositivo. El sensor utilizado, de la empresa Trafficnow (Trafficnow, 2014) reportaba, además de la dirección MAC del dispositivo BT, el tipo de dispositivo. La información del tipo de dispositivo está incluida en el CoD que intercambian el sensor y el dispositivo BT en el proceso de *Inquiry*. La propuesta que realizaron fue seleccionar un conjunto de estos posibles dispositivos, que los investigadores entendían que las personas llevan consigo al viajar en un vehículo. Los códigos que se utilizaron para el filtrado fueron los asociados a los siguientes dispositivos, (SIG, 2014):

- Ordenador.
- Teléfono.

- Audio/Vídeo.
- Periféricos.
- Imágenes.
- Juguetes.

El algoritmo propuesto realizaba los pasos que se muestran en la Imagen 20 y que se describen a continuación: en primer lugar, se filtraron todas las direcciones MAC que no estaban en dos sensores consecutivos. En segundo lugar, se filtraron aquellas direcciones que no correspondían con alguno de los tipos de dispositivo mencionados anteriormente y por último, se rechazaban aquellos viajes que excedían la media del tiempo de viaje.

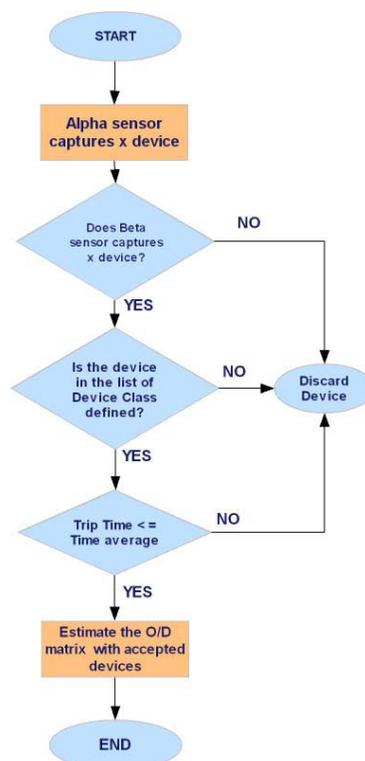


Imagen 20: Algoritmo filtrado MAC propuesto por Canon-Lozano et al., 2012

En el estudio realizado por Araghi et al., 2012, evaluaron la posibilidad de usar sensores BT como base para el cálculo del tiempo de viaje y poder distinguir entre

diferentes modos de transporte, en este caso vehículo a motor – bicicleta, que tuvieran un tiempo de viaje significativamente distinto.

En su experimento aplicaron los métodos de clustering siguientes:

- Jerárquica.
- K-medias.
- Dos-pasos.

Los resultados obtenidos fueron comparados con un sistema de referencia basado en vídeo. Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, este estudio debería haberse realizado con distancias entre sensores superiores a las fijadas para que sea concluyente. Sin embargo, se menciona en este punto por ser un método que se podría analizar para la clasificación de medios de transporte. En este estudio se tuvo en cuenta el CoD de los dispositivos BT para la identificación del medio de transporte, y para el filtrado de los tránsitos se usó el tiempo de viaje, fijando el límite superior del filtrado en 2 veces el tiempo de viaje en tráfico fluido, 120Km/h y como límite inferior el tiempo de viaje que asociaron a un peatón, 6km/h.

### 3.6.4 Conclusiones

El análisis de los estudios que se ha realizado en este apartado permite concluir que en la mayoría de los casos los datos que ofrece el sensor son procesados a varios niveles, aplicando una batería de filtrados. Los resultados de los filtros para la eliminación de repeticiones de una misma MAC en el sensor no son concluyentes, habría que analizarlos con mayor detalle, principalmente las posibilidades de usar el *timestamp* asociado al máximo valor del RSSI. Respecto a los algoritmos de clasificación de los tránsitos existen dos tendencias, una que usa la varianza de la distribución del cálculo del tiempo de viaje y otra que usa el valor del tiempo de viaje en función del tipo de carretera y del tipo de transporte, para fijar los umbrales de corte que fijan la validez o no de los tránsitos.

En ningún estudio se ha analizado la presencia de varios dispositivos en un mismo vehículo y los estudios relativos al cálculo de la matriz O/D no han sido

concluyentes. Todos estos aspectos serán analizados y descritos en los siguientes capítulos.

### **3.7 Sistemas XXXXXXXXXXXX**



























### 3.8 Simulación de Tráfico

Cuando se abordó el trabajo integrado en esta tesis, el uso de los datos proporcionados por sensores BT para el cálculo de las matrices O/D dependientes del tiempo, se planteó un problema, ¿cómo validar los desarrollos e hipótesis? Por lo que fue necesario definir un método que permitiese verificar:

- La validez de la tecnología BT como fuente de información para calcular matrices O/D dinámicas.
- Una vez validada la tecnología, evaluar los resultados en función de los porcentajes de detección de los sensores y por tanto de los porcentajes de itinerarios creados a partir de los datos de los sensores, frente al total de la muestra.
- Validar el modelo de obtención de la matriz O/D basado en XXX.

La forma ideal para realizar los estudios planteados sería disponer de una implantación real con sensores BT y un sistema de referencia (reconocimiento de matrículas, observadores, etc.), de tal forma que se pudiera verificar la fiabilidad y veracidad de los resultados que proporcionase el sistema propuesto. Sin embargo:

- El despliegue de sensores en un escenario real es muy costoso económicamente e inabordable para esta tesis.
- Salvo en tramos de autopista con peaje cerrado, no existen implantaciones estables de sensores que permitan obtener matrices O/D dependientes del tiempo y aun así, este tipo de información no es fácilmente accesible.

Por lo tanto, fue necesario definir un método de bajo coste, abordable dentro de la investigación asociada a esta tesis, que permitiera verificar los resultados de la

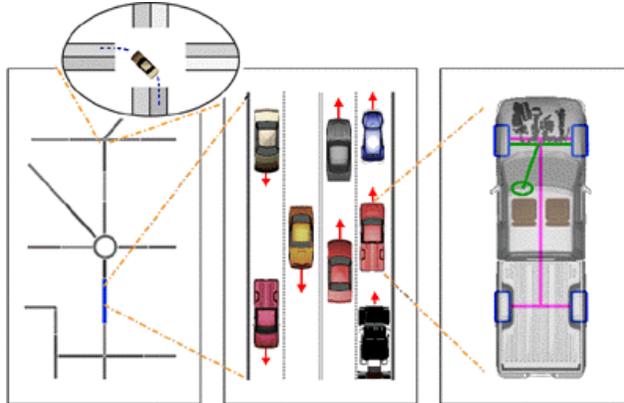
investigación. En este sentido, se planteó la posibilidad de abordar esta verificación mediante el empleo de un simulador de tráfico.

Para poder determinar qué simulador se ajusta mejor al problema que se plantea, se han analizado las cuatro clases de simuladores de tráfico que existen, y que se muestran en la Imagen 25, en función del nivel de detalle de la simulación o nivel de abstracción del modelo de flujo de tráfico utilizado (Barcelo, 2010):

- Modelo macroscópico de flujo de tráfico: este tipo de modelo tiene como objetivo la descripción de la evolución en el espacio-tiempo de las variables que caracterizan el flujo macroscópico de tráfico: volumen, velocidad y densidad. Algunos ejemplos de este tipo de simuladores son METANET, (Carlson et al., 2012), usado por el doctorando, (Tomás et al., 2002). PTV Visium, TransCAD o el AIMSUN.
- Modelo mesoscópico de flujo de tráfico: este tipo de modelo consiste en una simplificación de los modelos microscópicos a pesar de que trabajan con vehículos individuales o agrupados en pelotones, sin embargo usan la dinámica de los modelos macroscópicos. Esto reduce la necesidad de datos de este modelo, frente a los que precisan los simuladores microscópicos, y computacionalmente son más eficientes que éstos. La simulación de forma general se realiza siguiendo un modelo macroscópico pero en las intersecciones se realiza una aproximación microscópica. Ejemplos de este tipo de simuladores son Dynameq (DYNAMIC EQUilibrium) (Barcelo, 2010) o Dynamit (Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travelers) (MahXXXsani & MahXXXsani, 2001).
- Modelo microscópico de flujo de tráfico: este tipo de modelo se basa en la descripción del movimiento de cada vehículo individual que compone el flujo de tráfico. Lo cual supone que se debe modelizar las acciones (aceleración, deceleración, cambios de carril) de cada conductor como respuesta al tráfico que le rodea. Un ejemplo de este tipo de simulador es el SUMO (Simulation of Urban MObility) (M. Krajzewicz & Behrisch, 2014) o el AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-

urban Networks) que actualmente integra también modelado macroscópico y mesoscópico. (Barceló et al., 2005)(Barcelo, 2010).

- Modelo sub-microscópico: este tipo de modelo describe el mismo comportamiento de un modelo microscópico pero añade al modelo mayor especificación, en especial sobre el vehículo.



*Imagen 25 Diferentes modelos de simulador, de izq. a dcha. Macroscópico, microscópico y sub-microscópico, en círculo mesoscópico (DLR, 2013)*

Una vez analizados los distintos tipos de simuladores, en función de su nivel de abstracción, cabe plantearse, ¿qué modelo es el más adecuado para las necesidades de la tesis?, y una vez identificado el modelo, ¿cuál es el simulador más adecuado?

El objetivo es que el simulador elegido pueda emular los resultados que ofrece una red de sensores BT. Es decir, que ofrezca la posibilidad de registrar el paso de los vehículos por una red de sensores, identificado cada vehículo por una referencia única y con el valor del tiempo en el que se ha registrado el vehículo.

Por lo tanto, será necesario que el simulador elegido trabaje directamente con el vehículo, por lo tanto se deben descartar los simuladores macroscópicos y mesoscópicos, quedando como única opción los simuladores microscópicos ya que no se necesita información sobre los elementos del vehículo que proporcionan los simuladores sub-microscópicos.

Los simuladores microscópicos son el tipo de simuladores más numeroso, es más, muchos de los simuladores que inicialmente se desarrollaron como macroscópicos han evolucionado e incorporan la simulación microscópica para poder realizar estudios de enlaces o intersecciones, ejemplos de esta evolución son TransCAD o PTV Visum, entre otros.

A continuación se analizan dos de los simuladores microscópicos más usados en la actualidad y que destacan sobre el resto, AIMSUN y SUMO.

### 3.8.1 Simulador AIMSUN

El simulador AIMSUN es un producto comercial de la empresa TSS – Transport Simulation Systems S.L. El simulador AIMSUN surgió a mediados de los años 90 del grupo de investigación de simulación de la UPC, liderado por el profesor Jaume Barceló. Inicialmente, como su nombre indica, se desarrolló siguiendo un modelo microscópico pero fue incorporando el resto de modelos, siendo en la actualidad también mesoscópico y macroscópico.

Actualmente el AIMSUN está disponible comercialmente en su versión 8 y también se ha desarrollado una versión *on-line* que permite la toma de decisiones en tiempo real. El simulador AIMSUN está siendo integrado en los ATMS, debido a la rapidez en el procesamiento de la simulación, lo que le permite simular lo que va a ocurrir en una red de carreteras con los datos en tiempo real, de tal forma que el gestor del tráfico puede obtener una previsión del estado de la red. Actualmente, precisa entre 2 y 5 minutos para poder ofrecer la simulación de la siguiente media hora de tráfico en la red estudiada, gracias a la arquitectura multihilo implementada.

El AIMSUN es una potente herramienta para la realización de estudios de tráfico y actualmente está siendo usado para la gestión en tiempo real, de tal forma que muchos CGT lo han adquirido y lo están usando para este fin. TSS hace referencia a que actualmente existen más de 3.000 usuarios registrados que usan AIMSUN.

Como ejemplo, el Gobierno Vasco lo ha instalado en su CGT de Txurdinaga (Bilbao) y lo usa para la gestión de la red metropolitana de Bilbao, también está

siendo usado en Madrid Calle 30 para la evaluación de la respuesta frente a incidentes en los túneles y su red asociada.

AIMSUN es un sistema multiplataforma en el que se han incluido opciones para adaptarlo a las necesidades de los integradores, ofreciendo una API que permite integrar el simulador en las aplicaciones existentes en los CGT. Así mismo permitiría incluir en la simulación nuevos sistemas ITS, modificando los modelos de comportamiento que dispone AIMSUN por otros definidos por el programador, como podría ser nuevos modelos de conducción (conducción armónica), guiado de vehículos, control adaptativo de tráfico no estándar, etc.

Los datos de salida que proporciona AIMSUN, en su simulación microscópica, están agregados en un intervalo de tiempo previamente definido por el usuario, pueden ser obtenidos para secciones o a nivel global, y son:

- Flujo.
- Densidad.
- Velocidad.
- Tiempo de viaje.
- Longitud de cola.
- Tiempo de parada y paradas.
- Consumo de fuel y polución.
- Datos de trayectoria.

### 3.8.1.1 Ventajas y desventajas de AIMSUN

La principal ventaja que presenta este simulador es su gran difusión, lo que supone que existe una comunidad de usuarios muy grande, y por lo tanto hay disponible una gran cantidad de información sobre problemas y soluciones. También existen herramientas muy amigables para trabajar con el entorno de simulación y existe un

equipo de soporte para solucionar los problemas y dudas surgidos en la creación de las redes o en la propia simulación.

La principal desventaja que presenta este simulador para su elección como elemento de trabajo para esta tesis, es que es un producto comercial y por lo tanto:

- Es un producto cerrado, que aunque permite incorporar ciertas funcionalidades externas, su código no es accesible y no se pueden incluir nuevos datos de salida, tal y como se necesitaría en este estudio.
- Tiene un coste, que siendo ajustado para su explotación comercial, no es abordable por esta tesis.

### 3.8.2 Simulador SUMO

El simulador SUMO (Behrisch et al., 2011) comenzó su desarrollo en el año 2001 por el Centro de Informática Aplicada de Colonia (ZAIK) y el Instituto de Sistemas de Transporte (ITS) del Centro Aeroespacial Alemán (DLR). Sin embargo, a partir del año 2004 solo ha continuado con su desarrollo el DLR. Este software se ha concebido como un sistema Open Source bajo licencia GNU ("Licencia Pública General de GNU," 2015), tanto para su código como para su versión compilada ejecutable, lo que ha permitido que junto al DLR muchos investigadores internacionales hayan colaborado en la mejora y ampliación del simulador SUMO.

El objetivo de los desarrolladores de SUMO fue dotar a la comunidad científica de una plataforma abierta y gratuita, fácil de entender, de tal forma que cualquier investigador que no haya contribuido a su desarrollo pueda adaptar el simulador a las necesidades de su investigación, sobre la que poder implementar los algoritmos a estudio. Además, debía tener soporte continuo a problemas que pudieran surgir en el código, que fuera capaz de aglutinar el trabajo desarrollado por múltiples investigadores que usasen SUMO como base de su investigación, proyectos, artículos o tesis, y de esa forma ir ampliando sus funcionalidades, y así convertirlo en una herramienta muy potente de simulación.

Estos objetivos ya se han conseguido y desde la primera versión de SUMO, que vio la luz en el año 2002, no han parado de ampliarse sus funcionalidades (Krajzewicz et al., 2012), de tal forma que actualmente incorpora un conjunto de utilidades que le han aportado una gran potencia. Las herramientas que actualmente incorpora SUMO son:

- *Netconvert*: Utilidad para importar la red a simular desde diferentes formatos, ya sea de otros simuladores como VISUM o MATSim, o desde ficheros shapefile o de OpenStreetMap.
- *Netgenerate*: Utilidad para generar una red viaria ficticia, permite generar tres tipos de redes, Manhattan (cuadrícula), araña o aleatoria.
- *Netedit*: Interfaz para la edición gráfica de la red a simular, esta herramienta todavía no está abierta al público y solo está disponible para uso interno de los desarrolladores del proyecto (DLR, 2013).
- *Sumo-gui*: Interfaz gráfica de representación de la red y de la simulación.
- *Dfrouter*: Utilidad para incorporar los datos de los sensores de tráfico tipo espiras.
- *Jtrrouter*: Utilidad para definir las rutas de todos los vehículos a partir de los porcentajes de giro en cada intersección.
- *Od2trips*: Utilidad para definir las rutas a partir de la matriz O/D.

La herramienta de simulación SUMO actualmente dispone de versiones Windows y Linux.

En los últimos años SUMO ha sido utilizado en diversos proyectos de investigación, donde se ha podido verificar el comportamiento del simulador en los siguientes campos:

- Investigación de la comunicación vehicular V2X, como base para la generación de ficheros que muestran el movimiento de los nodos de comunicaciones (proyecto iTETRIS).
- Navegación dinámica y elección de rutas.
- Definición de algoritmos de gestión de semáforos, cuya regulación se adapta a las condiciones del tráfico.

Cabe destacar el proyecto TrafficOnline (D. Krajzewicz et al., 2012) en el que se analizó la validez del uso de los datos proporcionados por la telefonía GSM para la determinación de tiempos de viaje. En este proyecto se usó SUMO para validar la robustez y funcionalidad del sistema implementado.

En el simulador se crearon escenarios reales del área de Berlín, en el que se incluyeron tanto áreas urbanas como interurbanas. La red de carreteras se importó desde una cartografía de NavTeq, fue necesario realizar correcciones manuales debido a la necesidad de ampliar la información que ofrece esta cartografía, ya que para la simulación es necesario información adicional a la que se precisa para la navegación, como son el número de carriles de cada segmento, especialmente en las intersecciones, que segmento se une con el siguiente, etc.

Los datos de entrada se obtuvieron de las espiras magnéticas y también fueron usados estos mismos datos para validar los resultados obtenidos en la simulación. Una vez validado el modelo se realizaron modificaciones para poder analizar situaciones diferentes a las reales, incluyendo variaciones de la demanda en +/- 20%.

También fue necesaria la creación de un modelo del comportamiento de la telefonía para ser incorporado a SUMO. En el modelo se tuvo en cuenta la probabilidad de que se inicie una llamada y la duración de la misma, teniendo en cuenta los valores reales registrados en el momento del estudio. También se introdujo en SUMO la posición de las celdas de telefonía existentes en la red.

Una vez calibrado el simulador, se incluyó una nueva funcionalidad para que escribiese en un fichero los valores de los tiempos de viaje por segmento, del

itinerario de cada vehículo simulado en modo normal. En la Imagen 26 se muestra un ejemplo de validación de un punto en el que se comparó los valores simulados en negro con los valores medidos por las espiras, en azul oscuro se muestra la media.

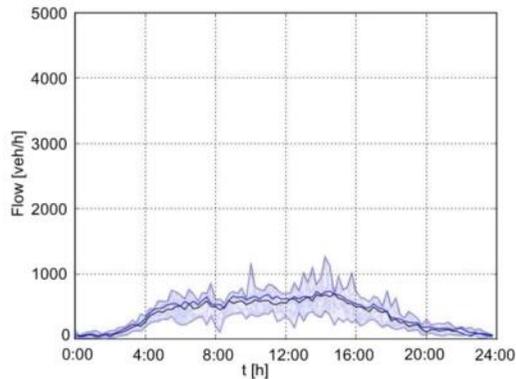


Imagen 26: Validación del modelo de simulación (D. Krajewicz et al., 2012)

También se realizó la misma tarea pero simulando en SUMO el comportamiento de la telefonía móvil, siguiendo el modelo creado en el proyecto TrafficOnline. Una vez obtenidos los resultados de la simulación se realizó la comparación entre los valores reales y los obtenidos por la simulación. En la Imagen 27 se muestra la simulación del número de llamadas con SUMO (en negro) y los obtenidos en el mundo real, en verde oscuro el valor medio, en dos celdas distintas.

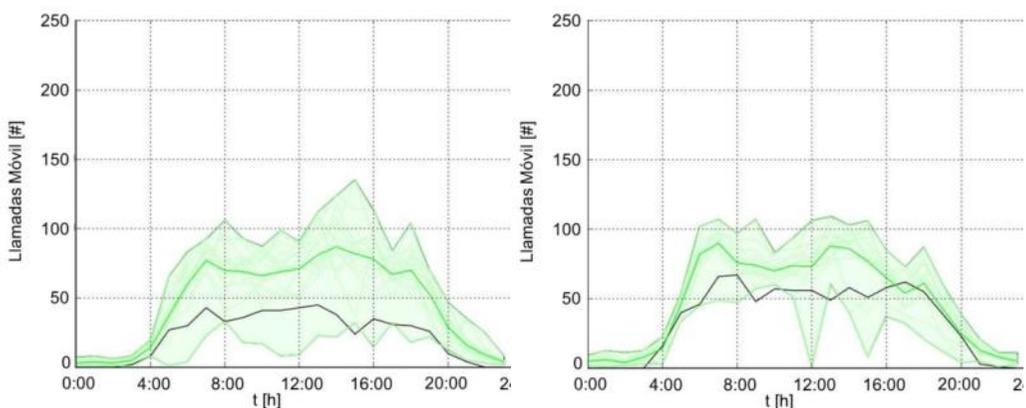


Imagen 27: Validación del comportamiento del móvil en TrafficOnline (D. Krajewicz et al., 2012)

### 3.8.2.1 Ventajas e inconvenientes de SUMO

Las ventajas que presenta este simulador de tráfico para el estudio objeto de esta tesis, están asociadas a su carácter puramente microscópico y al hecho de ser una licencia Open Source, ya que:

- Cada vehículo que participa en la simulación lleva asociado un identificador único.
- El código del simulador puede ser modificado para ajustar la simulación o la salida del simulador a las necesidades del estudio o proyecto.
- Permite importar las redes desde diversas fuentes o crear redes ficticias.

La desventaja que presenta este simulador es que el proceso de creación de la red de simulación es largo y muy laborioso, a pesar de contar con herramientas para importar de diferentes fuentes de datos, es necesario un trabajo manual muy importante para poder crear una red con la que se pueda trabajar con el simulador.

### 3.8.3 Conclusiones

Una vez analizados los diferentes modelos de simulación de tráfico, en particular los simuladores microscópicos AIMSUN y SUMO, se ha optado por seleccionar el simulador SUMO para la realización de todos los trabajos de simulación necesarios en la tesis por las ventajas que presenta y que han sido descritas en el apartado anterior.

## 3.9 Sensores BT actuales

Tal y como ya se ha descrito en apartados anteriores, son muchos los estudios que se han realizado y que han demostrado que el uso de la tecnología BT para la sensorización de la movilidad es ya un hecho.

Tanto es así, que ya existen varias empresas que han desarrollado sensores comerciales para la aplicación de BT al mercado ITS. El uso de esta tecnología ha tenido un gran auge, debido principalmente a la proliferación de dispositivos que la usan y que están embarcados en el vehículo.

Además, los índices de penetración de estos dispositivos va en aumento, con lo que se asegura que en los próximos años las muestras que se tomen sean cada vez mayores, y por lo tanto, la precisión que se conseguirá en la determinación de los parámetros de movilidad será cada vez mayor.

Una gran ventaja que tiene el empleo de esta tecnología es que el dispositivo BT que se detecta no hay que instalarlo en el vehículo, se aprovechan los equipos que los usuarios del vehículo usan para otros fines (*smartphone*, navegadores, auriculares, *tablets*, etc.). Lo cual reduce enormemente los costes de implantación. A estas ventajas, se une que los sensores BT son relativamente fáciles de crear y sus componentes no son excesivamente costosos, estando el coste final del sensor BT en la horquilla que va de los 750 a los 2.400 euros.

Otro aspecto que le ha dado un gran auge a esta tecnología es que la necesidad de comunicación del sistema, entre el sensor y el CGT, actualmente no es muy grande, ya que la información que se transmite es de pocos bytes y de tipo texto, y el porcentaje de penetración de la tecnología no es muy elevado con respecto a la población total. Por lo que las redes de datos móviles actualmente cubren satisfactoriamente estas necesidades y el precio de este servicio es cada vez más accesible.

A continuación se realiza un compendio de los principales productos que existen actualmente en el mercado. El objetivo es analizar las características de estos sensores, el modelo de explotación de los datos y principalmente la arquitectura que se ha definido para el sistema.

### 3.9.1 BLIDS

La empresa CC.com comercializa un sistema de información de tráfico basado en la tecnología Bluetooth que denomina BLIDS, (CC.com, 2015). Este sistema se plantea como un producto llave en mano, en el que se suministra el sensor junto con el software de configuración, almacenamiento, procesamiento y visualización. Los datos del sensor son almacenados en el servidor en una base de datos.



*Imagen 28: Sensor BLIDS*

El sensor está desarrollado siguiendo un estándar industrial, tanto por su diseño compacto, ver Imagen 28, fácil de instalar en carretera, así como por sus especificaciones, en las que se han elegido componentes con un rango extendido de temperaturas. El procesador que se ha elegido es un ARM9 que le permite trabajar con un consumo muy bajo, 2,5 W. El sistema operativo elegido para este sistema es un LINUX empotrado.

Su instalación está pensada para realizarse sobre elementos existentes en la carretera sin necesidad de obra civil o inversiones importantes en el emplazamiento.

El sensor ha sido pensado para trabajar en tres modos de operación: en función de si se alimenta directamente de la red eléctrica, con baterías o mediante un panel solar, tal y como se observa en la Imagen 29.



*Imagen 29: Ejemplo instalación BLIDS*

La arquitectura elegida para el sistema BLIDS ha sido el modelo cliente/servidor en la que los sensores se distribuyen en la carretera, actuando de clientes. El cliente transmite al servidor el identificador del vehículo con el tiempo de paso registrado en la detección. La información es transmitida utilizando tres tipos de tecnología: GPRS, Ethernet o WLAN. La antena que usa el sensor es omnidireccional y solo dispone de un sensor BT por equipo.

En la especificación del sensor, la empresa indica que puede captar la información de los vehículos de varios carriles en ambos sentidos y a más de 125 mph (201 Km/h). El ratio de detección lo fijan entre un 25% y 38% del total de los vehículos (CC.com, 2015).

El sensor puede ser actualizado y configurado de forma remota, usando las tecnologías que tiene disponibles para las comunicaciones entre el equipo y el servidor. Dispone de un chip GPS integrado para la localización y sincronización temporal de los equipos.

En la descripción del sistema no se especifica qué algoritmo se utiliza para la asociación del tiempo de paso con el identificador del vehículo, ni del filtrado de los datos en el servidor.

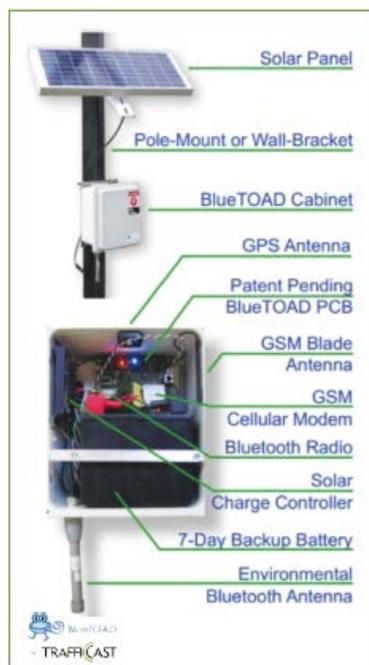
### 3.9.2 BlueTOAD

BlueTOAD (Bluetooth Travel-time Origination and Destination) es un producto desarrollado por la empresa TrafficCast similar en prestaciones al sistema BLIDS (Araghi et al., 2012).

Le distinguen pocos aspectos, ya que también dispone de un único sensor BT por equipo, con un microcontrolador y una antena omnidireccional de 4 dBi, tal y como se muestra en la Imagen 30. Este equipo integra la posibilidad de alimentación por PoE (Power over Ethernet) y las comunicaciones móviles están implementadas en GSM.

A pesar de que su nombre puede dar la impresión de que realiza el cálculo de matrices O/D, su solución está centrada en el cálculo del tiempo de viaje y en la velocidad de los vehículos.

El sistema está basado en un modelo cliente/servidor, a diferencia del sistema BLIDS solo disponen de un único centro servidor en el que se filtran y procesan los datos, se realizan los cálculos y los resultados se muestran vía WEB a los clientes.



*Imagen 30: Sistema BlueTOAD*

Respecto a los algoritmos de filtrado no hay indicaciones salvo que permiten filtrar las direcciones MAC de dispositivos de peatones, así como eliminar autobuses y otros valores anómalos. En lo referente a los algoritmos de procesamiento indican que obtienen los datos del tiempo de viaje y la velocidad a partir de varias muestras de emparejamiento de direcciones MAC, aplicando algoritmos propietarios. El procesamiento de los datos se realiza en tiempo real, con un retraso medio de 2 minutos.

### 3.9.3 BluFAX

BluFAX es un sensor desarrollado por la empresa Traffax del que no se dispone casi información respecto al sensor, la información que ofrece está más basada en sus funcionalidades que en sus características.

Este sistema también implementa un modelo cliente/servidor. Tal y como ocurre con los dos equipos anteriores, tan solo dispone de un sensor por dispositivo y no existe la posibilidad de comunicarse entre los equipos instalados en la vía.

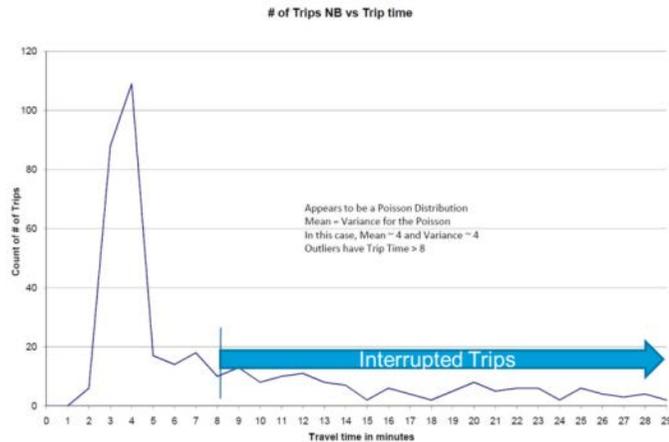
El diseño está basado en una placa con procesador en el que se integra un sensor BT, GPS y comunicaciones GSM y Ethernet, tal y como se muestra en la Imagen 31.



*Imagen 31: Sensor BluFAX ("Traffax INC,," 2015)*

El sensor BT que tiene instalado alcanza tan solo 100 m, lo que reducirá el número de detecciones ya que la velocidad máxima de detección está entorno a los 115 Km/h.

El filtrado y procesamiento de los datos se realiza en el servidor que se suministra con los equipos. El filtrado de los valores atípicos se realiza mediante el cálculo del valor medio de los datos usando una distribución de Poisson, estableciendo que los datos válidos son aquellos que se encuentran entre la media y la varianza, ver Imagen 32.



*Imagen 32: Filtrado BluFAX (“Traffax INC,” 2015)*

### 3.9.4 Post Oak

Post Oak Traffic Systems es una empresa que comercializa el sensor desarrollado por el Instituto de Transporte de Texas (Puckett & Vickich, 2010).



*Imagen 33: Sensor Post Oak*

Esta empresa cede los derechos de propiedad de los datos obtenidos por sus sensores a los propietarios de los mismos.

Al igual que los productos anteriores, el sistema de recopilación y procesamiento de datos se basa en una arquitectura cliente/servidor donde los sensores BT transmiten los datos recogidos a un servidor centralizado donde se aplican algoritmos para emparejamiento y filtrado con objeto de obtener tiempos de viaje y velocidades en tiempo real.

Este sensor es el resultado de un desarrollo incremental que partió de una solución basada en un portátil con un dispositivo USB de BT. La versión actual dispone de

un procesador TS-7800 de bajo consumo que permite la instalación con alimentación por batería o panel solar, ver Imagen 33. El sensor BT es de clase 1 y tiene un alcance de 100m. El sensor está equipado con puertos Ethernet y USB. El software se ejecuta sobre el sistema operativo Linux.

Las comunicaciones con el sensor se realizan principalmente por medio de GSM, GPRS o 3G.

El filtrado de las repeticiones de las direcciones MAC se realiza en el propio sensor para reducir el ancho de banda de la transmisión de datos.

Como complemento a este dispositivo, la empresa ha desarrollado una API que permite la integración de los datos en el software disponible en el CGT.

### 3.9.5 Waspnote

Waspnote es un sensor inalámbrico desarrollado por Libelium (Spin-off de la Universidad de Zaragoza), basado en el concepto Arduino, que es una especificación hardware de código abierto. Su diseño modular está orientado a que se puedan integrar una gran variedad de dispositivos de sensorización, dando lugar a una infinidad de configuraciones posibles.

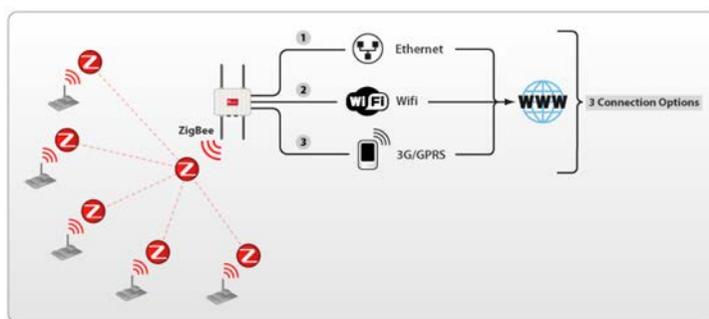
El procesador que implementa es un ATmega1281 de bajo consumo de 14 MHz, la memoria SRAM es muy pequeña, de tan solo 8Kb, lo que limita las posibilidades de realizar algún procesamiento en el sensor. El almacenamiento se realiza sobre una tarjeta SD de 2Gb, ver Imagen 34.



*Imagen 34: Ejemplo de waspmote*

Una de las configuraciones que suministra, es un dispositivo para la sensorización de tráfico que emplea tecnología BT para la detección de vehículos y peatones, y un módulo de comunicaciones ZigBee para la transmisión de datos entre motas, que permite la creación de redes malladas y la conexión con un dispositivo especial (Meshlium), ver Imagen 35. Este dispositivo Meshlium actúa de pasarela para poder transmitir los datos recogidos por la red de sensores a un servidor centralizado o a un CGT por medio de protocolos de comunicación de media/larga distancia como GPRS, 3G, WiFi, Ethernet.

El dispositivo Meshlium es capaz de almacenar los datos recibidos por las motas en un sistema de ficheros local, en una base de datos local MySQL o en una base de datos remota MySQL.



*Imagen 35: Ejemplo de arquitectura Wasp mote*

### 3.9.6 Bitcarrier

La empresa Bitcarrier comercializa un sensor que dispone de detección BT y WIFI, ver Imagen 36. El sensor es capaz de detectar los dispositivos BT y WIFI en un radio de 50m. (Bitcarrier, 2014)

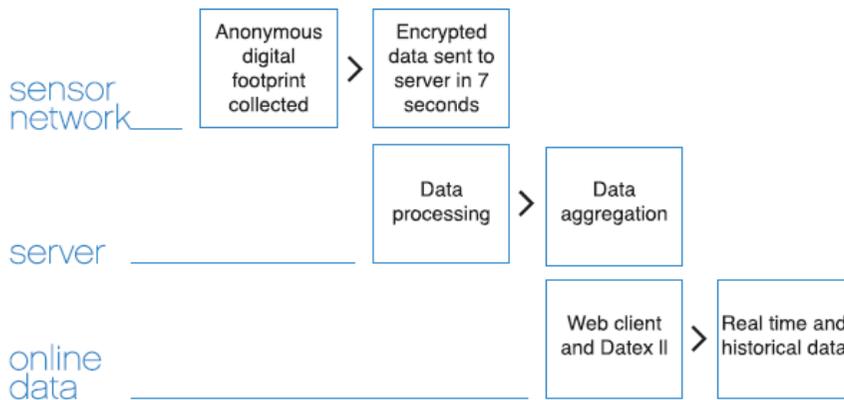


*Imagen 36: Ejemplo de sensor de Bitcarrier*

El sensor está basado en un hardware y software propietario del que no se conoce sus especificaciones. El sensor envía antes de 7 segundos la información de cada dispositivo que detecta a un servidor central donde se realiza todo el filtrado y procesado de los datos. Por lo tanto, la arquitectura que sigue este sistema es cliente/servidor, siendo además único y situado en la empresa. Los resultados de la explotación de los datos son enviados en tiempo real a los clientes, pero los datos son propiedad de la empresa. Existe una API para la integración de los datos que proporciona el sistema con el software de CGT, ver Imagen 37.

Existe un servidor web al que los clientes pueden conectarse para consultar la información de sus sensores (tiempo de viaje, velocidad e incidentes).

La transmisión entre el sensor y el servidor se puede realizar mediante tecnología 3G, GPRS o WIFI.



*Imagen 37: Flujo de datos en Bitcarrier*

### 3.9.7 DeepBlue

DeepBlue es un sensor BT de la empresa Trafficnow (Trafficnow, 2014). El sensor está basado en un hardware y software propietario, que dispone de un procesador ARM 9 de bajo consumo con comunicaciones Ethernet, GPRS/GSM. Los equipos montan una antena direccional con 11,5 dBi de ganancia con dos canales, siendo el ángulo horizontal de 110 grados y el vertical de 30 grados, ver Imagen 38. El alcance de la detección se extiende hasta 270 m en ambos sentidos del sensor, lo que les permite llegar a cubrir hasta 540 m. En sus especificaciones indican que podrían llegar a captar vehículos a 250 Km/h.

El equipo dispone de GPS para la sincronización temporal de los sensores. El sistema operativo del sensor es LINUX e implementa una estructura cliente/servidor. Existe la opción de que el cliente disponga de un servidor propio y gestione sus datos o que se conecte el sensor al servidor que ofrece la empresa Trafficnow.



*Imagen 38: Ejemplo sensor Deepblue*

La empresa ofrece tiempos de viaje en tiempo real y matrices O/D. No se dispone información de los algoritmos que se usan para el filtrado y cálculo de los parámetros. En su página web indican que se requiere una detección del 5% del flujo total para poder considerar que los datos que ofrece son válidos.

Los datos de los sensores son propiedad de los propietarios de los sensores.

### 3.9.8 BLISITT

BLISITT es un sensor BT y WIFI, desarrollado por el grupo LISITT del Instituto de Investigación IRTIC de la Universitat de València. Este sensor integra dos detectores BT y dos detectores WIFI, con dos antenas direccionales de 12 dBi de ganancia con polarización horizontal de 90 grados y vertical de 30 grados.

El hardware y software ha sido íntegramente desarrollado en el LISITT. El sistema está desarrollado sobre un procesador ARM 7 Dual core de bajo consumo (6W). El equipo dispone de comunicaciones Ethernet 100Mbps, GSM/GPRS/UMTS, posicionamiento GPS, servicio NTP y FTP. La alimentación se realiza por red, panel solar, baterías o PoE. Al sensor se puede acceder mediante un servidor Web a través de WIFI o Ethernet, ver Imagen 39.

El sistema operativo del sensor es LINUX e implementa una arquitectura distribuida, basada en XXXXXs, de tal forma que la información se procesa en varios niveles antes de llegar al CGT.



*Imagen 39: Ejemplo sensor BLISITT*

El sensor BLISITT permite obtener tiempos de viaje en tiempo real y matrices O/D. Los datos de los sensores son propiedad de los propietarios de los sensores.

### 3.9.9 Conclusiones

En casi todos los casos, no se dispone información de los algoritmos o procedimientos usados para la eliminación de MAC repetidas, para el emparejamiento de MAC o para el cálculo de los parámetros de movilidad.

Todos estos productos, salvo BLISITT, están basados en arquitectura cliente/servidor. En algunas soluciones como Bitcarrier y Bluetoad, el servidor es único y los datos son totalmente gestionados por la empresa. En el resto de productos se dispone de un servidor central, pero los clientes pueden disponer de un servidor propio.

El caso de Libelium es especial, ya que su negocio se ha centrado en la venta de dispositivos de bajo coste para muchos propósitos, el sensor BT es uno más de la gama de productos que dispone y su especificación es muy básica. Su concepción está más enfocada a la creación de redes de sensores.

El sensor BLISITT, al haber sido desarrollado por el grupo de investigación al que pertenece el doctorando, es el que más flexibilidad ofrece a la hora de plantear modificaciones en la información que suministra o integrar en el sensor parte de los algoritmos que se desarrollen en el trabajo de investigación realizado en la tesis. Por lo tanto será el sensor que se usará en las pruebas reales del sistema.

## 4 Metodología

---

Tal y como se ha descrito en el apartado 2.2, el objetivo principal de esta tesis ha sido definir los algoritmos y el sistema software capaz de obtener la matriz O/D dinámica de una red de carreteras, mediante el empleo de los datos que proporcionan sensores BT de lectura de direcciones MAC, desarrollando un sistema XXXXXXXX de procesamiento basado en la tecnología de sistemas XXXXXXXXXXXX, con el fin de aprovechar las infraestructuras de equipamiento existentes en las redes viales actuales, que son claramente distribuidas.

En el presente capítulo se va a describir la metodología de trabajo que se ha seguido para cumplir con los objetivos definidos y las fases en las que se ha realizado.

### **Validación de los sensores BT para el cálculo de matrices O/D**

La primera cuestión que hubo que resolver fue si los datos que proporcionan los sensores BT eran válidos para ser usados para el cálculo de las matrices O/D dinámicas de una red viaria.

El uso de los sensores BT como sensor de tráfico para la obtención de los tiempos de viaje y velocidades medias, entre distintos puntos de una red viaria, está muy extendido y es ampliamente aceptado. En el apartado 3.6.3 se ha realizado un análisis de varios estudios (Brennan et al., 2010), (Malinovskiy et al., 2011), (Bhaskar & Chung, 2013), (Porter et al., 2013), donde se ha podido verificar este aspecto.

Sin embargo, no se ha encontrado ningún estudio que verifique la validez de los sensores BT para la obtención de las matrices O/D. Es más, algunos investigadores ponen en duda esta capacidad y plantean la necesidad de estudiar este tema en profundidad (Blogg et al., 2010) (Barceló et al., 2010).

En el estudio realizado por Jaume Barceló et al., 2010, para la predicción de los tiempos de viaje y la estimación de matrices O/D dinámicas en carreteras usando sensores BT, plantea la siguiente cuestión:

*Si los sensores BT permiten detectar en el intervalo de tiempo  $k$  un vehículo y asociarle el tiempo de la detección cuando entra en la carretera en la entrada  $i$ , posteriormente el mismo vehículo vuelve a ser detectado y se le asocia el tiempo de su detección cuando sale de la red por la salida  $j$ , entonces el sistema de detección BT debería permitir generar una muestra  $M_{ij}(k)$  del número de vehículos que entrando por la entrada  $i$  durante un intervalo de tiempo  $k$  abandonan la carretera por la salida  $j$ . Por lo tanto cabría preguntarse ¿Por qué no se usa esta muestra para extrapolar a la población total la estimación de la matriz dinámica  $M_{ij}(K)$ ?*

En este estudio se compararon los datos que proporcionaban los sensores BT con los datos de las espiras magnéticas existentes en los mismos emplazamientos que los sensores, y que habían sido correctamente calibradas. A pesar de que los datos obtenidos parecían que tenían una correlación aceptable a través del tiempo entre la población total y la muestra, es decir, entre los valores obtenidos con las espiras magnéticas y los valores obtenidos con el sensor BT, ver Imagen 40, sin embargo, cuando el autor del

estudio realizó un análisis más profundo de los datos se cuestionó la corrección de la expansión de los valores obtenidos para la muestra del sensor BT a toda la población.

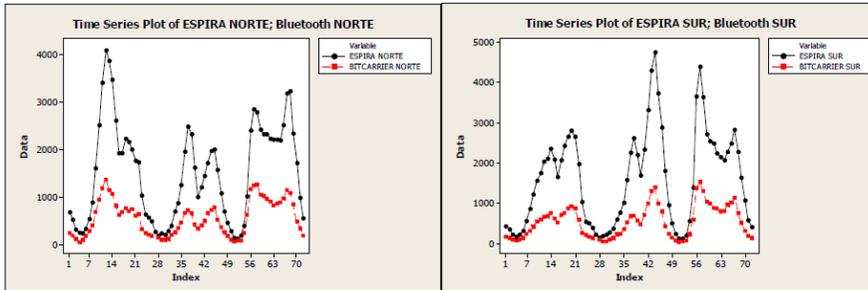


Imagen 40: Estudio correlación muestras espiras y sensor BT (Jaume Barceló et al., 2010)

En la Imagen 41, se puede apreciar que la proporción de vehículos detectados por el sensor BT no es constante en el tiempo. En el estudio se planteó que la penetración de la tecnología aún no estaba estabilizada y seguía creciendo. Esto podría producir que el error en la medida varíe en el tiempo y no siempre sea aceptable el valor que se obtenga al realizar la expansión de la matriz O/D usando los sensores BT.

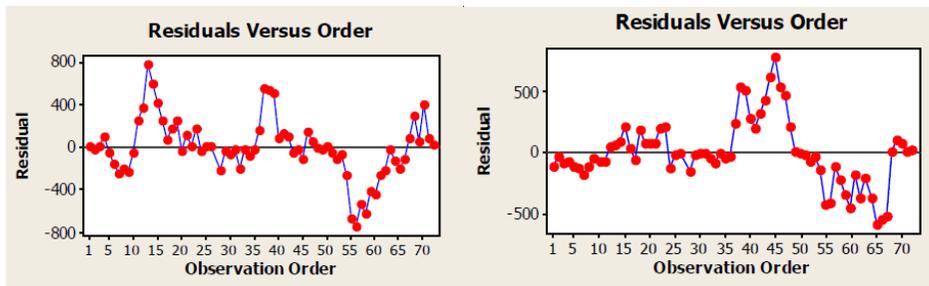


Imagen 41: Análisis residual comparación entre el conteo por espiras y sensor BT (Jaume Barceló et al., 2010)

En el estudio realizado por Blogg et al., 2010, descrito en el apartado 3.5.1.2, el proceso de expansión se realizó utilizando el porcentaje de detección de cada sensor, por lo tanto se requiere un sistema que realice el conteo de todos los vehículos para poder obtener esa información, ya que no se puede asegurar que el porcentaje de detección de un sensor permanezca constante en el tiempo, ni aunque se estabilizase el índice de penetración de la tecnología. Por lo tanto, la matriz O/D obtenida a partir de los sensores BT debería expresarse solo en porcentaje respecto al total de tránsitos. Cuando

esta información sea utilizada por un ATMS, éste deberá disponer de un sistema de conteo de vehículos para poder introducir las estimaciones de vehículos proporcionadas por el sistema BT.

Así pues, el primer objetivo que se planteó fue definir un procedimiento que permitiese demostrar la validez de la utilización de los datos de los sensores BT como base para el cálculo de las matrices O/D dinámicas. Para ello se decidió utilizar un modelo de simulación, utilizando el simulador SUMO, que se adaptó para poder incluir sensores BT ideales y vehículos con dispositivos BT con diferentes niveles de penetración. El proceso seguido fue en primer lugar definir una red de carreteras de la cual se conocía su matriz O/D real, y comparar el resultado real con la matriz O/D obtenida del seguimiento de los vehículos equipados con dispositivos BT. Este trabajo se detalla en el capítulo 5: *“Validación de los sensores BT para el cálculo de matrices O/D”*, donde se demuestra la viabilidad del empleo de detectores BT ideales y donde se fijan las condiciones mínimas para admitir la utilización de estos datos en el cálculo de matrices O/D.

### **Aplicación de los Sistemas XXXXXXXXXXXX al cálculo de la Matriz O/D**

Una vez que se demostró la validez del uso de los datos de los sensores BT para la determinación de las matrices O/D, se planteó analizar qué arquitectura del sistema sería la más adecuada para realizar este cálculo en un sistema de tráfico real, bajo tres premisas que se consideraron irrenunciables desde que se planteó la investigación:

El estudio realizado en el apartado 3.9 detectó que todos los sistemas BT actuales se basan en soluciones cliente/servidor. Los datos de los sensores BT son enviados por diferentes mecanismos de comunicación, a un servidor centralizado. Este tipo de solución se adapta a la primera de las premisas definidas, pero dista mucho de cubrir la tercera, y varios autores se plantean que sean adecuadas para cumplir con la segunda. En las investigaciones realizadas, entre otros, por Porter et al., 2011 y Stevanovic et al., 2014, se apuntaba la necesidad de abordar el estudio que permita definir algoritmos o arquitecturas que tengan en cuenta la gran cantidad de información que deberá procesarse en instalaciones a gran escala o cuando el porcentaje de penetración sea mayor, en el momento de los estudios no sobrepasaba el 10% en los estudios de Porter y el 25% en los de Stevanovic.

Ante esta situación se decidió estudiar y proponer una arquitectura alternativa al modelo cliente / servidor, que se adaptase a la estructura de los sistemas de gestión de tráfico actuales y que fuese capaz de optimizar los procedimientos de cálculo necesarios para la obtención de matrices O/D dinámicas. El capítulo

6: *“Aplicación de los Sistemas XXXXXXXXXXXX al cálculo de la Matriz O/D”* recoge y justifica la solución propuesta, basada en la aplicación de Sistemas XXXXXXXXXXX (XXX).

La arquitectura XXX no sólo se adapta a la estructura de los sistemas de gestión actuales, sino que es muy adecuada para facilitar

de cálculo de matrices O/D dinámicas

necesita:

La solución XXX propuesta se validó usando el modelo de simulación SUMO, tomando como datos de entrada al sistema los proporcionados por el sensor ideal y comprobando que la matriz que se obtuvo con el XXX coincidía con la matriz de la simulación utilizada.

**Algoritmos de filtrado, matching y de clustering**

Una vez demostrada la validez de los sensores BT y del sistema XXX desarrollado para el cálculo de la matriz O/D dinámica en un entorno de simulación, que se puede definir como ideal, fue necesario plantear su aplicación a los entornos reales.

### **Algoritmos de cálculo de la Matriz O/D**

Una vez se dispuso del conjunto final de tránsitos entre los sensores, fue necesario realizar su procesamiento para calcular los parámetros de movilidad, el tiempo de viaje y la matriz O/D.

En primer lugar se analizaron y probaron los algoritmos propuestos en trabajos previos existentes en la bibliografía. Hay que destacar que la gran mayoría de ellos solo se aplicaban al cálculo del tiempo de viaje, por lo tanto se optó por seleccionar el más utilizado y se adaptó al cálculo de la matriz O/D. El otro algoritmo seleccionado se había creado para calcular la matriz O/D. Los resultados del análisis demostraron que ambos algoritmos presentaban deficiencias a la hora de calcular la matriz O/D dinámica.

Una vez detectadas esas deficiencias el doctorando propuso dos algoritmos específicamente creados para calcular la matriz O/D dinámica y el tiempo de viaje. Estos algoritmos fueron definidos y comparados entre sí y con el algoritmo existente que mejores resultados había proporcionado en las pruebas.

Los resultados demostraron que los algoritmos definidos por el doctorando permiten obtener la matriz O/D dinámica y el tiempo de viaje de una red de

carreteras con sensores BT con los condicionantes fijados en la validación realizada a la tecnología BT.

Los trabajos realizados en esta fase de la tesis se detallan en el capítulo 8: *“Algoritmos de cálculo de la Matriz O/D”*.

### **Evaluación del sistema propuesto en condiciones reales**

Como fase final del trabajo se aplicó el sistema completo, el XXX y los algoritmos definidos, a instalaciones reales para comprobar su validez en el cálculo de la matriz O/D dinámica usando sensores BT.

Para poder evaluar de forma adecuada los algoritmos propuestos se han realizado tres pruebas piloto en diferentes entornos de tráfico:

- La primera de ellas se ha realizado en un entorno interurbano, con distancias entre sensores que varían entre 13Km y 160 Km. Esta instalación se ha realizado en autovía.
- La segunda de ellas también se ha realizado en un entorno interurbano, para realizar un estudio direccional en una rotonda de un polígono industrial en una carretera convencional. La distancia entre sensores es muy corta, entre 150 y 300 m.
- La tercera prueba se ha realizado en un entorno urbano y ha servido para clasificar los desplazamientos por el centro histórico de la ciudad de Valencia. La distancia entre los sensores va de los 500 m a los 1.100 m

La descripción de las pruebas y los resultados obtenidos se han incluido en el capítulo 9: *“Evaluación del sistema propuesto en condiciones reales”*,

En los capítulos siguientes se describen en detalle los trabajos realizados para la validación del uso de los sensores BT como base para el cálculo de matrices O/D dinámicas, para la especificación del sistema MultiXXXXXX

y para la propuesta y

evaluación de nuevos algoritmos para el cálculo de la matriz O/D dinámica adaptados a la arquitectura XXX.

## 5 Validación de los sensores BT para el cálculo de matrices O/D dinámicas

---

En el apartado 3.6 se han descrito de forma detallada los estudios disponibles en la bibliografía que han permitido validar el uso de la tecnología BT como sensor de tráfico. En estos estudios ha quedado claramente demostrada la validez del uso de los datos que proporcionan los sensores BT para la obtención del tiempo de viaje entre puntos sensorizados de una red de carreteras.

En estos estudios, se han analizado aspectos de la tecnología que mejoran la detección y que son de aplicación para la obtención de la matriz O/D, como son las características de la antena, la localización del sensor en el plano vertical y horizontal, etc.

Tal y como se ha descrito en el capítulo 4: “*Metodología*”, en los primeros estudios realizados se analizó la posibilidad de utilizar los datos que se empleaban para el cálculo del tiempo de viaje para ofrecer la matriz O/D. Sin embargo, se plantearon dudas sobre su aplicación y claramente se determinó que este aspecto debería ser estudiado en detalle.

Este es el objetivo que se ha marcado en este punto de la tesis: ¿bajo qué condiciones pueden usarse los datos de los sensores BT como fuente de información para el cálculo de las matrices O/D dinámicas? En la revisión bibliográfica realizada no se ha encontrado publicado ningún trabajo de estas características. Por lo tanto, este estudio puede considerarse como una aportación novedosa que realizará esta tesis.

## 5.1 Procedimiento de validación

Para realizar esta validación se analizó la posibilidad de utilizar un entorno de pruebas real del que se conociese la matriz O/D de los vehículos y en el que se pudiese ir variando el porcentaje de vehículos que llevan embarcado un dispositivo BT frente al número total de vehículos.

Los datos que proporcionasen los sensores BT permitirían calcular la matriz O/D, para diferentes porcentajes de detección, y se compararía el resultado con el valor real de la matriz, con el objetivo de poder evaluar el error que se comete al calcular la matriz O/D, a partir de una muestra de datos obtenidos con los sensores BT, en función del porcentaje de detección.

En este punto se descartó la posibilidad de realizar una prueba real, ya que si bien podría obtenerse un entorno en el que se conociese la matriz O/D real, por ejemplo un tramo de peaje cerrado, sería imposible poder actuar sobre los porcentajes de penetración de la tecnología. Además, el coste económico de la instalación sería inviable. Por lo tanto, se optó por realizar el experimento mediante el uso de un modelo de simulación de tráfico.

A continuación se detallan los pasos seguidos para llevar a cabo la validación de la tecnología:

1. Elegir el simulador de tráfico que mejor se ajuste a la exigencia del experimento.
2. Definir la red de estudio y crear el modelo de simulación.
3. Obtener la matriz O/D del modelo de simulación.

4. Definir los sensores BT virtuales en el simulador.
5. Generar los datos base del estudio, es decir una muestra N de matrices O/D simuladas para diferentes porcentajes de penetración de la tecnología BT, partiendo de un 5% hasta llegar al 100% con incrementos del 5%.
6. Analizar los resultados, comparando los valores de la matriz O/D obtenida con los sensores virtuales, para cada porcentaje de detección simulado, con la matriz O/D real.
7. Conclusiones del experimento.

En los siguientes apartados se va a describir en detalle cada uno de estos pasos.

## 5.2 Elección del simulador

En el apartado 3.8, ya se describió en detalle cuales fueron las motivaciones para seleccionar la simulación como método de validación de las hipótesis, los algoritmos de filtrado, así como del sistema propuesto para el cálculo de la matriz O/D que se desarrolló durante la tesis. Así mismo, se llegó a la conclusión de que el modelo de simulación microscópico era el que mejor se ajustaba a las necesidades de la tesis, al ofrecer información individual de cada vehículo que interviene en la simulación.

Entre los simuladores microscópicos existentes se analizaron en detalle dos de ellos: AIMSUN y SUMO. Ambos son una solución técnica excelente, pero se decidió realizar el estudio con el simulador SUMO por las siguientes razones:

- Es un software *Open Source*, por lo tanto se tiene acceso al código del simulador bajo licencia *GNU General Public License (GPL)*.
- El código puede ser modificado para introducir nuevas funcionalidades al simulador.
- Permite definir sensores de tráfico.

- Ha sido utilizado en los últimos años en varios proyectos de investigación, para el estudio de comunicaciones V2X (“Proyecto iTetris,” 2013), Navegación dinámica, comunicaciones móviles, etc. (D. Krajzewicz et al., 2012).
- El modelo de simulación ha sido ampliamente contrastado.
- El simulador genera un fichero de salida que contiene, para cada vehículo, un identificador único y un listado de los segmentos por los que ha pasado, desde que entra hasta que sale de la red, ordenados por orden de paso.

El inconveniente que presenta SUMO frente a AIMSUN es que la generación del modelo de simulación es más costosa ya que no dispone de herramientas amigables para la creación de la red como sí dispone el simulador comercial.

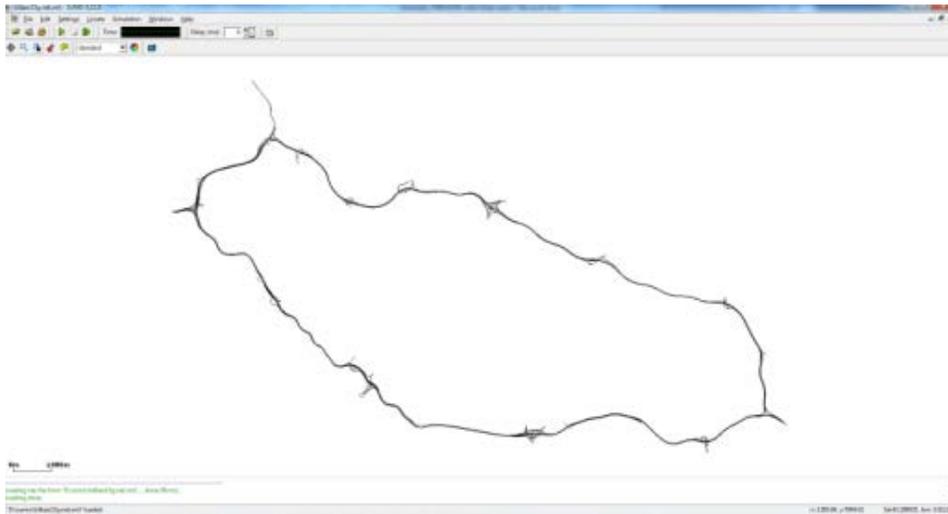
### **5.3 Definición del modelo de simulación.**

Cuando se planteó la realización de este estudio, una condición que se impuso fue que la red de carreteras sobre la que se trabajase fuese extensa, con un número de entrada y salidas importantes. De tal forma que se dispusiese de pares de la matriz O/D (entrada – salida) que cubriesen un amplio espectro en función del volumen de tráfico en la entrada y de su proporción dentro de la matriz O/D respecto al resto de todas las salidas.

También se optó por trabajar sobre una red real conocida, sobre la que se disponía de información real de tráfico, y no sobre una red ficticia, a pesar de que SUMO permite crear este tipo de redes. Aunque esta decisión pueda parecer más costosa, tiene la ventaja de que se dispone de información de partida de los flujos y los resultados obtenidos estarán más próximos a una situación real.

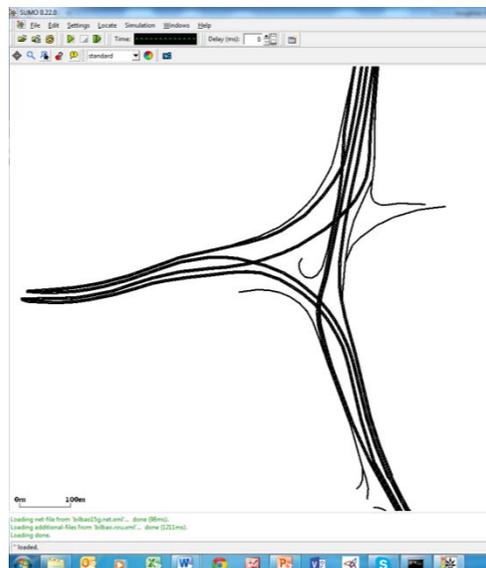
Tomando como partida estas condiciones, se optó por realizar el modelo de simulación de la red metropolitana de carreteras de la ciudad de Bilbao. La elección de esta red de carreteras fue por el conocimiento que se dispone de ella, ya que son varios los proyectos dirigidos por el doctorando aplicados en esta red, como estudios de accidentalidad, la tramificación de la red para el sistema de información web Bizkaimove, la definición del sistema ITS de control y gestión de tráfico, etc.

En la Imagen 42 se muestra el modelo de la red simulada que corresponde con el anillo de la red metropolitana de Bilbao, por el sur formada por la A-8 desde el Pk 103 al Pk 123, y por el norte por la N-637 desde el Pk 8 al Pk 28, lo que supone un tramo de 40 Km, en el que se han modelado 41 entradas y 42 salidas.

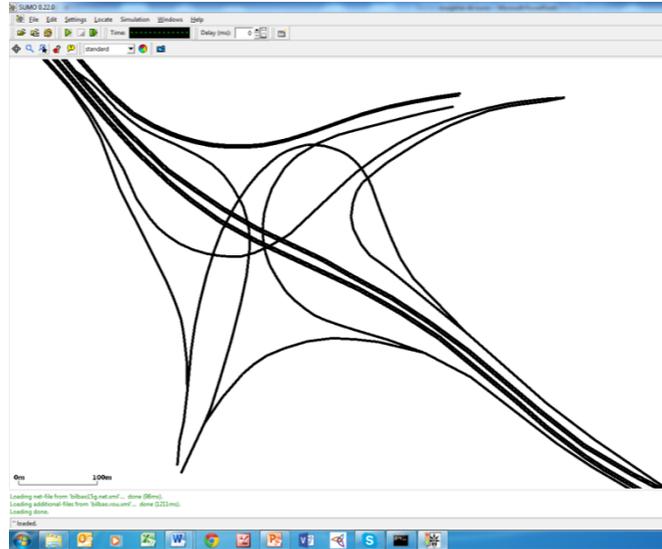


*Imagen 42: Red Simulada en SUMO*

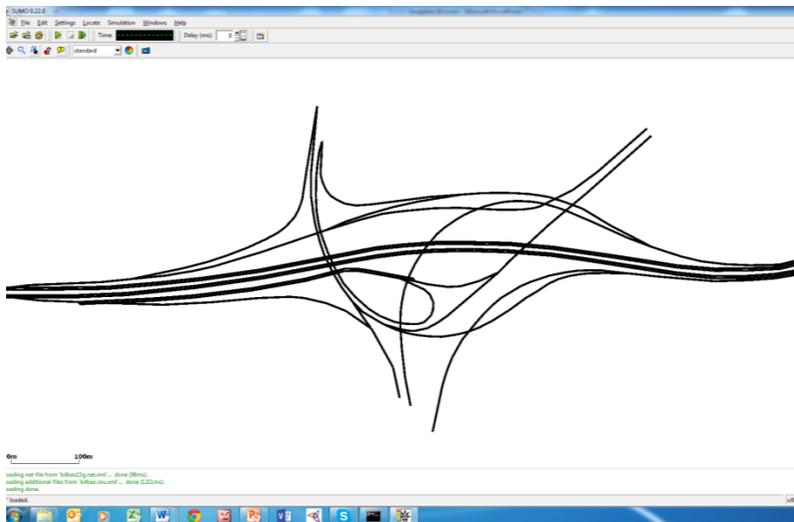
En la Imagen 43 (enlace de Cruces A-8), en la Imagen 44 (enlace de Derio N-637) y en la Imagen 45 (enlace de Basauri A-8) se muestra en detalle el modelo en SUMO de los enlaces más importantes de la red simulada.



*Imagen 43: Detalle enlace de Cruces A-8 simulación SUMO*



*Imagen 44: Detalle enlace de Derio N-637 simulación SUMO*



*Imagen 45: Detalle enlace de Basauri A-8 simulación SUMO*

Esta red de carreteras, que forma parte de la red de alta capacidad de Bizkaia, tiene la velocidad limitada a 80 Km/h en la A-8 y en la N-637 entre Cruces y los túneles de Artxanda. La IMD del tramo de la A-8 es de 89.214 vehículos, con un porcentaje de pesados del 4,9%. En el tramo de la N-637, entre Cruces y Kukularra, la IMD es de 126.234 vehículos, con un porcentaje de pesados del 8,1%, en el resto de la N-637, la IMD es de 56.962 vehículos, con un porcentaje de pesados del 10,5%.

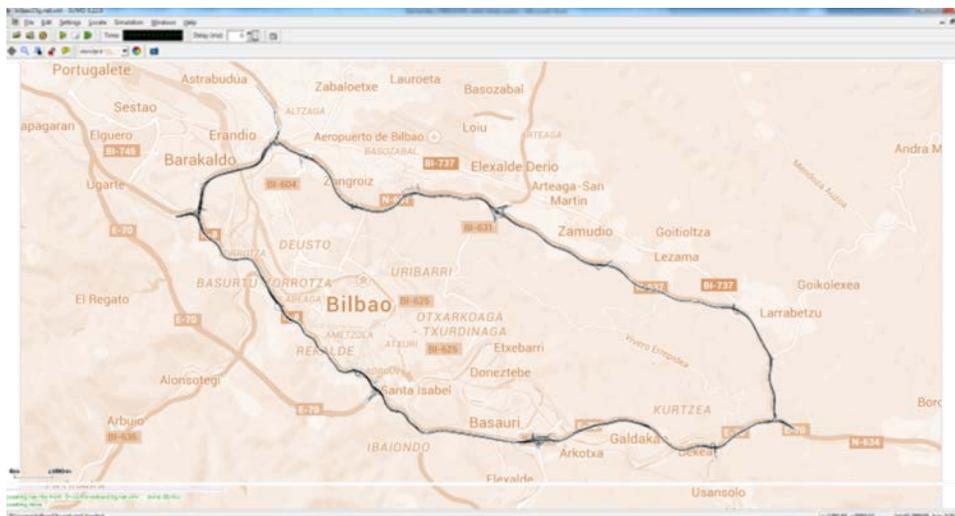
La creación del modelo de red en el simulador SUMO se realizó extrayendo la información de la red física del GIS Open Street Map (OSM). Las razones por las que se seleccionó OSM son:

- Proporciona la información geográfica de forma gratuita.
- La calidad de la información es muy buena.
- El formato de los mapas de OSM es soportado por SUMO.

Una vez realizada la exportación de la red seleccionada desde el OSM, se procedió a limpiar los datos que no correspondían con la red viaria objeto de estudio, vías secundarias y urbanas, carriles bici, ferrocarril, etc.

El siguiente paso fue convertir la red en formato OSM al formato soportado por SUMO, para ello se utilizó la herramienta que dispone el paquete software de SUMO *netconvert*, que permite la conversión de los ficheros con formato .osm al formato .net con el que trabaja el simulador SUMO. Este proceso permitió generar el fichero "bilbao.net.xml", que contiene la descripción completa de la red simulada.

Este fichero requirió de un trabajo manual de revisión y adecuación, ya que en el proceso de importación se produjeron varios errores, tales como diferencias de carriles en la red simulada con la red real, fallos en la conexión entre tramos de la red, principalmente en las uniones y bifurcaciones, así como en los sentidos de circulación en uniones. Una vez corregidos todos estos errores ya se disponía de la red final de la simulación. En la Imagen 46 se ha superpuesto la red simulada en SUMO con la red real obtenida en *Google Maps*.



*Imagen 46: Superposición red simulada con la red real*

Una vez definido el modelo de la red, se creó el modelo de demanda de tráfico. Al no disponer de la matriz O/D real, se optó por introducir los valores reales de flujo de tráfico obtenidos por las espiras magnéticas existentes en la red real. Estos datos son publicados anualmente por el Departamento de Obras Públicas y de Transporte de la Diputación Foral de Bizkaia en el documento “Evolución del tráfico en las carreteras de Bizkaia” (Diputación Foral de Bizkaia, 2013). Esta información se formateó al modelo proporcionado por SUMO y se creó el fichero de simulación “bilbao.flows.xml”.

Además de los flujos de tráfico se tuvo que definir los porcentajes de distribución del flujo en cada punto de decisión de la red, para que el simulador generase el itinerario de cada vehículo, esta información se incorporó en el fichero “bilbao.turns.xml”.

Con la red ya creada y con los datos de movilidad descritos, el simulador SUMO realizó la simulación de tráfico usando el módulo *jrtrouter*, cuya salida es un fichero con la simulación de tráfico de la red, con nombre “bilbao.rou.xml”. Este fichero contiene todas las rutas de los vehículos que han participado en la simulación. La simulación tiene una duración de una hora con un total de 17.482 vehículos.

El contenido del fichero de salida de la simulación es un listado de todos los vehículos, ordenados por el tiempo de inicio en la simulación. La información que se registra de cada vehículo es la siguiente:

- Un identificador único.
- El tipo de vehículo.
- El tiempo en el que aparece en la simulación.
- Listado de todos los segmentos de la red por los que ha pasado el vehículo, siendo el segmento inicial el de entrada a la red y el final el de salida.

A continuación se presenta un extracto del fichero de simulación, "bilbao.rou.xml", en el que se puede ver la información de la simulación asociada a cada vehículo, se han mostrado como ejemplo un vehículo de tipo v1 (turismo) y un vehículo de tipo v2 (pesado):

```
<vehicle id="0.0" type="v1" depart="0.00"
departLane="random">
  <route edges="27451565 133865533 133865534 133865536
133865535 62318906 62318907#0 62318907#1 27536736 27536773
27536774 215326134 215326139 215326135 59529403 59539072
133860964 133860963 92988148 228294882 92988149 163727911
163727904 163727910 133954765 133954763 41434714 41434727
123327157 123327160 42277245 42277244 56743757 56743758
56742278 22796487 205283672 28467389 28467390 205283698
205283702 84962417 84962422 41292924 41292925#0 28599010
129109293#1"/>
</vehicle>
```

```
<vehicle id="1.0" type="v2" depart="0.00"
departLane="random">
  <route edges="27451565 133865533 133865534 133865536
133865535 62318906 62318907#0 62318907#1 27536736 27536773
136588465#0 136588465#1"/>
</vehicle>
```

Todos los ficheros de simulación se han incluido en el *Anexo I: Ficheros simulación SUMO*.

## **5.4 Obtención de la matriz O/D del modelo de simulación**

Una vez creado el modelo de simulación, corregidos los errores y ejecutada la simulación, se procesó el fichero "bilbao.rou.xml" para obtener la matriz O/D de la simulación. El procesamiento consistió en la obtención de las proporciones de vehículos entre todos los pares O/D de la red simulada. La matriz O/D obtenida por este método es la que se tomará como referencia, equivaldría a la matriz O/D real.

La matriz O/D de la simulación se ha incluido en el anexo digital de esta tesis.

## **5.5 Modificación del código del simulador**

Una vez se tenía el modelo de simulación de la red y la matriz O/D de la simulación, que consideraremos como la matriz O/D real, era necesario poder usar el simulador para emular el comportamiento de una red de sensores BT.

Una de las ventajas que ofrece SUMO es la posibilidad de definir diferentes tipos de sensores. El sensor que mejor se ajustaba a las necesidades del estudio es el definido como tipo E3. Este sensor se crea como un conjunto de secciones de entrada y salida. Este sensor detecta los vehículos que atraviesan una sección de entrada y salida asociada al sensor. El sensor registra la detección cuando el vehículo atraviesa la sección de salida.

Para poder simular el comportamiento de un sensor BT, se modificó el código del sensor E3 para que cada vez que un vehículo atravesase una sección de salida registrase el identificador único del vehículo, la información asociada al tiempo de detección, la sección de entrada y la sección de salida de la red.

Se definieron sensores E3 que cubriesen todas las secciones de entrada y salida de la red simulada, 41 secciones de entrada y 42 secciones de salida. De esta forma se consiguió reproducir la información que proporcionaría una red de sensores BT ideales que cubriesen todas las entradas y salidas de la red.

El fichero generado por los sensores E3, permitió obtener la matriz O/D de una red de sensores ideales en la que todos los vehículos llevasen embarcado un dispositivo BT.

Una vez generada la matriz O/D resultado del procesamiento de los sensores E3, se verificó que era idéntica a la matriz O/D resultado de la simulación.

Los sensores E3 creados en SUMO se han definido como sensores BT ideales por las siguientes razones:

- Solo se registra una vez el identificador único del dispositivo BT en cada sensor.
- Todos los identificadores registrados en los sensores corresponden con un dispositivo embarcado en un vehículo que ha realizado un tránsito válido en la red.
- No hay varios dispositivos en un mismo vehículo.

## 5.6 Generación de los datos base del estudio

Una vez llegados a este punto, se dispone de las bases para realizar el experimento, es decir: se conoce la matriz O/D real, se pueden emular diferentes porcentajes de detección de los sensores, eliminando datos de los sensores E3, se puede calcular la matriz O/D asociada al porcentaje de detección y se puede comparar con la matriz real.

Para poder simular el porcentaje de detección, se modificaron los ficheros de salida de los sensores E3, de tal forma que solo aparecieran registrados un porcentaje del total de los vehículos simulados, igual al porcentaje de estudio. Este proceso se realizó mediante un procedimiento aleatorio y se repitió  $n$  veces, obteniendo así una muestra de  $n$  matrices O/D por cada porcentaje de detección.

Por lo tanto, se disponía de una muestra de  $n$  matrices O/D para diferentes porcentajes de detección de los sensores BT ideales, se inició en un 5% y se llegó al 100%, con incrementos del 5%.

Con el objetivo de que la muestra fuese manejable, pero no fuese excesivamente pequeña, se decidió que el tamaño de la muestra  $n$  fuese 30.

## 5.7 Análisis de los resultados

El análisis de los resultados se realizó comparando los valores obtenidos para las  $n$  muestras de cada porcentaje de detección, para un conjunto de pares O/D seleccionados. La selección se realizó ordenando los pares de la matriz O/D por orden de volumen de tráfico, y se seleccionó un conjunto que cubriese todas las opciones, desde pares con mucha carga de tráfico hasta pares con una carga de tráfico muy reducida. Así mismo, se tuvo en cuenta que existiesen pares con diferentes porcentajes del reparto de tráfico con respecto a su entrada.

Para realizar el estudio de cada par O/D seleccionado se creó su diagrama de cajas (box plot) para todos los porcentajes, lo que permitió visualizar la dispersión de los valores obtenidos en función del porcentaje de detección. También se ha analizado la evolución del error absoluto, del coeficiente de variación, del coeficiente de desigualdad de Theil y el error estándar de la media en función del porcentaje de detección.

Además se ha analizado el tamaño mínimo de la entrada necesaria para poder obtener un valor de la matriz O/D estadísticamente válido. Así como el error de la matriz O/D completa respecto a varias entradas significativas.

A continuación se presentan y describen los resultados obtenidos para cada uno de estos estudios. En los diagramas que se muestran en el resto del capítulo, Imagen 48 a Imagen 89, en el eje X se representa el porcentaje de detección del sensor BT y en el eje Y se representa el valor que se ha analizado en cada caso.

### 5.7.1 Diagramas de Cajas (*box plot*)

Los diagramas de cajas o *box plot* nos permiten analizar la dispersión de las muestras y la simetría de una distribución. El diagrama se representa como una caja vertical cuyos extremos representan el primer cuartil, Q1, y el tercer cuartil, Q3, siendo la longitud de la caja igual al rango intercuartílico (RIC). Dentro de la caja se encuentran el 50% de las muestras. La línea intermedia de la caja representa el

percentil 50, es decir, la mediana, Q2. De la caja salen unas líneas o bigotes que se extienden hasta 1,5 veces el rango intercuartílico, es decir hasta  $Q3+1,5 RIC$  y hasta  $Q1-1,5RIC$ . Los valores que están fuera de estas líneas son marcados como valores extremos (“*outliers*”) y se representan con pequeños círculos o estrellas y se marca en número la medida que ha provocado este valor atípico (Mcgill et al., 1978).

En el eje X de los diagramas de cajas se representa el porcentaje de detección de los dispositivos BT. En el eje Y se representa el valor obtenido del porcentaje de contribución de los vehículos para ese par en la matriz O/D. Debido a que las diferencias entre valores son grandes de un diagrama a otro, se ha optado por no emplear la misma escala para todos los diagramas y de esta manera hacer más legibles los resultados.

En la Tabla 4 se muestran los pares que se han seleccionado para el estudio, estos pares cubren todos los rangos de carga y porcentaje del par respecto a la matriz O/D.

Segmento entrada	Segmento salida	Proporción O/D	Vehículos
37829827	96798065	35,69	531
37829827	27652282	21,44	319
136588449#0	27451557	43,24	288
98882354	27451557	22,79	160
27536762#0	136588465#1	40,82	120
129115904	57376419	15,93	104
11503124	129109293#1	21,25	85
157858099	24952572	29,17	49
27451565	82565991	3,09	33
40353345	41732724	4,07	10

Tabla 4: Pares O/D analizados con box plot

**Par 37829827 – 96798065 (Cruces – Avanzada)**

Este par tiene 531 vehículos y un porcentaje de reparto de 35,69%, el plano de situación se muestra en la Imagen 47.



Imagen 47: Plano situación par O/D Cruces – Avanzada

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 48:

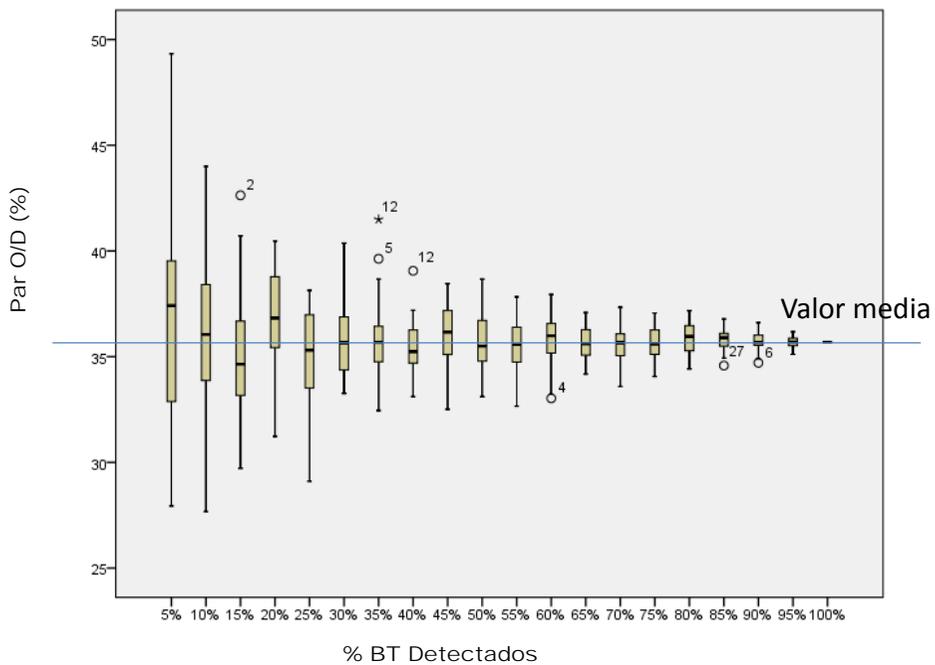


Imagen 48: Diagrama *box plot* par O/D Cruces – Avanzada

**Par 37829827 – 27652282** (Cruces – BEC)

Este par tiene 319 vehículos y un porcentaje de reparto de 21,44%, el plano de situación se muestra en la Imagen 49.



Imagen 49: Plano situación par O/D Cruces – BEC

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 50:

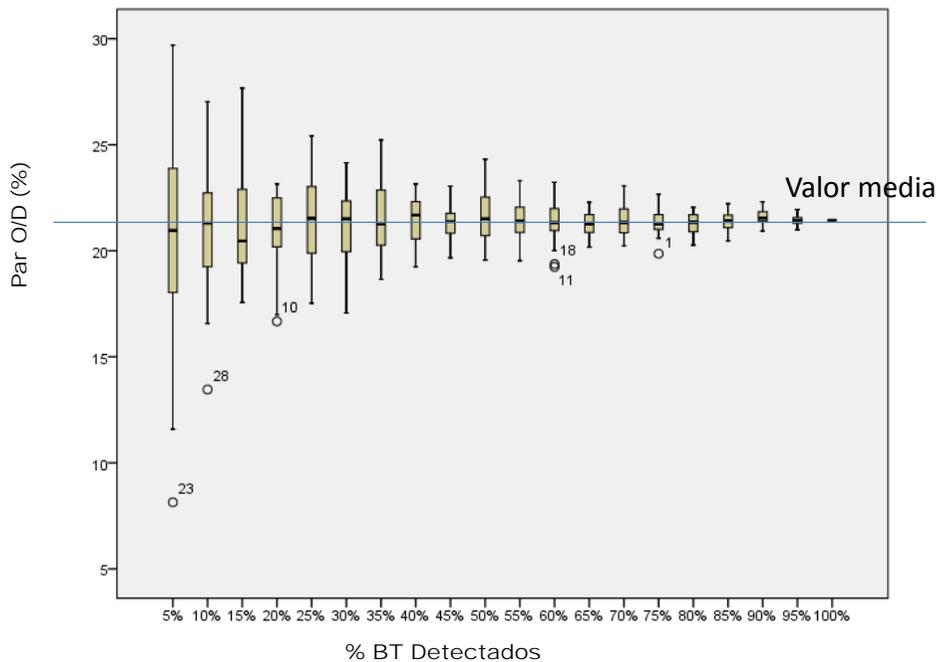


Imagen 50: Diagrama box plot par O/D Cruces – BEC

**Par 136588449#0- 27451557 (ASM – Cruces Santander)**

Este par tiene 288 vehículos y un porcentaje de reparto de 43,24%, el plano de situación se muestra en la Imagen 51.



Imagen 51: Plano situación par O/D ASM – Cruces Santander

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 52:

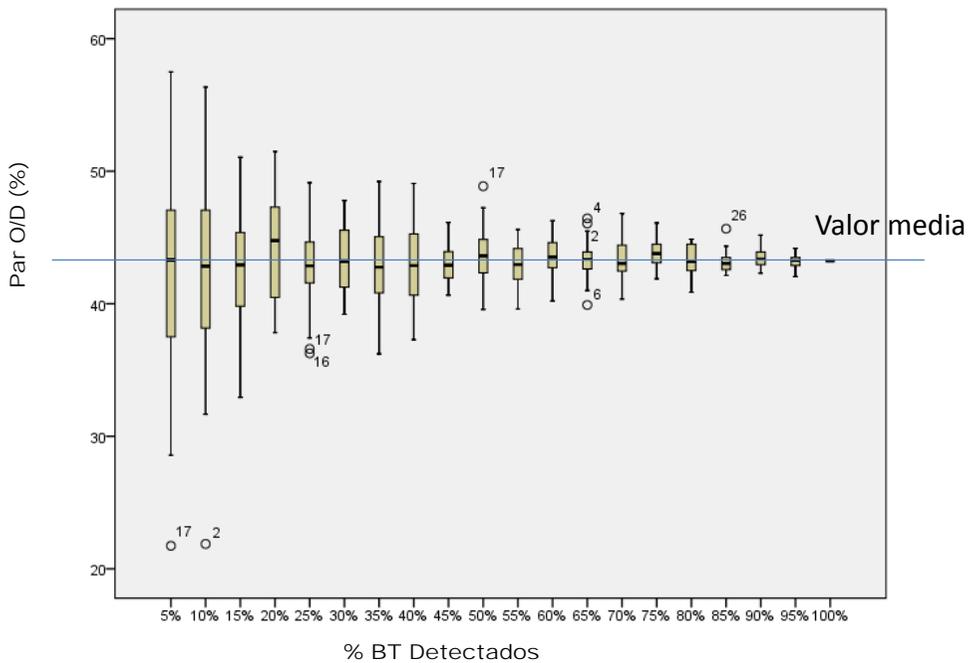


Imagen 52: Diagrama box plot par O/D ASM – Cruces Santander

**Par 98882354 - 27451557 (Miraflores – Cruces Santander)**

Este par tiene 160 vehículos y un porcentaje de reparto de 22,79%, el plano de situación se muestra en la Imagen 53.



Imagen 53: Plano situación par O/D Miraflores – Cruces Santander

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 54:

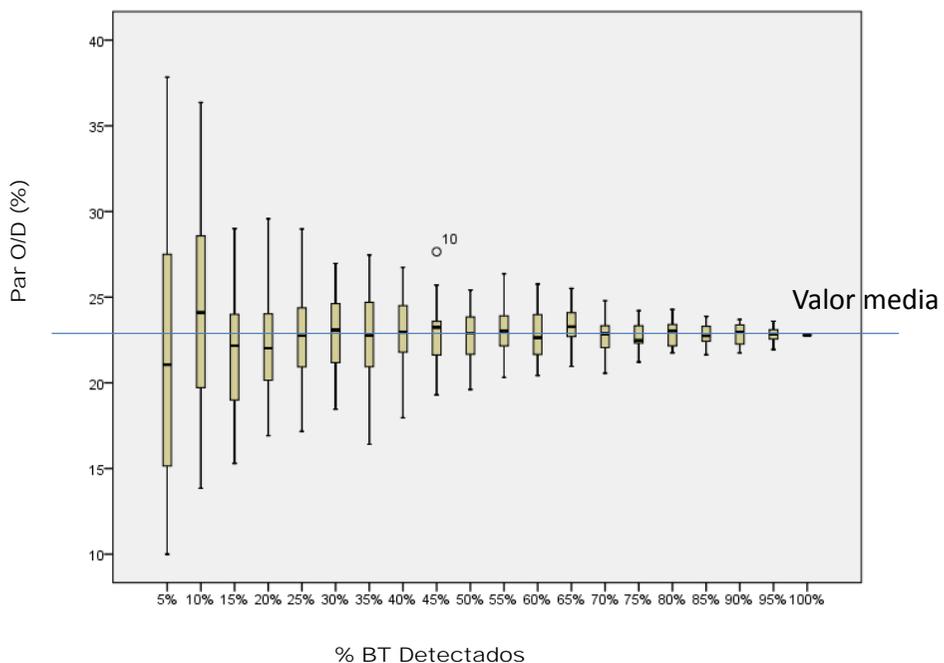


Imagen 54: Diagrama box plot par O/D Miraflores – Cruces Santander

**Par 27536762#0 - 136588465#1** (Kadagua – ASM Bilbao)

Este par tiene 120 vehículos y un porcentaje de reparto de 40,82%, el plano de situación se muestra en la Imagen 55.



Imagen 55: Plano situación par O/D Kadagua – ASM Bilbao

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 56:

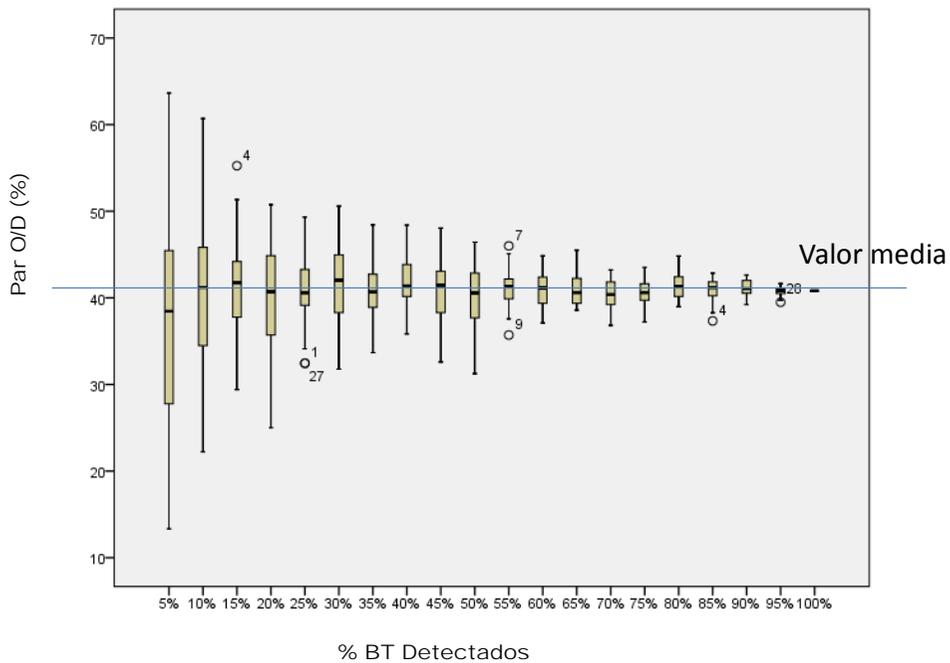


Imagen 56: Diagrama *box plot* par O/D Kadagua – ASM Bilbao

**Par 129115904 - 57376419** (Derio Mungia – Cruces Santander)

Este par tiene 104 vehículos y un porcentaje de reparto de 15,93%, el plano de situación se muestra en la Imagen 57.



Imagen 57: Plano situación par O/D Derio Mungia – Cruces Santander

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 58:

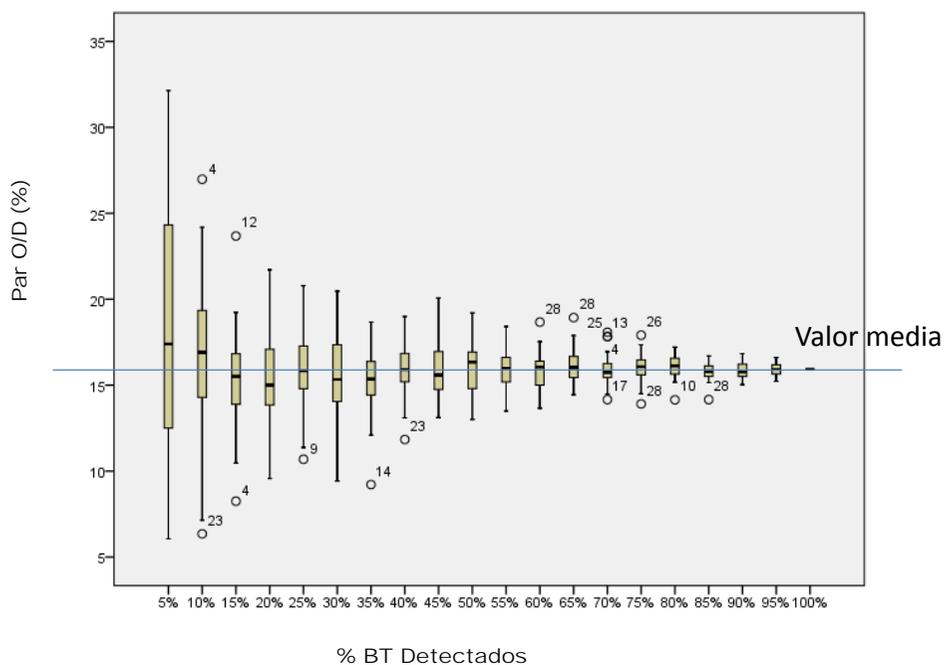


Imagen 58: Diagrama *box plot* par O/D Derio Mungia – Cruces Santander

**Par 11503124 - 129109293#1 (Erletxes – El Gallo)**

Este par tiene 85 vehículos y un porcentaje de reparto de 21,25%, el plano de situación se muestra en la Imagen 59.



Imagen 59: Plano situación par O/D Erletxes – El Gallo

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 60:

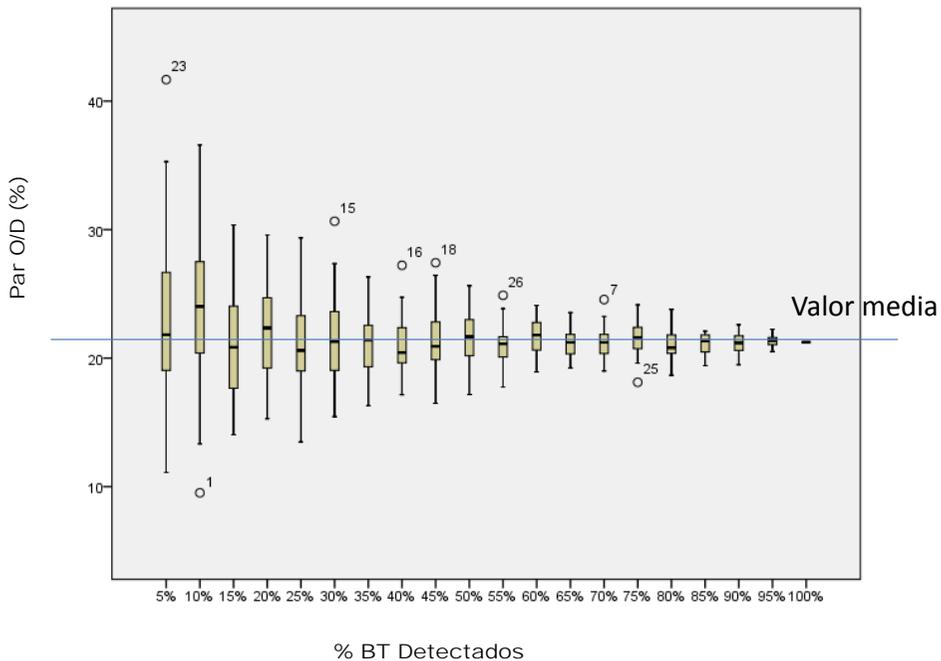


Imagen 60: Diagrama *box plot* par O/D Erletxes – El Gallo

**Par 157858099 - 24952572** (VSM Miraflores – Buia Vitoria)

Este par tiene 49 vehículos y un porcentaje de reparto de 29,17%, el plano de situación se muestra en la Imagen 61.



Imagen 61: Plano situación par O/D VSM Miraflores – Buia Vitoria

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 62:

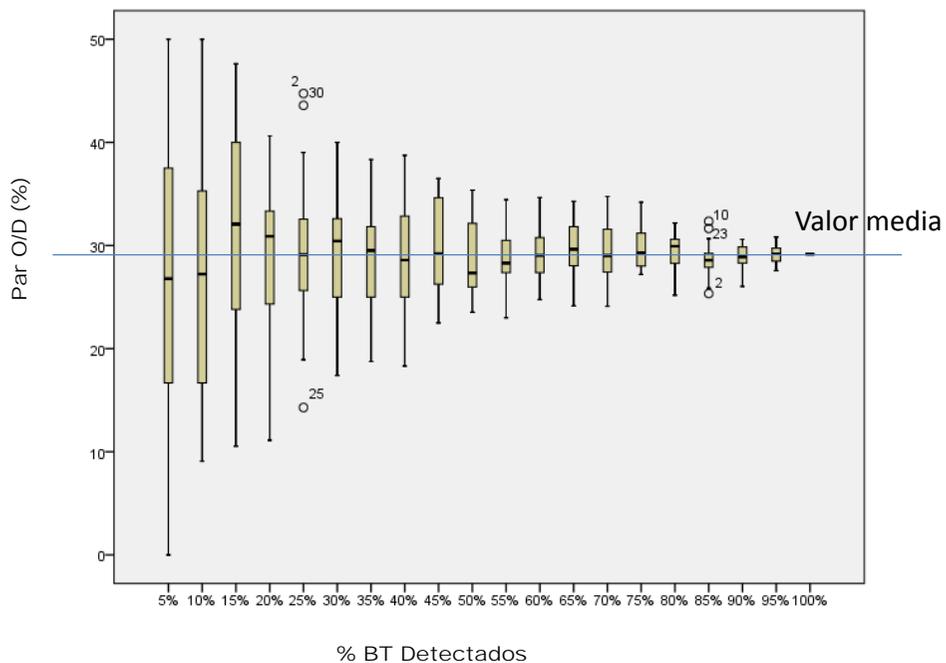


Imagen 62: Diagrama box plot par O/D VSM Miraflores – Buia Vitoria

**Par 27451565 - 82565991** (Cruces – Galdakao)

Este par tiene 33 vehículos y un porcentaje de reparto de 3,09%, el plano de situación se muestra en la Imagen 63.



Imagen 63: Plano situación par O/D Cruces – Galdakao

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la

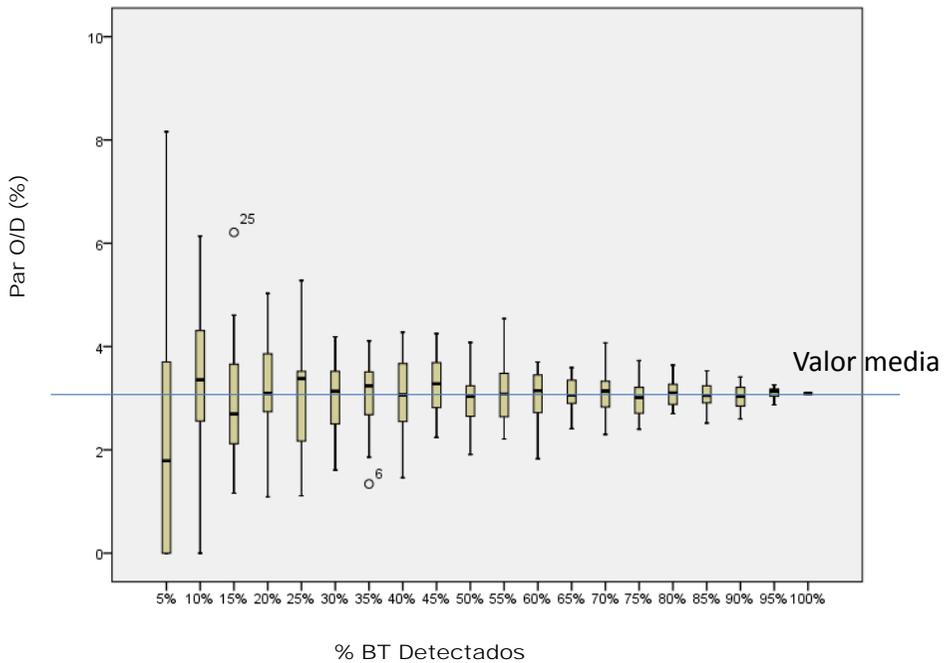


Imagen 64: Diagrama box plot par O/D Cruces – Galdakao

**Par 40353345 - 41732724** (Enekuri – Derio Mungia)

Este par tiene 10 vehículos y un porcentaje de reparto de 4,07%, el plano de situación se muestra en la Imagen 65.



Imagen 65: Plano situación par O/D Enekuri – Derio Mungia

El diagrama *box plot* de este par se muestra en la Imagen 66:

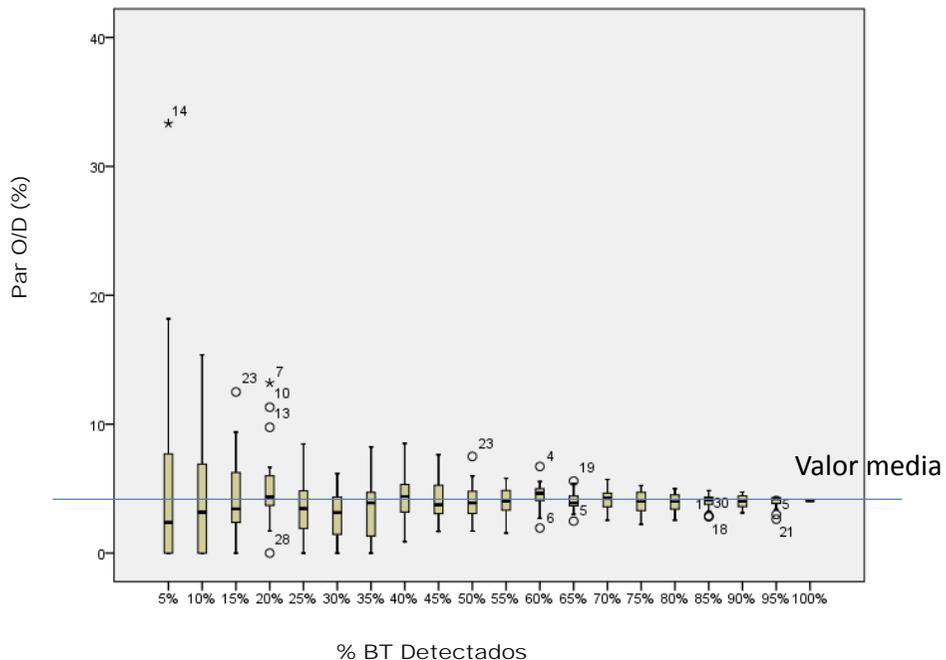


Imagen 66: Diagrama box plot par O/D Enekuri – Derio Mungia

Los diagramas *box plot* de los pares analizados de la matriz O/D muestran el comportamiento esperado, es decir, a medida que aumenta el porcentaje de detección la dispersión de la muestra es cada vez más pequeña y los valores fuera de rango son muy pocos. También se observa en todos los diagramas que a partir del 20% de detección se reduce significativamente la dispersión de la muestra, así como la asimetría. Además, se puede concluir que el valor real de la matriz O/D se encuentra en todas las muestras entre el primer y tercer percentil y en la zona central de la caja.

Para determinar la precisión y la variabilidad de las muestras a continuación se realizan varios análisis estadísticos que ofrecen valores numéricos comparables. En las leyendas de las gráficas se representa con valor entero el número de vehículos de ese par y en porcentaje la contribución del par a la matriz O/D que tiene la misma entrada.

### 5.7.2 Error absoluto medio

Para todos los porcentajes de detección se ha calculado el error absoluto medio (MAE, del inglés Mean Absolute Error) del valor obtenido de la contribución a la matriz O/D de cada par con respecto al valor real.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (3)$$

Siendo:

$n$  el tamaño de la muestra (30).

$x_i$  el porcentaje obtenido de contribución del par a la matriz O/D.

$y_i$  el valor real del porcentaje de contribución del par a la matriz O/D.

En la Imagen 67 se puede observar como a partir de un 20% de detección todos los casos estudiados tienen un MAE inferior a 5,5 puntos.

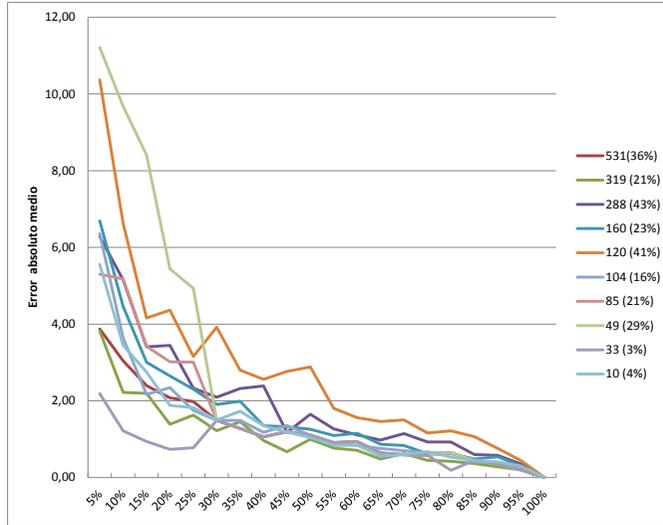


Imagen 67: Error absoluto medio en el cálculo de pares O/D en función del porcentaje de detección

En la Imagen 68 se presentan los resultados del MAE para pares con una contribución similar, entre el 20% y el 30% de la matriz, en este caso el MAE se encuentra entre 1,4 y 5,5 puntos para un porcentaje de detección del 20%.

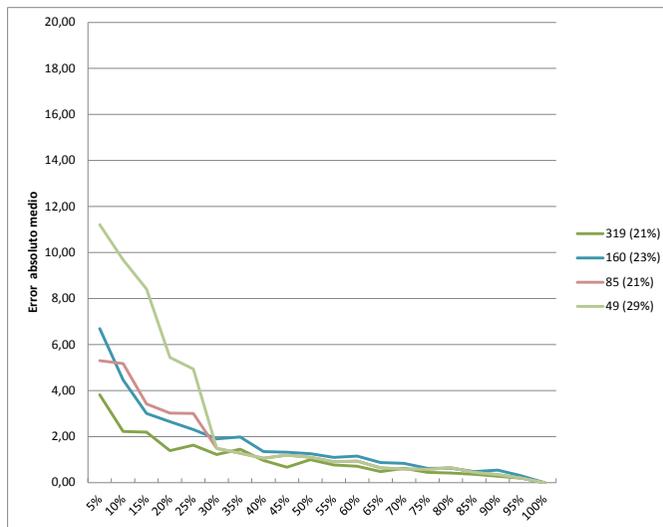


Imagen 68: Error absoluto medio para porcentajes matriz O/D entre 20% y 30%

En la Imagen 69 se puede observar como para los pares con mayor peso en la matriz O/D, lo que suele ir asociado con una mayor carga de tráfico, el MAE para un porcentaje de detección del 20% es inferior a 4,4 puntos.

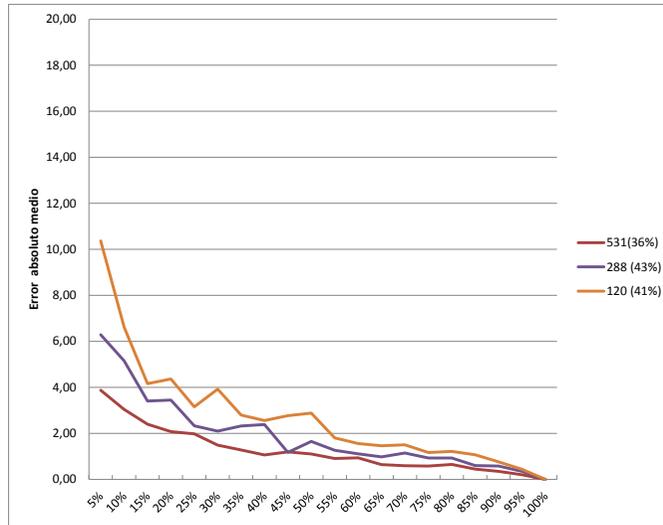


Imagen 69: Error absoluto medio para porcentajes matriz O/D entre 30% y 45%

### 5.7.3 Coeficiente de Variación

Este parámetro se acepta como una medida estandarizada de la dispersión de una distribución de probabilidad y se calcula como la proporción de la desviación típica de la muestra,  $\sigma$ , por la media,  $\bar{x}$ , calculada:

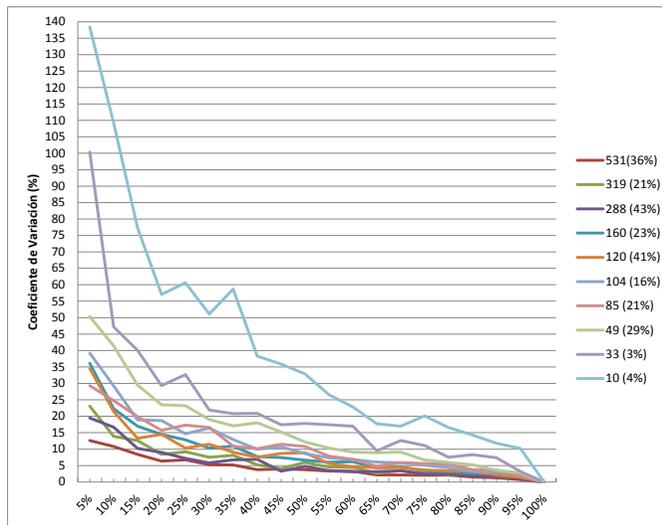
$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100 \quad (4)$$

El CV permite medir el error que se comete en la estimación de los porcentajes de la matriz O/D real, del par indicado, a partir de la muestra obtenida para su cálculo. Este indicador también permite comparar la precisión entre las distintas estimaciones. EUSTAT acepta en encuestas poblacionales un 20% del coeficiente de variación como valor máximo de referencia (EUSTAT, 2015)(DNAE, 2008). Los umbrales que definen son los siguientes:

- Por debajo del 7%, se considera un valor preciso.
- Entre 8 y 14% aceptable.
- Entre el 15% y el 20% es un valor regular.

- Por encima del 20% los datos tendrían que tomarse solo con fines descriptivos (tendencias).

En la Imagen 70 se muestra el porcentaje del coeficiente de variación de las muestras, analizando esta imagen se puede concluir que los pares que tienen una menor contribución a la matriz O/D tienen una dispersión mayor que aquellos que tienen un peso mayor en la distribución. También se observa que se podrían considerar válidos los valores obtenidos de la matriz O/D para la mayoría de pares analizados con porcentajes de detección de dispositivos BT del 20%. Tan solo aquellos pares con un peso pequeño en la matriz O/D o con un volumen de tráfico pequeño tienen valores superiores al 20% del CV para este porcentaje de detección.



*Imagen 70: Coeficiente Variación en el cálculo de pares O/D en función del porcentaje de detección*

En la Imagen 71 y en la Imagen 72 se ha representado el CV para los pares O/D que tienen un peso en la matriz O/D similar pero con un volumen de tráfico diferente. Como se puede observar tienen una precisión mayor los pares con mayor volumen de tráfico para un peso de la matriz O/D similar. También se observa que los pares que más contribuyen a la matriz O/D tienen una precisión aceptable para porcentajes del 20% de detección.

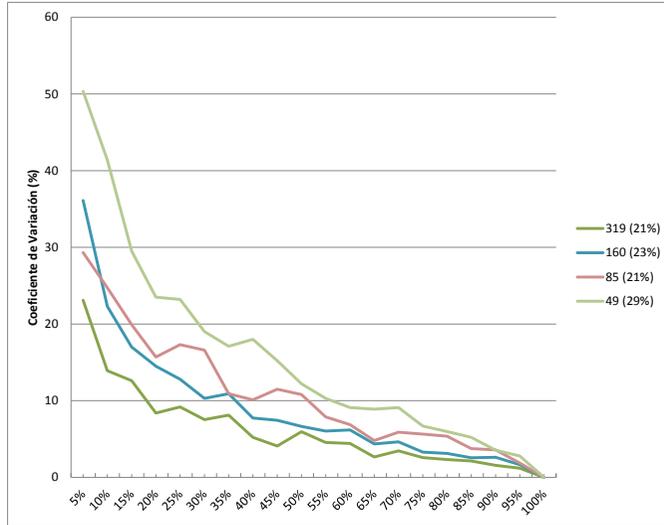


Imagen 71: Coeficiente Variación de pares O/D entre 20% y 30% de contribución

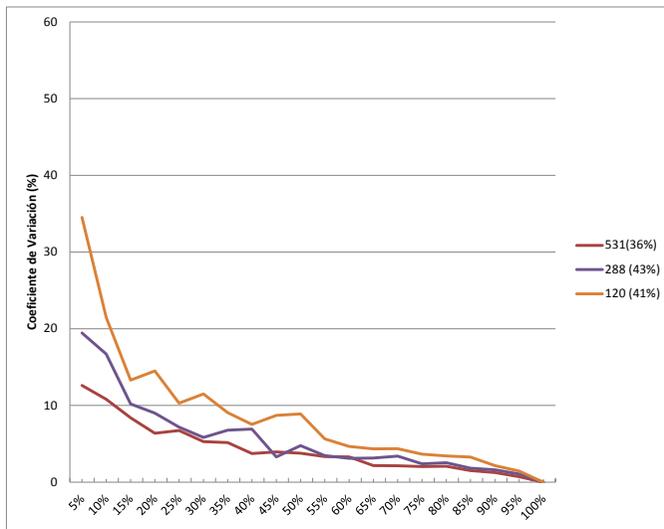


Imagen 72: Coeficiente Variación de pares O/D entre 30% y 45 % de contribución

### 5.7.4 Coeficiente de desigualdad de Theil

El coeficiente de desigualdad de Theil (U) (Song et al., 2013) permite medir el grado de desigualdad entre dos muestras, en nuestro caso se ha aplicado para comparar la desigualdad de la serie que se obtiene para cada porcentaje de detección con el valor de la matriz O/D real.

El resultado del coeficiente de Theil se encuentra en el intervalo  $[0,1]$ , considerándose que el valor  $U = 1$  indica que existe una discrepancia entre las muestras inaceptable y el valor  $U = 0$  indica que las muestras son exactamente iguales. El valor del coeficiente de Theil de 0,2 fija el umbral por debajo del cual es aceptable considerar la similitud entre las muestras comparadas.

El coeficiente de Theil se define como:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (5)$$

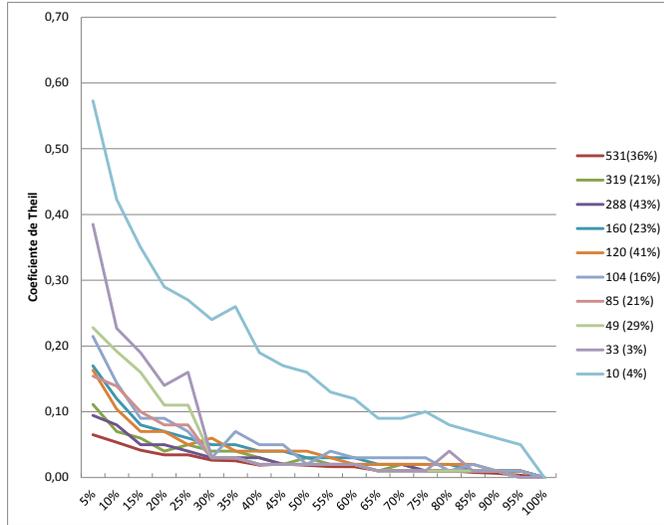
Siendo:

$n$  el tamaño de la muestra.

$x_i$  el  $i$  valor calculado del par O/D.

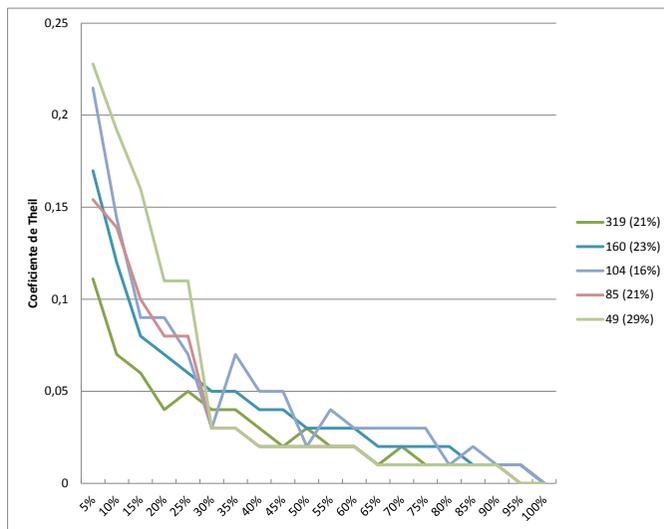
$y_i$  el  $i$  valor real del par O/D.

En la Imagen 73 se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de desigualdad de Theil para los tránsitos analizados en los apartados anteriores. Para un porcentaje de detección del 15%, en todos los casos el valor está por debajo de 0,2 salvo en el par O/D que tiene un porcentaje de contribución a la matriz O/D y un volumen de tráfico muy bajo.



*Imagen 73: Coeficiente desigualdad de Theil*

En la Imagen 74 se han representado los casos que contribuyen entre un 20% y un 30% a la matriz O/D, a partir de un 20% de detección, U tiene un valor inferior a 0,11. En la Imagen 75 se han representado los valores del coeficiente de Theil para aquellos pares O/D que más contribuyen a la matriz O/D. En aquellos casos que contribuyen más del 30% el valor de U es inferior a 0,2, siendo inferior a 0,07 para porcentajes de detección superiores al 20%.



*Imagen 74: Coeficiente desigualdad Theil para porcentajes del 20% al 30% de contribución matriz O/D*

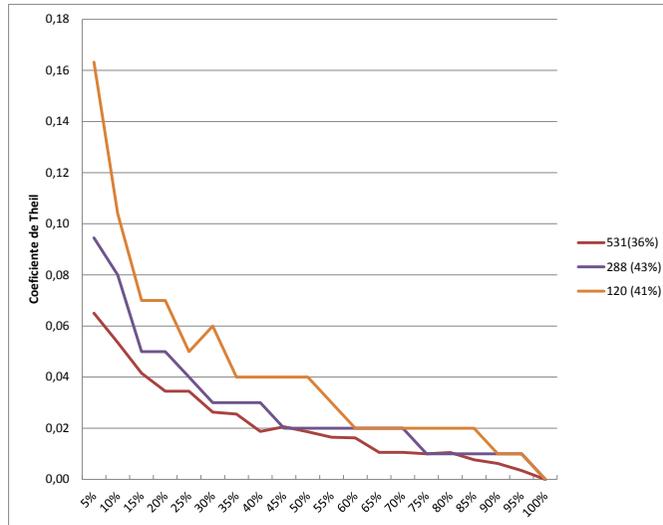


Imagen 75: Coeficiente desigualdad Theil para porcentajes del 30% al 45% contribución matriz O/D

### 5.7.5 Cálculo del tamaño de la muestra mínima

Para poder realizar una inferencia de un dato poblacional, ya sea una media o una proporción a partir de los valores obtenidos de una medida, es necesario fijar una serie de parámetros que definirán el tamaño mínimo de la muestra. El tamaño de la muestra vendrá condicionado por la población total, por el nivel de confianza y por la precisión con la que se desee obtener el parámetro calculado.

El nivel de confianza establece la probabilidad de que la variable estimada se encuentre dentro del intervalo de confianza. El nivel de confianza se representa normalmente por un porcentaje y se define como  $1 - \alpha$ , siendo  $\alpha$  la proporción de las colas de la distribución normal que están fuera del intervalo de confianza.

La fórmula utilizada en diversos estudios (Rodríguez del Águila & Ramírez González, 2007) (Pita Fernandez, 2011), aplicada al estudio que se plantea, para determinar el tamaño de la muestra de un estudio de una variable que siga una distribución normal, conocido el tamaño de la población, es la siguiente:

$$n_{ij} = \frac{N_i * Z_{\alpha}^2 * p_{ij} * q_{ij}}{d^2 * (N_i - 1) - Z_{\alpha}^2 * p_{ij} * q_{ij}} \quad (6)$$

Siendo:

$n_{ij}$  el tamaño de la muestra mínima que se deberá analizar de los vehículos en la salida  $j$  que entran en la red por la entrada  $i$ .

$N_i$  la población total de vehículos en la entrada  $i$ .

$d$  la precisión deseada para el estudio.

$Z_\alpha$  el valor crítico que determina el intervalo de confianza de la distribución normal. Se calcula a partir del valor de  $\alpha$  y representa el límite a partir del cual el área acumulativa de la distribución es inferior a  $\alpha/2$ . (si  $1-\alpha = 0,9$  entonces  $Z_\alpha = 1,645$ , si  $1-\alpha = 0,95$  entonces  $Z_\alpha = 1,96$ ).

$p_{ij}$  la proporción de vehículos que se espera obtener en la salida  $j$  desde la entrada  $i$ .

$$q_{ij} = 1 - p_{ij}.$$

Uno de los objetivos de la tesis es fijar bajo qué condiciones es posible utilizar los sensores BT para calcular la matriz O/D. El objetivo del estudio presentado en este apartado es determinar un umbral mínimo, para el tamaño de la población de vehículos en una entrada de la red de carreteras, que permita obtener una distribución de la matriz O/D, con unos valores mínimos del nivel de confianza y de precisión. El valor obtenido de este umbral fijará de forma indirecta el tiempo mínimo de integración necesario en una instalación real para poder alcanzar ese valor y poder calcular una matriz O/D estadísticamente válida.

El estudio que se ha realizado ha consistido en calcular el tamaño de la muestra  $n_{ij}$  necesario para estimar el porcentaje de la matriz O/D para los 606 pares O/D de las 41 entradas ( $i$ ) y 42 salidas ( $j$ ) simulados de la red metropolitana de Bilbao.

Los parámetros utilizados para el cálculo han sido:  $N_i$ , obtenido de los datos de entrada al simulador y que representa el valor de vehículos que hay en cada entrada de la red ( $i$ ),  $p_{ij}$ , el valor de la proporción del par O/D que tiene como origen la entrada  $i$  y como destino la salida  $j$  que también es conocido de los datos de

entrada al simulador. Los valores fijados para el nivel de confianza han sido del 90% y 95% y para la precisión del estudio del 5% y del 10%.

Una vez obtenido el listado de todos los tamaños de las muestras, se calcula a qué porcentaje corresponde del valor real de vehículos que se tiene para esa salida de cada par O/D. Si el porcentaje resultante es superior al 100% indicará que no es posible calcular ese par O/D con ese tamaño de entrada para ese nivel de confianza y precisión del estudio.

Por lo tanto, si se representa en una gráfica el tamaño de vehículos de todas las entradas de la red y el mayor porcentaje de la muestra respecto al valor real de todos los pares O/D de cada entrada, trazando una recta en el porcentaje 100%, que representa que la muestra es igual al tamaño de la salida, delimitará el valor mínimo del tamaño de la entrada para poder calcular los pares O/D de todas las salidas con los parámetros fijados de precisión e intervalo de confianza.

En la Tabla 5 y en la Tabla 6 se muestra un ejemplo de éste cálculo para la entrada con más vehículos, 2.236 y la de menos vehículos, 41.

Segmento Inicio	Segmento Fin	$N_i$ (Veh Entrada Totales)	Veh Salida	$p_{ij}$ (% matriz O/D real)	$n_{ij}$ (Tamaño Muestra)	porcentaje de la muestra respecto al valor total
30039355	4948327	2.236	2	0,09	0,2	12%
30039355	24952572		70	3,13	8,2	12%
30039355	25806381		118	5,28	13,5	11%
30039355	27652230		472	21,11	44,2	9%
30039355	28507859		88	3,94	10,2	12%
30039355	41732487		1	0,04	0,1	11%
30039355	53627616		4	0,18	0,5	12%
30039355	56743761		90	4,03	10,4	12%
30039355	57376419		1050	46,96	65,5	6%
30039355	82565991		22	0,98	2,6	12%
30039355	205283665		23	1,03	2,8	12%
30039355	221334343		71	3,18	8,3	12%
30039355	129109293#1		29	1,30	3,5	12%
30039355	136588465#1		192	8,59	21,1	11%
30039355	8097697#1		4	0,18	0,5	12%

Tabla 5: Ejemplo cálculo tamaño muestra entrada Kukularra sentido Bilbao

Segmento Inicio	Segmento Fin	$N_i$ (Veh Entrada Totales)	Veh Salida	$p_{ij}$ (% matriz O/D real)	$n_{ij}$ (Tamaño Muestra)	porcentaje de la muestra respecto al valor total
42386539#1	4948327	41	6	14,63	18,8	313%
42386539#1	22663831		6	14,63	18,8	313%
42386539#1	27652230		1	2,44	5,7	569%
42386539#1	40353346		2	4,88	9,8	490%
42386539#1	41732487		3	7,32	12,9	430%
42386539#1	48932076		4	9,76	15,3	383%
42386539#1	57376419		4	9,76	15,3	383%
42386539#1	221334343		1	2,44	5,7	569%
42386539#1	136588465#1		1	2,44	5,7	569%
42386539#1	28597270#1		5	12,20	17,2	345%
42386539#1	8097697#1		8	19,51	21,1	264%
42386539#1	4948327		6	14,63	18,8	313%

Tabla 6: Ejemplo cálculo tamaño muestra entrada Lezama sentido Getxo

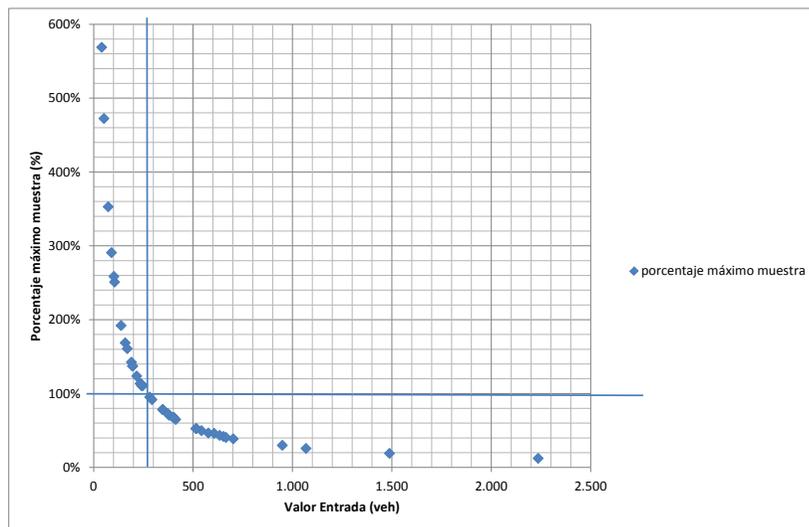
En el anexo digital se incluye el listado completo de los cálculos realizados para las 4 variantes estudiadas, en el *Anexo II: Gráficas tamaño de la muestra* se incluyen las gráficas de todos ellos.

A continuación se presentan los resultados más significativos para las diferentes opciones. En las gráficas se ha representado en el eje X el valor de vehículos de cada entrada de la red, en el eje Y se ha representado dos parámetros: en la gráfica en la que se representa el porcentaje máximo de la muestra, se representa para cada entrada cual es el porcentaje máximo de la muestra que se precisa de todas las salidas asociadas a esa entrada. Por ejemplo, para la entrada con 41 vehículos, correspondería a una salida en la que la muestra necesaria debería ser un 569% del valor real de la salida. En la gráfica en la que se representa el porcentaje mínimo de la muestra, se representa para cada entrada cual es el porcentaje mínimo de la muestra que se precisa de todas las salidas asociadas a esa entrada. Por ejemplo para la misma entrada, sería la salida que requiere un 264% del valor real de su salida.

**a) Intervalo de confianza del 90 % y precisión del 10%**

En la Imagen 76 se observa como para entradas con menos de 280 vehículos, en el periodo de cálculo de la matriz O/D, no se pueden obtener muestras estadísticamente válidas para algunas de sus salidas. También se observa que conforme aumenta la población de entrada, los porcentajes de las muestras de las salidas representan un porcentaje cada vez menor del valor real.

En la Imagen 76, también se aprecia como para valores grandes de la población de entrada, el porcentaje de los datos de la salida que se necesita como muestra es muy pequeño. Lo que significa que con porcentajes de detección inferiores al 20% se obtendrían valores estadísticamente válidos para todas las salidas con un nivel de confianza del 90% y una precisión del 10% para todas las salidas.

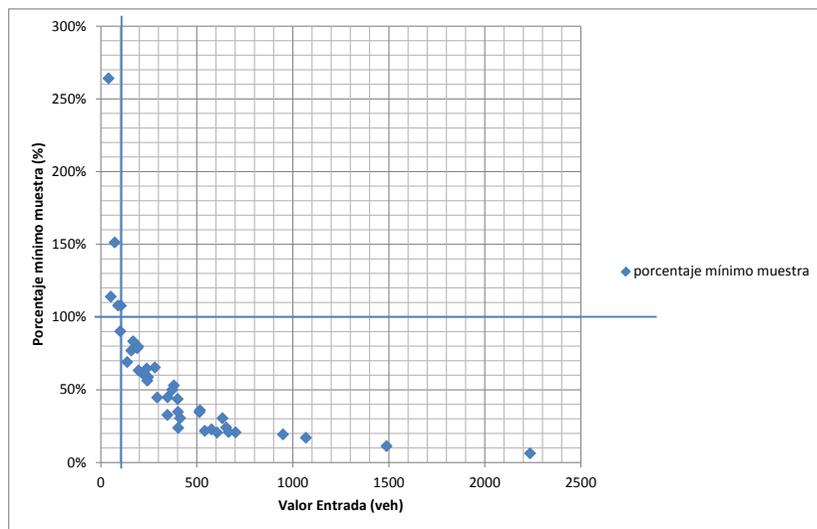


*Imagen 76: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 90% y precisión 10%*

Hay que tener en cuenta que por el tipo de variable que se está calculando, porcentajes de una matriz O/D, las salidas que más contribuyen a la matriz son las que tienen una proporción mayor de vehículos. En la siguiente gráfica se ha representado de todas las salidas asociadas a una misma entrada, aquella cuyo porcentaje de la muestra respecto a su valor real es

más pequeño, que corresponde con el par O/D de cada entrada con mayor carga de tráfico y que por lo tanto más contribuye a la matriz O/D asociada a esta entrada.

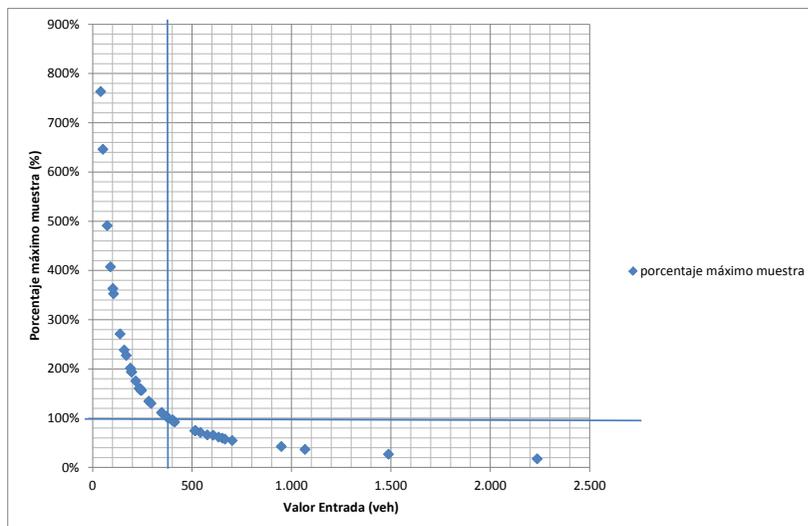
Como se puede observar en la Imagen 77, para las entradas con menos de 100 vehículos no se pueden obtener valores válidos para ninguna de las salidas. Para las entradas de más de 500 vehículos el porcentaje de la muestra de los pares con mayor peso sobre la matriz O/D está entorno al 20%.



*Imagen 77: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 90% y una precisión del 10%*

#### **b) Intervalo de confianza del 95 % y precisión del 10%**

En la Imagen 78 se observa que el valor de la entrada mínimo que se obtiene es de 400 vehículos para el intervalo de confianza 95% y precisión 10%.



*Imagen 78: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 95% y precisión 10%*

### c) Intervalo de confianza del 90 % y precisión del 5%

Para este intervalo de confianza y precisión, solo existen dos entradas que ofrecerían valores estadísticamente válidos para todas las salidas, la entrada de 1.488 con un porcentaje de 76% y 2.236 con un porcentaje del 49%.

### d) Intervalo de confianza del 95 % y precisión del 5%

Para este intervalo de confianza y precisión, solo la entrada de 2.236 vehículos con un porcentaje del 69% ofrecería valores estadísticamente válidos para todas las salidas.

Este estudio nos ha permitido fijar, para un intervalo de confianza y precisión, el valor mínimo de vehículos necesario en cada entrada a la red para poder asegurar que los resultados de la matriz O/D calculada a partir de los datos de los sensores BT sean estadísticamente válidos. Este valor, fijado en 280 vehículos para el intervalo de confianza del 90% y una precisión del 10%, nos determinaría de forma indirecta el tamaño mínimo del intervalo temporal de estudio de la matriz O/D.

### 5.7.6 Análisis de pares completos de la matriz O/D

En el análisis realizado en los apartados anteriores se observa que los pares O/D que más contribuyen a la matriz O/D tienen un buen comportamiento en todos los estadísticos analizados, por ejemplo introducen un error absoluto, en el cálculo de su proporción en la matriz O/D, inferior a 4,4 puntos a partir de un 20% de detección.

En este apartado se ha realizado un estudio del error absoluto y del error absoluto medio (MAE) de todos los pares de la matriz O/D de una misma entrada.

Las entradas seleccionadas para el estudio han sido:

- La primera entrada con datos válidos para un nivel de confianza del 90% y una precisión del 10%. Que corresponde con la entrada de Larrabetxu sentido Santander, de 282 vehículos.
- La primera entrada con datos válidos para un nivel de confianza del 95% y una precisión del 10%. Que corresponde con la entrada de Juan de Garai sentido Donostia, de 403 vehículos.
- Una entrada intermedia, para el nivel de confianza del 90% y 10% de precisión, en el que el tamaño de la muestra más pequeña supone un 46% del valor real de la salida, y para la muestra más grande un 21%. Esta entrada corresponde con el acceso a la red desde el nudo de Barakaldo sentido Bilbao, de 606 vehículos.
- La entrada con mayor volumen de tráfico y que es la única que con un nivel de confianza del 95% y una precisión del 5% proporciona valores estadísticamente válidos para todas las salidas. Esta entrada corresponde con la entrada del nudo de Kukularra sentido Santander (tráfico de la Avanzada sentido Rontegi), de 2.236 vehículos.



42353303	28597270#1	9	3,19
42353303	48875696#0	19	6,74
42353303	8097697#1	52	18,44
Totales		282	100%

Tabla 7: Datos de la matriz O/D entrada Larrabetxu sentido Santander

El resultado del error absoluto de la matriz O/D para esta entrada es el siguiente:

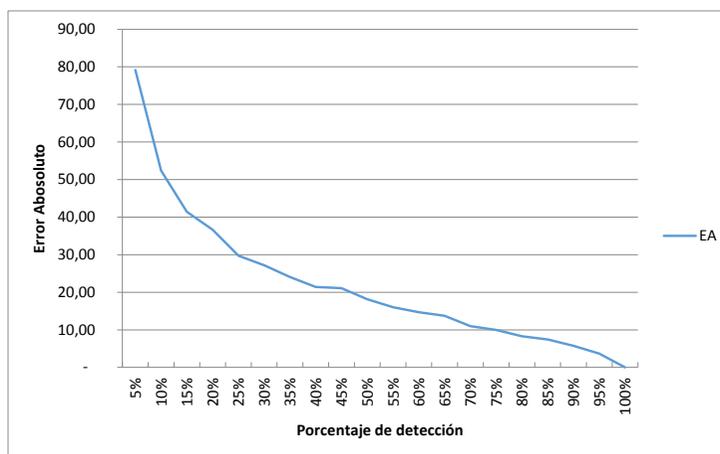


Imagen 80: Error Absoluto entrada Larrabetxu sentido Santander (282 veh)

Como se puede observar en la Imagen 80 el error absoluto de la matriz O/D para esta entrada es muy alto, tan solo a partir de un índice de penetración del 45% el error absoluto estaría por debajo de 20 puntos. Por lo que a pesar de que ésta entrada era la primera que permitía obtener datos estadísticamente correctos de todas sus salidas, tal y como ha demostrado el estudio realizado del tamaño de la muestra en el apartado 5.7.5, el error que se cometería con los índices de penetración actuales de la tecnología BT sería alto.

En la Imagen 81 se muestra el MAE asociado a esta entrada teniendo en cuenta que tiene asociadas 20 salidas. Los resultados muestran que a partir de un 20% de detección el MAE es de 1,8 puntos.



En la Tabla 8 se presentan los datos de los pares de la matriz O/D relacionados con esta entrada.

Entrada	Salida	Veh salida	$p_{ij}$ (% Matriz O/D)
25490709	22663831	2	0,50
25490709	24952572	52	12,90
25490709	27652230	1	0,25
25490709	28507859	238	59,06
25490709	40353346	3	0,74
25490709	56743761	67	16,63
25490709	57376419	4	0,99
25490709	82565991	9	2,23
25490709	83797792	1	0,25
25490709	205283665	9	2,23
25490709	129109293#1	16	3,97
25490709	8097697#1	1	0,25
Totales		403	100%

Tabla 8: Datos de la matriz O/D entrada Juan de Garai sentido Donostia

El resultado del error absoluto de la matriz O/D para esta entrada es el siguiente:

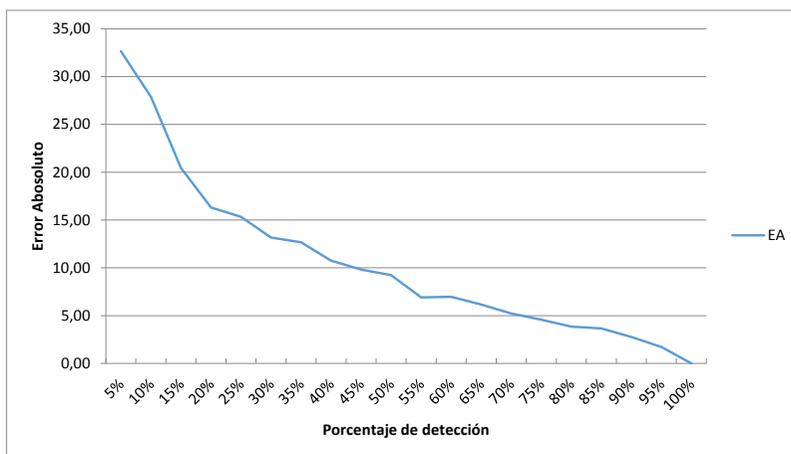


Imagen 83: Error Absoluto entrada Juan de Garai sentido Donostia (403 veh)

La Imagen 83 muestra como a partir del 25% de porcentaje de detección el error absoluto es de 15 puntos. Para poder obtener errores absolutos inferiores a 10 puntos, el porcentaje de detección debería ser superior al 40%.



En la Tabla 9 se presentan los datos de los pares de la matriz O/D relacionados con esta entrada.

Entrada	Salida	Veh salida	$p_{ij}$ (% Matriz O/D)
57376411#0	24952572	19	3,14
57376411#0	25806381	25	4,13
57376411#0	28507859	20	3,30
57376411#0	48932076	1	0,17
57376411#0	56743761	19	3,14
57376411#0	57376415	167	27,56
57376411#0	57376419	297	49,01
57376411#0	82565991	2	0,33
57376411#0	205283665	3	0,50
57376411#0	221334343	22	3,63
57376411#0	129109293#1	4	0,66
57376411#0	136588465#1	27	4,46
Totales		606	100%

Tabla 9: Datos de la matriz O/D entrada Barakaldo sentido Bilbao

El resultado del error absoluto de la matriz O/D para esta entrada es el siguiente:

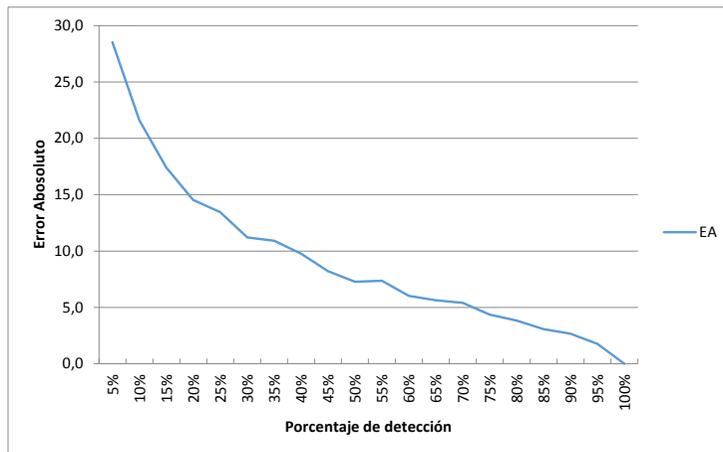


Imagen 86: Error Absoluto entrada Barakaldo sentido Bilbao (606 veh)

Como se puede observar en la Imagen 86, el error absoluto cae por debajo de 15 puntos con un porcentaje de detección del 20%.



En la Tabla 10 se presentan los datos de los pares de la matriz O/D relacionados con esta entrada.

Entrada	Salida	Veh salida	$p_{ij}$ (% Matriz O/D)
30039355	4948327	2	0,09
30039355	24952572	70	3,13
30039355	25806381	118	5,28
30039355	27652230	472	21,11
30039355	28507859	88	3,94
30039355	41732487	1	0,04
30039355	53627616	4	0,18
30039355	56743761	90	4,03
30039355	57376419	1050	46,96
30039355	82565991	22	0,98
30039355	205283665	23	1,03
30039355	221334343	71	3,18
30039355	129109293#1	29	1,30
30039355	136588465#1	192	8,59
30039355	8097697#1	4	0,18
Totales		2.236	100%

Tabla 10: Datos de la matriz O/D entrada Kukularra sentido Bilbao

El resultado del error absoluto de la matriz O/D para esta entrada es el siguiente:

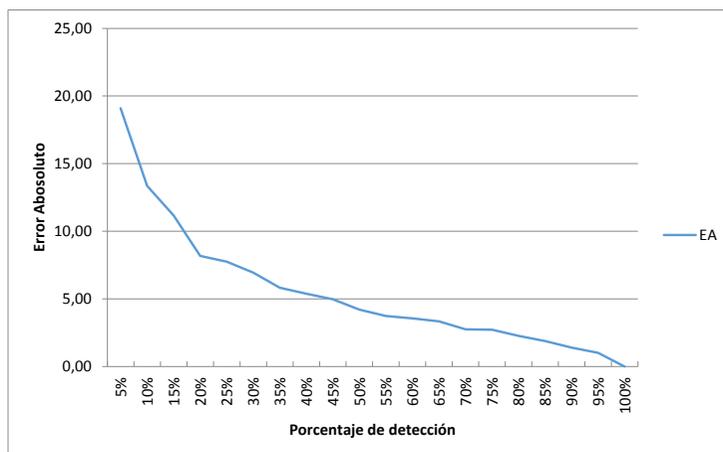


Imagen 89: Error Absoluto entrada Kukularra sentido Bilbao (2.236 veh)

Como se puede observar en la Imagen 89, a partir del 20% de detección el error absoluto cae por debajo de 8,2 puntos.

En la Imagen 90 se muestra el resultado del MAE para esta entrada que tiene asociadas 15 salidas en la matriz O/D. El MAE para un porcentaje del 20% de detección está por debajo de 0,6 puntos.

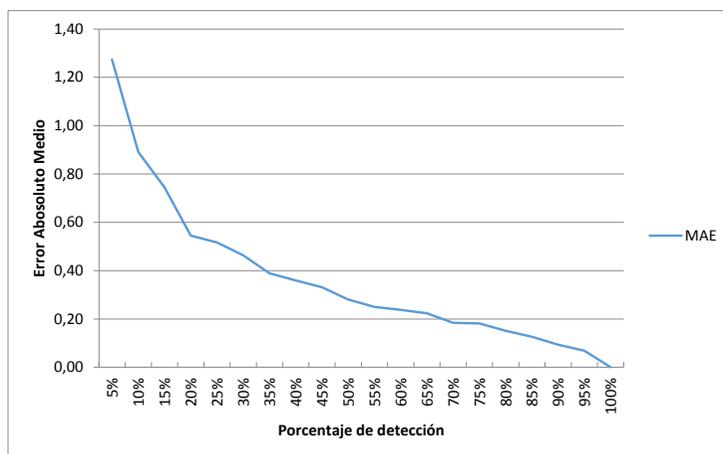


Imagen 90: MAE entrada Kukularra sentido Bilbao (2.236 veh)

## 5.8 Conclusiones del experimento.

Los diagramas de cajas han permitido visualizar como se reduce la dispersión y la asimetría de las medidas a partir del 20% de detección. Además, el valor real de la medida de la contribución al par O/D, para todos los porcentajes de detección, se encuentra en la zona central de la caja.

El error absoluto obtenido a partir del 20% de detección está por debajo de 5,5 puntos en todos los casos estudiados. Hay que destacar que para los pares que más contribuyen a la matriz O/D, con porcentajes superiores al 35% de la matriz, el error absoluto cae por debajo de 4,4 puntos para un porcentaje del 20% de detección.

El análisis del Coeficiente de Variación permite afirmar que para los pares de mayor peso en la matriz O/D, que tienen un mayor volumen de tráfico, la precisión de la medida es aceptable para porcentajes de detección superiores al 20%.

Los valores obtenidos para el coeficiente de desigualdad de Theil también permiten afirmar que la predicción de la matriz O/D utilizando los sensores BT es buena, en los pares con mayor contribución a la matriz O/D incluso con porcentajes bajos de detección 5 – 10%. Para pares con una contribución a la matriz O/D entre un 20 y 30%, la predicción se puede considerar buena a partir de un porcentaje del 15% de detección. Los pares con una contribución muy pequeña, inferior al 5% y con una intensidad de tráfico muy pequeña, inferior a 10 veh/h, precisan de un porcentaje de detección superior al 40% para poder considerar aceptable la predicción.

El estudio realizado para determinar el tamaño de la muestra ha permitido fijar un umbral para el tamaño mínimo de la población de entrada en función del intervalo de confianza y de la precisión definida para su cálculo. Hay que tener en cuenta que ese umbral se ha fijado sobre la salida más pequeña de todas las entradas, que en casi todos los casos se refieren a salidas de 1 – 2 vehículos y con un porcentaje de la matriz O/D inferior al 1%. El umbral para un intervalo de confianza del 90% y un 10% de precisión está en 280 vehículos. Esto indica que no es posible calcular matrices O/D dinámicas de forma instantánea y será necesario un periodo de integración mínimo que asegure una población de entrada en función del intervalo de confianza y la precisión fijada para el cálculo.

El análisis que se ha hecho de la matriz O/D de toda una entrada, ha permitido determinar que el error absoluto que se obtiene, para entradas que cumplen con la condición anterior, no siempre es aceptable para los porcentajes de detección de los sensores BT actuales (Stevanovic et al., 2014). Para obtener matrices O/D dinámicas, con un porcentaje de detección de un 20%, con errores absolutos inferiores a 15 puntos deberíamos asegurar un valor mínimo en la entrada de 400 vehículos y para errores absolutos inferiores a 10 puntos el número de vehículos en la entrada debería tener alrededor de 1000 vehículos.

Por lo tanto, los resultados demuestran que es posible plantear la obtención de matrices O/D dinámicas de forma directa, con los datos que proporcionan los sensores BT simulados en SUMO. Para un tamaño de la entrada superior a los 1.000 vehículos, para un porcentaje de detección de un 20% el error absoluto sería inferior a 10 puntos.

## **6 Aplicación de los XXXXXX XXXXXXXXXXXX al cálculo de la Matriz O/D dinámica**

---

El objetivo principal de esta tesis es definir un modelo que permita determinar la matriz O/D de una red de carreteras extensa sensorizada mediante sensores BT, teniendo en cuenta su implantación sobre los sistemas ITS actuales. De tal forma que la instalación de este nuevo tipo de sensorización permita extender la vida útil de los sistemas actuales, dotándoles de nuevas funcionalidades.



## 6.1 Modelo de conocimiento

Para que los XXXXXs que formarán el XXX que se va a diseñar, puedan interactuar con el entorno y colaborar entre sí para poder conseguir el objetivo del sistema, es necesario que se haya definido una ontología común. Esta ontología permitirá definir el dominio de la aplicación y permitirá a los XXXXXs entender los mensajes que se intercambien entre sí.

La ontología va a permitir definir cada elemento que forma el sistema mediante conceptos, también permitirá definir las relaciones que existen entre los elementos que forman el dominio, así como las reglas que se aplicarán sobre los propios conceptos o sus relaciones.

Los XXXXXs van a aplicar reglas sobre la información que se obtenga de los sensores o que se intercambien entre ellos. Por lo tanto, es necesario que esta información sea conocida por todos los XXXXXs, que la entiendan y sepan interpretarla. La ontología que se va a definir a continuación permite que la información necesaria para el sistema sea conocida, y sea común para todos los elementos que forman parte del sistema, en nuestro caso los XXXXXs del XXX.

La ontología se ha modelado usando la herramienta Open Source Protégé (Stanford, 2015), que permite editar ontologías con el lenguaje de ontología web (OWL, del inglés Ontology Web Language) (Mankovskii et al., 2009).

En la tesis de Tomás López, 2006 se definió una ontología que permitía modelar el dominio del tráfico interurbano, enfocada a problemas de gestión de tráfico. A continuación se presenta una modificación de esta ontología, adaptada al problema concreto de este trabajo y en la que se incluyen elementos que no se tuvieron en cuenta en su momento, como son los conceptos relacionados con los parámetros de movilidad y otros que han surgido a posteriori como son los sensores BT.

Tal y como se desarrolla en Tomás, 2006, el dominio del tráfico se describe mediante diferentes subdominios: el de la carretera, el del comportamiento del tráfico y el del equipamiento.

### 6.1.1 Subdominio de la carretera

Este subdominio define los aspectos relacionados con la topología de la red viaria y se compone de los siguientes conceptos.

- Carretera: representa una vía de comunicación, proyectada y construida fundamentalmente para la circulación de vehículos a motor. Se compone de un conjunto de segmentos y enlaces.
- Segmento: representa una parte de una carretera de un solo sentido de circulación con las mismas características: número de carriles, ancho de la calzada y arceles, etc.
- Punto: define una localización exacta dentro de un segmento.
- Enlaces: representan las zonas de la carretera donde se conectan dos o más segmentos. Los enlaces pueden clasificarse en:
  - Entrada: enlace de entrada a la red.
  - Salidas: enlace de salida de la red.
  - Bifurcaciones: representa ramificaciones de un segmento en dos o más segmentos.
  - Uniones: enlaces donde dos o más segmentos confluyen en un único segmento.
  - Acuerdos: representan enlaces donde se unen segmentos de diferentes características.
  - Trenzados: representan enlaces de carretera donde los flujos de tráfico se cruzan entre sí. Por ejemplo, áreas en las que la circulación se ve afectada por los movimientos de entrada y salida.
- Tramo: representa un conjunto de segmentos y enlaces, contiguos, que están incluidos dentro de una misma carretera.

- Itinerario: representa un camino entre un origen y un destino, compuesto por segmentos y enlaces que pueden pertenecer a varias carreteras.

En el dominio del XXX que se va a desarrollar, tan solo se hará uso de los enlaces de tipo acuerdo, entrada y salida.

## 6.1.2 Subdominio del equipamiento de la carretera

En este subdominio se describe el equipamiento de la carretera, los sensores (ETD, Meteorológicas, DAI, CCTV, Poste SOS, AVI) y actuadores (PMV). A continuación, se describe en detalle el equipamiento que está directamente involucrado con la tesis y que servirá al XXX para interactuar con el entorno y para su colaboración mediante el intercambio de información y reglas.

- Estación Remota Universal (ERU): este equipamiento es el encargado de la gestión local del equipamiento instalado en la carretera, permite el procesamiento de la información y las comunicaciones entre los sensores y efectores instalados en la carretera con el Centro de Gestión de Tráfico (CGT).
- Nodo de Concentración Local (NCL): este equipamiento es el encargado de crear los nodos de comunicaciones de la red troncal de tráfico. Una NCL se encarga de concentrar la información de las ERU de un tramo o de una carretera.
- Estación de Toma de Datos (ETD): este equipamiento es el encargado de obtener la información de tráfico, normalmente mediante el uso de lazos de inducción magnética. La información que proporciona este equipo básicamente es la intensidad de tráfico, la velocidad media, la ocupación, la clasificación de vehículos, alarXXX por congestión y por vehículo en sentido contrario.
- Sensor BT: este equipamiento es el encargado de la lectura de las direcciones MAC de los dispositivos embarcados en los vehículos que

circulan por la carretera. Permite obtener la dirección MAC del dispositivo y el *timestamp* del momento de la detección.

### 6.1.3 Subdominio del comportamiento del tráfico

En este subdominio se describen los parámetros que modelan el comportamiento del tráfico y sus relaciones. Tal y como se ha realizado en el apartado anterior, solo se describirá un subconjunto directamente relacionado con el XXX que se va a modelar. Los parámetros de este subdominio pueden clasificarse en:

Parámetros de tráfico:

- **Intensidad:** número total de vehículos que entran o salen de una carretera por un enlace o que han atravesado una sección transversal de un segmento o enlace, en un determinado intervalo de tiempo.
- **Velocidad:** velocidad de los vehículos que circulan entre dos puntos de la red, su valor puede darse como un valor medio o instantáneo.
- **Porcentaje:** relación entre intensidades de vehículos, en el sistema XXX se referirá a la relación de los vehículos que salen por una salida de la red en relación a los vehículos que han entrado por una determinada entrada.
- **Dirección MAC:** dirección de la MAC del dispositivo BT detectado por el sensor.
- **Timestamp:** momento temporal de la detección de la dirección MAC expresado en los segundos transcurridos desde el 1 de enero de 1970.

Parámetros de movilidad:

- **Tránsito:** representa el desplazamiento de un vehículo entre dos puntos de la red en los que hay instalado un sensor que ha permitido la identificación del vehículo, o de un dispositivo que lleve embarcado, y su seguimiento a través de la red. El tránsito puede ser completo si ha comenzado en un enlace de tipo entrada y finalizado en un enlace de tipo salida, o parcial, si

no empieza y acaba en un enlace de tipo entrada o salida. También se puede clasificar como válido o no válido, en función de los parámetros que fijarán los algoritmos de filtrado. Estos algoritmos serán aplicados por los XXXXXXs antes de obtener el tiempo de viaje o contabilizar el tránsito en la matriz O/D.

- Tiempo de viaje: representa el tiempo que ha tardado un vehículo para desplazarse entre dos puntos de la red. Su valor puede darse como un valor medio o instantáneo. En el caso del valor medio  $\overline{T_{ij}}(k)$ , representa el valor medio de los tiempos de viaje de los vehículos que son detectados en el sensor  $i$  y que posteriormente han sido detectados en el sensor  $j$  en el intervalo  $k$ .
- Matriz O/D: representa la distribución espacial de los tránsitos en un periodo de tiempo dado en una red sensorizada, en nuestro caso por sensores BT. Se puede expresar en valores enteros o en porcentaje. El cálculo de cada componente de la matriz se realiza mediante la ecuación ( 7 ), donde:
  - $NV_i(k)$  representa el número de vehículos detectados en el sensor  $i$  en el intervalo  $k$ .
  - $NV_{ij}(k)$  representa el número de vehículos detectados en el sensor  $j$  que fueron antes detectados en el sensor  $i$  en el intervalo  $k$ .

$$M_{ij}(k) = \frac{NV_{ij}(k)}{NV_i(k)} \quad (7)$$

- $M_{ij}(k)$ , sería la componente  $[i, j]$  de la matriz O/D y representaría la proporción de los vehículos que han realizado el tránsito entre el sensor  $i$  y el  $j$  con respecto a todos los tránsitos que tienen como origen el sensor  $i$ , en el intervalo  $k$ .

En la Imagen 91 se ha incluido el esquema conceptual, diseñado con Protégé (Stanford, 2015), del dominio del tráfico aplicado al XXX desarrollado en la tesis.

*Imagen 91: Conceptos de la ontología del XXX de cálculo de matrices O/D*

## **6.2 Diseño del XXX para el cálculo matriz O/D en los sistemas ITS actuales**

El diseño del XXX se ha realizado usando la metodología INGENIAS, tal y como se ha descrito y justificado en el apartado 3.7.4. Esta metodología facilita la modelización del XXX desde distintas vistas del sistema. De tal forma que el conjunto de todas estas vistas permite una representación completa del sistema. Los modelos que definen la metodología son:

- El modelo de la organización.
- El modelo del entorno.
- El modelo de conocimiento.
- El modelo de XXXXXS.
- El modelo de interacciones entre XXXXXS.

### **6.2.1 Modelo de la organización**

El punto de vista de la organización permite modelar el sistema desde su aspecto más general, describiendo la organización como una estructura donde van a existir los XXXXXS, los recursos, los objetivos y las tareas. Este modelo, partiendo de la

organización y de su principal objetivo o propósito permite realizar una descripción de las principales actividades del sistema, y organizar los XXXXXXs en relación a las tareas que realizan.

El XXX modelado solo cuenta con una organización, el Centro de Gestión de Tráfico. La principal actividad que se ha fijado en el modelo a la organización es la obtención de la matriz O/D de la red sensorizada con sensores BT, teniendo como actividad complementaria la obtención de los tiempos de viaje asociados a los itinerarios existentes en dicha red. Esta actividad principal se puede dividir en varias subactividades, como son: la identificación de los vehículos a partir de su dispositivo BT en cada emplazamiento, la creación de tránsitos entre sensores y su filtrado, la obtención de los parámetros de movilidad a nivel de tramo y la obtención de los parámetros de movilidad a nivel de la red global.

La descripción social de la organización se presenta en la Imagen 92.

*Imagen 92: Modelo organización del XXX*

A continuación se describe la descomposición que se ha realizado del sistema teniendo en cuenta los objetivos, las actividades y las tareas.



- La Imagen 93 representa el flujo de trabajo de la organización, donde se han plasmado las relaciones entre las distintas tareas que debe realizar el XXX. Cada tarea tiene un XXXXX responsable de ejecutarla, también se muestran los datos y la información que la tarea consume o produce. Los datos que produce una tarea, son consumidos por la tarea siguiente, estableciéndose las relaciones típicas productor-consumidor de este tipo de diagrama. Además se muestran las aplicaciones, algoritmos y recursos hardware y software que son necesarios para que pueda ejecutarse cada tarea.

*Imagen 93: Flujo de Trabajo de la organización*

## 6.2.2 Modelo del entorno

Este modelo permite identificar y definir el rol de todos los elementos externos que van a interactuar con el XXX. Estos elementos permiten a los XXXXXXs percibir el estado del entorno y sus variaciones, así como actuar sobre él.

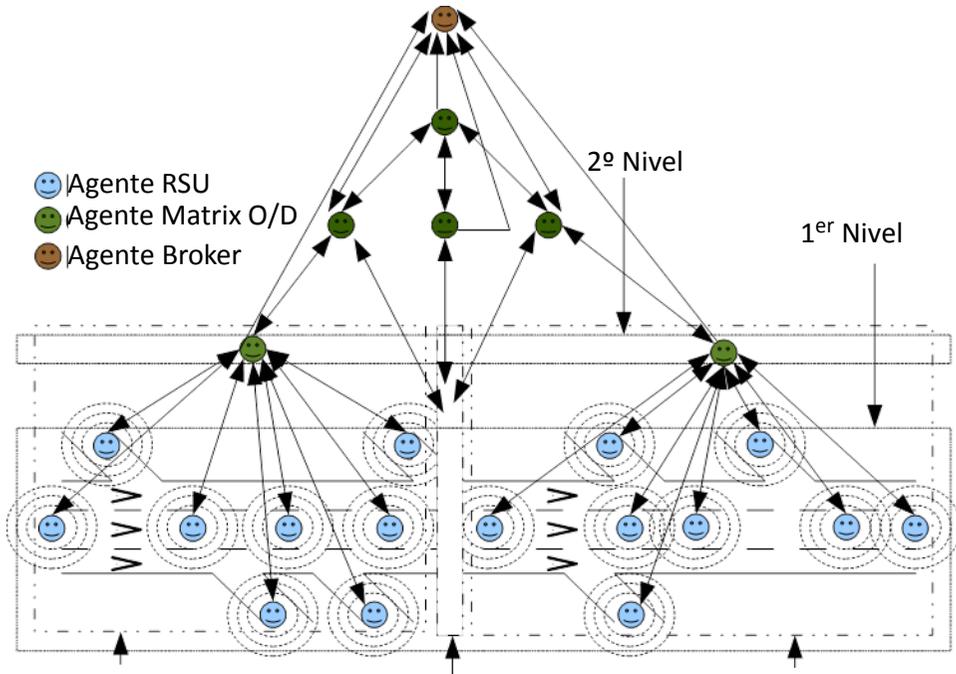
Las entidades que forman el entorno del XXX se muestran en la Imagen 94 y se describen a continuación:

- Los vehículos: el objetivo del XXX es obtener parámetros de movilidad de una red viaria. Por lo tanto, los vehículos que circulan por la red sobre la que se va a implantar el XXX son la base del sistema, serán la fuente de información. Si bien es cierto que no se actuará directamente sobre ellos, el sistema XXX percibirá el entorno y sus variaciones a través de la detección de los dispositivos BT embarcados en estos vehículos.
- Dispositivos BT: corresponden con los dispositivos con tecnología BT que están activados y embarcados en los vehículos. Estos dispositivos intercambian información con el sensor BT, suministrándole al sensor su dirección MAC que permitirá detectar de forma unívoca al dispositivo. También permite intercambiar el CoD y el valor del RSSI en el momento del intercambio de información.

Sensores BT: se encargan de detectar los dispositivos BT que se encuentran embarcados en los vehículos. A través de los sensores, el XXX obtiene la información del entorno, registrando la dirección MAC y el *timestamp* de cada dispositivo que detecta en el radio de alcance del sensor.

- Base de Datos CGT: la colaboración entre todos los XXXXXXs del XXX permitirá obtener la matriz O/D de la red sensorizada, así como los tiempos de viaje entre XXXXXXs XXX o entre varias agrupaciones de ellos. Esta información se almacenará en la BD del CGT. El XXXXXX XXXXX es el encargado de insertar esta información en la BD del CGT.
- Centro de Gestión de Tráfico: La información de las matrices O/D y de los tiempos de viaje se integrará en la aplicación del CGT, ya sea para su difusión a los usuarios, para lanzar estrategias de gestión de tráfico o para la realización de estudios. La integración se hará a través de la BD del CGT o a través de una API desarrollada para la interconexión del XXX con la aplicación del CGT. El XXXXXX XXXXX se instalará en el CGT.

*Imagen 94: Modelo del entorno del sistema XXX*







### 6.2.3 Modelo de Conocimiento: Relaciones entre conceptos

En el apartado 6.1: “*Modelo de conocimiento*” se ha definido el modelo del conocimiento del sistema XXX mediante la definición de una ontología común. Esta ontología común permite que todos los XXXXXs puedan interactuar e intercambiar mensajes. En este apartado se va a completar la ontología definida anteriormente con las propiedades relacionales de los conceptos, necesarias para que los XXXXXs del XXX puedan desempeñar su función de forma individual y en forma colaborativa con el resto de los XXXXXs.

Los conceptos definidos en la ontología están relacionados entre sí, no son conceptos aislados. Estas relaciones son las que permiten obtener los resultados del sistema. A continuación se describen las relaciones entre los distintos subdominios del modelo de conocimiento definido para el XXX y que se muestran en la Imagen 97.

*Imagen 95: Diagrama de relaciones de la ontología del XXX*

#### 6.2.4 Modelo de interacción

Este modelo se encarga de las interacciones entre los XXXXXXs, es decir, de los mecanismos de coordinación entre los XXXXXXs, en la forma en la que los XXXXXXs se comunican entre sí e intercambian los mensajes.

El XXX que se ha modelado solo dispondrá de interacciones privadas e internas al propio sistema, ya que no interactúa con el exterior, ya sea con otros XXXXXXs de

Las principales interacciones definidas en el sistema son:



















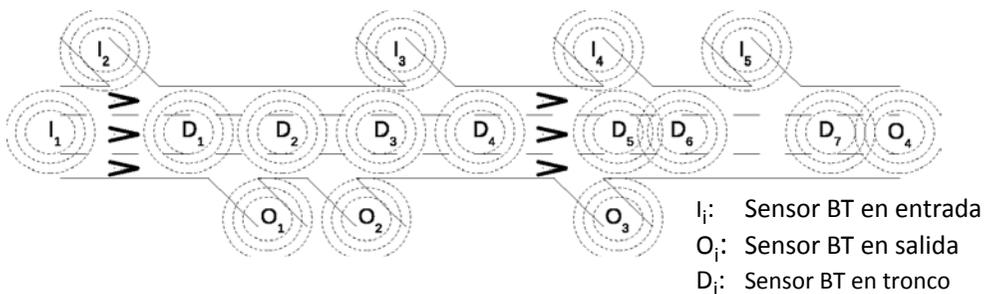
### 6.3 Validación del XXX

Para poder evaluar los resultados proporcionados por el XXX se ha empleado el simulador SUMO, ver apartado 3.8.2. El procedimiento que se ha seguido para la validación del XXX es muy similar al que se ha seguido para la validación del uso de los sensores BT como base para el cálculo de las matrices O/D, ver apartado 5.1.

En primer lugar, se ha modelado una red ficticia de la cual se conoce su matriz O/D. Sobre esta red se ha definido un conjunto de sensores BT, que cubren todas las entradas y salidas de la red, así como varios puntos intermedios. Sobre esta red se ha aplicado el XXX implementado y se ha evaluado los resultados que ofrece el XXX con los valores originales introducidos en el modelo de simulación. A continuación se describe con mayor detalle el estudio realizado.

#### 6.3.1 Creación del modelo de simulación

La red diseñada y la distribución de sensores BT en la red se muestra en la Imagen 105. Sobre la red que se ha creado se han programado 16 sensores BT mediante el sensor E3 de SUMO. Estos sensores se han asociado a 5 XXXXXXs XXX situados en las entradas a la red, a 4 XXXXXXs XXX situados en las salidas de la red y a 7 XXXXXXs XXX situados en 7 puntos intermedios, que generarán tránsitos parciales. Todos los tránsitos que pasen por los sensores definidos como D3 y D4 serán tránsitos parciales en el XXXXXX XXXXXXXX asociado a ese detector, estos tránsitos deberán ser cerrados por el XXXXXX XXXXXX.



*Imagen 96: Esquema red simulada verificación XXX*

En la Tabla 21 se muestran las distancias entre los sensores más próximos, de tal forma que los tránsitos finales se crearán como combinación de los tránsitos intermedios.

De	I1	I2	I3	I4	I5	D1	D1	D2	D2	D3	D4	D4	D5	D6	D7
A	D1	D1	D4	D6	D7	D2	O1	D3	O2	D4	D5	O3	D6	D7	O4
Distancia (m)	500	50	50	50	50	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

*Tabla 11: Distancias red simulada verificación XXX*

En este estudio se ha decidido no utilizar el modelo de simulación creado de la red metropolitana de Bilbao que se ha utilizado en el capítulo anterior. En este caso se ha optado por una red más sencilla en la que se pudiese implementar una simulación con una duración de 24 horas, en la que se puedan crear hasta 24 intervalos de estudio. Este nuevo modelo se ha diseñado para que se pudiese desplegar sobre él un XXX con varios XXXXXXs XXXXXXXX, que generaran tanto tránsitos completos como parciales, de tal forma que el XXXXXX XXXXXX tuviera que realizar tanto la función de almacenaje de datos en la BD del CGT como la función de cierre de tránsitos.

Con el fin de poder asegurar que los resultados de este nuevo modelo de simulación son comparables a los que se han obtenido con la red metropolitana de Bilbao, ver apartado 5.7, se ha calculado el MAE de la matriz O/D que se obtiene de los sensores con la introducida en el modelo de simulación.

Los resultados obtenidos para la simulación completa, las 24 horas, de las entradas I1, con 14.943 vehículos, e I2, con 9.275 vehículos, se muestran en la Imagen 106 y en Imagen 107 respectivamente.

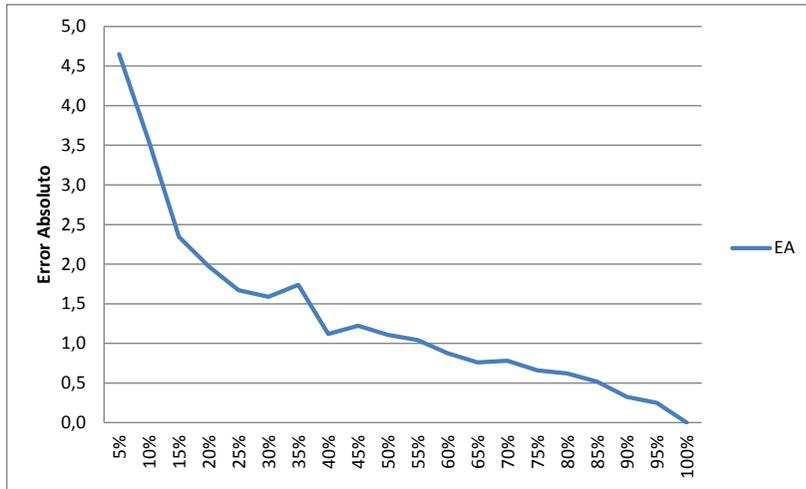


Imagen 97: Error Absoluto entrada I1 red implantación XXX

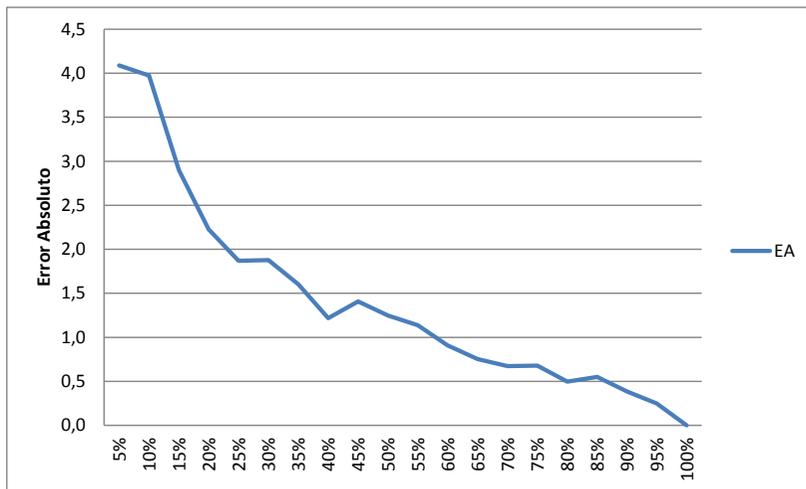


Imagen 98: Error Absoluto entrada I2 red implantación XXX

Los resultados obtenidos para las entradas I1 e I2 demuestran que para volúmenes de entrada grandes se consiguen errores absoluto aceptables, para porcentajes de detección del 25%, inferiores a 2 puntos.

En la Imagen 108 y en la Imagen 109 se muestran los resultados para la hora 8 de la simulación, en la que el volumen de entrada para la entrada I1 es de 678 vehículos y para la entrada I2 de 288 vehículos.

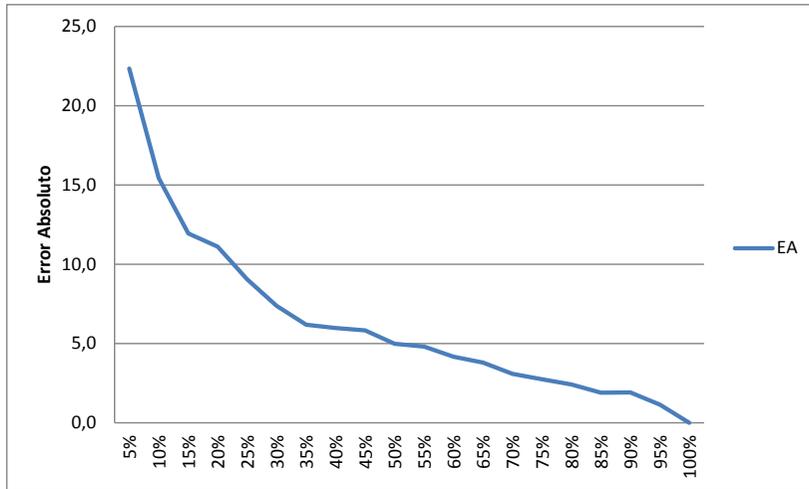


Imagen 99: Error Absoluto entrada I1, hora 8, red implantación XXX

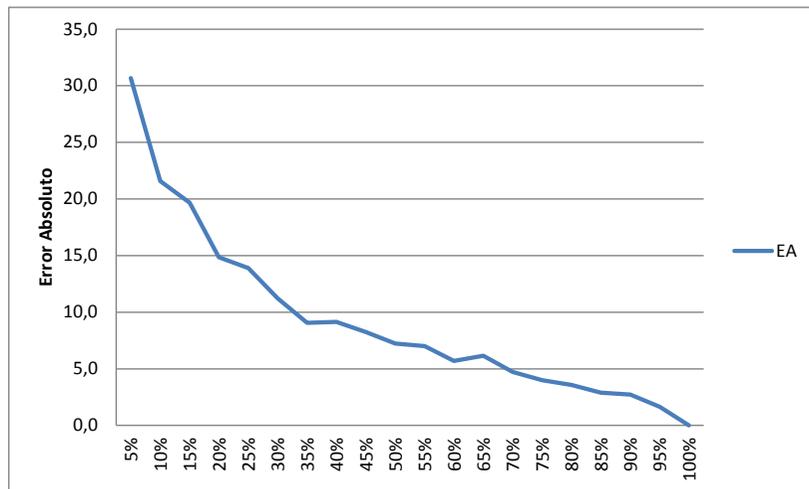


Imagen 100: Error Absoluto entrada I2, hora 8, red implantación XXX

Los resultados obtenidos para las entradas I1 e I2 para la hora 8 son equivalentes a los resultados obtenidos en el apartado 5.7.6: "Análisis de pares completos de la matriz O/D", para entrada con un volumen de tráfico similar.

El coeficiente de desigualdad de Theil que se obtiene para todos los pares de la matriz O/D está por debajo de 0,07, para cualquier porcentaje de detección, lo que nos permite afirmar que existe similitud entre la matriz O/D calculada con el XXX y la introducida en el modelo de simulación.

### 6.3.2 Implantación del XXX sobre la red simulada

La implantación del XXX sobre la red simulada se ha realizado tal y como se puede observar en la Imagen 110, se han XXXXXXs XXX por cada XXXXXX XXXXXXXX, de tal forma que en ambos casos se dispone de tránsitos parciales y de tránsitos completos

Una vez cerrados los tránsitos, se actualiza la matriz O/D del periodo de integración en la BD del CGT.

### 6.3.3 Resultados

Los resultados obtenidos han permitido verificar que el XXX implementado permite reproducir correctamente la matriz O/D. El procedimiento que se ha seguido para la validación ha sido calcular los parámetros de movilidad integrados en periodos de una hora y se han comparado con los simulados en la red. La comparación ha demostrado que el porcentaje de coincidencia es del 100%.

En la Imagen 111 se presentan una muestra de ocho horas del total de la simulación de los valores de los repartos introducidos en SUMO para los tránsitos I1-O1, I1-O2, I2-O4 y I3-O3. Los tránsitos I2-O4 e I3-O3 están asociados a vehículos que se han registrado en sensores BT gestionados

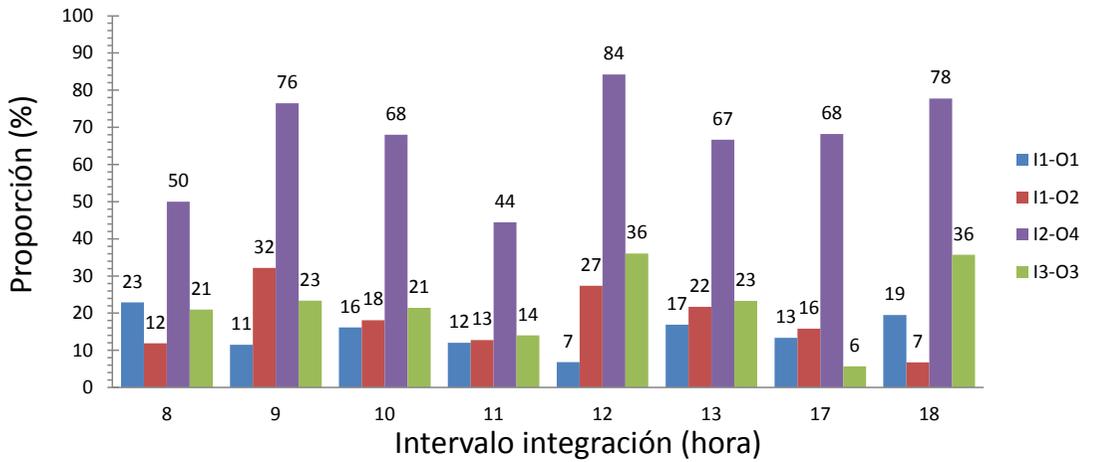


Imagen 102: Valores repartos tráfico en SUMO

Al aplicar el XXX a los datos proporcionados por los sensores E3 en el modelo simulado, se ha obtenido la matriz O/D para cada periodo de integración. La Imagen 112 muestra la matriz O/D, para todos los pares O/D, para el intervalo de integración que corresponde a la hora 8 de la simulación, en la Imagen 113 para la hora 11 y en la Imagen 114 para la hora 18 de la simulación.

Al comparar los datos introducidos en la simulación, Imagen 111, con los obtenidos al aplicar el XXX a la salida de los sensores BT simulados en SUMO, Imagen 112, Imagen 113 e Imagen 114, se comprueba que las matrices O/D son idénticas. Estos resultados se repiten en el resto de intervalos de integración.

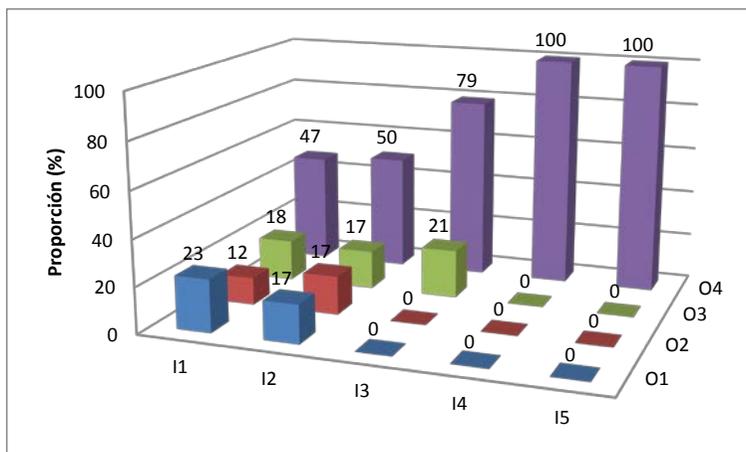


Imagen 103: Matriz O/D intervalo integración hora 8 al aplicar el XXX

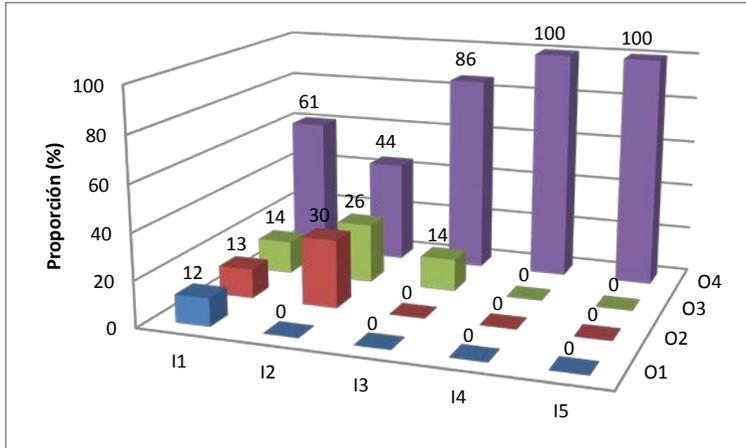


Imagen 104: Matriz O/D intervalo integración hora 11 al aplicar el XXX

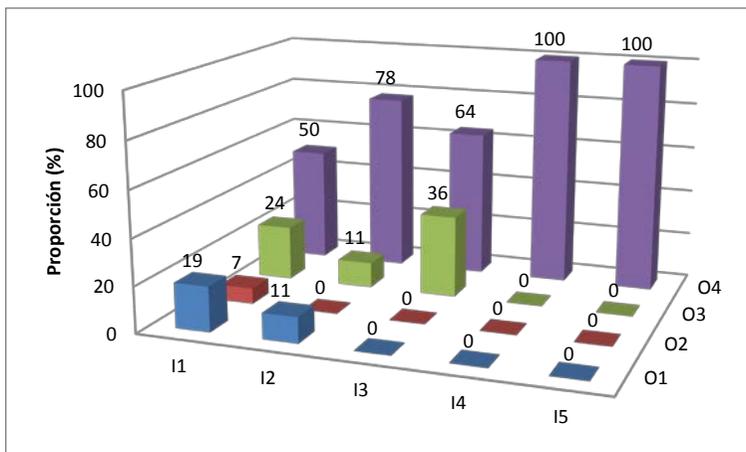


Imagen 105: Matriz O/D intervalo integración hora 18 al aplicar el XXX

## 6.4 Esquema de implantación del XXX en el anillo de circunvalación de Bilbao

Una vez se ha verificado que el XXX implementado permite obtener la matriz O/D sobre una red simulada, en este apartado se propone el esquema de implantación del XXX sobre la red real del anillo de circunvalación de Bilbao. En la Imagen 115 se muestra cómo quedaría la implantación del XXX sobre dicha red. El sistema estaría formado

se encargarían de procesar la información de los 46 sensores BT que se ha estimado que serían necesarios para poder calcular la matriz O/D de la red. Los 46 sensores BT se instalarían en las entradas y salidas y en tronco de la vía en los principales nudos.

*Imagen 106: Esquema implantación del XXX en anillo de circunvalación de Bilbao*

## **6.5 Conclusiones**

El sistema XXX que se ha modelado e implementado va a permitir obtener las matrices O/D y los tiempos de viaje de una red mediante el empleo de sensores BT. El XXX implementado serviría para usar los datos proporcionados por la tecnología BT, pero también podría utilizar cualquier tecnología distribuida que permita la identificación de los vehículos y por lo tanto su seguimiento. Es decir, en el caso de

que la matrícula electrónica se acabe implantando, el sistema sería totalmente válido para su aplicación con muy pocas modificaciones.

El XXX se ha diseñado para poder ser desplegado sobre la red ITS actual. Es decir, en el caso de que se imponga esta tecnología como modo de sensorización permitiría extender la vida útil del sistema actual.

El procedimiento de verificación del XXX, mediante los resultados de la simulación de la red ficticia implementada en SUMO, ha permitido verificar el modelo y la implementación del XXX de cálculo de matrices O/D y tiempos de viaje de una red de carreteras sensorizada con sensores BT. Si bien es cierto que estos sensores se podrían catalogar como "ideales", ya que no reproducen la problemática de los sensores reales que se va a estudiar en el capítulo siguiente.

## 7 Algoritmos de filtrado, matching y de clustering

---

En este capítulo se van a tratar aquellos aspectos que permitirán aplicar el XXX desarrollado en el capítulo anterior a un entorno real, con una red de sensores BT reales. En el capítulo anterior se ha trabajado con los datos que proporcionaba un sensor BT que se ha definido como ideal, en el que el identificador del vehículo solo se registra una vez, en el que un vehículo solo tiene un identificador, no se registran identificadores que no sean de vehículos que hayan realizado un tránsito válido, y por lo tanto de características que difieren bastante de las proporcionadas por un sensor BT real.

El objetivo de este capítulo es aproximar los datos que proporciona el sensor BT real a los que ha proporcionado el sensor BT ideal que se ha utilizado en el capítulo anterior. Para poder conseguir este objetivo se tendrán que analizar aquellos aspectos que mejoren el propio proceso de detección del sensor BT real, también se deberán tratar los datos, aplicando algoritmos que permitan eliminar duplicados de MAC, eliminar MAC que no correspondan a dispositivos embarcados en

vehículos que hayan hecho un tránsito válido y eliminar transitos de dispositivos que van embarcados en el mismo vehículo.

Para cumplir con este objetivo, este capítulo se ha estructurado de la siguiente forma:

En la primera parte se analizarán aquellos aspectos del sensor que permitan mejorar la detección de los dispositivos BT.

En una segunda parte se evaluarán los algoritmos existentes en la bibliografía sobre la reducción de datos del sensor BT, de tal forma que se elija el algoritmo que mejor se ajuste al problema del cálculo de la matriz O/D. Este algoritmo irá integrado en el XXXXXX XXX de la arquitectura del XXX.

En una tercera parte se definirá el algoritmo de *matching* que permita el emparejamiento de los datos de las direcciones MAC de diferentes dispositivos para ir definiendo transitos entre sensores.

Por último, se definirá el algoritmo de *clustering* que permita agrupar los dispositivos que van embarcados en el mismo vehículo con el objetivo de que solo se registre un dispositivo por vehículo, este algoritmo irá integrado en el XXXXXX XXXXXX y en el XXXXXX XXXXX.

Una vez se obtenga el conjunto de los posibles transitos, en el capítulo siguiente se analizarán los algoritmos que permitan realizar el *clustering* para determinar que transitos creados se pueden considerar válidos para realizar el cálculo del tiempo de viaje y cuales para calcular la matriz O/D dinámica.

## 7.1 Mejora de los sensores BT

En el estado de la técnica se han analizado los estudios que se han realizado para validar el uso de sensores BT. Tal y como se ha podido comprobar, el uso de estos sensores principalmente se ha enfocado en la obtención del tiempo de viaje dentro de la red sensorizada, normalmente un itinerario o una pequeña red.

En el apartado 3.4.3 se han descrito ciertas características del sensor que pueden influir en la detección de las direcciones MAC de los dispositivos BT embarcados,

como es la altura, la ganancia y direccionalidad de la antena. También se ha demostrado que la colocación de dos sensores en un mismo emplazamiento mejora los porcentajes de detección.

Así mismo, se han analizado los sensores existentes en el mercado y los que se han utilizado en los distintos estudios presentes en la bibliografía. Tal y como se ha descrito en el apartado 3.9, existen dos tendencias, una que usa un equipo de procesamiento de uso general con un dispositivo BT USB y otra que usa equipos desarrollados específicamente para este fin.

Aunque el sensor BT no está dentro del alcance de esta tesis, en este apartado se van a analizar en detalle aquellos aspectos del sensor que influyen en la detección y las decisiones que se han tomado a la hora de crear el sensor BT, utilizado en las pruebas, para mejorar el porcentaje de detección. En la parte final se describirá la evolución que ha seguido el sensor usado en los experimentos desde su primer prototipo hasta el dispositivo actual.

## 7.1.1 Influencia de la antena en la detección

### 7.1.1.1 Altura de la antena

En el apartado 3.4.3, se ha descrito el estudio de Brennan et al., 2010, y el de Puckett & Vickich, 2010, en el primero se realizó un análisis empírico modificando la altura de la antena, en el segundo experimento se modificó la situación de la antena desde el suelo a la altura de la barrera New Jersey, mejorando los resultados cuando la antena estaba sobre la barrera. Estos experimentos han determinado claramente que la altura de la antena es muy importante en la calidad de las detecciones del sensor BT.

Respecto a la cuestión de cuál es la altura idónea para la antena del sensor, deberá analizarse cada caso, ya que la presencia de obstáculos, entre la antena del sensor BT y el dispositivo BT, va a producir pérdidas de la señal, lo que tendrá una influencia negativa en el porcentaje de detección.

La altura idónea de la antena se puede calcular teniendo en cuenta las dimensiones de la primera Zona de Fresnel, que define un volumen elipsoidal, alrededor de la línea recta que une el emisor y el receptor de una señal inalámbrica, que tiene que estar despejado para que la potencia emitida por el emisor y que alcanza la antena receptora sea máxima.

El radio de la primera Zona de Fresnel en cualquier punto de la trayectoria entre la fuente emisora y la receptora viene definido por la ecuación ( 8 ):

$$r = 17.31 * \sqrt{\frac{(d1 * d2)}{(f * d)}} \quad (8)$$

Siendo:

- $r$  la zona de despeje en metros.
- $d1$  y  $d2$  las distancias al obstáculo en metros desde el emisor y receptor.
- $d$  la distancia total en metros del enlace.
- $f$  la frecuencia en MHz.

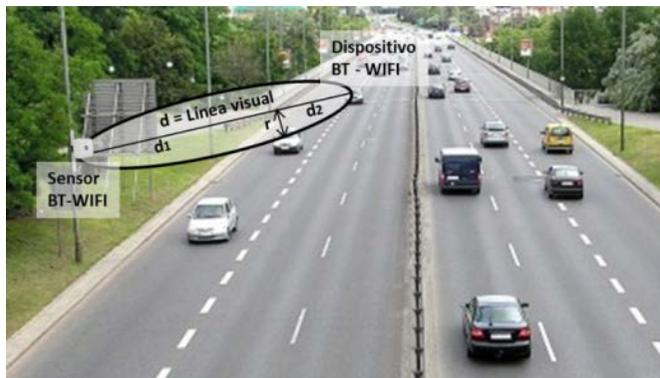


Imagen 107. Primera Zona de Fresnel

Para una instalación interurbana, en la que interesa cubrir áreas de detección de hasta 200 m, la primera Zona de Fresnel, en la zona central del enlace, es de 2,44 m. Por lo tanto, inicialmente la antena debería estar a una altura mínima de 2,5 metros en zonas despejadas, tal y como empíricamente se obtuvo en el experimento de Brennan et al., 2010.

En cada instalación será necesario determinar la posición idónea en función de la altura de los obstáculos. En el caso de que el punto de sensorización tenga alta intensidad de tráfico y haya que cubrir varios carriles o ambos sentidos de circulación o exista un alto porcentaje de vehículos pesados, la altura de la antena debería ser mayor, llegando incluso a los 6 metros.

En entornos en los que no haya vehículos pesados o su porcentaje sea muy bajo, la altura del sensor podría fijarse en los 3 metros.

Hay que destacar que una oclusión de un 20% de la primera Zona de Fresnel no genera casi atenuación de la señal.

### 7.1.1.2 Características de la antena

La respuesta a ¿qué antena utilizar?, dependerá del tipo de aplicación y entorno sobre el que se vaya aplicar. En entornos urbanos la antena debería ser muy direccional y de corto alcance (3 – 5 dBi de ganancia) para intentar reducir el número de dispositivos que se detecten y que no estén relacionados con el estudio.

En aplicaciones interurbanas, en las que se quiere obtener datos en un tramo amplio de carretera, sería conveniente instalar antenas de mayor ganancia (10 – 12 dBi) que permitan cubrir tramos de carretera de hasta 200 m, lo que permitirá mejorar la detección de dispositivos embarcados en vehículos a alta velocidad. Si por el contrario, se está trabajando en un nodo, y se quiere discernir entre los tráficos del tronco y los accesos, se deberían combinar antenas de mayor y menor ganancia.

En la Imagen 117 y en la Imagen 118 se pueden ver una simulación de zonas cubiertas por un sensor BT. En el ejemplo de la Imagen 118, con antena

omnidireccional, el sensor captaría dispositivos BT que pueden estar en diferentes vías.



*Imagen 108. Zona de detección con antena direccional*



*Imagen 109. Zona de detección con antena omnidireccional*

Los estudios presentados en el apartado 3.4.3 sugieren que para mejorar la detección es conveniente contar con dos detectores en el mismo sensor y con antenas direccionales con polarización horizontal y vertical.

Por lo tanto, como conclusión de los estudios se optó por disponer, para las pruebas del sistema, de un sensor con doble detección BT y con antenas omnidireccionales de 12 dBi con polarización horizontal y vertical. Respecto a la

altura de las antenas, se recomienda que siempre se instalen por encima de los 3 metros.

### 7.1.2 Evolución del sensor utilizado

Tal y como se ha descrito en el capítulo 2, esta tesis ha surgido como resultado de los trabajos realizados en dos proyectos de investigación, INTELVIA y OASIS.

En el proyecto INTELVIA se desarrolló el primer modelo basado en XXX para la obtención de las matrices O/D. En el consorcio de este proyecto se debía haber desarrollado un sensor que realizase la lectura de la MAC de los equipos BT embarcados. Sin embargo, al final del proyecto el dispositivo que se implementó no llegó a desarrollar esta funcionalidad y los datos de los sensores BT necesarios para probar el XXX fueron obtenidos usando un modelo desarrollado con SUMO.

Una vez finalizado INTELVIA, el equipo de investigación de LISITT, se planteó la necesidad de disponer de un sensor BT que completase el XXX de obtención de matrices O/D. En un primera fase, se estudió la posibilidad de crear un sensor tal y como se ha realizado en diversos estudios, mediante el empleo de un portátil u ordenador industrial y un dispositivo USB BT.

Sin embargo, esta opción no cumplía con varios de los objetivos que se habían marcado. El primero de ellos era que el sensor elegido pudiese ser usado en instalaciones reales y no solo en experimentos de investigación. Además, el sensor BT se instalaría, en muchas ocasiones en zonas aisladas de carretera donde la alimentación debería hacerse por batería o placas solares, por lo tanto debería tener un consumo eléctrico muy pequeño, 5-6 W. En consecuencia, esta solución fue rápidamente descartada y se optó por la búsqueda de sensores BT industriales específicos de lectura de direcciones MAC.

En el estudio de los sensores existentes en el mercado se comprobó que la mayoría de las empresas que comercializaban estos sensores, descritos en el apartado 3.9, no ofrecían la posibilidad de adquirir únicamente el sensor, ya que su modelo de negocio estaba basado en un producto llave en mano. Incluso en algunos de los casos los datos del sensor no estaban disponibles para los clientes, eran

almacenados en la base de datos de la empresa y solo se ofrecía a los clientes los datos procesados de los tiempos de viaje entre los puntos sensorizados.

En el estudio de mercado se encontró un producto ofrecido por la empresa Libelium, ver apartado 3.9.5. Esta empresa, creada como una spin-off de la Universidad de Zaragoza, ofrecía una plataforma hardware Open Source con la posibilidad de crear sensores BT.

Las ventajas que presentaba este producto eran:

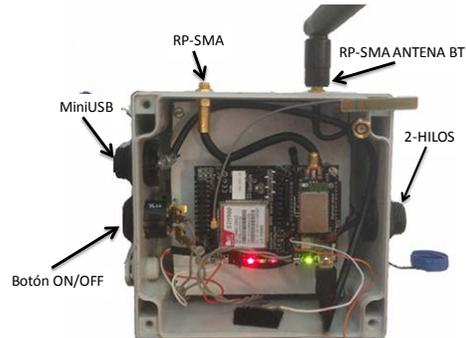
- Un consumo eléctrico muy reducido, menos de 5W en emisión.
- Permitía añadirle al sensor módulos para diferentes tipos de comunicaciones: BT, Zigbee, GPRS, etc.
- Permitía añadir al sensor BT módulos con otros sensores: termómetro, higrómetro, luxómetro, etc.
- Disponía de un software y hardware que permitía crear una red de sensores.
- Precio reducido.

En la Imagen 119 se muestra el prototipo que se creó con este sistema para probar el XXX desarrollado. Durante las pruebas se encontraron los siguientes inconvenientes:

- Solo disponía de un procesador, lo que provocaba que durante el envío de los datos al XXXXXX XXX no pudiese realizar capturas de BT.
- La memoria de datos SRAM era muy limitada, solo 8KB, por lo tanto no permitía que el XXXXXX XXX se instalase en el sensor. Tampoco se podía realizar ningún tipo de filtrado o procesamiento de los datos en el sensor.
- El micro-controlador disponía de una EEPROM de 4KB y una memoria Flash de 128KB donde se almacenaba el firmware a ejecutar. Aunque era teóricamente posible usar parte de estas memorias para datos de

programa, en la práctica no era viable, ya que su acceso ralentizaba mucho la ejecución del firmware y se reducía el número de escaneos por minuto.

- El almacenamiento permanente se realizaba sobre una tarjeta SD y en varias ocasiones el sistema de ficheros tuvo inestabilidades.



*Imagen 110: Sensor BLISITT versión Waspote - Libelium*

Vistas las limitaciones del sensor de Libelium se optó por crear un sensor, mostrado en la Imagen 120, usando una tarjeta de procesamiento Cubieboard, que disponía de mayores prestaciones, tanto en procesamiento como en comunicaciones y almacenamiento, siendo el consumo también reducido. Esta solución mejoraba las desventajas del producto Waspote de Libelium. Pero introducía una desventaja muy importante, principalmente debida a que los dispositivos de comunicaciones BT y GPRS tenían que conectarse a través del puerto USB lo que hacía que los prototipos no fueran robustos.



*Imagen 111: Prototipo Cubieboard*

Estos primeros pasos permitieron definir las especificaciones que debería disponer un sensor BT que ofreciese todas las funcionalidades necesarias para poder realizar instalaciones permanentes con especificaciones industriales. Estas especificaciones permitieron plantear la creación de un prototipo que cumpliera con todas ellas, dando lugar al actual sensor BLISITT que dispone de las siguientes especificaciones:

- Procesador de bajo consumo y con varios núcleos.
- Memoria RAM mínima de 512 MB y memoria ROM interna de 8 GB.
- 2 Sensores BT integrados en la placa.
- 2 Sensores WIFI integrados en la placa.
- Doble antena con polarización vertical y horizontal.
- GPS.
- Comunicaciones 3G y GPRS integradas en la placa.
- Comunicaciones Ethernet 100 Mbps.
- Alimentación por PoE y red eléctrica.
- Rango extendido de temperaturas.
- Estanqueidad IP 67.



*Imagen 112: Sensor BLISITT actual*

El prototipo fue desarrollado durante el año 2014, las primeras versiones se probaron en el campus científico de la Universitat de València donde LISITT tiene sus instalaciones, en la Imagen 122 se muestra su instalación. En estas primeras pruebas de laboratorio se evaluó el sensor y se probaron las primeras versiones de los algoritmos de cálculo de la matriz O/D. Actualmente ya ha sido instalado en varios emplazamientos, de forma definitiva en la autopista M-12 en Madrid, y de forma temporal para realizar estudios puntuales de tiempos de viaje y velocidades en Méjico. En la Imagen 121 se muestra la versión autónoma con baterías y una antena, la versión normal se alimenta por red o PoE y dispone de 2 antenas direccionales.

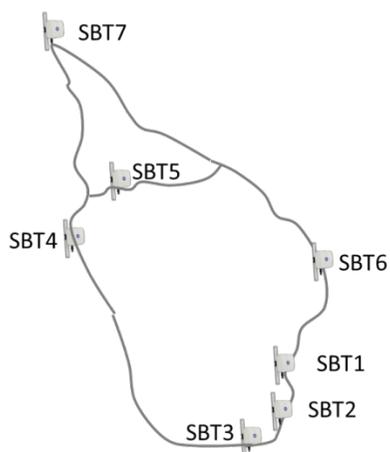


*Imagen 113: Entorno de pruebas de laboratorio*

Los algoritmos que se describen en los apartados siguientes han sido probados utilizando los datos que ha proporcionado este sensor BT.

### 7.1.3 Entorno de pruebas

Para poder evaluar los algoritmos existentes y validar los algoritmos que se han definido e implementado sobre dispositivos reales, se ha dispuesto de una instalación de sensores BT en una autovía en un entorno de tráfico interurbano y con distancias entre sensores grandes, entre 13 y 160 Km. Los sensores BT han sido instalados en los mismos emplazamientos en los que se ha instalado un sistema basado en procesamiento de imágenes mediante un OCR, que ha servido como sistema de referencia. En la Imagen 123 se muestra el emplazamiento de los sensores. Por motivos de confidencialidad no ha sido posible describir el lugar exacto donde se ha realizado la prueba.



*Imagen 114: Mapa instalación sensores prueba autovía*

Para la evaluación de los algoritmos se han utilizado los sensores 1, 2, 6 y 7. En la Tabla 22 se muestran las distancias entre los sensores:

Origen	Destino	Distancia (Km)
SBT1	SBT2	12,9
SBT1	SBT6	38
SBT1	SBT7	147
SBT2	SBT6	50,9
SBT2	SBT7	159,9
SBT6	SBT7	109

*Tabla 12: Distancia entre sensores del estudio real*

## 7.2 Algoritmo de reducción de los datos del sensor BT

Los algoritmos de reducción de datos, que se utilizan para eliminar las repeticiones de una misma MAC en cada sensor, van encaminados a obtener una mejor precisión en el cálculo del tiempo de viaje y a evitar que un mismo vehículo sea contabilizado dos o más veces cuando atraviesa la zona de detección del sensor BT. Además el objetivo es que el registro único de cada vehículo se haga lo más próximo a la posición real del sensor BT dentro de su área de detección. Este mismo problema ocurre en el caso del cálculo de la matriz O/D, solo se debe contabilizar una vez cada vehículo, por lo que pueden aplicarse algoritmos similares en ambos casos. Por lo tanto, se han analizado en el estudio que se describe en este apartado, tanto algoritmos utilizados para el cálculo de tiempo de viaje como para el cálculo de la matriz O/D.

Además, hay que tener en cuenta que los algoritmos propuestos por el doctorando, para el cálculo de la matriz O/D en tiempo real, no se pueden desligar del cálculo de los tiempos de viaje, como se discutirá en el apartado siguiente, ya que el valor del tiempo de viaje de los tránsitos de cada periodo de integración ha sido usado para definir los umbrales de corte en el algoritmo de filtrado de tránsitos.

En los estudios disponibles en la bibliografía, en los que se han comparado diferentes métodos de reducción de datos, ver apartado 3.6.2., Porter et al., 2011, concluye que el mejor método es utilizar el *timestamp* de la media de la primera y última detección de la dirección MAC de cada dispositivo BT. En el estudio realizado por Araghi et al., 2012, el mejor método corresponde con el uso del *timestamp* de la detección con mayor valor del RSSI de todos los registros de la MAC de cada dispositivo BT.

En ambas propuestas, el *timestamp* que se selecciona de todos los registrados de la MAC del dispositivo se intenta que corresponda con el instante en el que el dispositivo BT se encuentre lo más próximo a la posición real de la antena, lo que reduciría el error en el cálculo del tiempo de viaje.

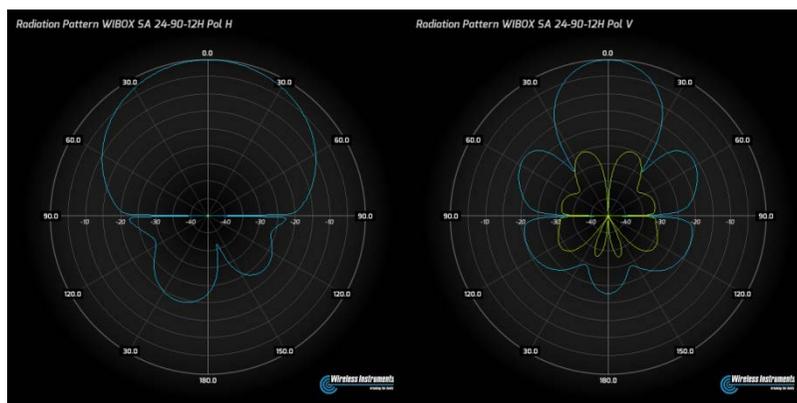
En el estudio realizado por Porter et al., 2011, ver Tabla 3 del apartado 3.6.2, se observa como los mejores resultados son, para casi todas las antenas, los

obtenidos mediante el promedio de *timestamps*. En los dos casos que es mejor el primero o el último registro, se trata de antenas direccionales con patrón de radiación lobulado donde el sensor se encuentra en un lateral de la zona de detección, lo que podría explicar este resultado.

A la vista de los resultados obtenidos en los estudios analizados, y para comprobar su validez, en el apartado siguiente se presenta un estudio específico en el que se analiza las posibles ventajas de usar el valor máximo del RSSI de todos los registros de la dirección MAC de un mismo dispositivo BT en un sensor.

### 7.2.1 Estudio del uso del RSSI para filtrado

El sensor utilizado en el experimento real dispone de 2 antenas direccionales con polarización horizontal y vertical de 12dBi de ganancia, siendo el ángulo de la polarización horizontal de  $90^{\circ}$  y el vertical de  $30^{\circ}$ , ver Imagen 124.



*Imagen 115: Patrón de cobertura de la antena utilizada en el sensor BT*

En la instalación real, el sensor se instaló sobre poste en el lateral de la vía y enfocado a un sentido de circulación, tomando datos de ambos sentidos de la calzada.

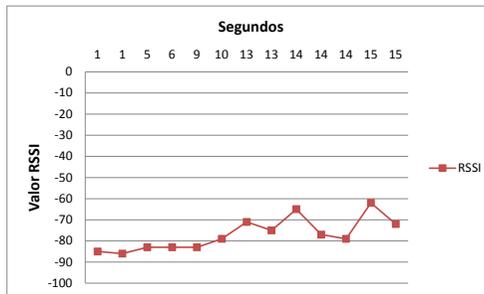
En las gráficas de la Imagen 125 se muestra el patrón de detección de un dispositivo en función del valor del RSSI detectado. Para realizar el estudio se han tomado muestras de direcciones MAC que han sido captadas varias veces en un mismo intervalo de detección y que se han usado para el cierre de un tránsito. Es

decir, que corresponden a un dispositivo que ha pasado por dos sensores consecutivos. Las gráficas representadas corresponden con dispositivos detectados por el sensor SBT2.

Tránsito de SBT2 a  
SBT1  
15 detecciones



Tránsito de SBT2 a  
SBT1  
13 detecciones



Tránsito de SBT1 a  
SBT2  
22 detecciones



Tránsito de SBT1 a  
SBT2  
19 detecciones

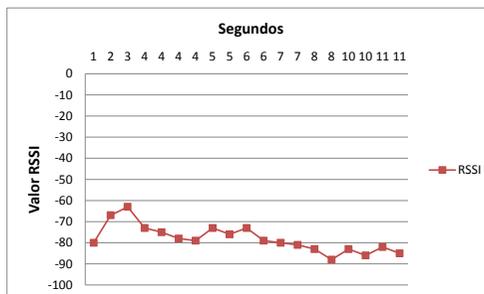


Imagen 116: Ejemplos distribución RSSI captado para una MAC

En las gráficas mostradas en la Imagen 125 se puede observar como el valor del RSSI reproduce la forma del patrón de cobertura de la antena utilizada en el sensor. El máximo RSSI se encuentra desplazado hacia el lado donde está situado el sensor. Los sensores se han instalado en el sentido SBT1 SBT2, por lo tanto los tránsitos de SBT1 a SBT2 al llegar al sensor, son detectados en la zona más cercana al sensor lo que se traduce en un mayor valor del RSSI. Por el contrario, los tránsitos SBT2 a SBT1 son detectados inicialmente por la zona del patrón de cobertura más alejada del sensor y por lo tanto su RSSI será menor inicialmente para ir creciendo en la última fase de detección. En el anexo digital se han incluido gráficas del estudio de todos los emplazamientos, siguiendo los mismos criterios de selección.

En los estudios presentados en el apartado 3.6.2, quedó patente que no es posible usar el valor del RSSI para determinar la distancia del dispositivo BT al sensor. Sin embargo, después de varias pruebas se ha llegado a la conclusión de que si se selecciona como *timestamp* de las repeticiones de una MAC, el de mayor RSSI, se tendrá una mejor aproximación a la localización del sensor que la que se tendría tomando la primera, la última o incluso la media de ambas detecciones, siempre teniendo en cuenta el patrón de cobertura de la antena utilizada y que se trata de un estudio realizado en un entorno interurbano sin intersecciones semaforizadas.

Para otros entornos, por ejemplo en una vía urbana con intersecciones semaforizadas, podría ser aconsejable realizar otro criterio de selección.

Por lo tanto, será necesario que el sensor BT registre junto al *timestamp* y la dirección MAC, el valor del RSSI.

### **7.3 Procedimiento de creación de tránsitos entre sensores**

En todos los estudios analizados en el apartado 3.6.3, se aplica un método similar a la hora de construir los tránsitos con los datos proporcionados por los sensores BT. El método consiste en seleccionar una MAC de un sensor y comprobar si existe un registro de esa MAC en otro sensor. En caso afirmativo se crea un tránsito entre ambos sensores. Las diferencias que se han encontrado en los estudios presentes

en la bibliografía se producen a la hora de seleccionar el *timestamp* asociado a la detección del dispositivo en el sensor BT.

Dados dos sensores A y B, los emparejamientos se han realizado utilizando alguna de las siguientes combinaciones:

- Primer *timestamp* de la MAC en el sensor A y primer *timestamp* de la MAC en el sensor B (Wasson & Bullock, 2012) (Puckett & Vickich, 2010) (Araghi et al., 2012)(Porter et al., 2011).
- Último *timestamp* de la MAC en el sensor A y último *timestamp* de la MAC en el sensor B (Tsubota et al., 2011) (Malinovskiy et al., 2011) (Araghi et al., 2012) (Porter et al., 2011).
- Media de los *timestamp* de la MAC en el sensor A y media de los *timestamp* de la MAC en el sensor B (Porter et al., 2011).
- Primer *timestamp* de la MAC en el sensor A y último *timestamp* de la MAC en el sensor B y el contrario (Porter et al., 2011).
- *Timestamp* del máximo RSSI de la MAC en el sensor A y *timestamp* del máximo RSSI de la MAC en el sensor B (Araghi et al., 2012) (Porter et al., 2011).

Tal y como ya se ha comentado en el apartado anterior, los estudios comparativos realizados por Porter et al., 2011 y Araghi et al., 2012, planteaban que los mejores métodos eran en el primer caso usar la media de los *timestamps* y en el segundo el valor máximo del RSSI. En ambos casos, teóricamente el valor usado se aproximaba más a la posición exacta del sensor.

Las conclusiones aportadas en estos trabajos no pueden ser extrapoladas a todas las instalaciones y estudios, ya que el resultado puede depender de varios factores, como el tipo de antena utilizado o el tipo de estudio que se quiera realizar. En estudios con intersecciones semaforizadas, en función de que se quiera incluir o no la intersección en el estudio, puede ser aconsejable elegir el emparejamiento último-primero.

### 7.3.1 Análisis de los algoritmos de emparejamiento de direcciones MAC

El objetivo de este análisis es verificar de forma práctica, utilizando los datos obtenidos en la instalación real, que los mejores emparejamientos de *timestamp* para el cálculo de tiempos de viaje, para el tipo de antena utilizada por el sensor BT, son los propuestos por Porter et al., 2013 y Araghi et al., 2012. Para ello se ha aplicado el algoritmo de cálculo de matrices O/D definido como algoritmo  $\beta$  en el apartado 8.2.1: “*Algoritmo ajuste continuo del tiempo de viaje (Algoritmo  $\beta$ )*”, a las opciones de emparejamiento de direcciones MAC que se describen a continuación:

- **Media *timestamp*:** Se selecciona la media de *timestamp* que define el intervalo de detección de la MAC en cada sensor.
- **Primero - Primero:** Se selecciona el *timestamp* del primer registro de la MAC en el intervalo de detección de cada sensor.
- **RSSI:** Se selecciona el valor máximo del RSSI de cada MAC en su intervalo de detección.
- **Último - Último:** Se selecciona el *timestamp* del último registro de la MAC en el intervalo de detección de cada sensor.
- **Primero – Último:** Se selecciona el *timestamp* del primer registro de la MAC en el intervalo de detección del primer sensor y el último del segundo sensor.
- **Último – Primero:** Se selecciona el *timestamp* del último registro de la MAC en el intervalo de detección del primer sensor y el primero del segundo sensor

Los resultados que se muestran en la Tabla 23 son los valores de la integración del día completo analizado. Las tablas incluyen los resultados obtenidos para todos los tránsitos posibles entre los sensores de la instalación real. Con este estudio se cubren la práctica totalidad de emparejamientos presentes en la bibliografía.

TRÁNSITO	Longitud (Km)	Media timestamp		Primero - primero		Último - último		Máx. RSSI		Primero-último		Último-primero	
		tiempo	Nº Trans	tiempo	Nº Trans	tiempo	Nº Trans	tiempo	Nº Trans	tiempo	Nº Trans	tiempo	Nº Trans
<b>SBT1 SBT2</b>	12,9	0:11:13	799	0:11:11	800	0:11:16	799	0:11:16	799	0:11:19	799	0:11:08	800
<b>SBT2 SBT1</b>	12,9	0:06:57	837	0:07:01	837	0:06:53	837	0:06:52	836	0:07:04	837	0:06:49	837
<b>SBT1 SBT7</b>	147,0	1:50:27	98	1:50:27	98	1:50:27	98	1:50:26	98	1:50:34	98	1:50:20	98
<b>SBT7 SBT1</b>	147,0	1:41:27	69	1:41:29	69	1:41:24	69	1:41:26	69	1:41:32	69	1:41:21	69
<b>SBT2 SBT7</b>	159,9	2:10:22	66	2:10:27	66	2:10:15	66	2:10:15	66	2:10:34	66	2:10:08	66
<b>SBT7 SBT2</b>	159,9	1:53:49	41	1:53:48	41	1:53:50	41	1:53:49	41	1:53:56	41	1:53:42	41
<b>SBT1 SBT6</b>	38,0	0:33:38	194	0:33:38	194	0:33:37	194	0:33:37	194	0:33:44	194	0:33:31	194
<b>SBT6 SBT1</b>	38,0	0:32:55	119	0:32:55	119	0:32:55	119	0:32:55	119	0:32:59	119	0:32:51	119
<b>SBT2 SBT6</b>	50,9	0:44:11	109	0:44:15	109	0:44:06	109	0:44:07	109	0:44:21	109	0:44:00	109
<b>SBT6 SBT2</b>	50,9	0:46:32	74	0:46:29	74	0:46:34	74	0:46:33	74	0:46:38	74	0:46:25	74
<b>SBT6 SBT7</b>	109,0	1:15:29	2106	1:15:24	2106	1:15:31	2105	1:15:30	2106	1:15:34	2105	1:15:22	2107
<b>SBT7 SBT6</b>	109,0	1:20:58	2156	1:21:02	2156	1:20:54	2156	1:20:55	2156	1:21:05	2156	1:20:51	2156

Tabla 13: Tiempos de viaje y tránsitos con algoritmos de emparejamiento de direcciones MAC

Tal y como se puede observar en la Tabla 23, las diferencias de tiempo de viaje al aplicar los distintos tipos de emparejamiento de direcciones MAC no son significativas. Además se puede observar que el método de emparejamiento que se utilice no influye en el número de tránsitos que se pueden crear con las direcciones MAC, siendo la diferencia máxima entre métodos inferior al 0,2%.

Si analizamos las diferencias máxiXXX entre los tiempos de viaje de las distintas opciones, recogidas en la Tabla 24, se observa que son inferiores al 2% en todos los casos, salvo en el tramo SBT2 y SBT1, donde la diferencia entre los distintos métodos alcanza un máximo de un 3,54%.

TRÁNSITO	Longitud (Km)	Media timestamp		Primero - primero		Último - último		Máx. RSSI		Primero-último		Último-primero	
		dif	% dif	dif	% dif	dif	% dif	dif	% dif	dif	% dif	dif	% dif
<b>SBT1 SBT2</b>	12,9	0:00:06	0,88%	0:00:08	1,18%	0:00:03	0,44%	0:00:03	0,44%	0:00:00	0,00%	0:00:11	1,62%
<b>SBT2 SBT1</b>	12,9	0:00:07	1,65%	0:00:03	0,71%	0:00:11	2,59%	0:00:12	2,83%	0:00:00	0,00%	0:00:15	3,54%
<b>SBT1 SBT7</b>	147,0	0:00:07	0,11%	0:00:07	0,11%	0:00:07	0,11%	0:00:08	0,12%	0:00:00	0,00%	0:00:14	0,21%
<b>SBT7 SBT1</b>	147,0	0:00:05	0,08%	0:00:03	0,05%	0:00:08	0,13%	0:00:06	0,10%	0:00:00	0,00%	0:00:11	0,18%
<b>SBT2 SBT7</b>	159,9	0:00:12	0,15%	0:00:07	0,09%	0:00:19	0,24%	0:00:19	0,24%	0:00:00	0,00%	0:00:26	0,33%
<b>SBT7 SBT2</b>	159,9	0:00:07	0,10%	0:00:08	0,12%	0:00:06	0,09%	0:00:07	0,10%	0:00:00	0,00%	0:00:14	0,20%
<b>SBT1 SBT6</b>	38,0	0:00:06	0,30%	0:00:06	0,30%	0:00:07	0,35%	0:00:07	0,35%	0:00:00	0,00%	0:00:13	0,64%
<b>SBT6 SBT1</b>	38,0	0:00:04	0,20%	0:00:04	0,20%	0:00:04	0,20%	0:00:04	0,20%	0:00:00	0,00%	0:00:08	0,40%
<b>SBT2 SBT6</b>	50,9	0:00:10	0,38%	0:00:06	0,23%	0:00:15	0,56%	0:00:14	0,53%	0:00:00	0,00%	0:00:21	0,79%
<b>SBT6 SBT2</b>	50,9	0:00:06	0,21%	0:00:09	0,32%	0:00:04	0,14%	0:00:05	0,18%	0:00:00	0,00%	0:00:13	0,46%
<b>SBT6 SBT7</b>	109,0	0:00:05	0,11%	0:00:10	0,22%	0:00:03	0,07%	0:00:04	0,09%	0:00:00	0,00%	0:00:12	0,26%
<b>SBT7 SBT6</b>	109,0	0:00:07	0,14%	0:00:03	0,06%	0:00:11	0,23%	0:00:10	0,21%	0:00:00	0,00%	0:00:14	0,29%

Tabla 14: Porcentaje máxima diferencia distintas opciones de emparejamiento

Si se analizan solo los algoritmos recomendados en la bibliografía: mayor RSSI y media de *timestamp*, puede observarse de forma práctica que realmente son los que ofrecen un valor más ajustado del tiempo de viaje. En nuestro entorno de

pruebas la mayor diferencia que se obtiene entre estos dos métodos es de 1,2%, que corresponde al tránsito con tiempo de viaje y la distancia más corta, de 7 minutos. Como puede observarse en la Tabla 23, los tiempos de viaje medios obtenidos para los mismos tramos, pero diferentes sentidos de circulación, no son iguales. Esto es debido a las condiciones del tráfico, ya que en uno de los sentidos se producen un mayor número de periodos de congestión.

## **7.4 Algoritmo de filtrado de dispositivos embarcados en el mismo vehículo**

Durante el proceso de análisis de los datos proporcionados por el sensor BT, se ha observado que el sensor envía información de todos los dispositivos embarcados en el vehículo, sin discernir si pertenecen a un mismo vehículo o a diferentes vehículos. Por lo tanto sería necesario realizar un filtrado de estos dispositivos para solo contabilizar uno de ellos, ya que si no se podría introducir un error significativo en relación al valor real de la matriz.

En la revisión bibliográfica realizada en el estudio de la técnica, no se ha encontrado ninguna investigación sobre procedimientos para el filtrado de los dispositivos que van embarcados en el mismo vehículo, aunque sí se pone de manifiesto el error que este hecho puede producir sobre los resultados finales.

Por ejemplo, en un itinerario en el que existan rutas de transporte público con frecuencias de paso altas, se podría generar sobreestimaciones respecto a otros pares de la matriz O/D, producidas por la detección de los dispositivos BT que lleven los pasajeros, si se contabiliza cada dispositivo como un vehículo.

En Blogg et al., 2010 se presenta los resultados de un estudio puntual en el que se analizan los vehículos detectados mediante sensores BT y el número de dispositivos que lleva embarcado cada vehículo, en un entorno rural con muy poco tráfico. Este dato es usado posteriormente como base para expandir la matriz O/D obtenida. En el resultado obtenido se concluye que se produce, en este entorno, una sobreestimación con respecto a los datos obtenidos con OCR.

En el estudio de Canon-Lozano et al., 2012, sí se menciona que sería necesario plantear algoritmos de filtrado que eliminen dispositivos embarcados en el mismo vehículo, pero no se propone ningún procedimiento para su implantación.

Como novedad dentro del procedimiento para el cálculo de matrices O/D basado en XXX, el doctorando propone la incorporación de un algoritmo de filtrado dentro del



### 7.4.1 Efectos del algoritmo de filtrado

Para evaluar los efectos del algoritmo de filtrado sobre los tránsitos de vehículos se han analizado todos los tránsitos de los sensores SBT1, SBT 2, SBT 6 y SBT 7 generados durante 24 horas.

La Tabla 25 muestra el número de Tránsitos Brutos, que corresponde con los tránsitos creados entre los sensores BT antes de ningún filtrado, el número de Tránsitos Candidatos, que corresponden a tránsitos

t	Tránsitos Brutos	Tránsitos Candidatos	%
	7491	984	13,14
	7491	1438	19,20

*Tabla 15: Tránsitos candidatos a ser filtrados*

De los 984 tránsitos de dispositivos candidatos a ser filtrados para  $t = 10$  s, la distribución de los CoD de las dos MAC involucradas en los tránsitos, en el sensor origen y en el sensor destino, ha sido la siguiente:

Ud	CoD	Major Class	Minor Class
490	5A0204	Phone	Cellular
171	5A020C	Phone	Smartphone
125	520204	Phone	Cellular
49	340408	Audio	Hands-free
34	7A020C	Phone	Smartphone
28	580204	Phone	Cellular
11	300408	Audio	Hands-free
11	240404	Audio	Wearable headset

10	240408	Audio	Hands-free
9	58020C	Phone	Smartphone
9	580110	Computer	Handheld PC /PDA
6	200408	Audio	Hands-free
3	700204	Phone	Cellular
3	640404	Audio	Wearable headset
3	5A0208	Phone	Cordless
3	280408	Audio	Hands-free
2	001F00	sin categoria	sin categoria
1	420300	LAN	Full Available
1	002101	Computer	sin categoria
2	0A0110	Computer	Handheld PC /PDA
2	500204	Phone	Cellular
1	78020C	Phone	Smartphone
2	200404	Audio	Wearable headset
1	5A0114	Computer	Palm sized PC/PDA
1	5A010C	Computer	Laptop
1	66E404	Audio	Wearable headset
1	1A0114	Computer	Palm sized PC/PDA
1	100104	Computer	Desktop workstation
1	020110	Computer	Handheld PC /PDA
2	72020C	Phone	Smartphone

*Tabla 16: CoD de dispositivos en mismo*

Como se puede apreciar en la Tabla 26, la gran mayoría de dispositivos corresponden a teléfonos móviles y *Smartphones*, con un porcentaje del 87%, los dispositivos de manos libres corresponden a un porcentaje del 11% y un 2% del resto de dispositivos (PDAs, portátiles, etc.).

### Aplicación del

t	Tránsitos Brutos	Tránsitos Candidatos	%	Tránsitos a Filtrar	% Total	% Candidatos
	7491	984	13,14	306	4,08	31,10
	7491	1438	19,20	371	4,95	25,80

*Tabla 17: Datos filtrado de dispositivos embarcados en mismo vehículo*

De este conjunto de tránsitos a filtrar

El reparto de los tránsitos filtrados en función del emplazamiento origen del tránsito es el siguiente:

SBT 1	SBT 2	SBT 6	SBT 7
26,7	27,0	27,9	18,4

*Tabla 18: Reparto filtrado por emplazamiento para el*

Como se muestra en la Tabla 28, el filtrado ha sido bastante equilibrado para los 3 primeros emplazamientos, pero no así para el emplazamiento 7, por lo tanto el filtrado realizado mejorará el resultado final de los cálculos de la matriz O/D.

Por cuestiones de privacidad se ha optado por no usar las direcciones MAC reales y se han representado por el descriptor A y B.

El formato de los datos del fichero es el siguiente:





## 7.4.1.2 Aplicación paso

:

t	Tránsitos Brutos	Tránsitos no eliminados 3a	%	Tránsitos a Filtrar	% Total	% Candidatos
	7491	678	9,05	85	1,13	12,54
	7491	1067	14,24	182	2,43	17,06

*Tabla 19: Datos filtrado de dispositivos embarcados en mismo vehículo,*

SBT 1	SBT 2	SBT 6	SBT 7
24,7	25,0	25,3	25,0

*Tabla 20: Reparto filtrado por emplazamiento para el*



### 7.4.1.3 Resultados finales del filtrado

Los resultados finales que se obtienen al aplicar el algoritmo de filtrado completo,

:

t	Tránsitos Brutos	Tránsitos Candidatos	% Tránsitos Candidatos	Tránsitos a Filtrar (3a+3b)	% Tránsitos a filtrar
	7491	984	13,14	391	5,22
	7491	1438	19,20	553	7,38

*Tabla 21: Datos filtrado dispositivos embarcados en mismo vehículo,*

Como muestra la Tabla 31, la aplicación del paso 3a+3b, para  $t = 10$  s supone un filtrado de un 2,66% del total de los tránsitos creados entre los emplazamientos del estudio. Este filtrado inicial permitirá mejorar los resultados que se obtengan de las matrices O/D y del tiempo de viaje al aplicar el resto de algoritmos, al haber eliminado dispositivos embarcados en el mismo vehículo.

## 7.5 Conclusiones

En el apartado 7.1: “Mejora de los sensores BT” se ha determinado que la antena del sensor debe estar situada a una altura mínima de 3 metros y en determinados emplazamientos puede ser aconsejable llegar hasta los 6 metros, principalmente en carreteras con mucho tráfico de vehículos pesados o si existe algún obstáculo entre la antena y los vehículos.

También se ha determinado que las características que debe tener el sensor son:

- Procesador de bajo consumo y con varios núcleos.
- Memoria RAM mínima de 512 MB y memoria ROM interna de 8 GB.
- 2 Sensores BT integrados en la placa.

- 2 Sensores WIFI integrados en la placa.
- Doble antena con polarización vertical y horizontal.
- GPS.
- Comunicaciones 3G y GPRS integradas en la placa.
- Comunicaciones Ethernet 100 Mbps.
- Alimentación por PoE y red eléctrica.
- Rango extendido de temperaturas.

En el apartado 7.2: "*Algoritmo de reducción de los datos del sensor BT*" se han analizado las ventajas de usar el valor del RSSI como parámetro para realizar el emparejamiento de las direcciones MAC. El estudio de las gráficas del RSSI de dispositivos BT detectados varias veces en el sensor, sugieren que pueden mejorarse los resultados del cálculo de los tiempos de viaje utilizando este parámetro.

En el apartado 7.3: "*Procedimiento de creación de tránsitos entre sensores*" se han analizado los distintos algoritmos de creación de tránsitos y se ha concluido que no hay diferencias significativas en el cálculo del tiempo de viaje. Estas diferencias se reducen para las opciones que mejores resultados han demostrado en los estudios publicados, como son la de usar el mayor RSSI o la media de los *timestamp* detectados para cada MAC. La diferencia máxima entre ambos métodos ha sido del 1,2% para el tránsito con menor tiempo de viaje, 7 minutos, del 0,44 % para el tránsito de 11 minutos e inferior al 0,15% para el resto de tránsitos.

Tal y como se ha concluido en este apartado, se propone que el sensor BT registre el valor del RSSI de cada detección y lo envíe junto al *timestamp* y la MAC al XXXXXX XXX. El XXXXXX XXX incluirá en el mensaje que enviará al XXXXXX XXXXXXXX el máximo de los valores del RSSI asociados al intervalo de detección de cada MAC.

En el apartado 7.4: *“Algoritmo de filtrado de dispositivos embarcados en el mismo vehículo”* se ha propuesto un nuevo procedimiento para filtrar los dispositivos BT que van embarcados en un mismo vehículo y evitar tener vehículos duplicados que puedan falsear la matriz O/D.



## 8 Algoritmos de cálculo de la Matriz O/D dinámica

---

En el capítulo 7 se han definido los algoritmos que nos han permitido obtener los tránsitos entre los sensores que hay instalados en la red viaria. Una vez se ha obtenido el conjunto de los tránsitos entre sensores se tiene que determinar que tránsitos son válidos para realizar el cálculo del tiempo de viaje, y cuales son válidos para calcular la matriz O/D dinámica. Estos conjuntos de tránsitos válidos, no tienen por qué ser iguales y normalmente no lo serán.

En una primera parte de este capítulo se han analizado los algoritmos presentes en la bibliografía que permiten calcular el tiempo de viaje y la matriz O/D. Una vez analizados estos algoritmos, se constató que era necesario aportar nuevos algoritmos que mejorasen el proceso de obtención de la matriz O/D.

En una segunda parte se han definido dos algoritmos que permiten calcular matrices O/D dinámicas y los tiempos de viaje de la red sensorizada.

En una tercera parte se ha realizado un estudio comparativo del mejor algoritmo existente en la bibliografía usado para el cálculo del tiempo de viaje, pero adaptado

al cálculo de la matriz O/D, y los dos algoritmos propuestos por el doctorando. Esta evaluación se ha realizado con los datos obtenidos en el entorno de prueba definido en el apartado 7.1.3. La validación se ha hecho en dos escenarios: el primero de ellos con los datos obtenidos directamente por los sensores y el segundo de ellos simulando un corte total de un sentido de circulación de media hora de duración.

La evaluación de los resultados ha permitido detectar que, ante un corte total del sentido de circulación, los algoritmos de cálculo de la matriz O/D no se adaptan a cambios muy bruscos en las condiciones de tráfico.

Para solucionar este problema se ha propuesto una modificación a uno de los algoritmos de cálculo de la matriz O/D que ha permitido mejorar los resultados.

## **8.1 Estudio de los algoritmos existentes en la bibliografía**

### **8.1.1 Algoritmos existentes en la bibliografía**

En el estudio realizado en el apartado 3.6.3 se ha constatado que la mayoría de referencias estaban relacionadas con algoritmos para el cálculo del tiempo de viaje, existiendo muy pocas centradas en el cálculo de la matriz O/D.

En este punto es necesario destacar que las necesidades de datos para realizar el cálculo de los tiempos de viaje son diferentes a las del cálculo de la matriz O/D. Por ejemplo, los algoritmos de tiempo de viaje ofrecen buenos resultados con porcentajes de detección pequeños, 5-10%, (Trafficnow, 2014), (Jaume Barceló et al., 2010). Además, estos algoritmos eliminan para el cálculo del tiempo de viaje algunos tránsitos por ser considerados excesivamente lentos. Sin embargo, en el caso de los algoritmos para el cálculo de la matriz O/D es muy importante que no se pierdan tránsitos, y por lo tanto el filtrado de los mismos debe ser realizado tratando de eliminar el menor número posible de tránsitos. Por otro lado, tal y como se concluyó en el capítulo 5, es aconsejable que el porcentaje de vehículos detectados sea superior al 20%.

A continuación se describen los algoritmos presentes en la bibliografía:

- En el estudio de Tsubota et al., 2011, se realiza un primer filtrado por tiempo de viaje anormalmente alto, que supere un valor prefijado. De los tránsitos que quedan tras el primer filtrado solo validan los tránsitos que son detectados por 3 sensores, a partir de los cuales se calcula la distribución de las medidas cada 5 minutos y se elimina todos aquellos tránsitos que superan el percentil 75. El valor del tiempo de viaje de un periodo de integración se calcula como la media de los tránsitos considerados válidos tras los filtrados.
- En el estudio de Puckett & Vickich, 2010, un primer algoritmo calcula la media de los tránsitos de los últimos 15 minutos y se descartan aquellos que difieran un 25% de la media, lo que elimina muchos tránsitos necesarios para calcular la matriz O/D. Este algoritmo es posteriormente mejorado usando la varianza como parámetro de corte. Este último algoritmo es similar al usado por Malinovskiy et al., 2011 y Quayle et al., 2011, en el que se usa como corte la desviación típica respecto a la media calculada en el periodo de integración, que se fija en 15 minutos.
- El estudio de Araghi et al., 2012, aplica los algoritmos de K-medias, Jerárquico y dos pasos para su estudio encaminado a discriminar entre distintos medios de transporte que tienen velocidades medias bien diferenciadas.
- En el estudio realizado por Canon-Lozano et al., 2012 se aplica un primer algoritmo en el que se eliminan las MAC que no estén en dos sensores consecutivos, posteriormente se filtran aquellos que su CoD no corresponda con un listado predefinido, que los autores entienden que corresponden con los tipos de dispositivos que podrían ir embarcados en un vehículo. Finalmente, se descartan los tránsitos que tengan un tiempo de viaje que supere la media de los tiempos de viaje del periodo de integración. Con el conjunto de tránsitos que cumplen con estos requisitos se calcula la matriz O/D.

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, es habitual eliminar tránsitos lentos para el cálculo del tiempo de viaje y realizar los cálculos con una franja de tránsitos cercanos a la media. Sin embargo, no todos esos tránsitos eliminados para el cálculo del tiempo de viaje deberían descartarse para el cálculo de la matriz O/D, teniendo en cuenta que no se deben contabilizar tránsitos de bicicletas o peatones, o tránsitos ficticios debidos al fallo de un sensor o a no haber detectado en uno de los sensores un dispositivo embarcado en un vehículo que realiza tránsitos periódicos.

### 8.1.2 Adaptación y evaluación de algoritmos existentes al cálculo de la matriz O/D

En este apartado se ha tomado la decisión de evaluar dos algoritmos de los presente en la bibliografía, el primero de ellos es el más utilizado en la bibliografía para el cálculo del tiempo de viaje, Malinovskiy et al., 2011, Quayle et al., 2011 y Puckett & Vickich, 2010, ya descrito en el apartado anterior, y en el que se realizará una adaptación para poder aplicarlo al cálculo de la matriz O/D. El segundo de ellos es el propuesto por Canon-Lozano et al., 2012, para el cálculo de la matriz O/D en el sistema de transporte metropolitano de Bogotá.

El resto de algoritmos analizados se han descartado debido a que el algoritmo propuesto por Araghi et al., 2012, está orientado a estudiar la matriz O/D de diferentes medios de transporte en los que el tiempo de viaje es muy diferente. El algoritmo propuesto por Tsubota et al., 2011, elimina los tránsitos que superan el percentil 75 de la distribución, por lo tanto este algoritmo es similar al que se va a estudiar propuesto por Malinovskiy, con el problema adicional de que al no filtrar tránsitos por la parte baja de la distribución pueden computarse tránsitos físicamente imposibles.

En el resto de trabajos en los que se han analizado los resultados del cálculo de la matriz O/D usando sensores BT, no se ha descrito el algoritmo utilizado, como es el caso de Blogg et al., 2010, en el que solo se analizan métodos de expansión de la matriz O/D calculada.

A continuación se describe en detalle cada algoritmo. En la definición formal de los algoritmos, la notación subíndice indicará el sensor de inicio y final del tramo, el superíndice se ha usado para identificar el significado particular de la variable y entre paréntesis se expresa el intervalo de integración o instante temporal.

### 8.1.2.1 Adaptación del algoritmo de Malinovskiy (Algoritmo $\sigma$ )

Este algoritmo calcula la media y la desviación típica del tiempo de viaje de todos los tránsitos registrados durante el periodo de integración, fijado en 15 minutos. Se clasifican como válidos aquellos tránsitos que estén entre la media y una vez la desviación típica. Con este conjunto de tránsitos válidos se calcula la media, valor que se toma como el tiempo de viaje del periodo de integración. En estos algoritmos se realiza un filtrado inicial, antes de calcular el tiempo de viaje, eliminando todos aquellos tránsitos cuyo tiempo de viaje supera un valor constante prefijado, en el estudio presentado por Malinovskiy se fija en 60 minutos, de esta forma elimina los tráficos lentos. Sin embargo, este filtro no se aplicará en el estudio realizado en este apartado, ya que los tráficos lentos no pueden descartarse inicialmente para el cómputo de la matriz O/D. A este algoritmo le llamaremos  $\sigma$ .

La desviación típica se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$\sigma_{ij}(p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{ij}(p)} (TT_{ij}^{tk}(p) - \overline{TT}_{ij}(p))^2}{n_{ij}(p)}} \quad (9)$$

Siendo:

$\sigma_{ij}(p)$  Desviación típica del cálculo de la media del tiempo de viaje,  $\overline{TT}_{ij}(p)$ , del tramo definido por el sensor i y el sensor j, que denominaremos tramo, en el intervalo temporal p.

$TT_{ij}^{tk}(p)$  Tiempo de viaje calculado del tránsito k en el tramo en el intervalo temporal p.

$\overline{TT}_{ij}(p)$  Media tiempo de viaje del tramo en el intervalo temporal p.

$n_{ij}(p)$  Número de muestras usadas para calcular  $\overline{TT}_{ij}(p)$  en el tramo en el intervalo temporal  $p$ .

Se crea el conjunto de tránsitos válidos, un tránsito se considera válido si dista de la media como máximo una desviación típica, es decir:

$$\overline{TT}_{ij}(p) - \sigma_{ij}(p) \leq TT_{ij}^{tk}(p) \leq \overline{TT}_{ij}(p) + \sigma_{ij}(p)$$

### Definición formal del algoritmo

Las variables usadas en el algoritmo son las siguientes:

$T_{int}$  Constante que define el tamaño temporal del intervalo (definido en 15 minutos).

$TS_{ij}(p)$  *Timestamp* de inicio del intervalo  $p$ .

$TS_{ij}^{tk}(p)$  *Timestamp* de la MAC que cierra el tránsito en el tramo en el intervalo temporal  $p$ .

$s_{ij}(p)$  Tránsitos válidos, valor de la matriz O/D en el tramo en el intervalo temporal  $p$ .

### Algoritmo

```

 $\overline{TT}_{ij}(p) = 0$ 
 $n_{ij}(p) = 0$ 
mientras ( $TS_{ij}^{tk}(p) - TS_{ij}(p) < T_{int}$ )
    // se almacena el registro del tránsito creado
    //se contabiliza para la media del intervalo.
     $\overline{TT}_{ij}(p) = \overline{TT}_{ij}(p) + TT_{ij}^{tk}$ 
     $n_{ij}(p) ++$ 
fin_mientras
//Media tiempo de viaje usada para definir  $\sigma_{ij}(p)$  del intervalo  $p$ .
 $\overline{TT}_{ij}(p) = \frac{\overline{TT}_{ij}(p)}{n_{ij}(p)}$ 
//Se Calcula la desviación típica.
 $\sigma_{ij}(p) = 0$ 
mientras ( $k = 0; k < n_{ij}(p); k ++$ )

```

$$\sigma_{ij}(p) = \sigma_{ij}(p) + (TT_{ij}^{tk}(p) - \overline{TT}_{ij}(p))^2$$

```

fin_mientras
 $\sigma_{ij}(p) = \text{sqrt}(\sigma_{ij}(p) / n_{ij}(p))$ 
//teniendo en cuenta la varianza se fijan los umbrales y se
//consideran los tránsitos válidos para el cálculo de tiempos de
//viaje y matriz O/D.
 $\overline{TT}_{ij}(p) = 0$ 
 $s_{ij}(p) = 0$  //permite contar el número de tránsitos válidos en el
//intervalo p.
mientras (k = 0; k < nij(p); k++)
//condición tránsito válido para cálculo matriz O/D y tiempo de
//viaje.
    si ( $\overline{TT}_{ij}(p) - \sigma_{ij}(p) \leq TT_{ij}^{tk}(p)$  &&  $TT_{ij}^{tk}(p) \leq \overline{TT}_{ij}(p) + \sigma_{ij}(p)$ )
        contabilizar tránsito i-j en matriz O/D en el periodo p.
         $s_{ij}(p)++$ 
         $\overline{TT}_{ij}(p) = \overline{TT}_{ij}(p) + TT_{ij}^{tk}(p)$ 
    fin_si
fin_mientras
//Tiempo de viaje del tramo en el periodo p.
 $\overline{TT}_{ij}(p) = \frac{\overline{TT}_{ij}(p)}{s}$ 
fin_algoritmo

```

### 8.1.2.2 Algoritmo de Canon-Lozano de cálculo de la matriz O/D.

Este algoritmo, descrito en el apartado 3.6.3, ver Imagen 20, calcula la matriz O/D con los tránsitos creados entre dos sensores que cumplan que su CoD corresponde con un dispositivo del tipo ordenador, teléfono, audio/vídeo, periférico, imagen o juguete.

El conjunto final de tránsitos válidos serán aquellos que cumplan que su tiempo de viaje sea menor o igual a la media del tiempo de viaje, calculada en el periodo de integración fijado en 15 minutos, es decir:

$$TT_{ij}^{tk}(p) \leq \overline{TT}_{ij}(p)$$

Siendo:

$TT_{ij}^{tk}(p)$  Tiempo de viaje calculado del tránsito k en el tramo en el intervalo temporal p.

$\overline{TT}_{ij}$  (p) Media tiempo de viaje del tramo en el intervalo temporal p.

### Definición formal del algoritmo

Las variables usadas en el algoritmo son las siguientes:

$T_{int}$  Constante que define el tamaño temporal del intervalo (definido en 15 minutos).

$TS_{ij}(p)$  *Timestamp* de inicio del intervalo p.

$TS_{ij}^{tk}$  (p) *Timestamp* de la MAC que cierra el tránsito en el tramo en el intervalo temporal p.

$n_{ij}(p)$  Número de muestras usadas para calcular  $\overline{TT}_{ij}$  (p) en el tramo en el intervalo temporal p.

$CoD_{ij}^{tk}$  (p) Tiempo de viaje calculado del tránsito k en el tramo en el intervalo temporal p.

$s_{ij}(p)$  Tránsitos válidos, valor de la matriz O/D en el tramo en el intervalo temporal p.

### Algoritmo

```

 $\overline{TT}_{ij}$  (p) = 0
 $n_{ij}$  (p) = 0
mientras ( $TS_{ij}^{tk}$  (p) -  $TS_{ij}(p)$  <  $T_{int}$ )
    si ( $CoD_{ij}^{tk}$  (p) e conjunto de CoD válidos)
        //se almacena el registro del tránsito creado
        //se contabiliza para la media del intervalo.
         $\overline{TT}_{ij}$  (p) =  $\overline{TT}_{ij}$  (p) +  $TT_{ij}^{tk}$ 
         $n_{ij}$  (p) ++
fin_mientras
//Media tiempo de viaje usada para definir conjunto final de
//tránsitos válidos del intervalo p.
 $\overline{TT}_{ij}$  (p) =  $\frac{\overline{TT}_{ij}$  (p)}{ $n_{ij}$  (p)}
```

```

//teniendo en cuenta el tiempo de viaje medio calculado se consideran
//tránsitos válidos para el cálculo de matriz O/D.
sij(p) = 0 //permite contar el número de tránsitos válidos en el
//intervalo p.
mientras (k = 0; k < nij(p); k++)
//condición tránsito válido para cálculo matriz O/D y tiempo de
viaje.
    si (TTijtk(p) ≤  $\overline{TT}_{ij}$ (p))
        contabilizar tránsito i-j en matriz O/D en el periodo p.
        sij(p)++
    fin_si
fin_mientras
fin_algoritmo

```

### 8.1.3 Resultado de la evaluación de los algoritmos existentes

Los algoritmos descritos en el apartado anterior se han probado utilizando los datos generados durante 24 horas en la instalación descrita en el apartado 7.1.3: "Entorno de pruebas". Los algoritmos se han aplicado a los tránsitos creados entre los sensores SBT 1, SBT 2, SBT 6 y SBT 7.

Los resultados obtenidos en la clasificación de los tránsitos tras aplicar los algoritmos, se muestra en la Tabla 32:

Algoritmo	$\sigma$		Canon	
	Válidos	No Válidos	Válidos	No Válidos
SBT1-SBT2	746	144	649	241
SBT2-SBT1	758	160	683	235
SBT1-SBT7	112	23	55	80
SBT7-SBT1	95	15	51	59
SBT2-SBT7	90	16	43	63
SBT7-SBT2	81	16	38	59
SBT1-SBT6	175	54	126	103
SBT6-SBT1	124	34	78	80
SBT2-SBT6	126	31	77	80
SBT6-SBT2	119	19	68	70
SBT6-SBT7	1936	314	1599	651
SBT7-SBT6	1975	320	1671	624

Tabla 22: Clasificación tránsitos algoritmos presentes en la bibliografía

Algoritmo	Clasificación	Total Clasi	Totales	%
$\sigma$	Válidos	6337	7483	84,7
	No Válidos	1146		15,3
Canon	Válidos	5138	7483	68,7
	No Válidos	2345		31,3

Tabla 23: Datos globales clasificación tránsitos presentes bibliografía

Como se puede observar en la Tabla 32 y en la Tabla 33 el algoritmo  $\sigma$  clasifica como válidos 16 puntos más que el algoritmo de Canon-Lozano.

Uno de los aspectos que se ha analizado de los algoritmos ha sido que el filtro no excluya tránsitos claramente válidos para el cálculo de la matriz O/D y que no incluya aquellos que no son válidos y que alterarían el valor de la matriz O/D.

Para analizar la validez de la clasificación de los tránsitos se ha creado un conjunto de gráficas en las que se han representado todos los tránsitos del día de estudio, diferenciados como válidos y no válidos, para todos los emplazamientos.

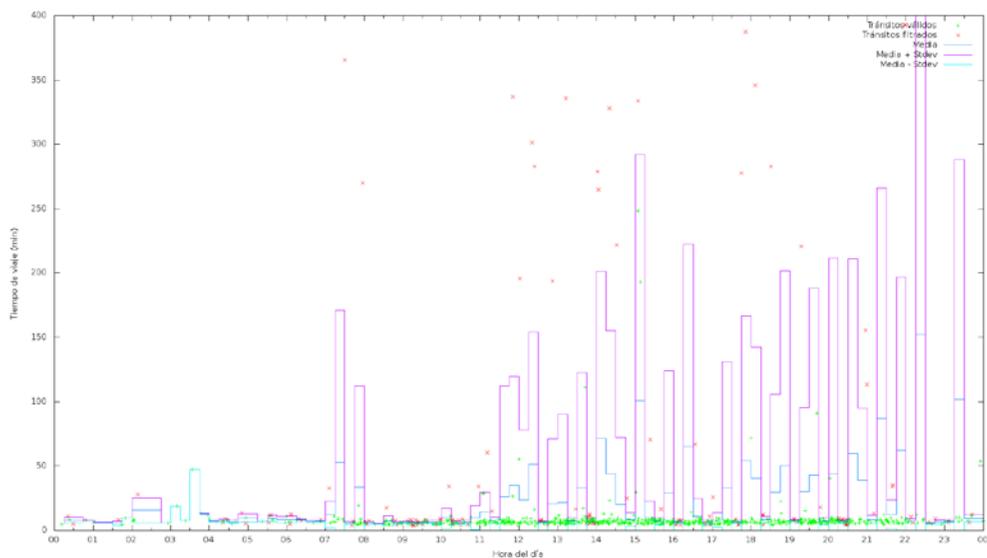
En el caso del algoritmo de Malinovski, algoritmo  $\sigma$ , la línea de color cian representa el límite superior de corte, la línea azul oscuro el valor medio y la línea magenta el límite inferior de corte. En el caso del algoritmo de Canon-Lozano solo existe un límite de corte representado en color azul oscuro. Los puntos verdes corresponden a tránsitos que los algoritmos han determinado que son válidos y por lo tanto serán contabilizados en la matriz O/D, los puntos rojos han sido clasificados como no válidos y por lo tanto descartados para ser contabilizados en la matriz O/D.

En el anexo digital se han incluido todas las gráficas, en este apartado se ha decidido incluir una ampliación de la gráfica en la que se limita el valor del eje X, para poder evaluar mejor los resultados. Ya que a pesar de que los tiempos de viaje del estudio, en velocidad libre, no superan en ningún caso los 150 minutos, se han creado tránsitos que llegan a 1.400 minutos. Este tipo de tránsitos son debidos a dispositivos que no se han detectado en uno de los sensores a primera hora del día, pero que en un tránsito periódico a final del día sí han sido detectados, lo que genera un tránsito ficticio.

**Gráficas del tránsito SBT 2 – SBT 1 (tiempo de viaje medio: 7 minutos)**

En la Imagen 126 y en la Imagen 127 podemos observar como en ambos algoritmos existen tránsitos que son descartados como válidos para el cálculo de la matriz O/D, pero que claramente deberían ser contabilizados. Por ejemplo en el periodo comprendido entre las 9h y las 11h, así como entre las 12h y 14h, siendo el algoritmo de Canon-Lozano el que más tránsitos descarta, tal y como se puede apreciar en la Tabla 33, esto es debido a que descarta aquellos cuyo tiempo de viaje sea superior a la media. El número de tránsitos registrados ha sido de 918

El algoritmo  $\sigma$ , aun siendo el que mejor clasifica de los dos, presenta un problema adicional, debido a que cuando la desviación típica de la muestra es grande, se incluyen tránsitos que no deberían incluirse, tal y como puede observarse en la Imagen 126 a las 15h donde se han incluido tránsitos de 250 minutos de duración en este tramo que registra un tiempo de viaje medio de 7 minutos.



*Imagen 117: Clasificación tránsitos algoritmo  $\sigma$  SBT 2 – SBT 1*

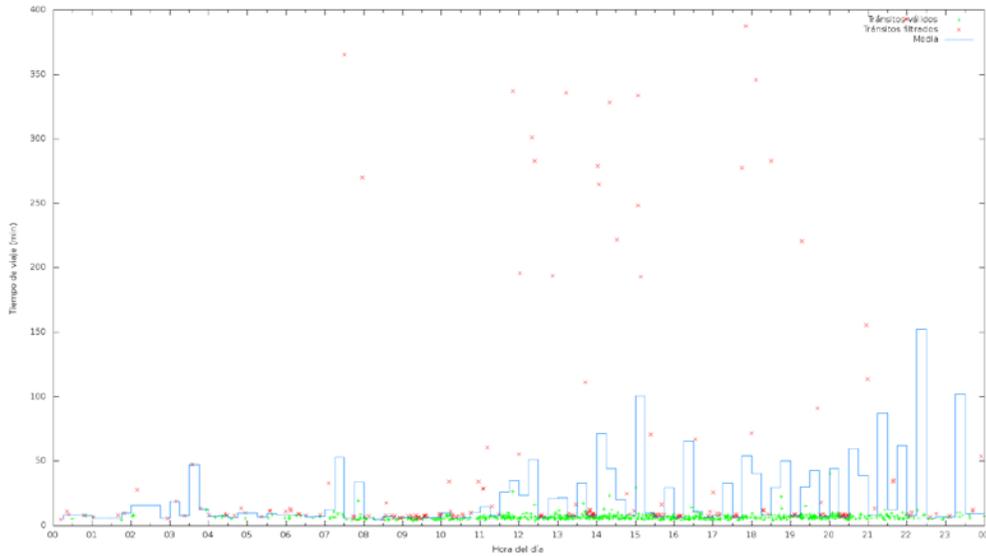


Imagen 118: Clasificación transitos algoritmo Canon-Lozano SBT 2 – SBT 1

### Gráficas del tránsito SBT 6 – SBT 7 (tiempo de viaje medio: 75 minutos)

El resultado de aplicar los algoritmos en este tramo tiene resultados similares al que se ha obtenido entre los sensores SBT 2 – SBT 1.

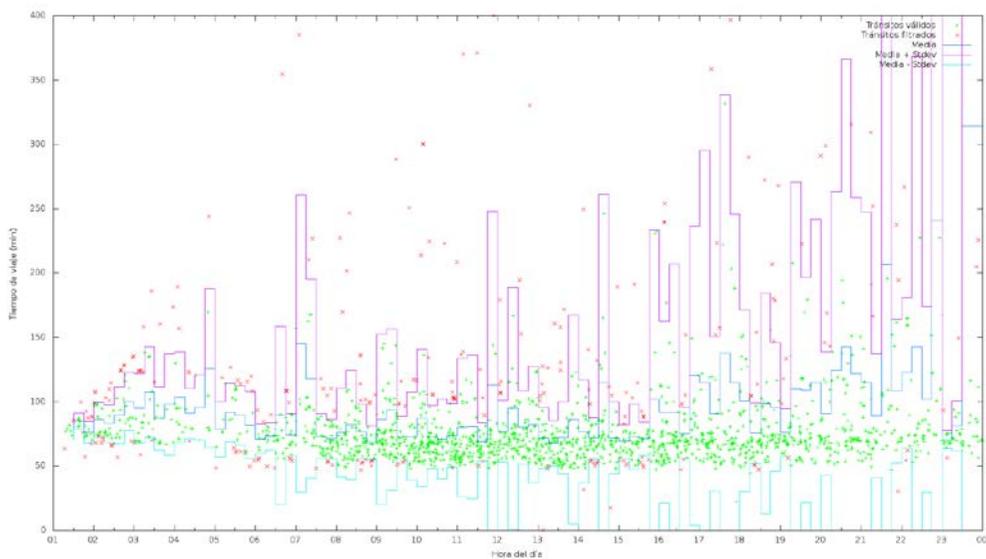
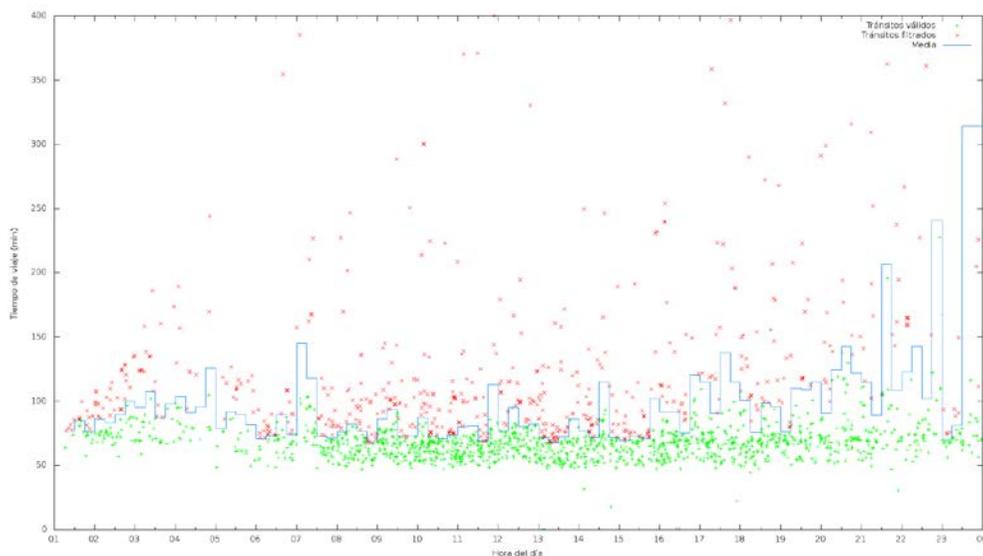


Imagen 119: Clasificación transitos algoritmo  $\sigma$  SBT 6 – SBT 7



*Imagen 120: Clasificación tránsitos algoritmo Canon-Lozano SBT 6 – SBT 7*

En este caso, en el que se han registrado 2.250 tránsitos, se observa en la Imagen 128 como el algoritmo  $\sigma$ , a pesar de que clasifica más tránsitos que el algoritmo de Canon-Lozano, ver Imagen 129, descarta algunos tránsitos rápidos que están fuera del rango definido para el filtrado, que deberían haber sido incluidos en el cálculo de la matriz O/D, tal y como se observa entre las 5h y las 7h y entre las 14h y las 16h.

### 8.1.4 Conclusiones

Los resultados han demostrado que tanto el algoritmo  $\sigma$ , como el algoritmo de Canon-Lozano presentan problemas en la clasificación de los tránsitos. El principal problema es que descartan tránsitos que deberían ser contabilizados en la matriz O/D. Esta deficiencia es debida a la forma en la que se han definido los umbrales de corte.

El umbral definido por Malinovskiy en el algoritmo  $\sigma$ , la media  $\pm$  la desviación típica, descarta tránsitos válidos cuando la dispersión de la muestra es pequeña e incluye tránsitos no válidos cuando la dispersión es grande. Este algoritmo podría tener mejor resultado si se descartasen los tránsitos que tienen tiempos de viaje anormalmente altos antes de realizar el cálculo de la desviación típica, pero no se

corregiría el problema que presenta cuando la dispersión es pequeña, ya que se seguirían descartando tránsitos que deberían ser contabilizados en la matriz O/D.

En el caso del algoritmo de Canon-Lozano, el umbral de corte se ha fijado en la media del tiempo de viaje, se eliminan del cómputo de la matriz O/D muchos tránsitos que claramente deberían ser contabilizados.

## **8.2 Propuesta de nuevos algoritmos para el cálculo de la matriz O/D**

Los resultados de la evaluación realizada en el apartado anterior han demostrado que los algoritmos existentes presentan problemas en la clasificación de los tránsitos válidos para calcular la matriz O/D, debido a que en algunas casos eliminan tránsitos que deberían ser contabilizados y en otros incluyen algunos que no se puede asegurar que deban contabilizarse.

En este apartado se introducen dos nuevos algoritmos propuestos por el doctorando. Estos algoritmos surgen de dos aproximaciones que se plantearon en el estudio de alternativas a los algoritmos existentes, una vez detectadas sus deficiencias.

A continuación se describe en detalle los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$ . En la definición formal de los algoritmos, la notación subíndice indicará el sensor de inicio y final del tramo, el superíndice se ha usado para identificar el significado particular de la variable y entre paréntesis se expresa el intervalo de integración o instante temporal.

### 8.2.1 (Algoritmo $\beta$ )

### 8.2.2 (algoritmo $\alpha$ )





### 8.3 Comparación de los algoritmos de cálculo de la matriz O/D

En este apartado se ha realizado un estudio comparativo entre el mejor algoritmo existente en la bibliografía para el cálculo de tiempo de viaje, adaptado al cálculo de la matriz O/D, el algoritmo que hemos llamado  $\sigma$  definido por Malinovskiy, y los dos algoritmos propuestos por el doctorando, que se han descrito en el apartado anterior, con los valores de las variables de configuración siguientes:

- Algoritmo de ajuste continuo del tiempo de viaje, algoritmo  $\beta$ :
  
- Algoritmo del ajuste adaptativo del tiempo de viaje, algoritmo  $\alpha$ :
  
- Algoritmo desviación típica de la media, algoritmo  $\sigma$ :
  - Media  $\pm \sigma$

La prueba se ha realizado sobre los datos de un día completo de la instalación descrita en el apartado 7.1.3: "Entorno de pruebas". Las condiciones de la prueba son similares a las seguidas en el apartado 8.1.3: "Resultado de la evaluación de los algoritmos existentes". En este estudio los algoritmos se han aplicado a dos condiciones de tráfico: una normal, tal y como se han registrado los valores en los sensores BT, y otra simulada, en la que se ha generado un corte total del sentido de circulación durante 30 minutos entre el emplazamiento 1 y 2 a las 11 de la mañana. Este último escenario se ha creado para determinar cómo se adaptan los algoritmos a cambios extremos en las condiciones de circulación.

### 8.3.1 Evaluación en condiciones normales de circulación

Los resultados obtenidos en la clasificación de los tránsitos en condiciones normales de circulación, tras aplicar los algoritmos, se muestra en la Tabla 34:

Algoritmo	$\beta$ (0,02)		$\beta$ (0,1)		$\alpha$ (3 Km)		$\alpha$ (5 Km)		$\sigma$ (1)	
	Válidos	No Válidos	Válidos	No Válidos	Válidos	No Válidos	Válidos	No Válidos	Válidos	No Válidos
SBT1-SBT2	799	91	802	88	806	84	807	83	746	144
SBT2-SBT1	836	82	837	81	839	79	841	77	758	160
SBT1-SBT7	98	37	112	23	114	21	118	17	112	23
SBT7-SBT1	69	41	72	38	82	28	82	28	95	15
SBT2-SBT7	66	40	71	35	74	32	75	31	90	16
SBT7-SBT2	41	56	49	48	60	37	69	28	81	16
SBT1-SBT6	194	35	193	36	197	32	197	32	175	54
SBT6-SBT1	119	39	120	38	119	39	115	43	124	34
SBT2-SBT6	109	48	111	46	116	41	116	41	126	31
SBT6-SBT2	74	64	73	65	73	65	82	56	119	19
SBT6-SBT7	2106	144	2116	134	2127	123	2135	115	1936	314
SBT7-SBT6	2156	139	2152	143	2170	125	2176	119	1975	320

Tabla 24: Clasificación tránsitos algoritmos matriz O/D y tiempo de viaje

Algoritmo	Clasificación	Total Clasi	Totales	%
$\beta$ (0,02)	Válidos	6667	7483	89,1
	No Válidos	816		10,9
$\beta$ (0,1)	Válidos	6708	7483	89,6
	No Válidos	775		10,4
$\alpha$ (3 Km)	Válidos	6774	7483	90,5
	No Válidos	709		9,5
$\alpha$ (5 Km)	Válidos	6814	7483	91,1
	No Válidos	669		8,9
$\sigma$ (1)	Válidos	6337	7483	84,7
	No Válidos	1146		15,3

Tabla 25: Datos globales de algoritmo matriz O/D

Como se puede observar en la Tabla 35 y en la Tabla 36:

- Los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$ , tiene un comportamiento muy similar para los 2 valores asignados al parámetro.
- Los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$  son los que más tránsitos clasifican como válidos,  $\sigma$  el que menos.
- En la clasificación global, el algoritmo  $\alpha$ , es el que más tránsitos clasifica como válidos, pero con resultados muy similares al algoritmo  $\beta$ .

- una vez aplicados los algoritmos de emparejamiento el número de tránsitos que se descartan para los cálculos de la matriz O/D está entorno al 10% para el algoritmo  $\alpha$  y  $\beta$ , y del 15% para el algoritmo  $\sigma$ , debido principalmente a tiempos de viaje excesivamente grandes.

Para analizar la validez de la clasificación de los tránsitos se ha creado un conjunto de gráficas en las que se han representado todos los tránsitos del día de estudio, diferenciados como válidos y no válidos, para todos los emplazamientos y para las 5 variantes de los algoritmos propuestos.

En el Anexo III: *Gráficas algoritmos matriz O/D* se han incluido todas las gráficas, en este apartado se ha seguido el mismo criterio que el fijado en el apartado 8.1.3: *“Resultado de la evaluación de los algoritmos existentes”*.

Cabe destacar que la representación de los resultados de los algoritmos  $\alpha$  y  $\sigma$  se realiza con barras horizontales, en lugar de una curva continua, debido a que el valor que se representa está integrado, en el caso del algoritmo  $\alpha$  cada 5 minutos y en el  $\sigma$  cada 15 minutos.

Para realizar la comparación entre algoritmos, en este apartado se presenta un subconjunto de gráficas que permiten analizar diferentes aspectos de los algoritmos. La línea de color cian representa el límite superior de corte, la línea azul oscuro el valor medio y la línea magenta el límite inferior de corte. Los puntos verdes corresponden a tránsitos que los algoritmos han determinado que son válidos para el cálculo de la matriz O/D, los puntos rojos han sido clasificados como no válidos.

### Gráficas del tránsito SBT 2 – SBT 1 (tiempo de viaje medio: 7 minutos)

En este caso los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$ , tienen unos resultados muy similares, pero el algoritmo  $\sigma$  clasifica un 9,9% menos transitos como válidos. El número de transitos registrados es de 918.

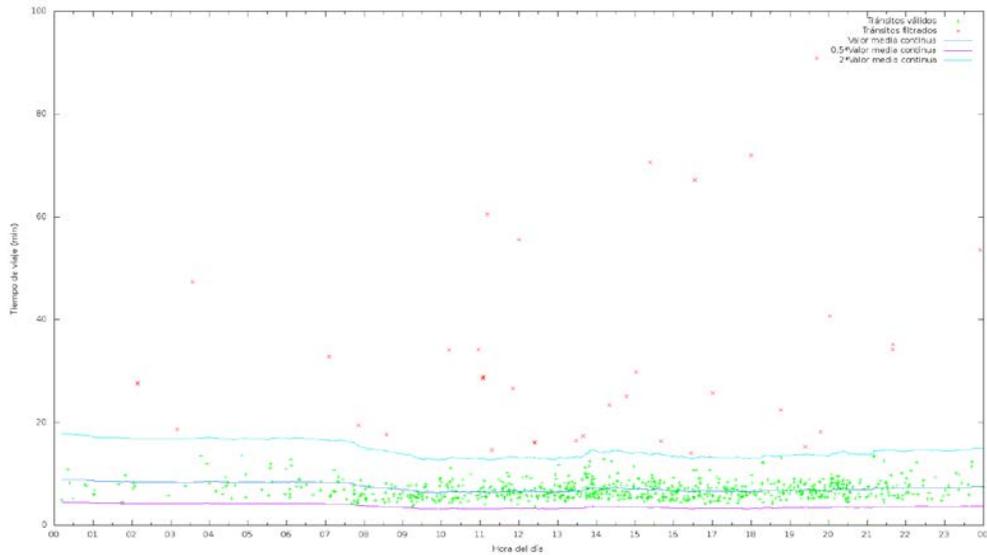


Imagen 121: Clasificación transitos algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 2 – SBT 1

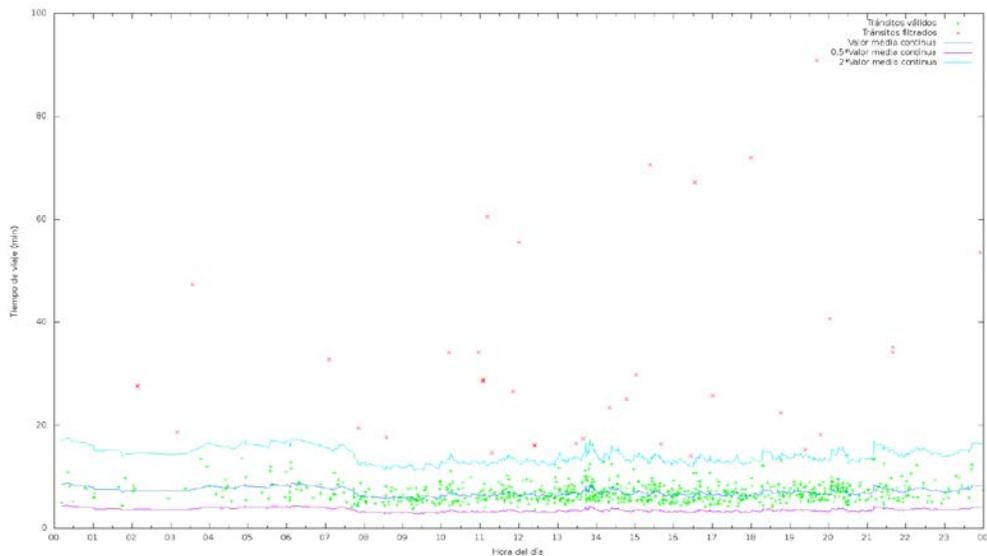


Imagen 122: Clasificación transitos algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 2 – SBT 1

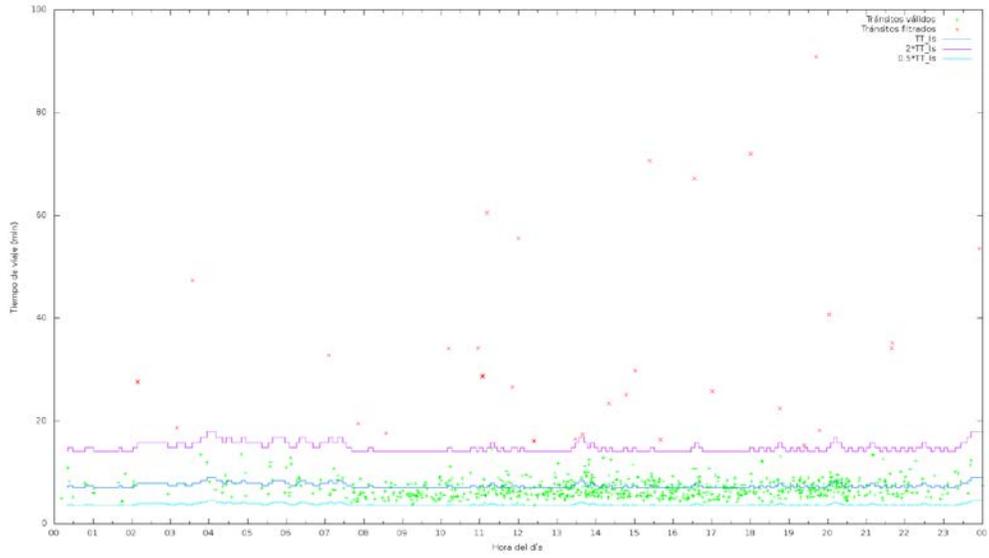


Imagen 123: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  SBT 2 – SBT 1

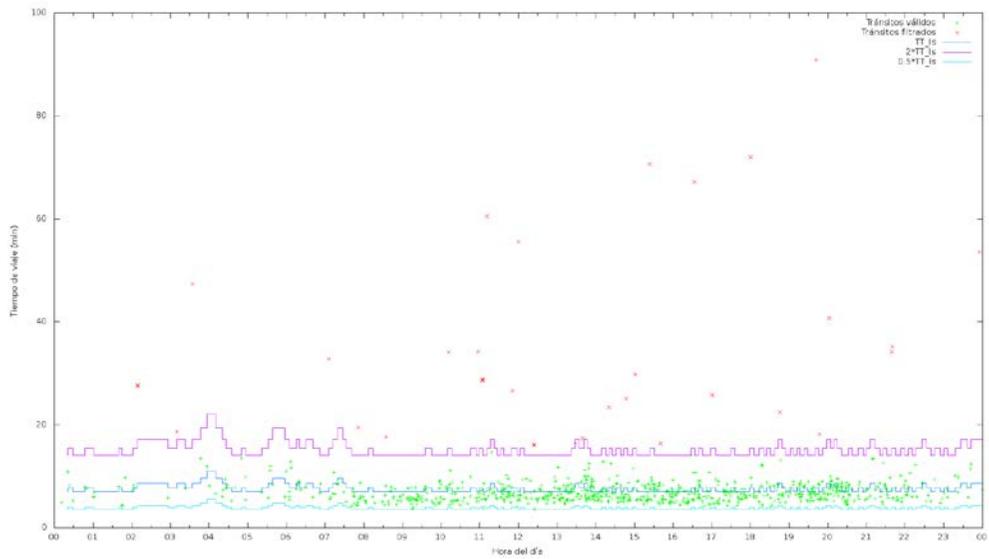


Imagen 124: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  SBT 2 – SBT 1

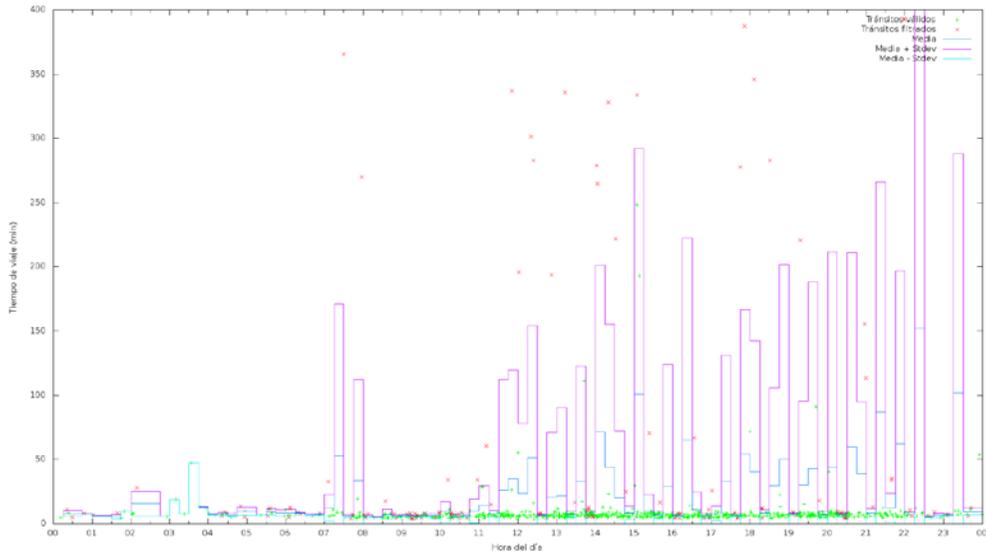


Imagen 125: Clasificación tránsitos algoritmo  $\sigma$  SBT 2 – SBT 1

Como puede observarse en las gráficas anteriores, la clasificación realizada por el algoritmo  $\alpha$  y  $\beta$  es muy similar. Sin embargo el algoritmo  $\sigma$  presenta varios problemas, cuando en un periodo solo hay un registro, que corresponde con un tránsito claramente no válido, el algoritmo lo acepta y lo computa. En los intervalos donde hay varios tránsitos claramente válidos, el algoritmo filtra los situados en los extremos, como por ejemplo entre las 9 h y las 11h. En intervalos donde hay tránsitos válidos y no válidos con valores extremos, la desviación tiene un valor excesivo lo que provoca que se incluyan valores claramente no válidos, como por ejemplo a las 15h.

#### Gráficas del tránsito SBT 7 – SBT 1 (tiempo de viaje medio: 101 minutos)

En este caso los algoritmos  $\beta$  clasifican como tránsitos válidos un 12,2 % menos que el algoritmo  $\alpha$ , y el algoritmo  $\alpha$  clasifica un 13,7% menos tránsitos como válidos que el algoritmo  $\sigma$ . En este punto solo se presentan las gráficas asociadas a un valor de  $\alpha$  y  $\beta$ , el resto de gráficas se pueden consultar en el Anexo III: *Gráficas algoritmos matriz O/D*". El número de tránsitos registrados es de 110.

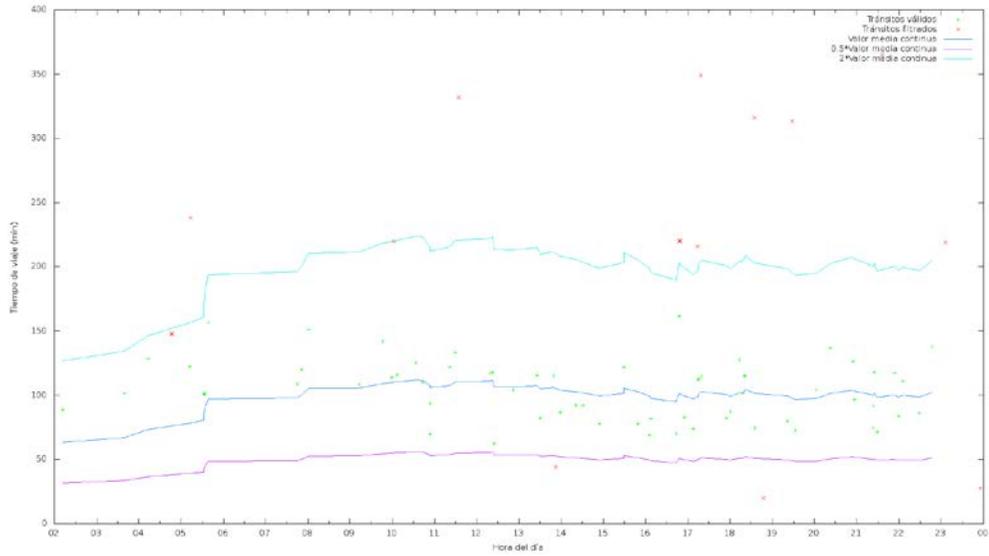


Imagen 126: Clasificación tránsitos algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 7 – SBT 1

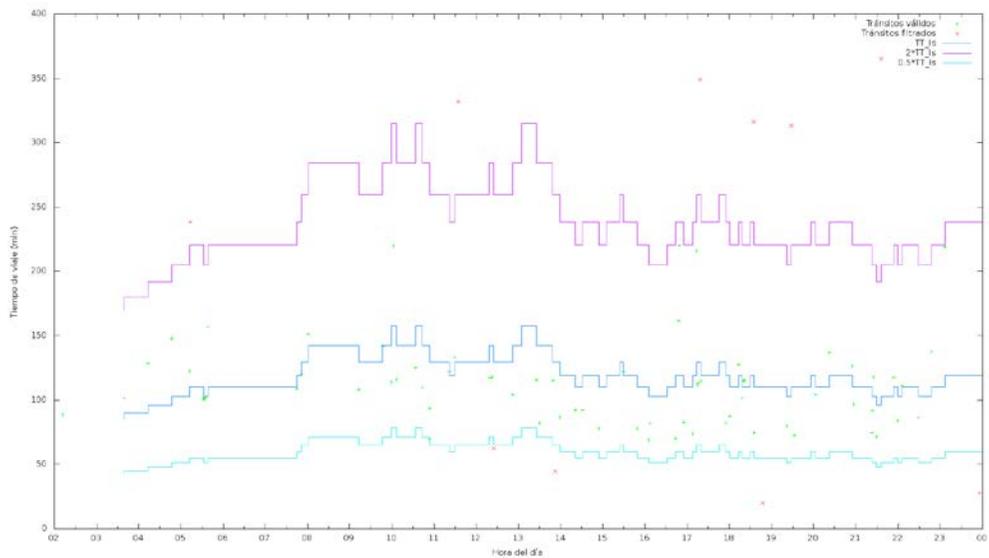
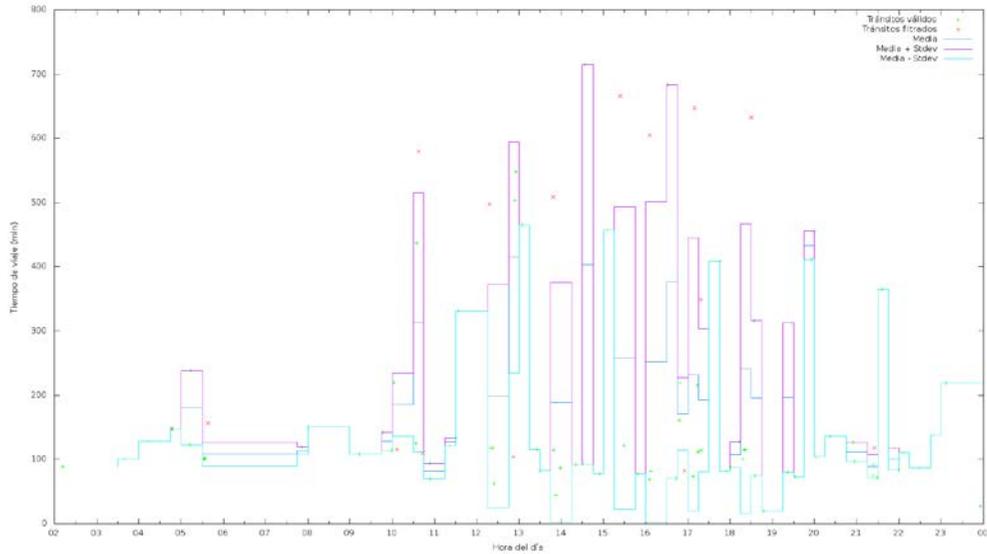


Imagen 127: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h SBT 7 – SBT 1



*Imagen 128: Clasificación tránsitos algoritmo  $\sigma$  SBT 7 – SBT 1*

En la Imagen 135, en la Imagen 136 y en la Imagen 137 se muestra como el algoritmo  $\alpha$  se ajusta mejor que el algoritmo  $\beta$  cuando hay pocos tránsitos. El algoritmo  $\sigma$  vuelve a realizar una clasificación que no puede considerarse correcta, incluyendo muchos tránsitos que claramente no son válidos. El valor del umbral inferior del algoritmo  $\sigma$  toma valores negativos, lo que supone que aceptaría valores de tiempo de viaje no válidos.

### Gráficas del tránsito SBT 6 – SBT 7 (tiempo de viaje medio: 75 minutos)

Este caso es similar al obtenido entre los sensores SBT 2 – SBT 1, los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$ , tienen unos resultados muy similares, siendo mejor el algoritmo  $\alpha$ . El algoritmo  $\sigma$  clasifica como tránsitos no válidos un 9,3% menos. El número de tránsitos registrados es de 2.250.

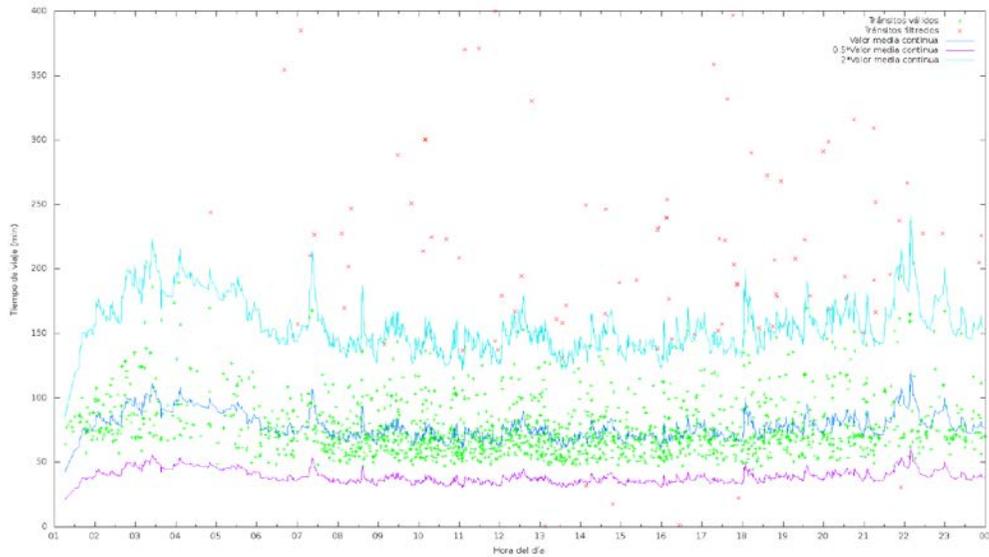


Imagen 129: Clasificación tránsitos algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 6 – SBT 7

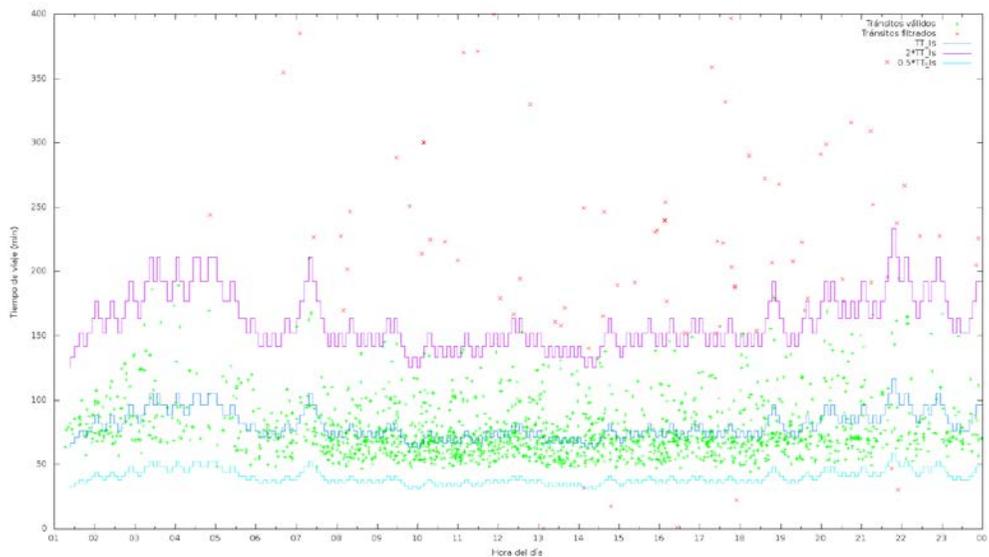
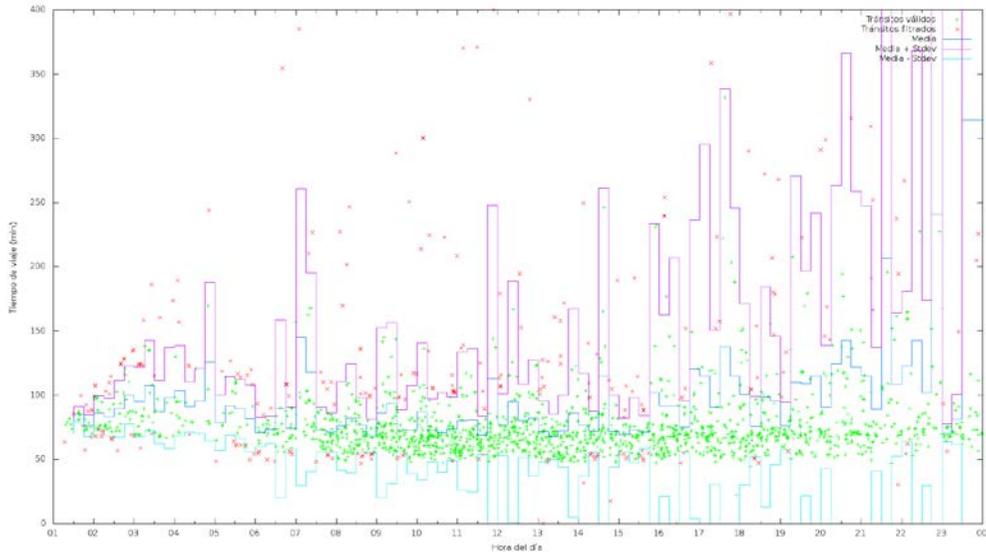


Imagen 130: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h SBT 6 – SBT 7



*Imagen 131: Clasificación transitos algoritmo  $\sigma$  SBT 6 – SBT 7*

En la Imagen 138, en la Imagen 139 y en la Imagen 140 se muestra como en tramos en los que el número de transitos es elevado, el algoritmo  $\alpha$  y el algoritmo  $\beta$  se ajustan a la curva que forman los transitos y realizan una clasificación de los transitos muy similar. El algoritmo  $\sigma$  vuelve a presentar los mismos problemas que en los casos anteriores.

### 8.3.2 Corte en un sentido de circulación

Para evaluar cómo se ajustan los algoritmos definidos a cambios bruscos en el tiempo de viaje, se ha creado una simulación en la que se ha realizado un corte total en el sentido de circulación del emplazamiento 1 al 2 de 30 minutos de duración. Este corte solo afecta a los transitos entre estos dos puntos.

Como se puede observar en la Tabla 36 y en la Tabla 37:

- El algoritmo  $\sigma$  tiene el mismo comportamiento se produzca o no un corte, hace la misma clasificación.
- El algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h realiza una mejor clasificación que  $\alpha = 3$  Km/h.

- El algoritmo  $\beta$  pierde el 3,2% de tránsitos válidos. Todos los tránsitos que se han visto involucrados en el incidente.

Algoritmo	Clasificación	Total Clasi	Totales	%
$\beta$ (0,02)	Válidos	799	890	89,8
	No Válidos	91		10,2
$\beta$ (0,1)	Válidos	802	890	90,1
	No Válidos	88		9,9
$\alpha$ (3 Km)	Válidos	805	890	90,4
	No Válidos	85		9,6
$\alpha$ (5 Km)	Válidos	805	890	90,4
	No Válidos	85		9,6
$\sigma$ (1)	Válidos	746	890	83,8
	No Válidos	144		16,2

Tabla 26: Datos algoritmo matriz O/D circulación normal SBT 1 – SBT 2

Algoritmo	Clasificación	Total Clasi	Totales	%
$\beta$ (0,02)	Válidos	773	890	86,9
	No Válidos	117		13,1
$\beta$ (0,1)	Válidos	776	890	87,2
	No Válidos	114		12,8
$\alpha$ (3 Km)	Válidos	780	890	87,6
	No Válidos	110		12,4
$\alpha$ (5 Km)	Válidos	786	890	88,3
	No Válidos	104		11,7
$\sigma$ (1)	Válidos	746	890	83,8
	No Válidos	144		16,2

Tabla 27: Datos algoritmo matriz O/D corte sentido SBT 1 – SBT 2

Las gráficas siguientes permiten analizar en detalle la clasificación realizada por cada algoritmo.

### Gráficas del tránsito SBT 1 – SBT 2 con corte sentido (tiempo de viaje medio: 11 minutos)

En número de tránsitos registrados es de 890.

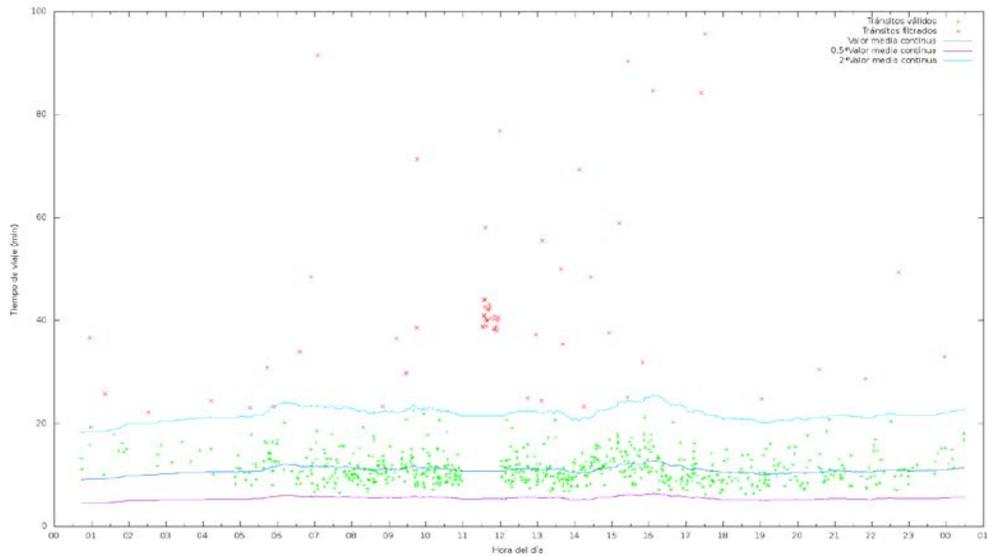


Imagen 132: Clasificación tránsitos algoritmo  $\beta = 0,02$  corte sentido SBT 1 – SBT 2

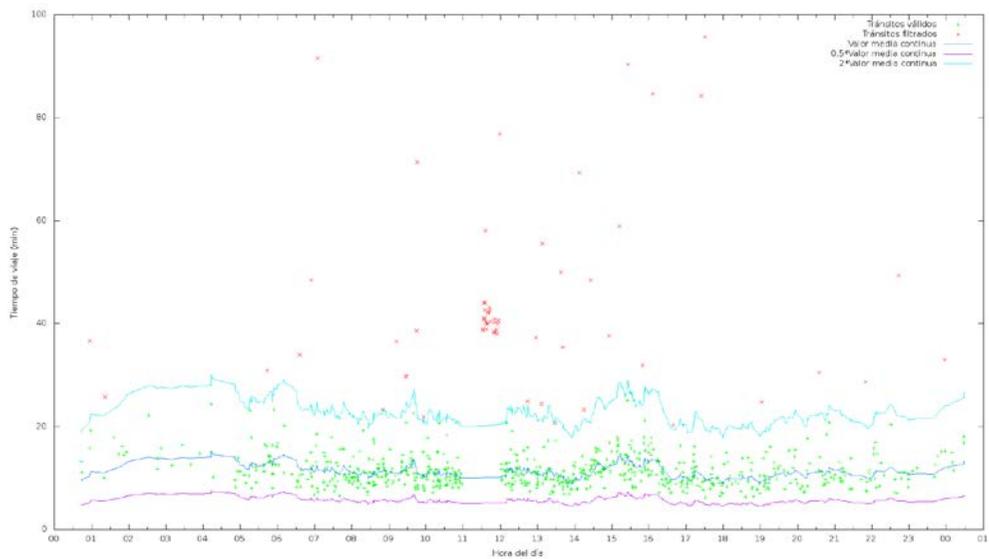


Imagen 133: Clasificación tránsitos algoritmo  $\beta = 0,1$  corte sentido SBT 1 – SBT 2

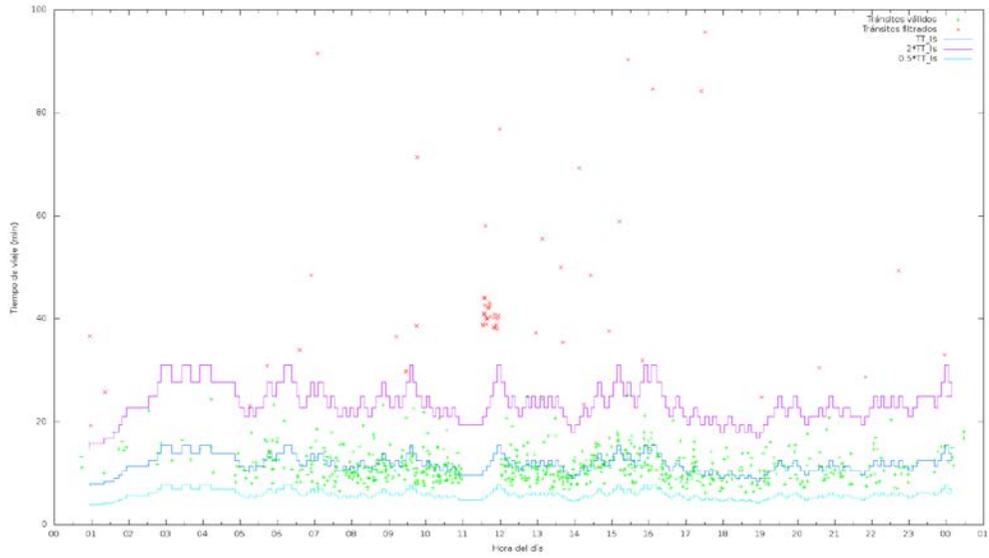


Imagen 134: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  con corte sentido SBT 1 – SBT 2

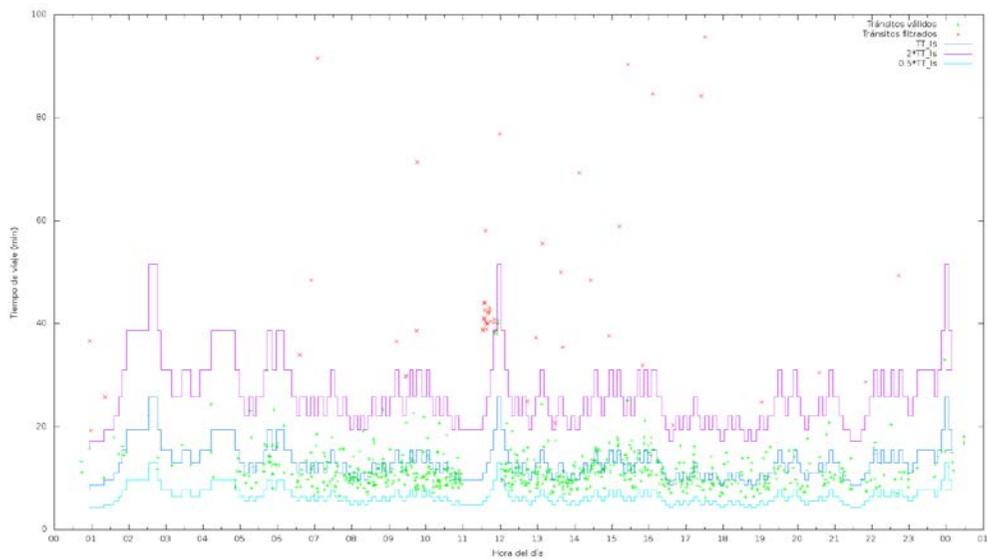
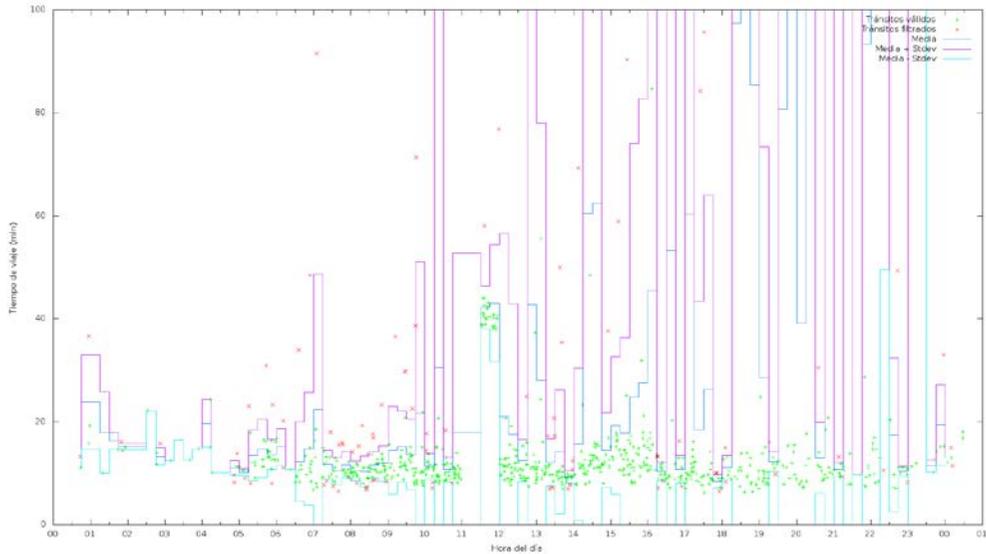


Imagen 135: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  con corte sentido SBT 1 – SBT 2



*Imagen 136: Clasificación tránsitos algoritmo  $\sigma$  con corte sentido SBT 1 – SBT 2*

Como puede verse en la Imagen 141 y la Imagen 142, el algoritmo  $\beta$  no se ajusta ante un cambio brusco en el tiempo de viaje. En la Imagen 143, se puede observar como el algoritmo  $\alpha = 3$  se intenta ajustar a la nueva situación de tráfico, pero es demasiado lento y no captura los vehículos iniciales, necesitaría varios periodos adicionales de integración para llegar a ajustarse. En la Imagen 144, se muestra como el algoritmo  $\alpha = 5$  llega a ajustarse a la situación producida por el corte, pero pierde los primeros tránsitos. También hay que destacar que en la vuelta a la normalidad se ajusta perfectamente sin perder casi ningún tránsito.

En la Imagen 145 se observa como el algoritmo  $\sigma$  se ajusta a la situación del tráfico producida por el corte de sentido, pero se reproduce el problema registrado en condiciones normales, pierde muchos tránsitos que son válidos e incluye muchos que razonablemente no lo son.

## 8.4 Modificación algoritmo $\alpha$

### Corte de un sentido de circulación entre SBT 1 y SBT 2

El resultado del filtrado es el siguiente:

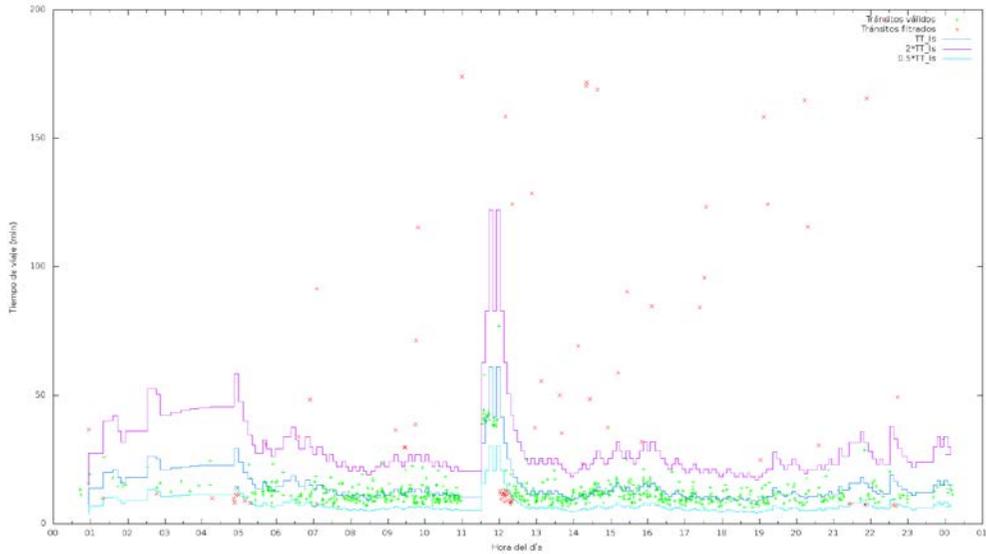
Algoritmo	Clasificación	Total Clasi	Totales	%
$\beta$ (0,02)	Válidos	773	890	86,9
	No Válidos	117		13,1
$\beta$ (0,1)	Válidos	776	890	87,2
	No Válidos	114		12,8
$\alpha$ (3 Km)	Válidos	792	890	89,0
	No Válidos	98		11,0
$\alpha$ (5 Km)	Válidos	788	890	88,5
	No Válidos	102		11,5
$\sigma$ (1)	Válidos	746	890	83,8
	No Válidos	144		16,2

Tabla 28: Datos matriz O/D corte total SBT 1 – SBT 2 con modificación algoritmo  $\alpha$

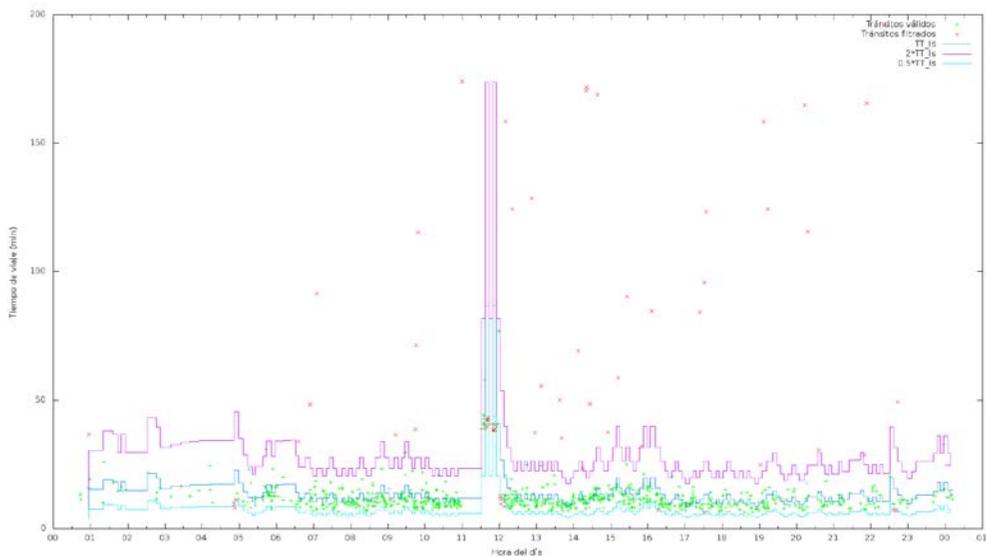
Como puede observarse en la comparación de la Tabla 37 y la Tabla 38,

, mejora la clasificación que realiza el algoritmo  $\alpha$ , principalmente para  $\alpha = 3$  Km/h pasando de clasificar como no válidos 12,4% de los tránsitos a 11%.

A continuación se muestran las gráficas de la clasificación de los tránsitos aplicando el algoritmo  $\alpha$  modificado.



*Imagen 137: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h modificado con corte sentido SBT 1 – SBT 2*



*Imagen 138: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h modificado con corte sentido SBT 1 – SBT 2*

En la Imagen 146 y en la Imagen 147 se observa como el algoritmo  $\alpha$

, es capaz de ajustarse más rápidamente a la situación de corte de carril, clasificando correctamente los tránsitos que se crean una vez vuelven a circular los vehículos. Sin embargo, en la vuelta a la normalidad se clasifican como no válidos

varios tránsitos que claramente deberían haberse clasificado como válidos. Hay que resaltar que en la simulación el restablecimiento de las condiciones normales se hace de forma inmediata, cosa que no ocurriría en una situación real de tráfico, donde el corte puede ser instantáneo pero la recuperación de la situación normal es mucho más lenta. Por lo tanto, el algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h proporcionaría mejores resultados en una situación real que los que se han obtenido en la simulación.

### Situación normal de tráfico

Para poder validar la modificación propuesta en el algoritmo  $\alpha$  también se ha aplicado a condiciones normales de circulación. En el Anexo III: *Gráficas algoritmos matriz O/D* se han incluido las gráficas de la aplicación del algoritmo  $\alpha$  con la modificación y sin ella a todos los tramos de estudio. A continuación se muestran ejemplos de los resultados que se han obtenido en varios tramos que ofrecen resultados relevantes para el estudio.

#### Tránsitos entre SBT 7 y SBT 6 (2.295 tránsitos)

Como puede observarse en la Imagen 148 y en la Imagen 149, cuando el número de tránsitos es alto y no hay periodos sin datos, la modificación del algoritmo  $\alpha$  proporciona los mismos resultados que el algoritmo  $\alpha$  sin la modificación.

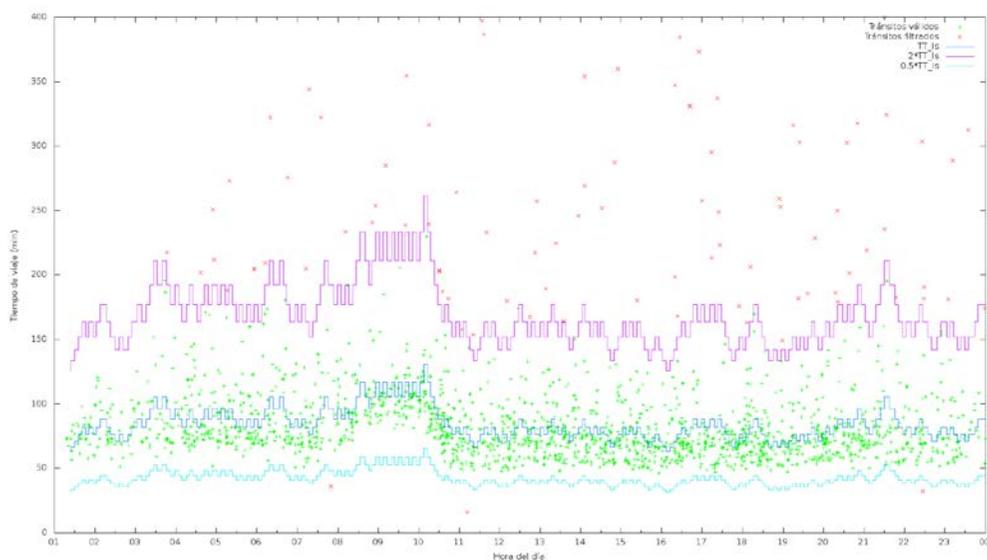


Imagen 139: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 6

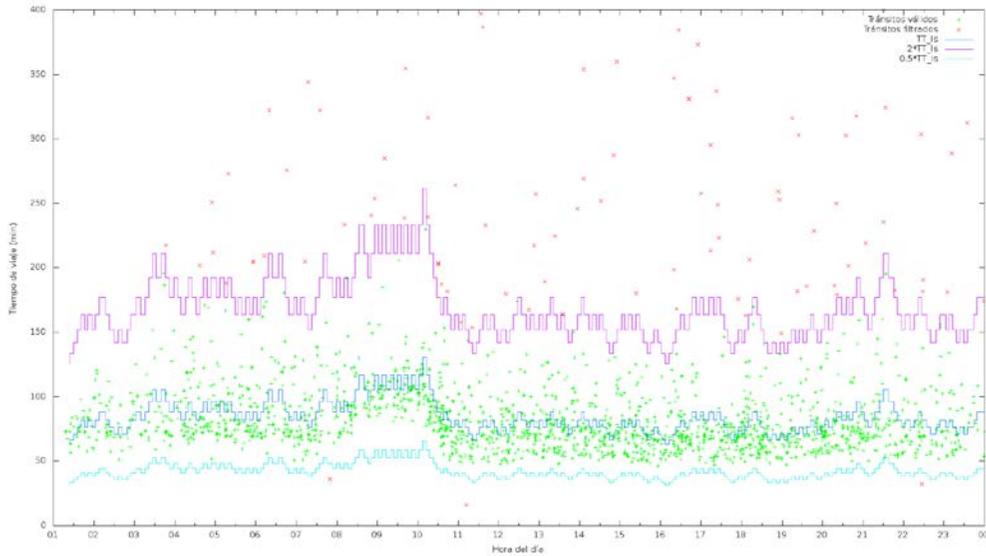


Imagen 140: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 6

#### Tránsitos entre SBT 6 y SBT 1 (158 tránsitos)

Como se muestra en la Imagen 150 y en la Imagen 151, en situaciones normales cuando el número de tránsitos es muy bajo y aparecen periodos sin datos, la modificación del algoritmo  $\alpha$  no funciona correctamente, ya que excluye tránsitos claramente válidos e incluye tránsitos no válidos en los cálculos.

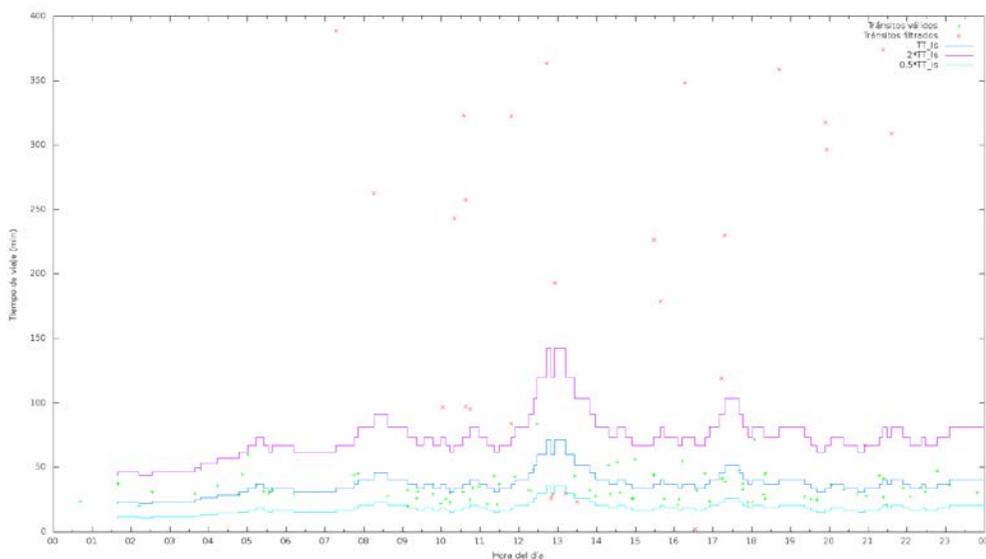


Imagen 141: Clasificación tránsitos algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 1

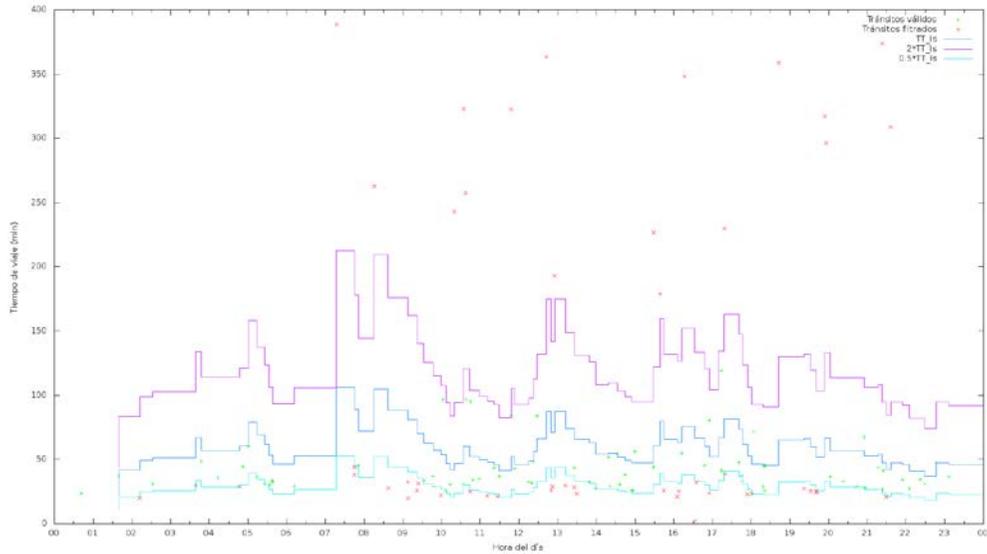


Imagen 142: Clasificación tráficos algoritmo con ajuste  $\alpha = 3 \text{ Km/h SBT } 6 - \text{ SBT } 1$

Por lo tanto, para tramos con pocos tránsitos y que aparezcan periodos normales sin tráfico, no se podría aplicar la modificación del algoritmo  $\alpha$ .

## 8.5 Implementación en el sistema MultiXXXXXX

La descripción del funcionamiento del XXX se ha realizado en el capítulo 6: "Aplicación de los XXXXXXXXXXXX al cálculo de la Matriz O/D", por lo tanto en este apartado solo se ha descrito

En la Imagen 152 se muestra el diagrama de actividad del proceso de filtrado y puede observarse el momento propuesto para la aplicación de cada algoritmo de filtrado, así como su integración en el XXX.

*Imagen 143: Diagrama de actividad del proceso de filtrado algoritmo  $\alpha$*

## 8.6 Conclusiones

En el apartado 8.1: “*Estudio de los algoritmos existentes en la bibliografía*” se han analizado los algoritmos presentes en la bibliografía que utilizan los datos proporcionados por los sensores BT para el cálculo del tiempo de viaje y la matriz O/D. Entre los algoritmos analizados se ha realizado un estudio comparativo entre una adaptación del algoritmo propuesto por Malinovskiy para el cálculo del tiempo de viaje y el de Canon-Lozano para el cálculo de matrices O/D. Los resultados han demostrado que estos algoritmos presentan problemas a la hora de la clasificación de los tránsitos que deben ser contabilizados en el cálculo de la matriz O/D dinámica.

Los resultados obtenidos en la evaluación de los algoritmos existentes en la bibliografía han motivado al doctorando a proponer dos nuevos algoritmos para el cálculo de la matriz O/D.

En el apartado 8.2: “Propuesta de nuevos algoritmos para el cálculo de la matriz O/D” se han descrito y formulado ambos algoritmos. Las dos propuestas se diferencian en la forma en la que se

En el apartado 8.3: “Comparación de los algoritmos de cálculo de la matriz O/D” se han comparado 3 algoritmos, el algoritmo propuesto por Malinovskiy adaptado al cálculo de la matriz O/D, que ha sido el que mejor se ha comportado con los datos de prueba de los existentes en la bibliografía, que se ha denominado algoritmo  $\sigma$ , y los dos propuestos por el doctorando, denominados algoritmo  $\alpha$  y algoritmo  $\beta$ . Los algoritmos se han analizado con los datos obtenidos por los sensores BT y con una simulación de un corte completo de sentido de circulación. A continuación se presentan las principales conclusiones de los tres algoritmos analizados:

- **Conclusiones del algoritmo  $\sigma$**

En el estudio concreto en el que se ha aplicado este algoritmo, la clasificación realizada de tránsitos válidos y no válidos presenta claras deficiencias. Esto es debido a que existen tránsitos fuera de rango que no son inicialmente filtrados, lo que genera en ciertas ocasiones una desviación típica grande y clasifica como tránsitos válidos algunos que claramente no lo son.

También se han detectado tramos en los que los tiempos de viaje entre los tránsitos son muy similares y por lo tanto la desviación típica es pequeña, lo que lleva a clasificar como no válidos tránsitos cercanos a la media que claramente son válidos para el cálculo de la matriz O/D dinámica.

Como ventaja a destacar de este algoritmo es su capacidad para adaptarse a los cambios bruscos en el tiempo de viaje.

Este algoritmo ha demostrado en los estudios presentados en la bibliografía que proporciona valores válidos de tiempos de viaje pero realizando un

filtrado inicial que elimine los tránsitos fuera de rango, pero claramente no serviría para calcular las matrices O/D.

Este algoritmo puede generar tiempos de viaje menores al asociado a la velocidad legal del tramo. Este problema se podría solventar introduciendo una condición en el algoritmo que limite este valor.

El coste de este algoritmo es lineal, multiplicado por una constante.

- **Conclusiones del algoritmo  $\beta$**

La ventaja que presenta este algoritmo es la sencillez y rapidez de cálculo. El coste del algoritmo es del orden de la talla del número tránsitos, tiene un coste lineal.

La desventaja que presenta este algoritmo es que el valor del tiempo de viaje que proporciona no se ajusta a cambios bruscos en el tráfico. Por lo tanto, podría presentar problemas principalmente en situaciones provocadas por accidentes y en zonas metropolitanas en las que se registren congestiones recurrentes.

Otro aspecto a resaltar es que también puede llegar a proporcionar valores del tiempo de viaje menores al asociado a la velocidad legal del. Igual como ocurre con el algoritmo anterior, este problema se podría solventar introduciendo una condición en el algoritmo que limite su valor.

- **Conclusiones del algoritmo  $\alpha$ .**

La ventaja que presenta este algoritmo es su capacidad de adaptación a las situaciones del tráfico, puede incluso proporcionar la tendencia del tráfico, indicando si el tráfico es estable, está ralentizándose o mejorando, analizando los valores de la velocidad media del periodo con el límite inferior de la velocidad media calculada en el periodo anterior.

La tendencia del tráfico se determinaría en el segmento del código del algoritmo que se presenta a continuación:

Otra ventaja importante es que este algoritmo se adapta a los cambios bruscos en el tráfico que se pueden producir por un accidente o en el tránsito de los niveles de servicio E y F.

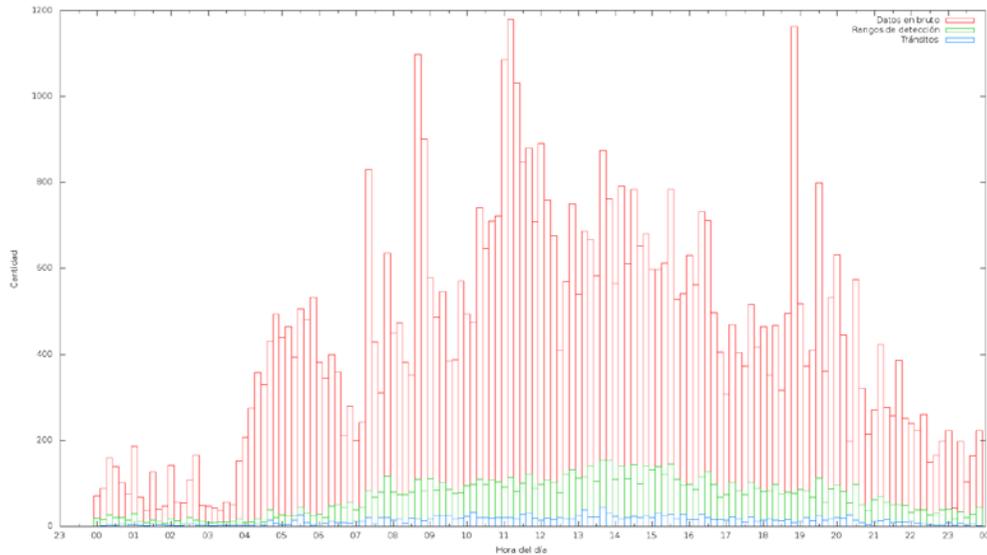
También hay que destacar que el cálculo del tiempo de viaje se ajusta a la forma en que se calcula este valor en los CGT, ya que no se consideran los tránsitos lentos y se limita a la velocidad legal del tramo.

La desventaja que presenta este algoritmo frente al algoritmo que aun siendo también lineal, del orden de la talla del número de tránsitos, estaría multiplicado por una constante positiva.

La posible aplicación de la modificación del algoritmo  $\alpha$ , planteada en el apartado 8.4: "*Modificación algoritmo  $\alpha$* ", que permitía adaptarse mejor a ese algoritmo cuando se producía un cambio brusco en las condiciones de circulación, deberá ser motivo de un estudio particular en cada instalación. Este estudio deberá estar enfocado a definir franjas horarias en las que, en condiciones normales de circulación y en todos los periodos de integración, siempre se haya creado al menos un tránsito válido.

En la Imagen 153 se ha representado la cadena de filtrados que se inicia en el XXXXXX XXX, donde se eliminan las repeticiones registradas de una misma MAC en un intervalo de detección, dejando un único registro por cada intervalo de detección. Estos datos son enviados

. En esta gráfica se ha representado la cadena de filtrado para un día de estudio de los tránsitos entre los sensores SBT1, SBT2 y SBT6, integrados cada 10 minutos. En el eje X se representa el momento temporal del día y en el eje Y el número de registros.



*Imagen 144: Cadena de filtrados*

En la Tabla 39 se presentan los resultados obtenidos.

Datos Brutos Sensor BT	Rangos de detección	Tránsitos Validos
62.384	9.678	1.948
100%	15,5%	3,1%

*Tabla 29: Cadena de filtrado de los datos del sensor BT*

Los datos obtenidos para estos pares de sensores permiten determinar que cada MAC se ha registrado una media de 6,5 veces por cada intervalo de detección.

En una arquitectura cliente-servidor, en el que los datos en bruto de los sensores son enviados al servidor, (Bitcarrier, 2014), se habrían registrado 62.384 mensajes entre los sensores BT y el CGT. En una arquitectura basada en XXX, tal y como se ha propuesto en esta tesis, los XXXXXs XXX, solo se habrían enviado 1.948

mensajes. Estos resultados muestran claramente la ventaja de la arquitectura XXX frente a la arquitectura cliente-servidor.



## 9 Evaluación del sistema propuesto en condiciones reales

---

En este capítulo se han incluido tres pruebas reales en las que se han instalado los sensores BT y se han aplicado los algoritmos y el sistema XXX descrito en los capítulos anteriores.

La primera de ellas se ha realizado en una autovía. Esta instalación ha servido para validar la capacidad de la tecnología BT, los algoritmos y del sistema XXX implementado para obtener la matriz O/D en un entorno de tráfico interurbano y con distancias entre sensores grandes, entre 12,5 y 170 Km. Los sensores BT han sido instalados en los mismos emplazamientos en los que se ha instalado un sistema basado en procesamiento de imágenes mediante un OCR, que ha servido como sistema de referencia.

La segunda de ellas se ha realizado en la rotonda Oeste del polígono l'Andana en la ciudad de Paterna. El objetivo de esta prueba ha sido probar la validez de la tecnología para la realización de estudios direccionales en zonas reducidas. El

entorno de trabajo es interurbano, en carretera convencional y con distancias entre sensores entre 150 y 300 metros.

La tercera de ellas se ha realizado en la ciudad de Valencia, el objetivo de esta prueba ha sido determinar la aplicación del sistema en un entorno urbano. El sistema se ha utilizado para analizar el uso del centro histórico de Valencia por los vehículos a motor, analizando la matriz O/D y clasificando los tránsitos en dos grupos. El primero de ellos incluía a los vehículos cuyo itinerario tenía el origen o el destino dentro del centro histórico, el segundo incluía a los vehículos cuyo itinerario tenía su origen y destino fuera del centro histórico. Las distancias entre sensores también han sido reducidas, desde los 500 a los 1.100 metros.

## 9.1 Estudio Matriz O/D en autovía

El objetivo de esta prueba piloto ha sido probar los algoritmos de filtrado y de cálculo de la matriz O/D definidos por el doctorando, y su comparación con los algoritmos existentes en la bibliografía, en un entorno interurbano, teniendo como datos de contraste los obtenidos por un OCR instalado en los mismos emplazamientos que los sensores BT.

### 9.1.1 Definición de la prueba

El grafo de la localización de los sensores BT se muestra en la Imagen 154

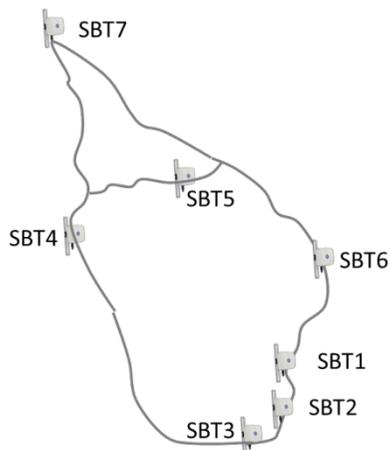


Imagen 145: Grafo de posición de los sensores BT en prueba piloto autovía

Las distancias entre los sensores BT y los OCR que se han instalado en esta red se muestran en la Tabla 40

Origen	Destino	Distancia (Km)
SBT1	SBT2	12,9
SBT1	SBT3	25,4
SBT1	SBT4	115,9
SBT1	SBT5	97,6
SBT1	SBT6	38
SBT1	SBT7	147
SBT2	SBT3	12,5
SBT2	SBT4	103
SBT2	SBT5	123,4
SBT2	SBT6	50,9
SBT2	SBT7	159,9
SBT3	SBT4	92
SBT3	SBT5	123
SBT3	SBT6	63,4
SBT3	SBT7	172,4
SBT4	SBT5	47
SBT4	SBT6	106,6
SBT4	SBT7	74
SBT5	SBT6	59,6
SBT5	SBT7	78,3
SBT6	SBT7	109

*Tabla 30: Distancia entre sensores BT y OCR en prueba autovía*

Los sensores BT fueron instalados sobre elementos de sustentación existentes en la autovía y su colocación fue siempre en el lateral de la vía. La localización de los sensores BT se realizó haciendo coincidir su ubicación con un sistema de procesamiento de imágenes que permitía el procesamiento de las matrículas mediante un OCR. Los resultados obtenidos con el OCR se han tomado como referencia para comparar los resultados del cálculo de la matriz O/D realizados por los algoritmos definidos en la tesis. La comparación se va a realizar con los datos



### 9.1.2 Esquema de implantación del XXX

En la Imagen 155 se muestra la propuesta de implantación del XXX en la prueba piloto de la autovía.

*Imagen 146: Esquema de implantación del XXX en prueba piloto autovía*

La prueba piloto en la autovía se ha realizado *off-line*, sin conexión ni integración con el sistema de gestión de tráfico. La instalación se ha realizado de forma temporal mientras ha durado la toma de datos.

En el caso particular de esta prueba se ha definido un modelo de despliegue en el que se ha proyectado la instalación

### 9.1.3 Resultados de la prueba

A continuación se muestran los resultados de las matrices O/D de la red sensorizada para los 5 algoritmos que se han comparado en el apartado 8.3, Tabla 42 a Tabla 46, y la obtenida mediante el OCR, Tabla 41.

		Destino							Total
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Tránsitos
Origen	P1	0	5.617	4.266	74	3	696	450	11.106
	P2	6.313	0	19.125	460	3	255	179	26.335
	P3	4.247	19.260	0	1.173	2	116	74	24.872
	P4	42	385	1.103	0	208	15	1.105	2.858
	P5	3	0	5	167	0	379	123	677
	P6	558	158	117	24	343	0	7.112	8.312
	P7	336	63	90	1.003	64	6.671	0	8.227
Total									82.387

Tabla 31: Matriz O/D OCR prueba autovía (veh)

		Destino							Total
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Tránsitos
Origen	P1	0	1.224	963	26	3	142	94	2.452
	P2	1.724	0	4.664	190	5	71	67	6.721
	P3	676	2.757	0	420	11	44	46	3.954
	P4	27	83	228	0	101	17	325	781
	P5	3	1	4	141	0	198	60	407
	P6	129	53	54	20	178	0	1.774	2.208
	P7	82	43	54	289	17	1.728	0	2.213
Total									18.736

Tabla 32: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo  $\alpha = 3$  (veh)

		Destino							Total
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Tránsitos
Origen	P1	0	1.228	966	30	6	140	94	2.464
	P2	1.727	0	4.670	194	13	89	77	6.770
	P3	673	2.756	0	418	13	53	60	3.973
	P4	33	88	231	0	102	26	328	808
	P5	5	5	15	142	0	197	62	426
	P6	127	62	63	26	180	0	1.773	2.231
	P7	82	44	57	292	17	1.730	0	2.222
Total									18.894

Tabla 33: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo  $\alpha = 5$  (veh)

		Destino							Total
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Tránsitos
Origen	P1	0	1.228	960	12	0	139	77	2.416
	P2	1.690	0	4.671	183	3	80	52	6.679
	P3	658	2.709	0	407	0	33	20	3.827
	P4	8	86	220	0	69	5	297	685
	P5	1	0	0	124	0	197	53	375
	P6	118	47	43	8	178	0	1.772	2.166
	P7	49	28	25	270	16	1.730	0	2.118
Total									18.266

Tabla 34: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo  $\beta=0,02$  (veh)

		Destino							Total
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Tránsitos
Origen	P1	0	1.224	957	13	0	138	82	2.414
	P2	1.697	0	4.666	184	3	81	58	6.689
	P3	660	2.720	0	412	0	32	24	3.848
	P4	13	91	222	0	96	4	318	744
	P5	2	0	0	133	0	200	55	390
	P6	121	52	51	10	179	0	1.769	2.182
	P7	69	32	26	282	17	1.720	0	2.146
Total									18.413

Tabla 35: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo  $\beta=0,1$  (veh)

		Destino							Total
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Tránsitos
Origen	P1	0	1.167	907	41	17	157	96	2.385
	P2	1.603	0	4.439	199	21	125	99	6.486
	P3	705	2.930	0	404	28	81	72	4.220
	P4	42	116	215	0	104	41	262	780
	P5	14	14	24	141	0	159	77	429
	P6	126	87	107	36	154	0	1.544	2.054
	P7	89	66	72	231	33	1.545	0	2.036
Total									18.390

Tabla 36: Matriz O/D BT prueba autovía algoritmo  $\sigma$  (veh)

Para realizar la comparación entre algoritmos se muestra a continuación la diferencia, para cada par de la matriz O/D, del porcentaje de la matriz O/D registrado por el sensor BT respecto al porcentaje de la matriz O/D registrado por el OCR. Al tomar el OCR como sistema de referencia, en las siguientes tablas obtenemos el error absoluto que se comete en la matriz O/D, con cada algoritmo, usando los datos de BT respecto al valor obtenido con el OCR.

		Destino							% detección frente OCR
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
Origen	P1	0,1	0,6	0,9	0,4	0,1	0,5	0,2	0,22
	P2	1,7	0,0	3,2	1,1	0,1	0,1	0,3	0,26
	P3	0,0	7,7	0,0	5,9	0,3	0,6	0,9	0,16
	P4	2,0	2,8	9,3	0,1	5,7	1,7	3,0	0,27
	P5	0,3	0,0	0,2	10,0	0,0	7,3	3,4	0,60
	P6	0,9	0,5	1,0	0,6	3,9	0,1	5,1	0,27
	P7	0,4	1,2	1,3	0,9	0,0	2,9	0,2	0,27

Tabla 37: Error absoluto algoritmo  $\alpha = 3$  frente a OCR y porcentaje de detección

		Destino							% detección frente OCR
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
Origen	P1	0,1	0,7	0,8	0,6	0,2	0,6	0,2	0,22
	P2	1,6	0,0	3,6	1,1	0,2	0,3	0,5	0,26
	P3	0,1	8,1	0,0	5,8	0,3	0,9	1,2	0,16
	P4	2,6	2,6	10,0	0,1	5,4	2,7	2,0	0,28
	P5	0,7	0,0	2,8	8,7	0,0	9,7	3,6	0,63
	P6	1,0	0,9	1,4	0,9	3,9	0,1	6,0	0,27
	P7	0,4	1,2	1,5	1,0	0,0	3,1	0,2	0,27

Tabla 38: Error absoluto algoritmo  $\alpha = 5$  frente a OCR y porcentaje de detección

		Destino							% detección frente OCR
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
Origen	P1	0,1	0,3	1,3	0,2	0,0	0,5	0,9	0,22
	P2	1,3	0,0	2,7	1,0	0,0	0,2	0,1	0,25
	P3	0,1	6,6	0,0	5,9	0,0	0,4	0,2	0,15
	P4	0,3	0,9	6,4	0,1	2,8	0,2	4,7	0,24
	P5	0,2	0,0	0,7	8,4	0,0	3,4	4,0	0,55
	P6	1,3	0,3	0,6	0,1	4,1	0,1	3,7	0,26
	P7	1,8	0,6	0,1	0,6	0,0	0,7	0,2	0,26

Tabla 39: Error absoluto algoritmo  $\beta = 0,02$  frente a OCR y porcentaje de detección

		Destino							% detección frente OCR
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
Origen	P1	0,1	0,2	1,3	0,1	0,0	0,5	0,7	0,22
	P2	1,4	0,0	2,8	1,0	0,0	0,2	0,2	0,25
	P3	0,1	6,7	0,0	6,0	0,0	0,4	0,3	0,15
	P4	0,3	1,2	8,7	0,1	5,6	0,0	4,1	0,26
	P5	0,1	0,0	0,7	9,4	0,0	4,7	4,1	0,58
	P6	1,2	0,5	0,9	0,2	4,1	0,1	4,4	0,26
	P7	0,9	0,7	0,1	1,0	0,0	0,8	0,2	0,26

Tabla 40: Error absoluto algoritmo  $\beta = 0,1$  frente a OCR y porcentaje de detección

		Destino							% detección frente OCR
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
Origen	P1	0,1	1,6	0,4	1,1	0,7	0,3	0,0	0,21
	P2	0,8	0,0	4,1	1,3	0,3	1,0	0,8	0,25
	P3	0,4	8,0	0,0	4,9	0,7	1,5	1,4	0,17
	P4	3,9	1,4	11,0	0,1	6,1	4,7	5,0	0,27
	P5	2,8	0,0	4,9	8,2	0,0	18,9	0,2	0,63
	P6	0,6	2,3	3,8	1,5	3,4	0,1	10,3	0,25
	P7	0,3	2,5	2,4	0,8	0,8	5,1	0,2	0,25

Tabla 41: Error absoluto algoritmo  $\sigma$  frente a OCR y porcentaje de detección

		Destino							% detección frente OCR
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
Origen	P1	0,1	22,1	27,2	0,4	0,2	3,8	1,9	0,19
	P2	1,8	0,4	3,4	1,0	0,1	0,5	0,3	0,21
	P3	14,5	20,2	0,0	3,9	0,2	1,0	0,6	0,15
	P4	1,6	3,0	7,5	0,2	1,1	1,5	0,4	0,19
	P5	0,1	0,2	1,3	5,4	0,0	1,7	5,3	0,31
	P6	1,4	1,9	2,8	0,0	2,2	0,1	5,4	0,20
	P7	2,4	1,8	1,9	1,9	0,1	4,2	0,1	0,20

Tabla 42: Error absoluto algoritmo Canon Lozano frente a OCR y porcentaje de detección

Algoritmo	Máximo	MAE
$\alpha = 3$	9,98	1,83
$\alpha = 5$	9,95	2,03
$\beta = 0,02$	8,40	1,39
$\beta = 0,1$	9,44	1,56
$\sigma$	18,92	2,67
Canon-lozano	27,23	3,25

Tabla 43: Resumen del error absoluto máximo y MAE

La Tabla 53 muestra como los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$  son los que mejor reproducen la matriz O/D obtenida por el OCR frente al algoritmo  $\sigma$ . También hay que destacar que en los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$  el error absoluto máximo es inferior a 10 puntos, siendo el MAE pequeño, entre 1,39 y 2,03 puntos. El algoritmo  $\beta$  con el parámetro de configuración de 0,02 es el que mejor resultado ofrece con un error absoluto máximo de 8,4 puntos y un MAE de 1,39 puntos del porcentaje. El algoritmo de Canon Lozano, tal y como se concluyó en el apartado 8.1.3: "Resultado de la

*evaluación de los algoritmos existentes*”, es el que peores resultados ofrece, con un error máximo de 27,23 puntos y un MAE de 3,25 puntos del porcentaje.

Los resultados que se han obtenido del estudio del porcentaje de detección de cada sensor BT respecto al OCR han ofrecido dos valores anómalos. La mayoría de los sensores tienen un porcentaje de detección entre el 22 y el 27%, sin embargo el sensor situado en el punto 3 tiene un porcentaje de detección del 15% y el situado en el punto 5 de más de un 50%. El primer resultado podría explicarse por una instalación incorrecta, en la que el campo de detección del sensor BT haya sido demasiado reducido, tal y como ha ocurrido en la prueba piloto descrita en el apartado 9.2. El segundo se podría explicar por fallos en la detección en el OCR del punto 5. Además, si se observan los errores absolutos asociados a estos puntos en la matriz O/D, son lo que presentan los valores máximos, como puede observarse de la Tabla 47 a la Tabla 51. Sin tener en cuenta estos puntos el error máximo que se obtiene para el algoritmo  $\beta$  con el parámetro de configuración de 0,02 es inferior a 4,8 puntos del porcentaje.

#### 9.1.4 Conclusiones

La prueba piloto realizada en la autovía ha sido muy importante, ya que se ha contado con los datos proporcionados por una instalación de procesamiento de imágenes con OCR que es ampliamente aceptada. Por lo tanto hemos tenido la posibilidad de contar con unos datos de referencia con los que comparar los resultados que hemos obtenidos mediante los procedimientos y algoritmos definidos en la tesis. Sin embargo, sería necesario disponer de más días completos de información del OCR para realizar un análisis comparativo más exhaustivo.

Los resultados que se han obtenido han confirmado las conclusiones que se obtuvieron en el apartado 8.3: *“Comparación de los algoritmos de cálculo de la matriz O/D”*. Los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$  proporcionan una matriz O/D más ajustada que los algoritmos presentes en la bibliografía. En este caso se ha demostrado que el algoritmo  $\beta$  ha obtenido mejores resultados que el algoritmo  $\alpha$ . El error absoluto máximo que se ha obtenido para un par de la matriz ha sido de 8,4 puntos del porcentaje y el MAE de 1,4 puntos del porcentaje.

Los resultados también han demostrado que analizando los porcentajes de detección de los sensores se pueden determinar fallos en los resultados de la matriz O/D. Por ejemplo, en el emplazamiento 3, el porcentaje de detección del sensor BT ha sido bajo, lo que ha repercutido en errores absolutos mayores que en el resto de pares. También se ha detectado un fallo en la detección del sensor OCR en el emplazamiento 5, este problema ha motivado que se hayan registrado porcentajes de detección en los sensores BT muy altos, superiores al 55%, lo que ha generado errores absolutos altos en los pares de la matriz O/D asociados a ese sensor.

## **9.2 Estudio direccional rotonda polígono de la Andana en Paterna**

El objetivo de esta prueba piloto ha sido realizar un estudio direccional en un entorno interurbano y probar la validez de los algoritmos propuestos y del sistema desarrollado para determinar la matriz O/D de una rotonda de acceso a un polígono industrial.

Esta prueba piloto surge como resultado de la colaboración entre la Direcció General d'Obres Públiques, Transports i Mobilitat de la Conselleria d'Habitatge, Obres Públiques i Vertebració del Territori de la Generalitat Valenciana y el laboratorio LISITT de la Universitat de València.

### **9.2.1 Definición de la prueba**

El estudio se realizó en la rotonda del polígono l'Andana en el cruce entre la Avenida de la Industria y la ronda de la Química de Paterna. Esta rotonda regula el tráfico que entra y sale del polígono en dirección a la CV-35 y el tráfico entre el Plantío y Mas Camarena – CV-35 – Parque Tecnológico. También existe un ramal de la rotonda que conecta con un centro comercial existente a 1,8 Km de la rotonda, siendo este tráfico más residual ya que no es el camino de acceso principal al mismo.

En la Imagen 156 se muestra el plano de la localización de los sensores en los ramales de la rotonda. Los ramales se han numerado siguiendo la dirección del tráfico, iniciando la numeración en el ramal que está en el polígono de la Andana.



*Imagen 147: Mapa situación sensores prueba direccional rotonda Andana*

Los sensores 1 y 4 fueron instalados en un báculo de farola, ver Imagen 157, el sensor 2 se instaló sobre el poste de un panel direccional de señalización, ver Imagen 158, y el sensor 3 se instaló sobre un poste de madera de telefonía. Los sensores eran autónomos y se alimentaban con batería. Cada sensor disponía de dos baterías de Litio en paralelo de 10.200mAh con salida de 5V y 2,1A. La duración del equipo con estas baterías es de aproximadamente 18 horas. No se dispuso de ningún medio de comunicación con los sensores, por lo que el tratamiento de los datos se realizó *off-line*.



*Imagen 148: Instalación sensor 1 rotonda Andana*



*Imagen 149: Instalación sensor 2 rotonda Andana*

Con objeto de poder evaluar los resultados obtenidos con los sensores BT se instalaron aforadores con gomas, ver Imagen 159, para obtener la intensidad de tráfico durante el estudio y se realizaron contajes manuales direccionales de los tránsitos en la rotonda. Esta información fue recogida y procesada por el personal de la Conselleria.



*Imagen 150: Instalación aforadores con goXXX rotonda Andana*

La duración del estudio fue de 13 horas, la prueba comenzó el día 8 de julio de 2015 a las 11 horas y finalizó a las 0 horas del 9 de julio de 2015. La duración del estudio estuvo condicionada a la duración de las baterías de los sensores BT.

El procedimiento seguido en esta prueba piloto ha sido el siguiente:

- Replanteo para fijar la localización de los sensores, en este caso se decidió la localización de los sensores teniendo en cuenta que el lóbulo trasero de la antena no llegase a la rotonda y que no hubiesen obstáculos entre el sensor y los vehículos.
- Instalación y configuración de los equipos.
- 
- 
- Retirada de los equipos y recogida de los datos de los sensores.
- Filtrado de los
- Creación de los tránsitos entre sensores.
- Creación de la matriz O/D.

- Presentación de los resultados y conclusiones.

## 9.2.2 Esquema de implantación del XXX en la rotonda

En la Imagen 160 se representa el esquema de implantación del XXX en la rotonda Oeste del polígono de l'Andana. En este esquema se ha tenido en cuenta la posible implantación de forma definitiva de este sistema y su integración en el Centro de Gestión de la Generalitat situado en el Pk 8,5 de la CV-35.

### *Imagen 151: Esquema implantación XXX en rotonda l'Andana*

La prueba de la rotonda Oeste de l'Andana se ha realizado *off-line*, sin conexión ni integración con el sistema de gestión de tráfico de la Generalitat Valenciana. La explotación se ha realizado en el LISITT una vez se desinstalaron los sensores BT.

Para realizar el cálculo de la matriz se ha implementado el algoritmo  $\beta$ , debido a que la clasificación que realizan los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$  son muy similares, tal y como se ha concluido de la comparativa realizada en el apartado 8.3, y a que en condiciones normales de circulación es más eficiente y ofrece mejores resultados.

### 9.2.3 Resultados de la prueba

#### Porcentaje de detección

En la Tabla 54 se muestran los valores registrados por los equipos de aforos mediante gomas.

H Ini	H Fin	P1		P2		P3		P4	
		Asc	Desc	Asc	Desc	Asc	Desc	Asc	Desc
10:00	11:00								
11:00	12:00								
12:00	13:00	214	159	171	289	69	81	201	148
13:00	14:00	255	146	226	343	61	66	207	228
14:00	15:00	313	138	253	309	43	72	170	263
15:00	16:00	226	161	220	281	73	61	279	-
16:00	17:00	202	122	186	312	34	52	277	-
17:00	18:00	193	147	184	284	48	38	217	-
18:00	19:00	236	197	229	299	51	40	228	-
19:00	20:00	271	163	204	314	52	83	197	-
20:00	21:00	221	126	160	258	53	70	-	-
21:00	22:00	184	109	149	203	34	45	-	-
22:00	23:00	133	34	66	114	14	33	-	-
23:00	0:00	57	25	40	74	11	13	-	-
Totales		2.505	1.527	2.088	3.080	543	654	1.776	639

*Tabla 44: Resultados aforos rotonda Andana*

El aforador situado en el punto 4 se soltó de su sujeción y dejó de tomar medidas, en el sentido descendente a partir de las 15 horas y en el sentido ascendente a partir de las 20 horas.

El número de tránsitos obtenidos mediante los sensores BT se muestra en la Tabla 55.

H Ini	H Fin	P1		P2		P3		P4	
		Asc	Desc	Asc	Desc	Asc	Desc	Asc	Desc
10:00	11:00								
11:00	12:00								
12:00	13:00	57	50	55	95	26	20	44	17
13:00	14:00	82	41	62	106	14	17	40	34
14:00	15:00	81	38	61	77	8	20	27	42
15:00	16:00	70	43	51	84	19	16	39	-
16:00	17:00	57	35	45	75	11	11	32	-
17:00	18:00	52	28	32	72	13	6	37	-
18:00	19:00	63	48	49	77	13	9	36	-
19:00	20:00	77	35	41	69	14	24	20	-
20:00	21:00	46	18	30	50	13	18	-	-
21:00	22:00	46	28	27	48	10	12	-	-
22:00	23:00	27	7	20	15	0	5	-	-
23:00	0:00	12	8	9	19	5	3	-	-
Totales		670	379	482	787	146	161	275	93

Tabla 45: Resultados tránsitos con sensores BT rotonda Andana

Los porcentajes de detección de los sensores BT respecto al aforador de goXXX se muestra en la Tabla 56. La comparación se realiza sobre tránsitos válidos.

H Ini	H Fin	P1		P2		P3		P4	
		Asc (%)	Desc (%)						
10:00	11:00								
11:00	12:00								
12:00	13:00	27	31	32	33	38	25	22	11
13:00	14:00	32	28	27	31	23	26	19	15
14:00	15:00	26	28	24	25	19	28	16	16
15:00	16:00	31	27	23	30	26	26	14	-
16:00	17:00	28	29	24	24	32	21	12	-
17:00	18:00	27	19	17	25	27	16	17	-
18:00	19:00	27	24	21	26	25	23	16	-
19:00	20:00	28	21	20	22	27	29	10	-
20:00	21:00	21	14	19	19	25	26	-	-
21:00	22:00	25	26	18	24	29	27	-	-
22:00	23:00	20	21	30	13	0	15	-	-
23:00	0:00	21	32	23	26	45	23	-	-
Medias		27	25	23	26	27	25	15	15

Tabla 46: Porcentajes detección sensor BT frente aforador en rotonda Andana

Como se puede ver en la Tabla 56, los porcentajes de detección para los sensores 1, 2 y 3 son similares, entre el 23% y el 27%. El sensor 4 presenta un porcentaje de detección bastante inferior, del 15%. Este sensor ha realizado menos detecciones que el resto de los sensores

Los resultados de la tasa de fallos y aciertos en las pruebas realizadas con dispositivos conocidos se muestran en la Tabla 57. Los datos se han calculado sobre un total de 108 tránsitos controlados. Hay que destacar que el sensor SB4 ha tenido una tasa de fallo en la detección de dispositivos conocidos de un 42,8%. El resto de sensores ha sido inferior al 4% en el sensor SBT 1 y de 0% en los sensores SBT 2 y 3. Tal y como ya se ha comentado anteriormente, la tasa de fallo tan alta del sensor SBT4 se asocia a la localización donde se ha realizado la instalación.

sensor	1		2		3		4	
	aciertos	fallos	aciertos	fallos	aciertos	fallos	aciertos	fallos
%	96,43	3,57	100,00	0,00	100,00	0,00	57,14	42,86

*Tabla 47: Tasa de fallos y aciertos con dispositivos conocidos*

### Matriz O/D

El personal de Conselleria realizó una toma de datos de contraste entre las 11:45 horas y las 14:00 del día de la instalación. En la Tabla 58 y en la Tabla 59 se muestra la matriz O/D que se ha obtenido de este periodo de integración en valor numérico y en porcentaje.

Matriz Origen-Destino del Contraste					
Totales de 11:45 a 14:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	14	306	99	125
	P2	137	3	45	283
	P3	68	63	1	12
	P4	127	320	13	11

*Tabla 48: Matriz O/D contraste rotonda Andana*

Matriz Origen-Destino del Contraste en porcentaje					
Totales de 11:45 a 14:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	2,6	56,3	18,2	23,0
	P2	29,3	0,6	9,6	60,5
	P3	47,2	43,8	0,7	8,3
	P4	27,0	67,9	2,8	2,3

Tabla 49: Matriz O/D contraste rotonda Andana (%)

La matriz O/D obtenida a partir de los sensores BT instalados en la prueba piloto, en la misma franja horaria que la medición de contraste, se muestra en la Tabla 60 en valor numérico y en la Tabla 61 en porcentaje.

Matriz Origen-Destino sensor BT					
Totales de 11:45 a 14:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	5	114	20	14
	P2	60	16	16	39
	P3	13	24	0	4
	P4	22	64	4	0

Tabla 50: Matriz O/D sensor BT rotonda Andana

Matriz Origen-Destino sensor BT en porcentaje					
Totales de 11:45 a 14:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	3,3	74,5	13,1	9,2
	P2	45,8	12,2	12,2	29,8
	P3	31,7	58,5	0,0	9,8
	P4	24,4	71,1	4,4	0,0

Tabla 51: Matriz O/D sensor BT rotonda Andana (%)

En la Tabla 62 se muestra el error absoluto de cada par de la matriz. El error máximo que se ha obtenido es de 30,7 puntos que corresponde con el par P2/P4, siendo el MAE de la matriz O/D de 8,8 puntos.

Error Matriz Origen-Destino sensor BT					
Totales de 11:45 a 14:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	0,7	18,3	5,1	13,8
	P2	16,5	11,6	2,6	30,7
	P3	15,5	14,8	0,7	1,4
	P4	2,5	3,2	1,7	2,3

*Tabla 52: Error absoluto matriz O/D rotonda Andana*

## 9.2.4 Conclusiones Preliminares

Respecto a los resultados obtenidos en esta prueba se ha observado que el sensor SBT 4 ha realizado una detección inferior al resto de sensores, un 15% frente al 25% de media del resto.

Otro problema que ha surgido ha sido a la hora de determinar los cambios de sentido, principalmente en los sensores SBT 1 y SBT 2, ya que en la zona de radiación de las antenas de estos dos sensores se encontraba, en el primer caso el polígono industrial l'Andana, y en el segundo la CV35 y parte del parque tecnológico. Esto ha supuesto que algunos tránsitos que no habían llegado a la rotonda se hayan considerado como cambios de sentido.

Los resultados obtenidos han permitido identificar una serie de condiciones que deberán cumplirse en los estudios direccionales:

La prueba ha permitido obtener la matriz O/D con un MAE inferior a 9 puntos, siendo el error máximo detectado para un par de la matriz de 30,7 puntos. Por lo tanto, se espera que el error que se cometa en nuevas instalaciones, donde se corrijan estas deficiencias, sea inferior.

### 9.2.5 Comprobación de las hipótesis de mejora

A la vista de los resultados obtenidos, se decidió repetir la prueba piloto en la misma rotonda, corrigiendo aquellos aspectos que se habían detectado que podían haber influido negativamente en los resultados

. La duración de la prueba fue de dos horas y media, comenzando a las 8:30 h y finalizando a las 11:00h.

En la Imagen 161 se muestra la localización final de los sensores.

*Imagen 152: Nueva localización sensores en rotonda Andana*

#### **Matriz O/D**

En la Tabla 63 y en la Tabla 64 se muestra la matriz O/D que se ha obtenido de este periodo de integración en valor numérico y en porcentaje. Las medidas se han realizado con mediciones manuales de los tránsitos entre los ramales de la matriz O/D por investigadores del LISITT.

Matriz Origen-Destino del Contraste					
Totales de 08:30 a 11:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	27	301	86	115
	P2	186	3	49	271
	P3	187	102	6	13
	P4	308	612	14	5

Tabla 53: Matriz O/D contraste rotonda Andana con 5 sensores

Matriz Origen-Destino del Contraste en porcentaje					
Totales de 08:30 a 11:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	5,1	56,9	16,3	21,7
	P2	36,5	0,6	9,6	53,2
	P3	60,7	33,1	1,9	4,2
	P4	32,8	65,2	1,5	0,5

Tabla 54: Matriz O/D contraste rotonda Andana con 5 sensores (%)

La matriz O/D obtenida a partir de los sensores BT instalados en la prueba piloto con 5 sensores, en la misma franja horaria que la medición de contraste, se muestra en la Tabla 65 el valor numérico y en la Tabla 66 el porcentaje.

Matriz Origen-Destino sensor BT					
Totales de 08:30 a 11:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	10	111	17	32
	P2	49	0	18	85
	P3	53	28	2	3
	P4	58	168	6	2

Tabla 55: Matriz O/D sensor BT rotonda Andana con 5 sensores

Matriz Origen-Destino sensor BT en porcentaje					
Totales de 08:30 a 11:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	5,9	65,3	10,0	18,8
	P2	32,2	0,0	11,8	55,9
	P3	61,6	32,6	2,3	3,5
	P4	24,8	71,8	2,6	0,9

Tabla 56: Matriz O/D sensor BT rotonda Andana con 5 sensores (%)

En la Tabla 67 se muestra el error absoluto de cada par de la matriz. El error máximo que se ha obtenido para un par O/D es de 8,4 puntos, frente a los 30,7 puntos, y el MAE ha sido de 2,9 puntos frente a los 8,8 puntos de la prueba anterior.

Error Absoluto Matriz Origen-Destino sensor BT					
Totales de 08:30 a 11:00					
		Destino			
		P1	P2	P3	P4
Origen	P1	0,8	8,4	6,3	2,9
	P2	4,3	0,6	2,2	2,7
	P3	0,9	0,6	0,4	0,7
	P4	8,0	6,6	1,1	0,3

Tabla 57: Error absoluto matriz O/D rotonda Andana con 5 sensores

La tasa de aciertos en esta prueba, sobre 100 tránsitos de dispositivos conocidos ha sido del 100% para los 4 sensores situados en los ramales, y del 77,8% del sensor situado

## 9.2.6 Conclusiones

Las correcciones que se han realizado

han permitido mejorar sustancialmente los resultados, tal y como se preveía de la evaluación de los datos obtenidos en la prueba inicial. El error absoluto máximo ha

sido de 8,4 puntos, se ha reducido en más de 22 puntos el obtenido en la prueba anterior, y el MAE ha sido de 2,9 puntos.

### **9.3 Análisis del uso del Centro Histórico de Valencia**

En objetivo de esta prueba piloto ha sido evaluar la validez de los algoritmos propuestos y del sistema desarrollado en un entorno urbano aplicado a la determinación de la proporción de vehículos a motor que utilizan el centro histórico de Valencia para realizar su itinerario por la ciudad de Valencia.

El resultado del estudio debía ofrecer el porcentaje de vehículos a motor que usan ciertos recorridos por el centro histórico de Valencia, en lugar de usar las rondas, para acortar sus desplazamientos por la ciudad.

Esta prueba piloto surge como resultado de la colaboración entre el servei de Circulació, Transports i Infraestructures del Ajuntament de València y el laboratorio LISITT de la Universitat de València.

#### **9.3.1 Definición de la prueba**

Como primer paso de la prueba se definieron los recorridos objeto del estudio:

- Recorrido 1 - 3: Calle la Paz – Comedias con calle San Vicente – Maria Cristina, distancia 500m.
- Recorrido 3 - 4: Calle San Vicente – Maria Cristina con Torres de Quart, distancia 800m.
- Recorrido 2 - 3: Calle Conde Trénor con calle San Vicente – Maria Cristina, distancia 1.000m.
- Recorrido 2 - 4: Calle Conde Trénor con Torres de Quart, distancia 1.100m.

Estos recorridos permitieron definir la localización de los sensores. A continuación se describen y justifican las 5 ubicaciones seleccionadas:

- Emplazamiento 1: Calle Paz – Comedias, sensor de entrada, permite detectar los vehículos que entran al centro histórico.
- Emplazamiento 2: Calle Conde Trénor, sensor de entrada, permite detectar los vehículos que entran al centro histórico.
- Emplazamiento 3: Calle San Vicente entre Plaza de la Reina y Plaza del Ayuntamiento, sensor de salida, permite detectar los vehículos que salen del centro histórico.
- Emplazamiento 4: Calle Quart-Murillo, sensor de salida, permite detectar los vehículos que salen del centro histórico.
- Emplazamiento 5: Calle Guillem de Castro – Lepanto, sensor intermedio, su objetivo es detectar vehículos que han sido registrados en la entrada por la calle Conde de Trénor, pero que no han entrado a la zona centro, han seguido por la ronda interior. Estos vehículos han sido detectados por el lóbulo trasero de la antena situada en el emplazamiento 2.

El emplazamiento de los sensores se ha realizado en los puntos indicados en la Imagen 162, donde también se han dibujado los itinerarios estudiados.

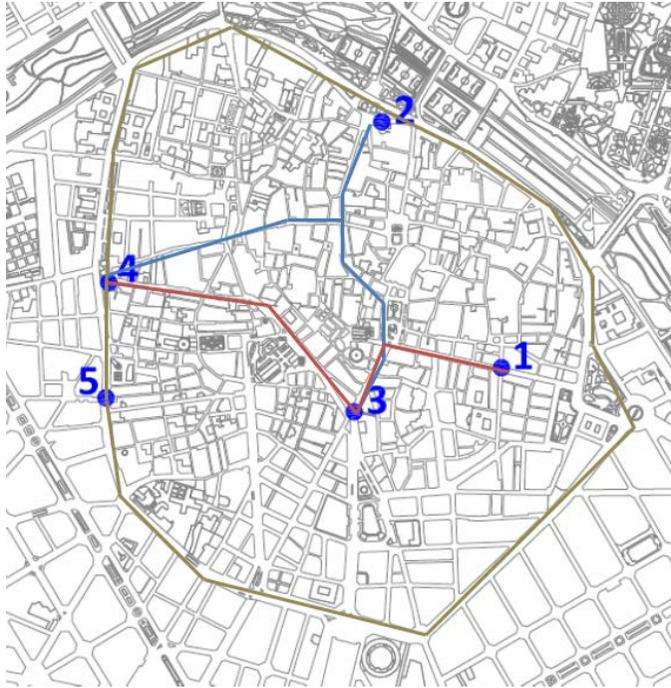


Imagen 153: Plano emplazamiento sensores e itinerarios

Los sensores fueron instalados en el báculo de los semáforos situados en cada emplazamiento y alimentados eléctricamente con una toma de 220V desde el regulador semafórico. No se dispuso de comunicación con los sensores, por lo que el tratamiento de los datos se realizó *off-line*.

La duración del estudio fue de 18 días, comenzando el jueves 28 de mayo de 2015 a las 0 horas y finalizando el domingo 14 de junio de 2015 a las 24 horas.

El procedimiento seguido en esta prueba piloto ha sido el siguiente:

Replanteo para fijar la localización de los sensores

- Instalación y configuración de los equipos.
-



El cálculo de los parámetros de movilidad se ha realizado utilizando los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$ , los resultados de la prueba se describen en detalle en el apartado siguiente.

### 9.3.3 Resultados de la prueba

#### **Clasificación de vehículos y peatones**

Uno de los principales retos de este estudio fue el diferenciar entre un dispositivo portado por un peatón y uno embarcado en un vehículo. Más aún por la localización del experimento, el centro histórico de Valencia, y por la distancia entre los sensores que definen el recorrido entre los sensores 1 y 3 de tan solo 500m. En las mediciones manuales que se realizaron para caracterizar estos dos tipos de transporte se registró una intensidad media horaria de 660 peatones y 616 vehículos, es decir, que el número de vehículos y peatones era muy similar. Con el objetivo de poder definir un procedimiento que permitiese distinguir entre un peatón y un vehículo a motor,

Con objeto de validar esta hipótesis también se analizaron los resultados obtenidos en la clasificación. Al analizar los ficheros de filtrado, se observó que habían direcciones MAC que habían sido registradas muchas veces en todo el periodo de estudio. Como ejemplo se muestran las siguientes:

MAC	Tipo Dispositivo	Tránsitos	Clasificado vehículo	Clasificado peatón	Porcentaje de error
00:21:3E:XX:XX:XX	TomTom	763	743	20	2,6
00:26:7E:XX:XX:XX	Parrot	752	736	16	2,1

*Tabla 58: Ejemplo clasificación vehículo – peatón*

Como se puede observar en la Tabla 69, estos dos equipos BT fueron clasificados erróneamente como peatones solo un 2,6% y un 2,1% respectivamente. Por lo tanto, analizados todos estos resultados se validó el criterio fijado para esta clasificación.

### **Porcentaje de detección**

Los porcentajes de detección que se han obtenido en el emplazamiento 1, Calle la Paz – Calle Comedias, se muestran en la Tabla 70. El estudio solo se ha realizado sobre este emplazamiento, ya que solo se dispuso información de aforos de ese punto y de los días que aparecen en la tabla.

Fecha	IMD espiras	Datos BT filtrados	Datos Rango Detección	% Detección filtrados	% Detección totales
28-may	16.282	2.089	6.920	12,83	42,50
29-may	16.885	2.104	6.838	12,46	40,50
30-may	13.606	1.680	5.255	12,35	38,62
31-may	9.861	1.187	4.011	12,04	40,68
01-jun	16.069	1.987	6.374	12,37	39,67
02-jun	15.495	1.929	6.414	12,45	41,39
03-jun	15.876	2.107	6.643	13,27	41,84
04-jun	17.222	2.105	7.077	12,22	41,09
05-jun	17.302	2.193	6.986	12,67	40,38
06-jun	13.496	1.642	5.372	12,17	39,80
07-jun	10.338	960	4.425	9,29	42,80
08-jun	15.021	1.907	6.439	12,70	42,87
Media				12,23	41,01
Desviación típica				0,99	1,33

*Tabla 59: Porcentaje de detección calle La Paz*

Como se puede observar en la Tabla 70 el porcentaje de detección de dispositivos BT en ese punto es del 41% y con una desviación típica muy pequeña, de tan solo 1,33. La comparación se realiza sobre dispositivos BT detectados y no sobre tránsitos válidos.

Los resultados de la tasa de fallos y aciertos en las pruebas realizadas con dispositivos conocidos se muestran en la Tabla 71. Los datos se han calculado sobre un total de 96 tránsitos controlados. La prueba se ha realizado sobre dos de los sensores presentes en el estudio. La tasa de aciertos del SBT 1 es del 87,5% y del sensor SBT2 es 100%.

sensor	1		3	
	aciertos	fallos	aciertos	fallos
%	87,50	12,50	100,00	0,00

*Tabla 60: Tasa de fallos y aciertos en prueba Valencia*

### Tiempos de viaje

En las gráficas del tiempo de viaje se representan los tránsitos detectados, en verde aparecen los tránsitos clasificados como válidos para calcular el tiempo de viaje, en rojo aquellos que se han filtrado por no corresponder con un vehículo o que han realizado el trayecto realizando alguna gestión. El algoritmo utilizado para el cálculo

de este variable ha sido el algoritmo  $\beta$ , descrito en el apartado 8.2. En el eje X se representa la escala de tiempos y en el eje Y el valor del tiempo de viaje en minutos.

En el anexo electrónico se presenta el conjunto de todas las gráficas obtenidas en todos los trayectos del estudio. Como ejemplo del tipo de información recopilada, se muestra a continuación un caso del análisis realizado para uno de los recorridos.

### Recorrido 1- 3 (Calle la Paz – Comedias con Calle San Vicente – Maria Cristina)

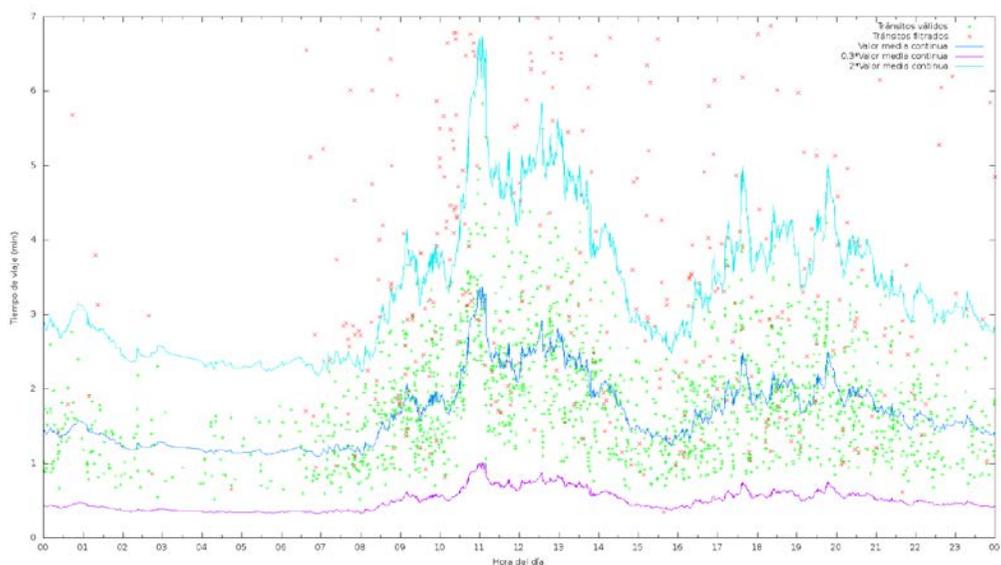
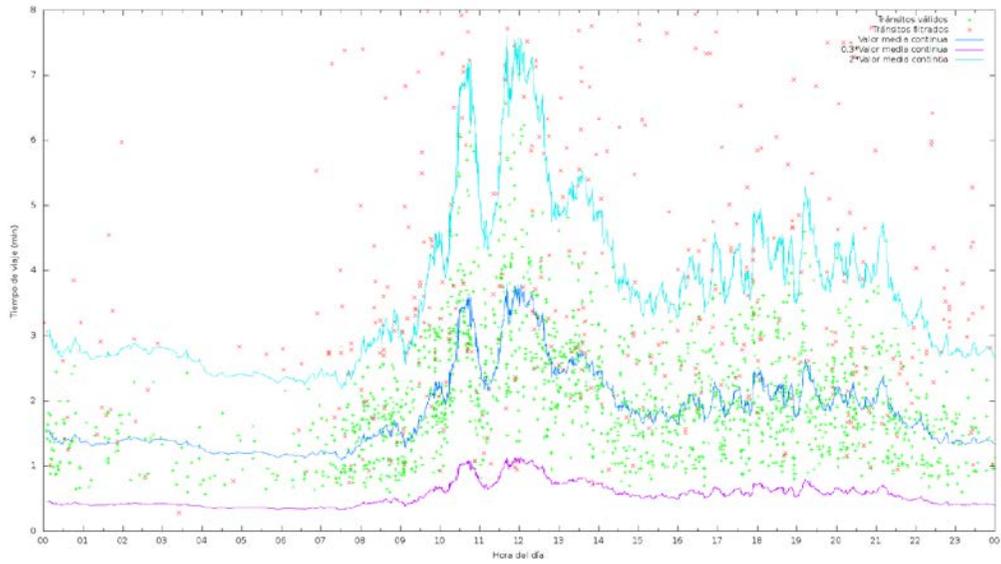
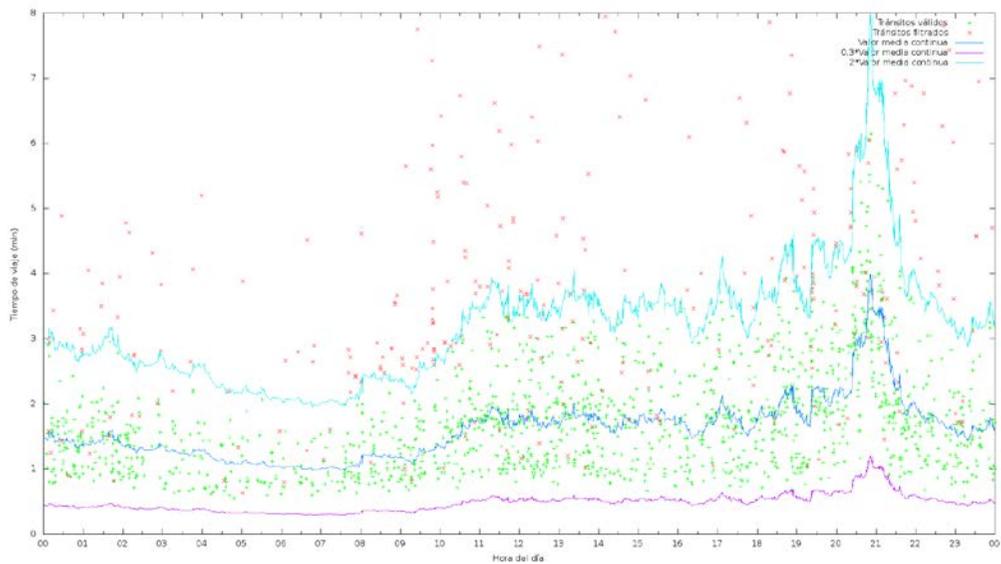


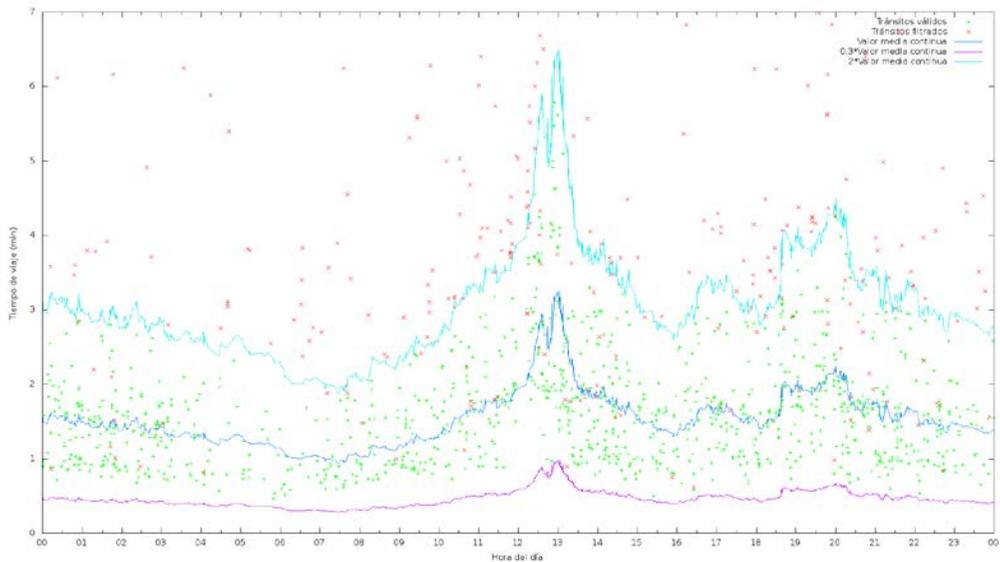
Imagen 155: Tiempos de viaje del jueves 28 de mayo de 2015 recorrido 1-3



*Imagen 156: Tiempos de viaje del jueves 4 de junio de 2015 recorrido 1-3*



*Imagen 157: Tiempos de viaje del sábado 30 de mayo de 2015 recorrido 1-3*



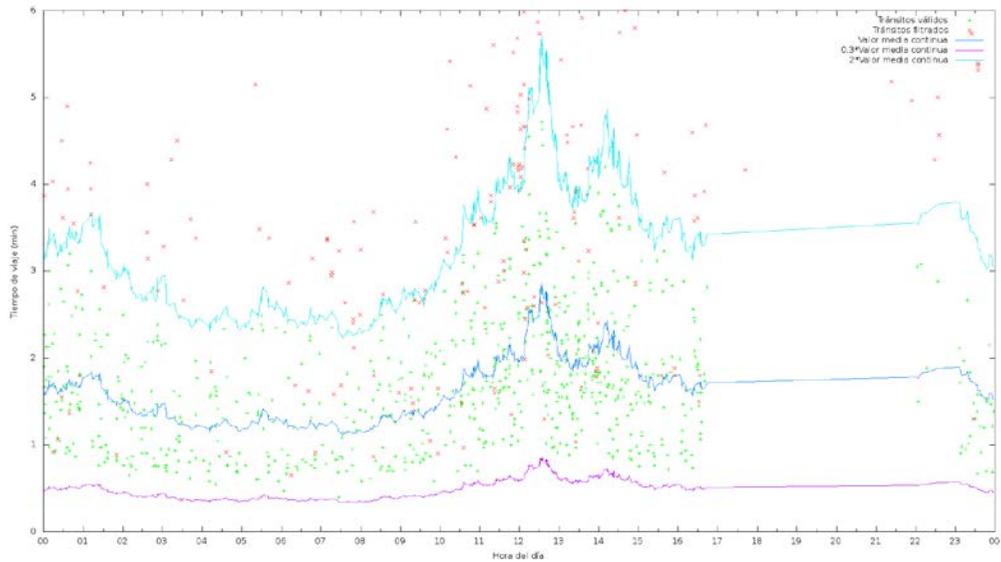
*Imagen 158: Tiempos de viaje del domingo 31 de mayo de 2015 recorrido 1-3*

Como se puede observar en la Imagen 164, Imagen 165, Imagen 166 e Imagen 167, el sistema ha sido capaz de reproducir los tiempos de viaje. En las gráficas se observa como en los días laborables aparecen dos horas punta, una más acusada a media mañana y otra más suave a media tarde. También se observa como a mediodía se produce una hora valle. Este comportamiento cambia en los fines de semana donde las horas punta se centran en la hora de cierre del comercio y a mediodía. Respecto al filtrado, se observa como la gran mayoría de los transitos que se han registrado alrededor del tiempo de viaje son filtrados como válidos. Los puntos que aparecen en rojo en la zona entre las curvas son debidos a que se han clasificado como peatón y por lo tanto se han filtrado.

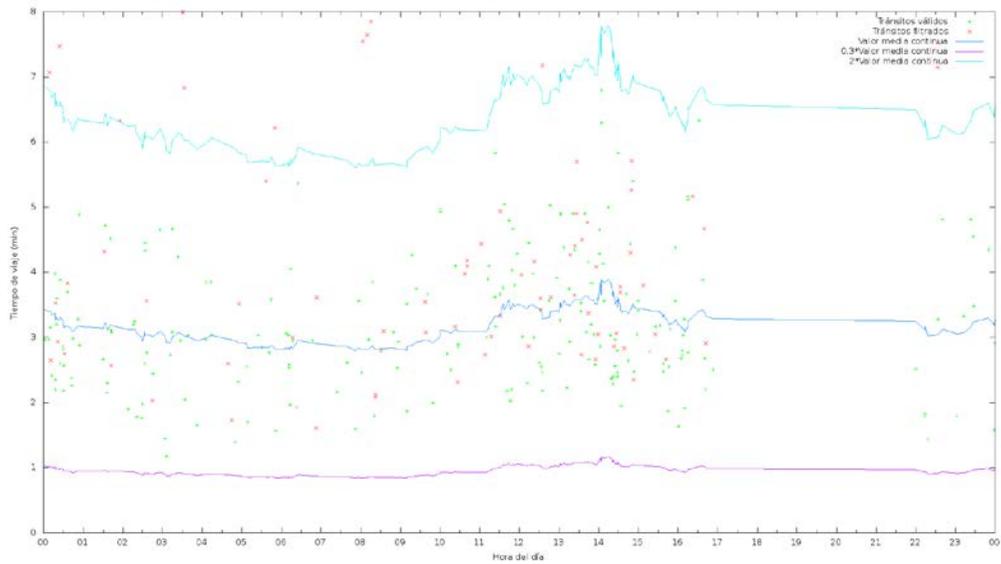
#### **Día 7 de junio, corte de tráfico zona centro**

El día 7 de junio se produjo una circunstancia particular con motivo de una fiesta local que supuso el corte del tráfico rodado en la zona centro. Esta situación se pudo observar directamente en los resultados proporcionados por el sistema. En la franja horaria en la que fue realizado el corte de tráfico, entre las 17:00h y las 22:00, el sistema funcionó correctamente, no reportando transitos durante ese periodo. Destacar que el sistema clasificó correctamente los transitos que se crearon una vez reestablecido el tráfico al acabar el evento.

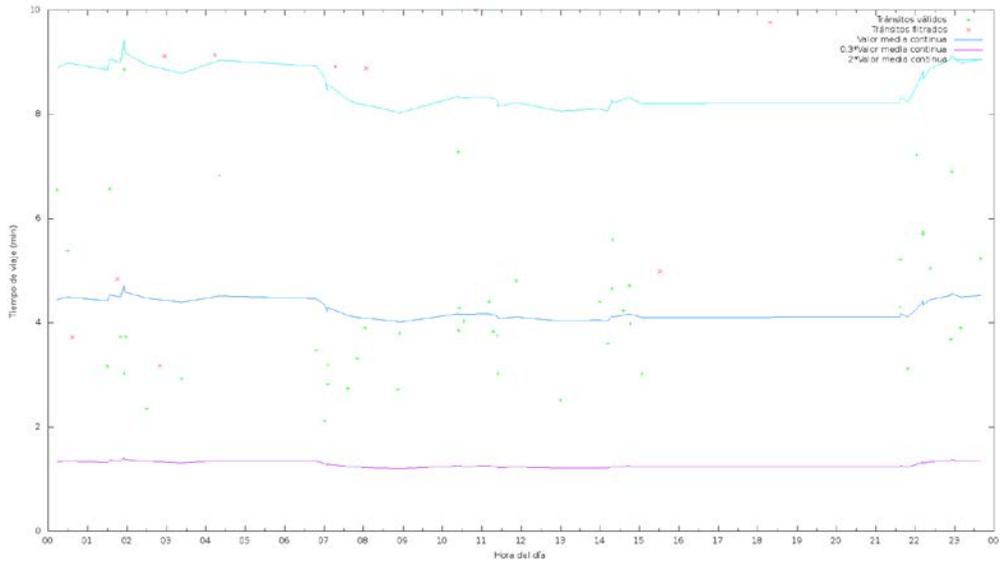
A continuación se muestran los resultados de los tiempos de viaje de ese día:



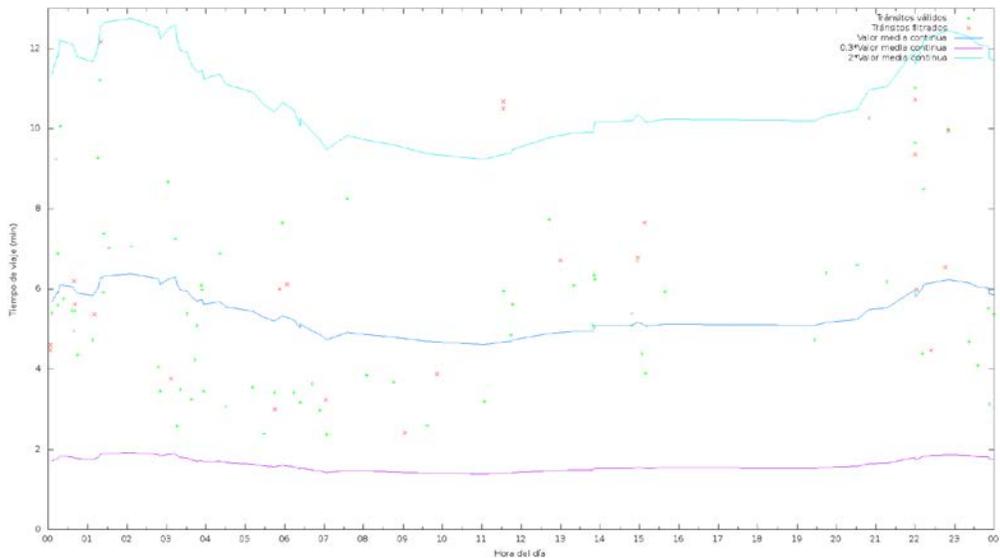
*Imagen 159: Corte tráfico domingo 7 de junio de 2015 recorrido 1-3*



*Imagen 160: Corte tráfico domingo 7 de junio de 2015 recorrido 3-4*



*Imagen 161: Corte tráfico domingo 7 de junio de 2015 recorrido 2-3*



*Imagen 162: Corte tráfico domingo 7 de junio de 2015 recorrido 2-4*

El corte de tráfico realizado en la zona centro el día 7 de junio se ha plasmado en las gráficas obtenidas al no haberse registrado ningún dispositivo embarcado en vehículos en ese periodo, tal y como se muestra en la Imagen 168, Imagen 169, Imagen 170 e Imagen 171. Además se ha comprobado que el filtro utilizado para clasificar los dispositivos BT embarcados en vehículos o portados por peatones funciona correctamente, ya que durante esa franja horaria el centro histórico de

Valencia registró un gran volumen de peatones que asistieron a los eventos que se realizaron.

### Porcentajes de distribución de los viajes

Para calcular el porcentaje de distribución de los viajes, se ha aplicado el algoritmo  $\alpha$  y el algoritmo  $\beta$  a los tránsitos que han sido clasificados como asociados a un vehículo a motor.

. El resultado que se ha obtenido se muestra en la Tabla 72.

Recorrido	Número Tránsitos	Algoritmo $\alpha$		Algoritmo $\beta$	
		Paso	No Paso	Paso	No Paso
1-3	43.713	69,7	30,3	68,5	31,5
2-4	12.076	26,2	73,8	24,5	75,5
2-3	8.413	30,1	69,9	27,8	72,2
3-4	11.733	56,6	43,4	54,9	45,1

*Tabla 61: Repartos de los tránsitos por el centro histórico*

La Tabla 72 muestra como el algoritmo  $\alpha$  y el algoritmo  $\beta$  realizan una clasificación de los tránsitos muy similar, siendo la diferencia máxima de 2,3 puntos. Este resultado es equivalente al que se ha obtenido en el estudio realizado en el apartado 8.3 en un entorno interurbano.

A continuación se han incorporado ejemplos de la clasificación de los tránsitos integrados en una hora para varios recorridos y días del estudio, como muestra de

los resultados obtenidos. El conjunto completo de los datos se ha incluido en el anexo digital de la tesis.

Como se puede observar en la Imagen 172, la distribución de los tránsitos del viernes 29 de mayo del recorrido 1-3 es muy similar durante las horas de mayor carga de tráfico, de 6 h de la mañana a 23 h de la noche. Este recorrido es utilizado principalmente por vehículos cuyo itinerario tiene origen y destino fuera del recorrido. En las horas de menor tráfico, entre las 2 h y las 5 h de la mañana, el uso del itinerario como paso por el centro llega hasta valores cercanos al 90%.

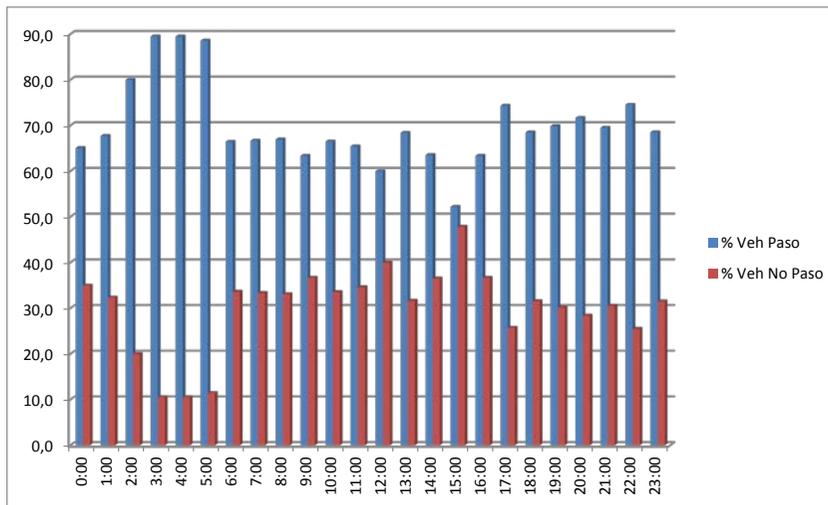


Imagen 163: Distribución horaria tránsitos viernes 29 mayo 2015 recorrido 1-3

La gráfica del tráfico del sábado 30 de mayo del recorrido 1-3, ver Imagen 173, muestra como de 8 h a 10 h de la mañana el reparto de tráfico está más equilibrado.

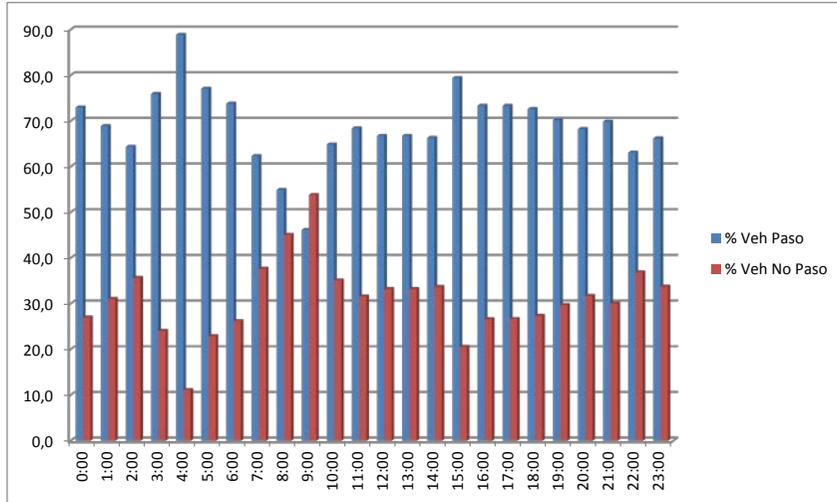


Imagen 164: Distribución horaria tránsitos sábado 30 mayo 2015 recorrido 1-3

En la Imagen 174, se muestra el reparto horario de los tránsitos del viernes 29 de mayo en el recorrido 2-3, se observa como el recorrido es usado mayoritariamente para uso residencial o de gestiones. Los valores que se obtienen entre las 2 h y las 5 h de la mañana no son significativos debido a que el número de detecciones es muy pequeño, inferior a 10 veh/h.

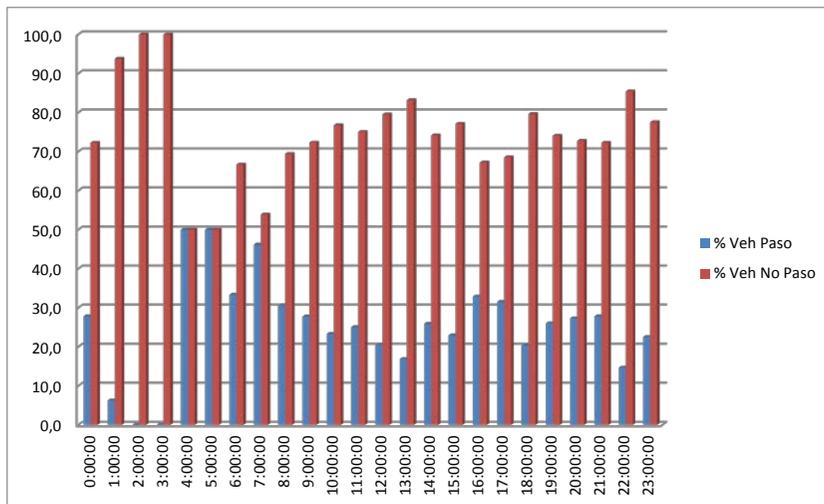
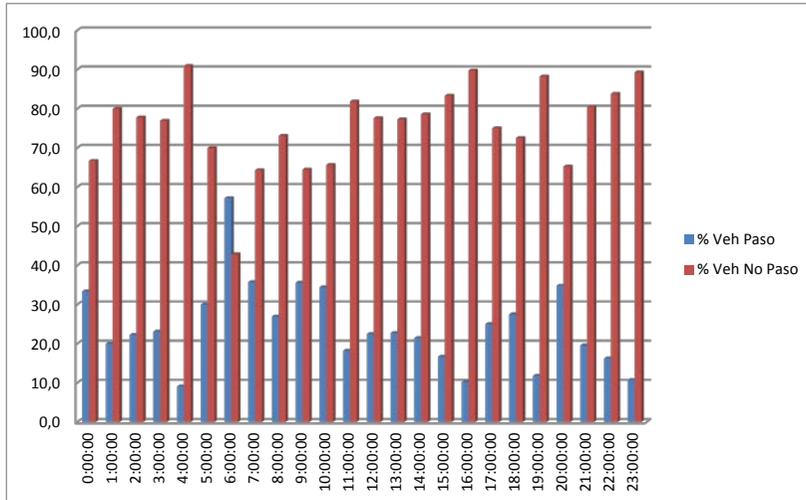


Imagen 165: Distribución horaria tránsitos viernes 29 mayo 2015 recorrido 2-3

El reparto de los tránsitos del sábado 30 de mayo, mostrado en la Imagen 175, demuestra como este recorrido es usado para acortar los itinerarios por el interior de la ciudad en un porcentaje superior al 30% en las primeras horas de la mañana y

a las 20 h. El pico que se observa a las 6 de la mañana está asociado con muy pocas detecciones. Sin embargo, entre las 0 h y las 3 h se han registrado tantas detecciones como en las primeras horas de la mañana.



*Imagen 166: Distribución horaria tránsitos sábado 30 mayo 2015 recorrido 2-3*

Como se puede observar en la Imagen 176, la distribución de los tráfcos del viernes 29 de mayo en el recorrido 2-4 es muy similar durante las horas de mayor carga de tráfico, de 8 h a 22 h. El recorrido es utilizado principalmente para la realización de gestiones o por tráfico residencial. Hay que destacar que existen muy pocas detecciones entre las 2 y las 6 de la mañana, tan solo un 10% de las que se detectan en horario diurno.

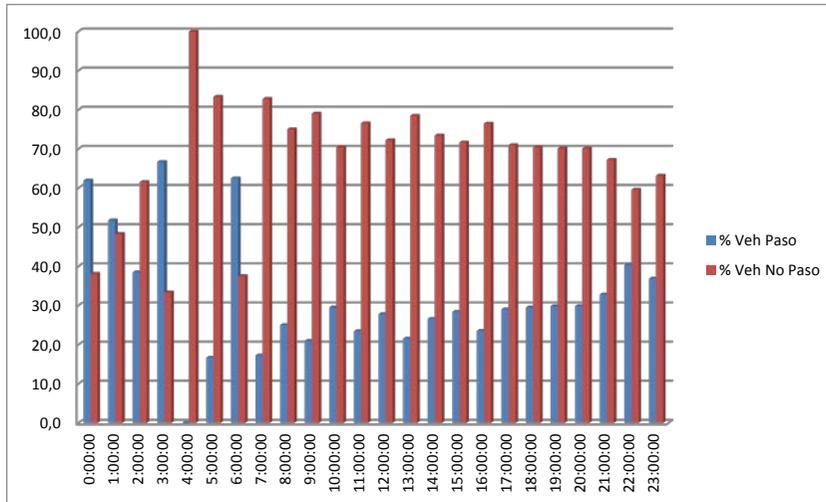


Imagen 167: Distribución horaria tránsitos viernes 29 mayo 2015 recorrido 2-4

El reparto del tráfico del sábado 30 y del domingo 31 de mayo, ver Imagen 177 e Imagen 178, muestra como existe un mayor equilibrio en los repartos durante las primeras horas del día, entre las 0h y 3h de la mañana se registran tantos tránsitos como durante las horas centrales del día, ya que la zona centro es un foco de atracción de tráfico como zona de ocio nocturno.

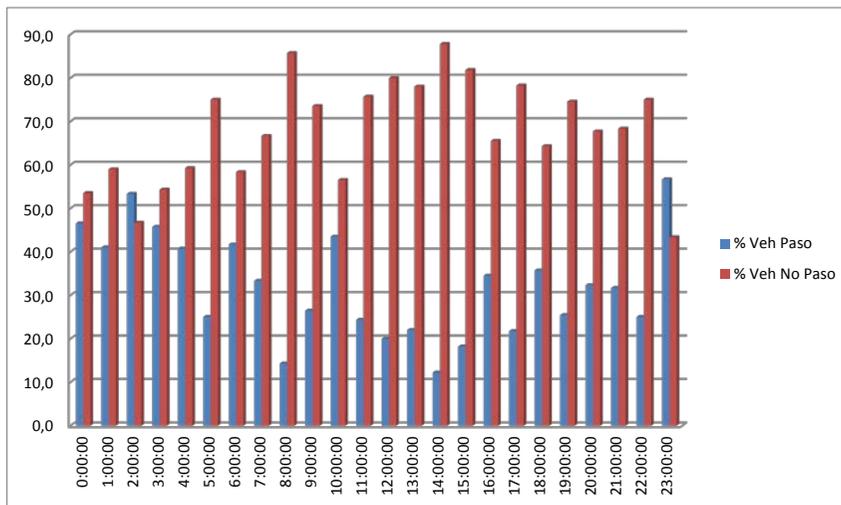


Imagen 168: Distribución horaria tránsitos sábado 30 mayo 2015 recorrido 2-4

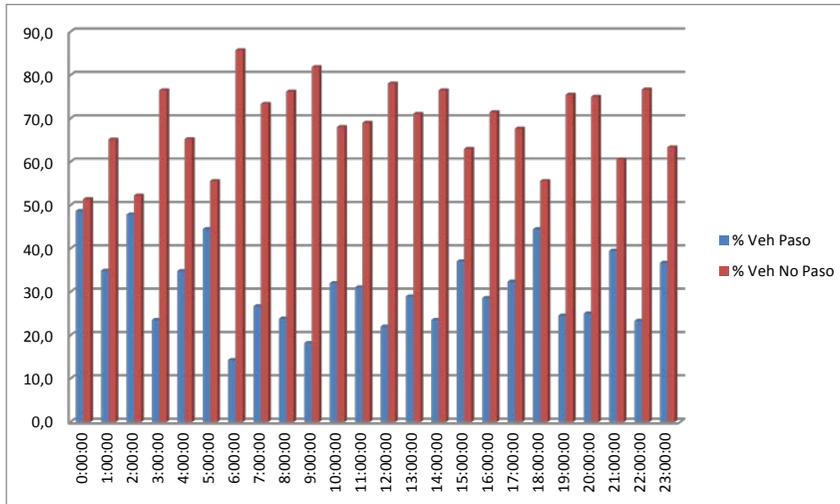


Imagen 169: Distribución horaria tránsitos domingo 31 mayo 2015 recorrido 2-4

Como se puede observar en la Imagen 179, la distribución de los tráfcos del viernes 29 de mayo en el recorrido 3-4 es equilibrada durante las horas de mayor carga de tráfico, de 7 h de la mañana a 23 h de la noche. En el periodo comprendido entre la 1 h y las 6 h de la mañana se han registrado muy pocos tránsitos.

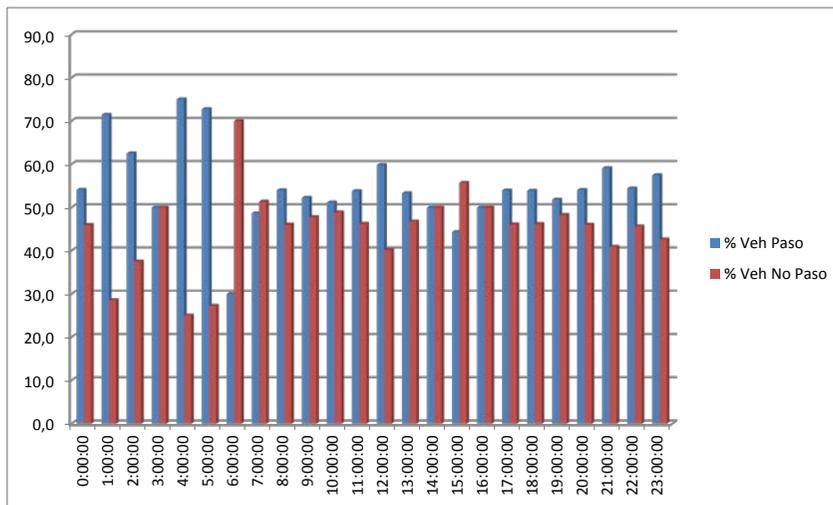


Imagen 170: Distribución horaria reparto tráfico viernes 29 mayo 2015 recorrido 3-4

### 9.3.4 Conclusiones

Hay que destacar la complejidad del estudio debido a la alta presencia de peatones dentro de las zonas de sensorización, mayor incluso que los vehículos a motor, la existencia de semáforos que detienen la circulación de los vehículos y la escasa distancia entre sensores, 500m en el recorrido 1-3. Estas condiciones producen que los tiempos de viaje entre peatones y vehículos estén muy próximos o se solapen. Por lo que cuando un vehículo realizaba alguna gestión en el centro, era imposible distinguir su tránsito del de un peatón solo usando el tiempo de viaje. Por esta razón se ha tenido que incluir un filtrado inicial para la clasificación de los tránsitos entre peatón y vehículo.

Los resultados obtenidos han permitido comprobar que la hipótesis realizada para la clasificación de los tránsitos creados en función de si son asociados a un peatón o a un vehículo ha sido correcta.

También se ha podido comprobar que los resultados obtenidos mantienen un porcentaje de detección constante en todos los días del estudio, para el punto en el que se disponía de datos de aforos, con un valor medio de 41,01 y con una desviación típica de solo 1,33.

El sistema también ha permitido obtener la clasificación de los tránsitos de los vehículos a motor en función del uso que hacen del centro histórico de Valencia. Los resultados obtenidos han sido contrastados con el personal del Circulació, Transports i Infraestructures del Ajuntament de València, junto con los que se ha hecho el estudio, verificando que reproducen la situación real existente en estos itinerarios.

Otro aspecto que nos ha permitido comprobar este estudio ha sido que los algoritmo  $\alpha$  y  $\beta$  ofrecen resultados similares en un entorno urbano a la hora de realizar el cálculo del tiempo de viaje y la matriz O/D, reproduciéndose los resultados que se han obtenido en el experimento realizado en autovía.

También cabe destacar la sencillez de la instalación, ya que si bien se realizó usando una cesta, podría haberse instalado usando una escalera y sin necesidad

de afectar al tráfico. Además el sistema no requiere de ningún tipo de configuración durante la instalación del sensor BT, tan solo hay que orientarlo en la dirección del tráfico y conectarlo a la alimentación eléctrica.



## 10 Conclusiones Finales

---

En este capítulo final se recopilan las principales conclusiones que se han obtenido de los trabajos desarrollados en la presente tesis, describiendo las principales aportaciones y resultados obtenidos, las líneas de investigación y trabajos futuros que quedan abiertos tras la finalización de los objetivos marcado inicialmente.

### 10.1 Aportaciones

A continuación se describen las principales aportaciones que se derivan del trabajo desarrollado y que se corresponden con los objetivos que se marcaron al inicio de la presente tesis:

- 1. Se ha demostrado la validez del uso de detectores BT como fuente de información para el cálculo de parámetros de movilidad y se han determinado las condiciones bajo las cuales es aceptable utilizar los datos de estos sensores para el cálculo de matrices O/D dinámicas.*

El primer aspecto a destacar es que durante la revisión bibliográfica realizada se han encontrado pocos estudios que planteasen el uso de los datos de los sensores BT como base para calcular la matriz O/D dinámica. Las

investigaciones previas o bien mostraban dudas a la hora de utilizar estos datos como fuente de información, planteando la necesidad de hacer un estudio en profundidad para su justificación (Barceló et al., 2010), o bien aplicaban metodologías o algoritmos de expansión que no ofrecían resultados satisfactorios (Blogg et al, 2010), y que dejaban en duda la viabilidad de utilizar este tipo de sensores.

El estudio de la viabilidad del uso de los sensores BT se ha realizado mediante un modelo de simulación de la red metropolitana de Bilbao, lo que nos ha permitido crear una red de sensores BT virtuales con una gran variabilidad de valores de entrada y salida. El modelo ha sido creado con 41 entradas y 42 salidas, con entradas que registraban 41 veh/h hasta entradas con 2.236 veh/h, lo que ha permitido crear pares O/D de unos pocos vehículos hasta pares con 1.050 veh/h.

Como parte del trabajo realizado se ha modificado la herramienta SUMO para simular tanto los detectores BT, que podían ubicarse en cualquier punto de la red, como el porcentaje de vehículos detectados con dispositivos BT. En la simulación se han incluido un total de 83 sensores y se ha modificado el porcentaje de vehículos detectados desde un 5% hasta un 100% con incrementos del 5%. Sobre este entorno de simulación se ha podido evaluar cómo influye el porcentaje de detección del sensor en la precisión del resultado de la matriz O/D calculada, en comparación con la matriz O/D real obtenida con el 100 % de los vehículos.

Los resultados obtenidos han permitido fijar las condiciones que deben cumplir los datos de los sensores BT para que puedan considerarse válidos para la obtención de las matrices O/D dinámica. Se ha determinado que el umbral mínimo de vehículos en una entrada a la red por un punto sensorizado debe de ser de 1.000 vehículos para un porcentaje de detección del 20% y un error absoluto de 10 puntos.

El despliegue del sistema XXX propuesto permite extender la funcionalidad y la vida útil del actual sistema de gestión de tráfico. A modo de prueba se ha definido el modelo de despliegue del sistema XXX sobre la red de Bilbao, simulando la ubicación de los elementos del XXX sobre la situación real del equipamiento existente en la actualidad.

La solución planteada no sirve solamente para sensores BT, sería igualmente válida para soluciones con otro tipo de sensores inalámbricos como WIFI o con la puesta en servicio de la matrícula electrónica, cuya lectura también se realizaría por medios inalámbricos.

2. *Se han propuesto nuevos algoritmos para el filtrado y tratamiento de los datos que proporcionan los sensores BT y se han propuestos dos nuevos algoritmos para realizar el cálculo de las matrices O/D obtenidos de una red viaria usando sensores BT reales.*

La primera decisión que se tomó fue determinar qué información, de la proporcionada por los sensores BT, era significativa para crear los intervalos de detección de cada dispositivo BT para los procesos de filtrado y para el cálculo de la matriz O/D dinámica. El conjunto de información que se ha decidido registrar de cada dispositivo es el siguiente:

- Dirección MAC.
- *Timestamp* de la primera y última detección.

La evaluación de los métodos de emparejamiento de direcciones MAC, para crear tránsitos entre sensores, ha permitido determinar que la media de los *timestamp* del intervalo de detección o el *timestamp* asociado al valor del máximo del RSSI son los mejores métodos que se pueden utilizar. También se ha propuesto que la instalación de la antena del sensor se realice a una altura mínima de 3 metros para mejorar los porcentajes de detección.

A partir de la información que reportan los sensores BT se investigó en la creación de un algoritmo de filtrado de los dispositivos BT que van embarcados en el mismo vehículo. Este algoritmo se basa en los datos del intervalo de

detección y el CoD de los dispositivos. El algoritmo propuesto filtra los dispositivos cuyos intervalos de detección extendidos se solapan y esta coincidencia se repite en al menos 3 sensores, o los dispositivos corresponden con un teléfono móvil y un dispositivo manos libres que se detectan en dos sensores consecutivos dentro del mismo intervalo de detección. Los resultados obtenidos al aplicar este algoritmo, en el caso de estudio, han permitido filtrar un 2,66% de los tránsitos, lo que ha mejorado el conjunto de los tránsitos sobre el que se calculan los parámetros de movilidad. Este algoritmo de filtrado estará integrado en los XXXXXXs XXXXXXXX y en los XXXXXXs XXXXX.

El segundo paso ha consistido en la obtención de dos algoritmos para el cálculo de las matrices O/D dinámicas. Para obtener estos algoritmos primero se ha realizado una búsqueda bibliográfica de los métodos más utilizados para el cálculo del tiempo de viaje y de la matriz O/D. Entre los algoritmos más utilizados se seleccionaron dos y se aplicaron al conjunto de datos de prueba. Una vez evaluados los procedimientos existentes, y comprobando que su precisión podía mejorarse, se definieron dos nuevos algoritmos para determinar la matriz O/D, denominados  $\alpha$  y  $\beta$ . La validez de estos dos algoritmos se ha probado sobre los datos de prueba, utilizando como algoritmo de contraste el que mejores resultados obtuvo de los presentes en la bibliografía al aplicar estos mismos datos.

Los resultados de aplicar los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$  a los datos de prueba mostraron que ambos producían mejores resultados que el algoritmo tomado como contraste, siendo el algoritmo  $\beta$  el más eficiente de los dos.

Posteriormente se evaluó el comportamiento de los algoritmos ante situaciones de cambios en las condiciones de tráfico. En estas circunstancias, aunque su comportamiento seguía siendo mejor que el del algoritmo de contraste, los datos obtenidos no eran tan buenos, sobre todo cuando se producían cambios bruscos en las condiciones de tráfico. Con objeto de evitar este problema se introdujo una modificación que mejoraba los resultados del algoritmo  $\alpha$ .

El nuevo algoritmo  $\alpha$  mostró una mejor adaptación a cambios bruscos de las condiciones del tráfico, de tal forma que detectó incluso cortes de calzada. Sin

embargo, también se ha demostrado que la nueva modificación, solo funciona bien, si en condiciones normales de circulación, podemos asegurar que en todos los periodos de integración tendremos al menos un tránsito válido, en todos los itinerarios.

3. *Se han realizado diferentes pruebas de campo en entornos reales para demostrar la validez de la arquitectura y de los procedimientos propuestos para el cálculo de matrices O/D mediante sensores BT.*

Con el objetivo de probar los algoritmos y procedimientos definidos en la tesis se han realizado tres pruebas de campo en diferentes entornos de trabajo, en las que se han instalado los sensores BT.

La primera de ellas se ha realizado en una autovía en un entorno de tráfico interurbano y con distancias entre sensores grandes, entre 12,5 y 170 Km. Los sensores BT han sido instalados en los mismos emplazamientos en los que se ha instalado un sistema basado en procesamiento de imágenes mediante un OCR, que ha servido como sistema de referencia. Los resultados que se han obtenidos han demostrado la validez de los procedimientos y algoritmos desarrollados en esta tesis. El algoritmo  $\beta$  es el que mejor se ha comportado en esta prueba y se ha obtenido una matriz O/D con un MAE inferior a 1,4 puntos del porcentaje de la matriz O/D.

La segunda de ellas se ha realizado en la rotonda Oeste del polígono l'Andana en la ciudad de Paterna. El objetivo de esta prueba ha sido probar la validez de la tecnología para la realización de estudios direccionales en zonas reducidas. El entorno de trabajo es interurbano, en carretera convencional y con distancias entre sensores entre 150 y 300 metros. Los resultados obtenidos han permitido fijar unos criterios para mejorar la detección en este tipo de pruebas,

. Los resultados del estudio han permitido determinar que el porcentaje de tránsitos creados es del 22,7% respecto a los datos de los aforadores automáticos. La tasa de aciertos en la detección de un dispositivo BT ha sido del 88,4% sobre una muestra de 108 tránsitos con dispositivos conocidos. Al

repetir la prueba, aplicando las condiciones propuestas para mejorar los resultados, se ha obtenido un error absoluto máximo de 8,4 puntos y un MAE de 2,9 puntos, mejorándose la tasa de aciertos hasta el 100% para los sensores situados en los ramales.

La tercera de ellas se ha realizado en la ciudad de Valencia, el objetivo de esta prueba ha sido determinar la aplicación del sistema en un entorno urbano. El sistema se ha utilizado para analizar el uso del centro histórico de Valencia por los vehículos a motor. Las distancias entre sensores también han sido reducidas, desde los 500 a los 1.100 metros.

Este estudio ha tenido una complejidad adicional a las otras dos pruebas piloto debido a la convivencia en el mismo entorno de peatones y vehículos, ya que ambas poblaciones podían portar un dispositivo BT en su recorrido por los itinerarios sensorizados. Por esta razón se ha tenido que definir un procedimiento de filtrado inicial para la clasificación de los tránsitos entre peatón y vehículo. Los resultados obtenidos han permitido verificar que la clasificación que realiza el algoritmo es correcta. El estudio ha analizado el uso del centro histórico por los usuarios de los vehículos a motor, distinguiendo entre los que usan el centro para la realización de gestiones o residencial y aquellos que lo usan para acortar su itinerario por la ciudad de Valencia.

También se han podido obtener resultados del rendimiento del sistema, siendo el porcentaje de detección de los sensores del 41% respecto a la población de vehículos totales, con una desviación típica de 1,33, y la tasa de aciertos en la detección de un dispositivo BT de 93,75% sobre una muestra de 96 tránsitos. Respecto a los algoritmos de cálculo de la matriz O/D propuestos se ha demostrado que el algoritmo  $\alpha$  y el algoritmo  $\beta$  tienen unos resultados muy similares, siendo la diferencia máxima de 2,3 puntos.

## **10.2 Líneas de investigación y trabajos futuros**

La inclusión de la tecnología WIFI en la detección y su convivencia con la tecnología BT en el mismo sensor, sin duda va a ser un reto a la hora del filtrado de los dispositivos que van embarcados en el mismo vehículo. A la hora de

implementar estos algoritmos de filtrado habrá que introducir nuevas variantes a los algoritmos definidos en el presente trabajo. Un aspecto a explorar será la tendencia de los fabricantes de *smartphone* que asignan la misma dirección MAC o direcciones correlativas a los *chipsets* de ambas tecnologías.

La implantación del XXX modelado y desarrollado sobre un sistema ITS de gestión de tráfico ha sido una tarea que no se ha podido llevar a cabo en el ámbito de esta tesis. Todas las pruebas han sido temporales y externas al sistema ITS existente. Por lo tanto, un trabajo que habrá que realizar será la integración del XXX en un sistema ITS real.

La integración del XXX en la arquitectura de un entorno real de gestión de tráfico supondrá un trabajo de estandarización a dos niveles: el primero referido al sensor, ya que actualmente no existe una normalización sobre este tipo de sensores. El segundo nivel, referido al protocolo de comunicaciones entre el sensor y la ERU (XXXXXX XXX), y entre la ERU y el CGT (XXXXXX XXXXXXXX y XXXXXX XXXXX). Estos trabajos deberían ser abordados dentro del comité técnico de normalización AEN/CTN 199: *“Equipamiento para la gestión del tráfico”* de AENOR.

Las nuevas técnicas de reidentificación de vehículos que han surgido mediante el empleo de sensores magnéticos (Taghvaeeyan & Rajamani, 2014), (Cirilo et al., 2013), que permiten identificar la huella magnética de los vehículos y realizar su seguimiento por diferentes puntos de sensorización, abren un nuevo campo de aplicación de los algoritmos que se han definido para el cálculo de la matriz O/D. Por lo tanto, será necesario afrontar un proceso similar al que se ha seguido en el presente trabajo: en primer lugar, estudiar las condiciones mínixxx que definan la validez de la aplicación de este nuevo tipo de sensores para realizar el computo de este parámetro de movilidad, y en segundo lugar, analizar la validez de los algoritmos  $\alpha$  y  $\beta$  y sus posibles modificaciones.

## 11 Bibliografía

---

- Abbott-jard, M., Shah, H., & Bhaskar, A. (2013). Empirical evaluation of Bluetooth and Wifi scanning for road transport, (October), 1–14.
- Abrahamsson, T. (1998). *Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey*. Laxenburg, Austria.
- AENOR. (2004). *Equipamiento para la señalización vial. Estaciones de toma de datos. Parte 3*. Retrieved from <http://www.aenor.es/aenor/norXXX/norXXX/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0031675&PDF=Si#.VTTZ1SF13RY>
- AMPLICON. (2014). ANPR solutions. Retrieved October 25, 2014, from <http://www.amplicon.com/security/anpr.cfm>
- Antoniou, C., Ben-Akiva, M., & Koutsopoulos, H. N. (2007). Nonlinear Kalman filtering algorithms for on-line calibration of dynamic traffic assignment models. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(4), 661–670. doi:10.1109/TITS.2007.908569
- Araghi, B. N., Christensen, L. T., Krishnan, R., & Lahrmann, H. (2012). Application of Bluetooth Technology for Mode- Specific Travel Time Estimation on Arterial Roads : Potentials and Challenges. *Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University*, 1–15.

- Awad, A., Frunzke, T., & Dressler, F. (2007). Adaptive distance estimation and localization in WSN using RSSI measures. *Proceedings - 10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools, DSD 2007*, (Dsd), 471–478. doi:10.1109/DSD.2007.4341511
- Barcelo, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. *Simulation* (Vol. 145). doi:10.1007/978-1-4419-6142-6
- Barceló, J., Codina, E., Casas, J., Ferrer, J. L., & García, D. (2005). Microscopic traffic simulation: A tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 41(2-3), 173–203. doi:10.1007/s10846-005-3808-2
- Barceló, J., Montero, L., Marqués, L., & Carmona, C. (2010). Travel Time Forecasting and Dynamic Origin-Destination Estimation for Freeways Based on Bluetooth Traffic Monitoring. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2175(-1), 19–27. doi:10.3141/2175-03
- Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., & Krajzewicz, D. (2011). SUMO – Simulation of Urban MObility. In *SIMUL 2011. The third International Conference on Advances in System Simulation* (pp. 63–68). Barcelona, Spain.
- 024X(200102)31:2<103::AID-SPE358>3.0.CO;2-O
- Bhaskar, A., & Chung, E. (2013). Fundamental understanding on the use of Bluetooth scanner as a complementary transport data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 37, 42–72. doi:10.1016/j.trc.2013.09.013
- Bitcarrier. (2014). Bluetooth sensor. Retrieved October 20, 2014, from <http://www.bitcarrier.com/roadsolver>

- Blogg, M., Semler, C., Hingorani, M., & Troutbeck, R. (2010). Travel Time and Origin-Destination Data Collection using Bluetooth MAC Address Readers, (October), 1–15. Retrieved from [http://www.atrf.info/papers/2010/2010\\_Blogg\\_Semler\\_Hingorani\\_Troutbeck.pdf](http://www.atrf.info/papers/2010/2010_Blogg_Semler_Hingorani_Troutbeck.pdf)
- Blosseville, J. M. (1994). Results of the Tristar AID system obtained from 3 field experimentations. In *Seventh International Conference on 'Road Traffic Monitoring and Control'* (Vol. 1994, pp. 168–171). IEE. doi:10.1049/cp:19940449
- Blosseville, J. M., & Lenoir, F. (1989). Titan : a traffic measurement system using image processing techniques. In *Road Traffic Monitoring, 1989., Second International Conference on* (pp. 84–88).
- Brennan, T. M., Ernst, J. M., Day, C. M., Bullock, D. M., Krogmeier, J. V., & Martchouk, M. (2010). Influence of Vertical Sensor Placement on Data Collection Efficiency from Bluetooth MAC Address Collection Devices. *Journal of Transportation Engineering*. doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000178
- Canon-Lozano, Y., Melo-Castillo, A., Banse, K., & Felipe Herrera-Quintero, L. (2012). Automatic generation of O/D matrix for XXXs transportation systems using an ITS approach. In *2012 IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS)* (pp. 1–6). IEEE. doi:10.1109/CITSS.2012.6336681
- Carlson, R. C., Manolis, D., Papamichail, I., & Papageorgiou, M. (2012). Integrated Ramp Metering and Mainstream Traffic Flow Control on Freeways Using Variable Speed Limits. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. doi:10.1016/j.sbspro.2012.06.1133
- Cascetta, E. (1984). Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: A generalized least squares estimator. *Transportation Research Part B: Methodological*. doi:10.1016/0191-2615(84)90012-2
- Cascetta, E., & Postorino, M. N. (2001). Fixed Point Approaches to the Estimation of O/D Matrices Using Traffic Counts on Congested Networks. *Transportation Science*, 35(2), 134–147. doi:10.1287/trsc.35.2.134.10138

- CC.com. (2015). Sistema Blids. Retrieved April 14, 2015, from <http://www.blids.cc/>
- Cirilo, R. V., Celda, A. G., Pla-Castells, M., & Martinez Plume, J. (2013). Improving similarity measures for re-identification of vehicles using AMR sensors. In *2013 9th International Conference on Information, Communications & Signal Processing* (pp. 1–5). IEEE. doi:10.1109/ICICS.2013.6782837
- Coifman, B. (2002). Estimating travel times and vehicle trajectories on freeways using dual loop detectors. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(4), 351–364. doi:10.1016/S0965-8564(01)00007-6
- Collins, J. F., Hopkins, C., & Martin, J. (1979). *Automatic Incident Detection- TRRL Algorithms HIOCC and PATREG*. Retrieved from [http://www.trl.co.uk/umbraco/custom/report\\_files/SR526.pdf](http://www.trl.co.uk/umbraco/custom/report_files/SR526.pdf)
- Day, C. M., Wasson, J. S., Jr., T. M. B., & Bullock, D. M. (2012). *Application of Travel Time Information for Traffic Management*. doi:10.5703/1288284314666
- Diputación Foral de Bizkaia. (2013). *Plan de Aforos de Bizkaia*. Bizkaia. Retrieved from [http://www.bizkaia.net/home2/archivos/DPTO6/Temas/Pdf/Aforos2013/Evolucion\\_2013.pdf?idioma=CA](http://www.bizkaia.net/home2/archivos/DPTO6/Temas/Pdf/Aforos2013/Evolucion_2013.pdf?idioma=CA)
- DLR. (2013). Especificaciones de SUMO. Retrieved March 10, 2015, from <http://sumo.dlr.de/>
- DNAE. (2008). Interpretación del coeficiente de variación. Retrieved March 1, 2015, from [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/est\\_interp\\_coefvariacion.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/censo/est_interp_coefvariacion.pdf)
- EuropeanComission. (2009). *Standardisation mandate addressed to CEN, CENELEC and ETSI in the field of information and communication technologies to support the interoperability of co-operative systems for Intelligent Transport in the European Community*. Retrieved from

[http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/standardisation\\_mandate\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/files/standardisation_mandate_en.pdf)

EUSTAT. (2015). Cálculo de coeficientes de variación para diferentes estimadores directos e indirectos utilizados en las encuestas económicas de Eustat. Retrieved May 6, 2015, from [http://www.eustat.es/document/datos/errores\\_c.pdf](http://www.eustat.es/document/datos/errores_c.pdf)

Fahmy, M. (University N. (1992). Automatic Number-Plate Recognition, 1–3.

Fraile, C. (2011). Adiós a los Postes SOS, 21–22.

Friedrich, M., & Schlaich, J. (2008). Automatic number plate recognition for the observance of travel behavior for the observance travel.

Galland, S., Knapen, L., Yasar, A. U. H., Gaud, N., Janssens, D., Lamotte, O., ... Wets, G. (2014). Multi-agent simulation of individual mobility behavior in carpooling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 45, 83–98. doi:10.1016/j.trc.2013.12.012

García-Linares Fontes, F. Montero Mora, F., Laina Relaño, R., Hernández Ayuso, A., Van Bijsterveld, W., & Carrero Novillo, M. (2010). Proyecto CENIT-OASIS: la autopista del futuro. *Carreteras: Revista Técnica de La Asociación Española de La Carretera*, 170, 32–48.

Gómez, J., & Pavón, J. (2004). Modelado SMA. Retrieved January 1, 2015, from <http://www.fdi.ucm.es/profesor/jpavon/doctorado/desarrolloSMA.pdf>

- Gómez-Sanz, J. (2013). Ingenias Development Kit. Retrieved January 1, 2015, from <http://ingenias.sourceforge.net/>
- Grabot, B. (2015). Engineering Applications of Artificial Intelligence. Retrieved January 1, 2015, from <http://www.journals.elsevier.com/engineering-applications-of-artificial-intelligence/>
- Gurney, R., Rhead, M., Ramalingam, S., & Cohen, N. (2012). Working towards an international ANPR Standard — An initial investigation into the UK standard. In *2012 IEEE International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)* (pp. 331–337). IEEE. doi:10.1109/CCST.2012.6393581
- ISO. (2003). *ISO 11898-1:2003 Road vehicles -- Controller area network (CAN) -- Part 1: Data link layer and physical signalling*.
- Jie, L., Zuylen, H. Van, Chunhua, L., & Shoufeng, L. (2011). Social and Monitoring travel times in an urban network using video , GPS and Bluetooth. doi:10.1016/j.sbspro.2011.08.070
- Kanayama, K., Fujikawa, Y., Fujimoto, K., & Horino, M. (1991). Development of vehicle-license number recognition system using real-time image processing and its application to travel-time measurement. In *[1991 Proceedings] 41st IEEE Vehicular Technology Conference* (pp. 798–804). IEEE. doi:10.1109/VETEC.1991.140605
- Kosch, T., Kulp, I., Bechler, M., Strassberger, M., Weyl, B., & Group, B. M. W. (2009). Communication Architecture for Cooperative Systems in Europe, (May).
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M., & Bieker, L. (2012). Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility, 5(3), 128–138.
- Krajzewicz, M., & Behrisch, D. (2014). sumo simulator documentation. Retrieved from <http://sumo-sim.org/userdoc/index.html>
- Kwon, J., & Varaiya, P. (2005). Real-Time Estimation of Origin-Destination Matrices with Partial Trajectories from Electronic Toll Collection Tag Data, 200(January), 0–19.

- Langheinrich, M., & Kasten, O. (2001). First Experiences with Bluetooth in the Smart-Its Distributed Sensor Network The Smart-Its Prototype. *Workshop on Ubiquitous Computing and Communications PACT 2001, Barcelona, Spain.*
- Licencia Pública General de GNU. (2015). Retrieved March 6, 2015, from <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>
- Lindveld, D. R., & Thijs, R. (1999). On-line travel time estimation using inductive loop data: the effect of instrumentation peculiarities. In *Proceedings of 6th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITS), held Toronto, Canada, november 8-12, 1999.* Toronto, Canada: Transport Research Laboratory.
- Maher, M. (1983). Inferences on trip matrices from observations on link volumes: A Bayesian statistical approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 17(6), 435–437.
- MahXXXsani, H., & MahXXXsani, H. (2001). Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications. *Networks and Spatial Economics*, 1, 267–292. doi:10.1023/A:1012831808926
- Malinovskiy, Y., Lee, U.-K., Wu, Y.-J., & Wang, Y. (2011). Investigation of Bluetooth-Based Travel Time Estimation Error on a Short Corridor. In Transportation Research Board (Ed.), *Transportation Research Board 90th Annual Meeting* (p. 19). Washington, DC: Transport Research Laboratory.
- Malinovskiy, Y., Wu, Y.-J., Wang, Y., & Lee, U. K. (2010). Field Experiments on Bluetooth-Based Travel Time Data Collection. In *Transportation Research Board 89th Annual Meeting* (p. 17).
- Mankovskii, S., Gogolla, M., Urban, S. D., Dietrich, S. W., Urban, S. D., Dietrich, S. W., ... Bechhofer, S. (2009). OWL: Web Ontology Language. In *Encyclopedia of Database Systems* (pp. 2008–2009). doi:10.1007/978-0-387-39940-9\_1073

- Mcgill, R., Tukey, J. W., & Larsen, W. A. (1978). Variations of Box Plots. *The American Statistician*, 32(1), 12–16.  
doi:10.1080/00031305.1978.10479236
- Menéndez, J. M., Alfonso, J., Cacheiro, E., & Sánchez, N. (2015). Cooperative ITS communications architecture: the FOTsis project approach and beyond. *IET Intelligent Transport Systems*.  
doi:10.1049/iet-its.2014.0205
- Muñoz, O., Pastor, G., González, J., Sanchez, P., & Otaegui, A. (2010). Intelvia an integral system for safe and intelligent traffic operational management. In *17th ITS World Congress*. Busan, Korea.
- Murphy, P., Welsh, E., & Frantz, J. P. (2002). Using Bluetooth for short-term ad hoc connections between moving vehicles: a feasibility study. In *Vehicular Technology Conference. IEEE 55th Vehicular Technology Conference. VTC Spring 2002 (Cat. No.02CH37367)* (Vol. 1, pp. 414–418). IEEE. doi:10.1109/VTC.2002.1002746
- Object\_Management\_Group. (2000). *agents\_Green\_Paper\_v100 object management group*. Retrieved from  
[www.objs.com/agent/agents\\_Green\\_Paper\\_v100.doc](http://www.objs.com/agent/agents_Green_Paper_v100.doc)
- Padgham, L., Thangarajah, J., & Winikoff, M. (2005). Tool support for agent development using the prometheus methodology. *Proceedings - International Conference on Quality Software, 2005*, 383–388.  
doi:10.1109/QSIC.2005.66
- Papadimitratos, P., Fortelle, A. D. La, Paristech, M., Evenssen, K., & Asa, Q. (2009). Vehicular Communication Systems : Enabling Technologies , Applications , and Future Outlook on Intelligent Transportation, (November), 84–95.
- Parameswaran, A. T., Husain, M. I., & Upadhyaya, S. (2009). Is RSSI a reliable parameter in sensor localization algorithms - an experimental study. *IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems*, 1–5.

- Peterson, B. S., Baldwin, R. O., & Kharoufeh, J. P. (2006). Bluetooth Inquiry Time Characterization and Selection. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 5(9), 1173–1187. doi:10.1109/TMC.2006.125
- Pita Fernandez, S. (2011). Determinación del tamaño muestral. Retrieved January 1, 2015, from [http://www.fisterra.com/mbe/investiga/9muestras/tamano\\_muestral2.pdf](http://www.fisterra.com/mbe/investiga/9muestras/tamano_muestral2.pdf)
- Porter, J. D., Kim, D. S., & Magana, M. E. (2011). *Wireless data collection system for real-time arterial travel time estimates*. Portland, Oregon. Retrieved from [http://www.oregon.gov/odot/td/tp\\_res/docs/reports/2011/wirelessdata.pdf](http://www.oregon.gov/odot/td/tp_res/docs/reports/2011/wirelessdata.pdf)
- Porter, J. D., Kim, D. S., Magaña, M. E., Poocharoen, P., & Arriaga, C. A. G. (2013). Antenna Characterization for Bluetooth-Based Travel Time Data Collection. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17, 142–151. doi:10.1080/15472450.2012.696452
- Proyecto iTetris. (2013). Retrieved April 8, 2015, from <http://www.ict-itetris.eu>
- Proyecto Safespot. (2013). Retrieved April 8, 2015, from <http://www.safespot-eu.org>
- Puckett, D. D., & Vickich, M. J. (2010). *Bluetooth® -Based Travel Time / Speed Measuring Systems Development Final Report*.
- Quayle, S. M., Koonce, P., DePencier, D., & Bullock, D. M. (2011). Arterial Performance Measures with Media Access Control Readers. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. doi:10.3141/2192-18

- Raymaps. (2014). Some common antenna radiation patterns. Retrieved from <http://www.raymaps.com/index.php/some-common-antenna-radiation-patterns/>
- Rodríguez del Águila, M., & Ramírez González, A. (2007). Sample size calculation. In *Epidemiology: a research manual for South Africa* (Vol. 42, pp. 485–492). SEICAP. doi:10.1016/j.aller.2013.03.008
- Rusell, S., & Norvig, P. (2013). *Artificial Intelligence: A modern Approach*.
- Schlaich, J. (2010). Generating Trajectories from Mobile Phone Data.
- Sherali, H. D., & Park, T. (2001). Estimation of dynamic origin-destination trip-tables for a general network. *Transportation Research Part B*, 35(3), 217–235.
- SIG. (2014). Bluetooth specifications. Retrieved April 21, 2015, from <http://www.bluetooth.com/Pages/Fast-Facts.aspx>
- Song, J., Wei, L., & Ming, Y. (2013). A Method for Simulation Model Validation Based on Theil's Inequality Coefficient and Principal Component Analysis (pp. 126–135). doi:10.1007/978-3-642-45037-2\_12
- Soriano, FR., Jaén, MA., Jordán, JG., Segura, J. (2007). Implementación del protocolo de registro electrónico de vehículos (ERI). Valencia: VII congreso ITS España.
- Stanford. (2015). Protégé, Ontology editor. Retrieved January 1, 2015, from <http://protege.stanford.edu/>
- Stevanovic, A., Olarte, C. L., Gallettebeitia, Á., Gallettebeitia, B., & Kaiser, E. I. (2014). Testing Accuracy and Reliability of MAC Readers to Measure Arterial Travel Times. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. doi:10.1007/s13177-014-0081-4
- Sun, Y., Zhu, H., Zhou, X., & Sun, L. (2014). VAPA: Vehicle Activity Patterns Analysis based on Automatic Number Plate Recognition

- System Data. *Procedia Computer Science*, 31, 48–57.  
doi:10.1016/j.procs.2014.05.244
- Taghvaeeyan, S., & Rajamani, R. (2014). Portable roadside sensors for vehicle counting, classification, and speed measurement. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1), 73–83.  
doi:10.1109/TITS.2013.2273876
- Tavana, H. (2001). Internally-Consistent Estimation of Dynamic Network Origin-Destination Flows From Intelligent Transportation Systems Data Using Bi-Level Optimization.
- Tomás, V. R., Martínez Plumé, J., Samper, J., Sánchez, I., & Martínez, J. . (2002). Traffic simulator as a tool to improve safety in the event of an accident. In *e-safety Congress and exhibition proceedings: IT solutions for safety and security in intelligent transport: 16-18 September 2002, Lyon, France* (p. 6). Lyon.
- Traffax INC. (2015). Retrieved April 23, 2015, from [www.traffaxinc.com](http://www.traffaxinc.com)
- Trafficnow. (2014). Bluetooth sensor. Retrieved April 23, 2014, from <http://www.deepbluesensor.com/>
- Tsubota, T., Bhaskar, A., Chung, E., & Billot, R. (2011). Arterial traffic congestion analysis using Bluetooth Duration data. *Australasian Transport Research Forum*, (September), 28–30.

- Van Zuylen, H. J., & Willumsen, L. G. (1980). The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(3), 281–293. doi:10.1016/0191-2615(80)90008-9
- Wang, Y., & Papageorgiou, M. (2005). Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: A general approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(2), 141–167. doi:10.1016/j.trb.2004.03.003
- Wasson, J. S., & Bullock, D. M. (2012). *Database architecture and query structures for probe data processing*.
- Welch, G., & Bishop, G. (2006). An Introduction to the Kalman Filter. In *Practice*, 7(1), 1–16. doi:10.1.1.117.6808
- Wieck, M. (2011). Use of Bluetooth Based Travel Time Information for Traffic Operations. In *18th ITS World Congress, Orlando, 2011. Proceedings* (p. 9). Washington, DC: ITS America.
- Wooldridge, M. (2009). *An Introduction to XXXXXXXX Systems*.
- Yafeng, Y. (2015). Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Retrieved January 1, 2015, from <http://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-c-emerging-technologies/>
- Yun, H. J., & Dan Choi, J. (2014). Practical experiences on a road guidance protocol for intersection collision warning application. In *16th International Conference on Advanced Communication Technology* (pp. 360–364). doi:10.1109/ICACT.2014.6778982
- Zhang, X., & Mustard, D. (2002). Methods for the estimation of time-dependent origin destination matrices using traffic flow data on road links. In *European Transport Conference* (p. 16). Retrieved from <http://abstracts.aetransport.org/paper/index/id/1415/confid/8>
- Zhu, F., Aziz, H. M. A., Qian, X., & Ukkusuri, S. V. (2015). A junction-tree based learning algorithm to optimize network wide traffic control: A coordinated multi-agent framework. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1, 1–15. doi:10.1016/j.trc.2014.12.009

## 12 Publicaciones

---

En este apartado se presenta una relación de las publicaciones relacionadas con la tesis en las que ha participado el doctorando:

**Javier Martínez Plumé**, Ramon V. Cirilo Gimeno, Antonio García Celda, Francisco R. Soriano García. Influence of percentage of detection on origin – destination matrices calculation from Bluetooth and WIFI MAC address collection devices. 13th Annual Industrial Simulation Conference, del 1 al 3 junio de 2015, UPV, Valencia, España. Conferencia clasificada como Core C.

2012. ISBN: 978-3-642-28761-9. Conferencia clasificada como Core C. Clasificada en el puesto 52 de 701 Conferencias del Computer Science Conference Ranking based on the "Estimated Impact of Conference (EIC).

Ramón V. Cirilo Gimeno, Antonio García Celda, Marta Pla Castells, **Javier Martínez Plumé**. Improving similarity measures for reidentificación of vehicles using AMR sensors. 9<sup>th</sup> International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICS) 2013. Tainan, Taiwan del 10 al 13 de diciembre de 2013. ISBN: 978-1-4799-0433-4. Conferencia clasificada como Core B.

Ramón V. Cirilo Gimeno, Marta Pla Castells, Antonio García Celda, **Javier Martínez Plumé**. A simulation model using AMR sensors applied to vehicles classification and identification. Industrial Simulation Conference, 22 al 24 mayo de 2013, Ghent University, Belgium. Proceedings. ISBN 978-90-77381-76-2. Conferencia clasificada como Core C.

**Javier Martínez Plumé**. Sistemas cooperativos entre vehículos y entre vehículo e infraestructura. I jornada de movilidad urbana e interurbana, nuevas tecnologías aplicadas a la movilidad y a la seguridad vial. Dirección de Tráfico de Gobierno Vasco. Vitoria Gasteiz, España, 13 de abril de 2011.

Marta Pla-Castells, Ramón V. Cirilo Gimeno, **Javier Martínez Plumé**. Ciudades inteligentes: Tecnologías de la Información al servicio del ciudadano. XXX Symposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2015, Pamplona, Navarra, del 2 al 4 de septiembre de 2015.

## 13 Anexo I: Ficheros simulación SUMO

---

Los ficheros de configuración y de salida de la simulación de la red metropolitana de Bilbao mediante SUMO se incluyen en formato electrónico en el CD adjunto a esta tesis.

Los ficheros incluidos son:

- Fichero de creación de la red de simulación: bilbao.net.xml
- Fichero de introducción de los flujos de tráfico: bilbao.flows.xml
- Fichero de introducción de los repartos: bilbao.turns.xml
- Fichero de definición de los tipos de vehículos: bilbao.vtype.xml
- Fichero de salida de la simulación: bilbao.rou.xml



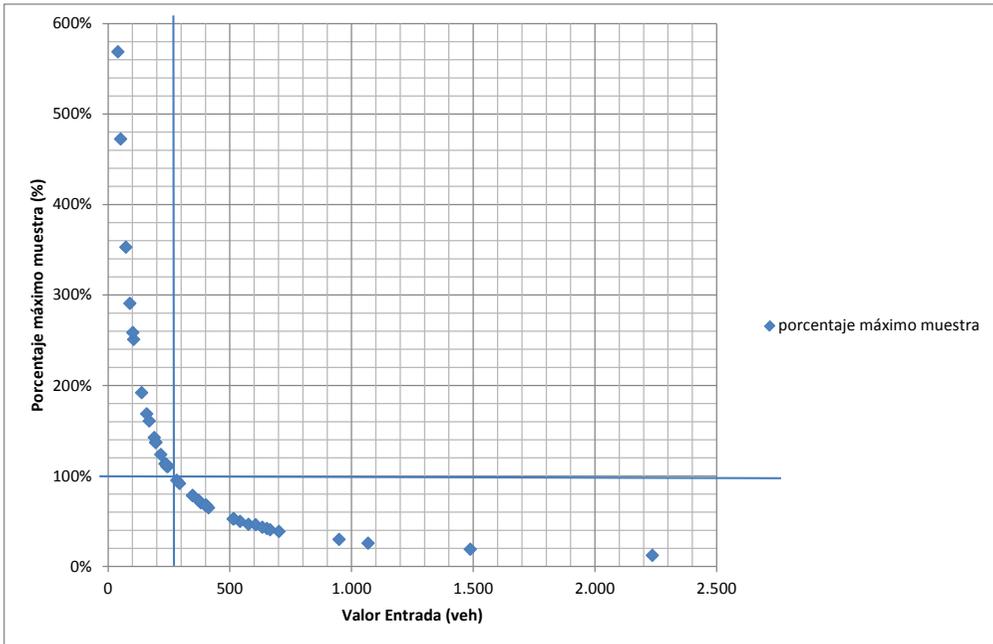
## 14 Anexo II: Gráficas tamaño de la muestra

---

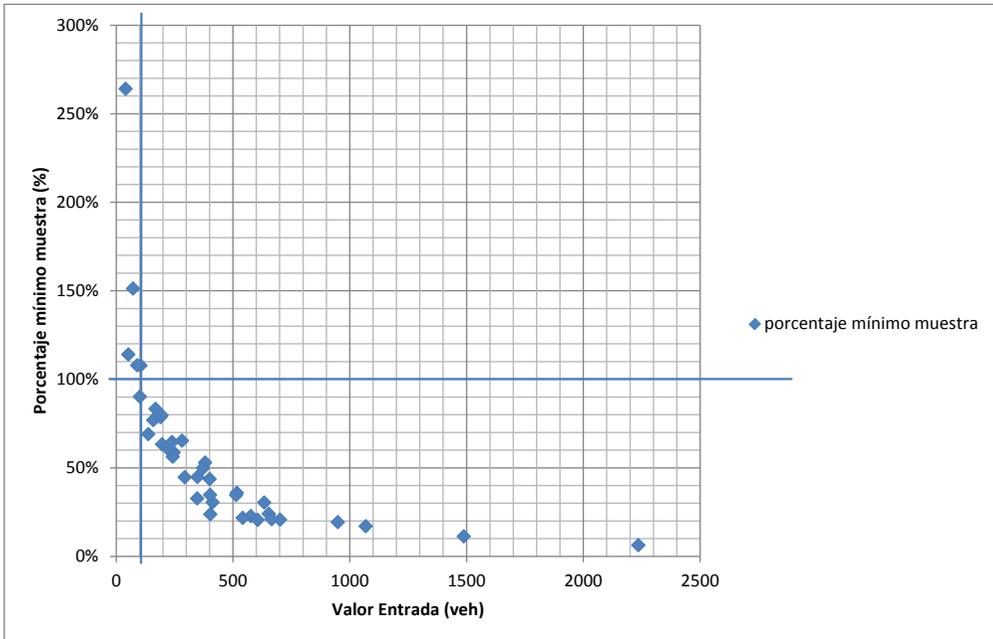
En este anexo se muestran las gráficas completas del estudio presentado en el apartado 5.7.5 “Cálculo del tamaño de la muestra mínima”.

En el anexo digital se ha incluido el fichero con los datos de la explotación. En este fichero se puede consultar la matriz O/D de la simulación de la red metropolitana de Bilbao.

**Intervalo de confianza del 90 % y precisión del 10%**

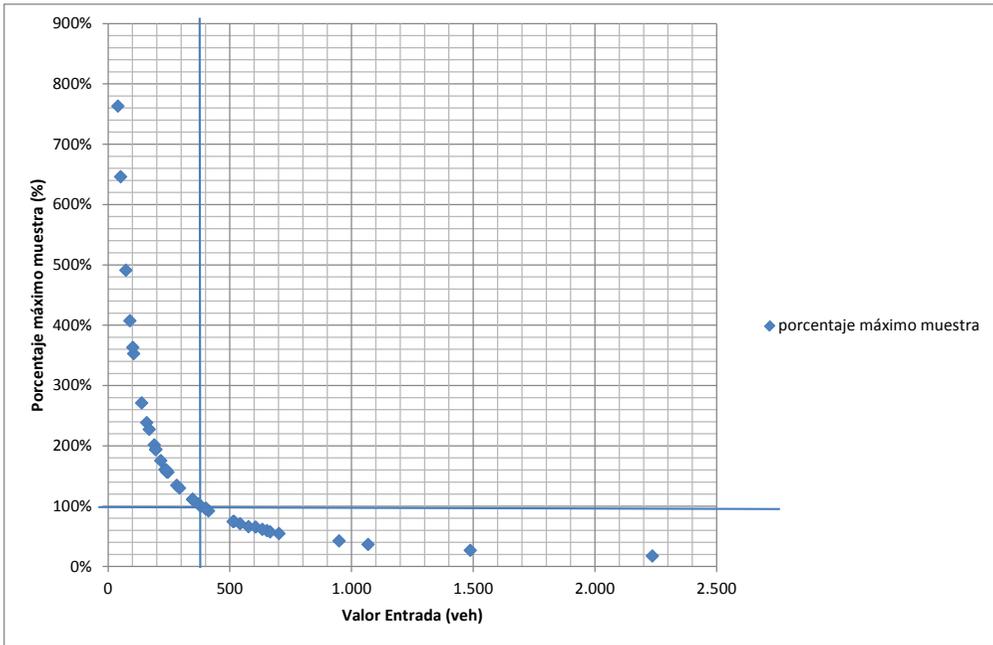


*Imagen 171: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 90% y precisión 10%*

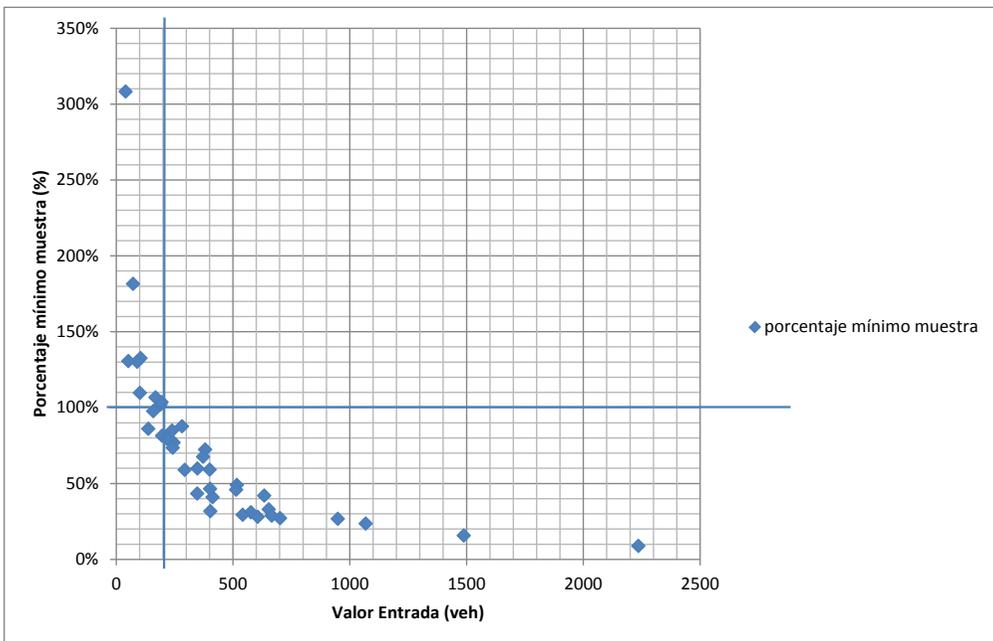


*Imagen 172: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 90% y una precisión del 10%*

**Intervalo de confianza del 95 % y precisión del 10%**

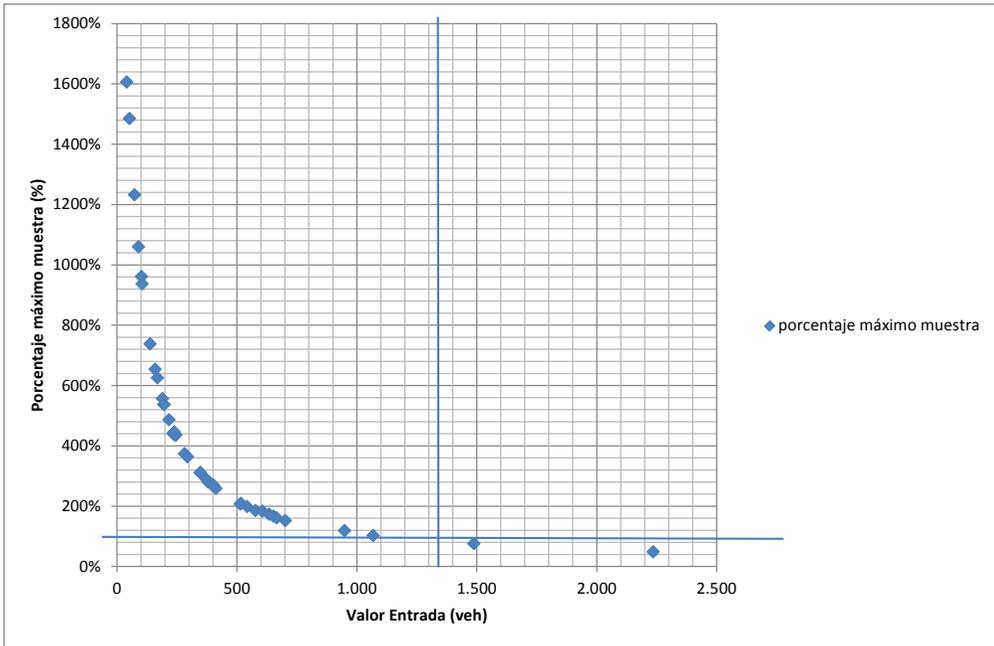


*Imagen 173: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 95% y precisión 10%*

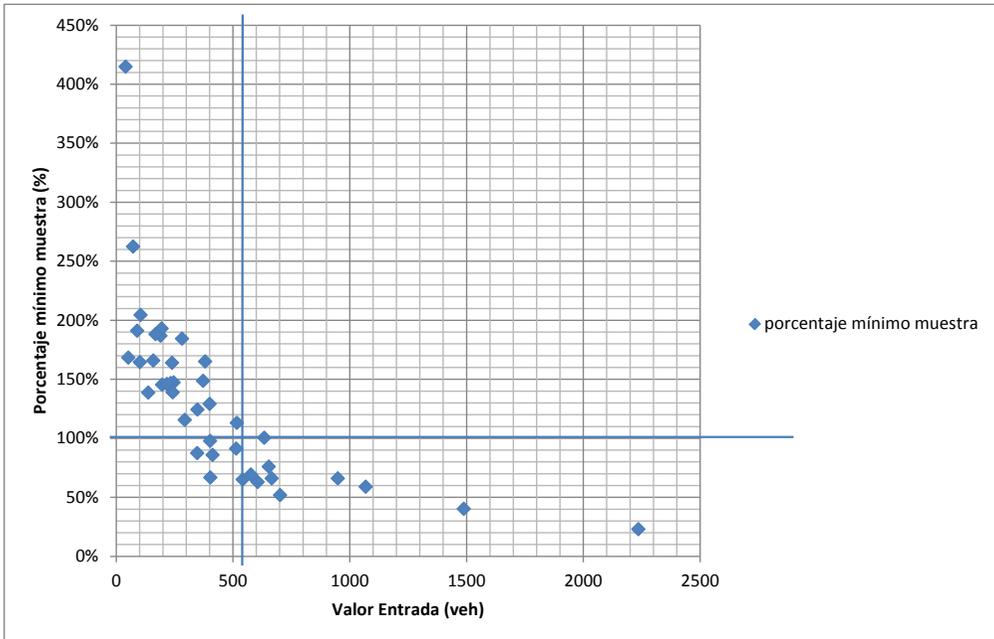


*Imagen 174: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 95% y una precisión del 10%*

**Intervalo de confianza del 90 % y precisión del 5%**

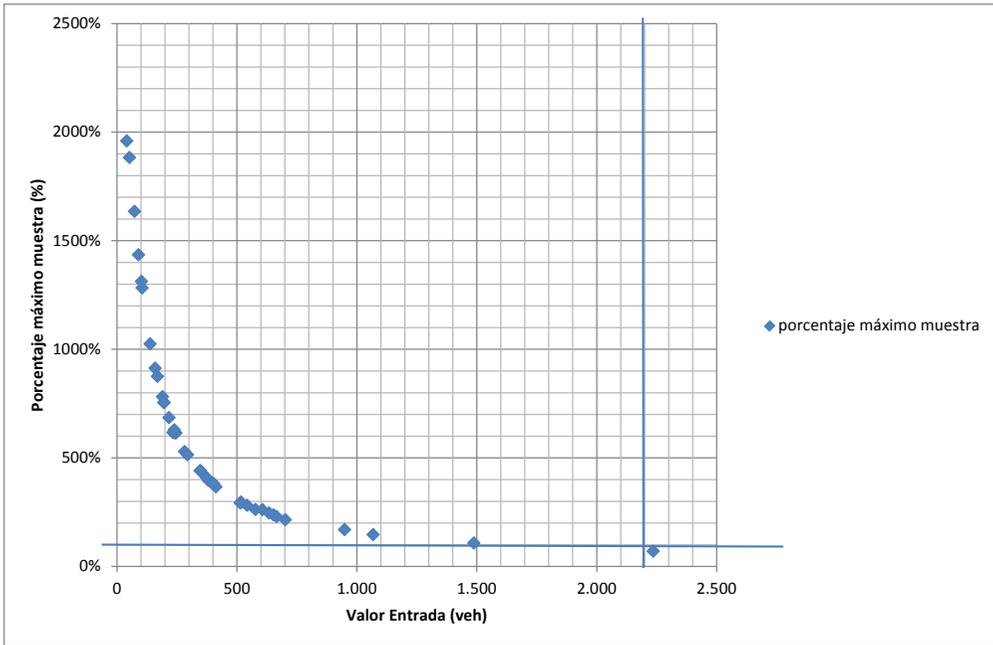


*Imagen 175: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 90% y precisión 5%*

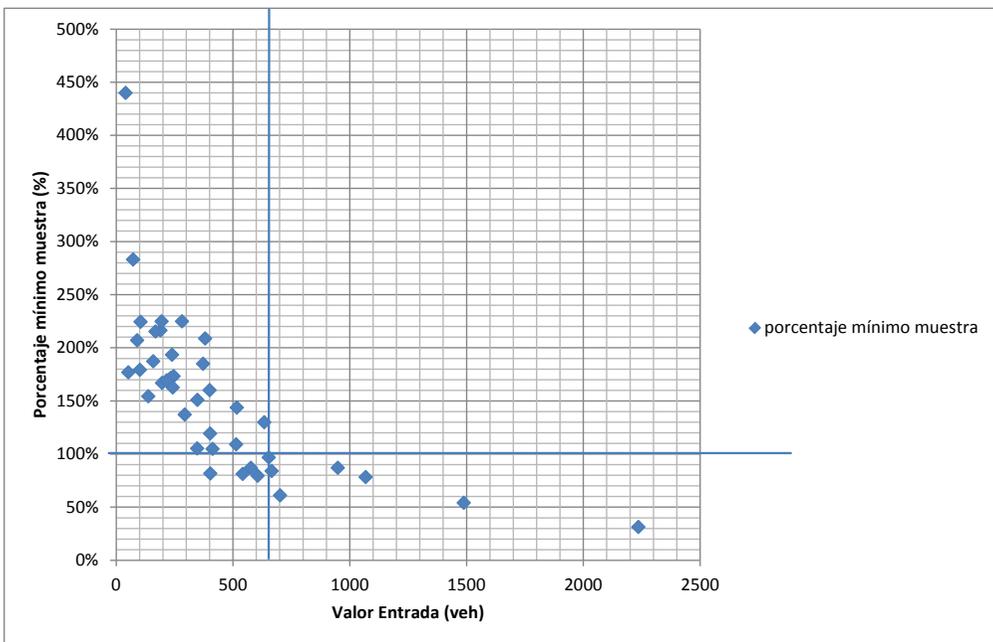


*Imagen 176: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 90% y una precisión del 5%*

**Intervalo de confianza del 95 % y precisión del 5%**



*Imagen 177: Límite inferior valor entrada intervalo confianza 95% y precisión 5%*



*Imagen 178: Porcentaje mínimo de la muestra respecto al valor real para un intervalo de confianza del 95% y una precisión del 5%*



## 15 Anexo III: Gráficas algoritmos matriz O/D

---

En este anexo se muestran las gráficas completas del estudio presentado en el apartado 8.3: *“Comparación de los algoritmos de cálculo de la matriz O/D* En las gráficas del algoritmo  $\alpha$  se ha incluido la versión sin ajuste y la versión con ajuste por periodos repetidos sin datos. Como se puede observar en las gráficas, en todos los itinerarios que tienen pocos tránsitos y que por lo tanto aparecen periodos sin detecciones no debidas a una incidencia, la modificación del algoritmo  $\alpha$  no ofrece resultados satisfactorios.

### Situación normal de tráfico SBT 1- SBT 2

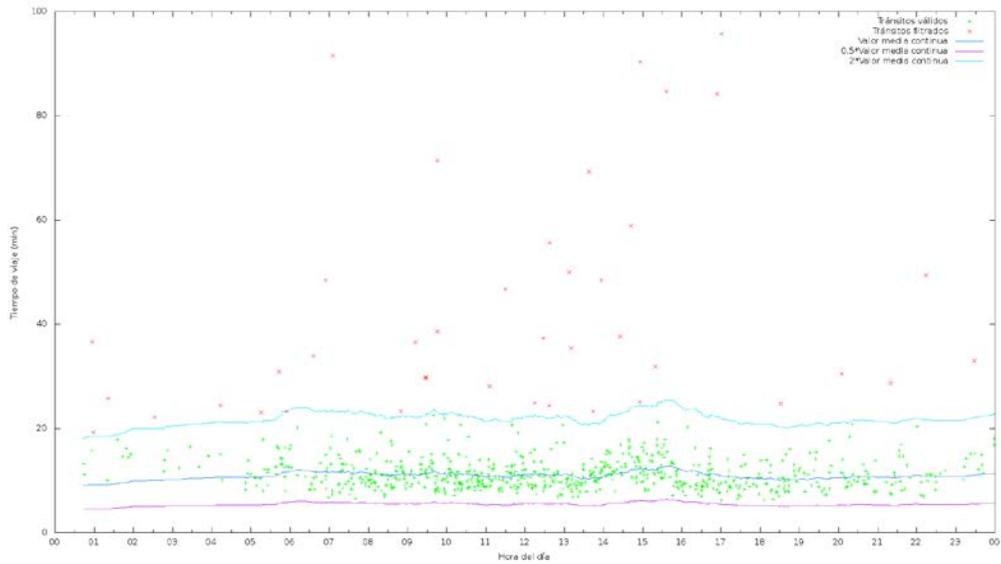


Imagen 179: Clasificación transitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 1 – SBT2

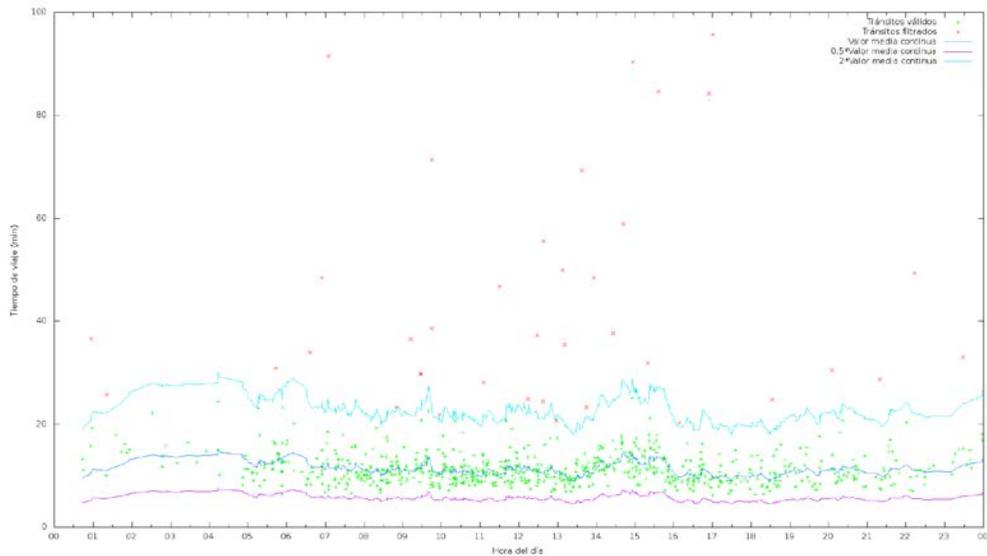


Imagen 180: Clasificación transitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 1 – SBT2

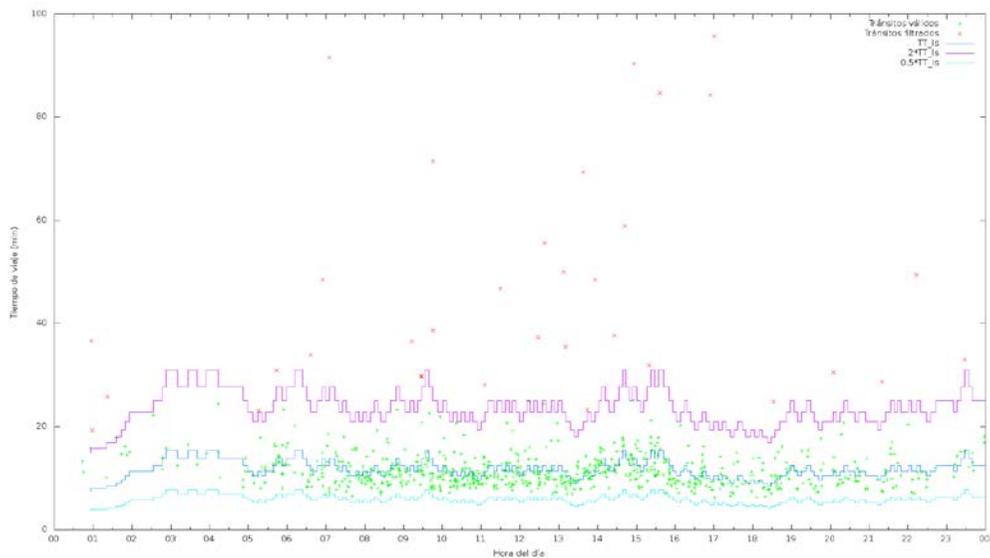


Imagen 181: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  sin ajuste Km/h SBT 1 – SBT2

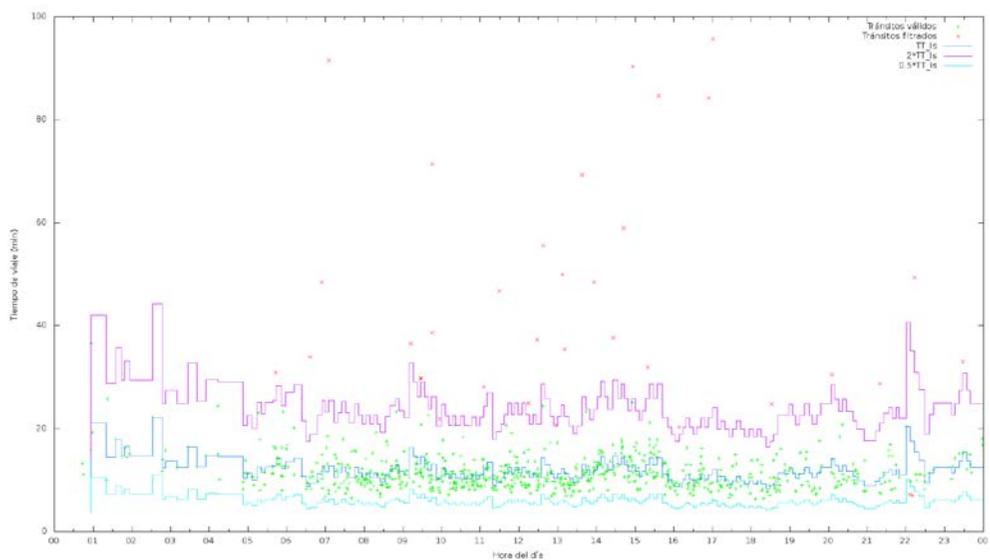


Imagen 182: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 1 – SBT2

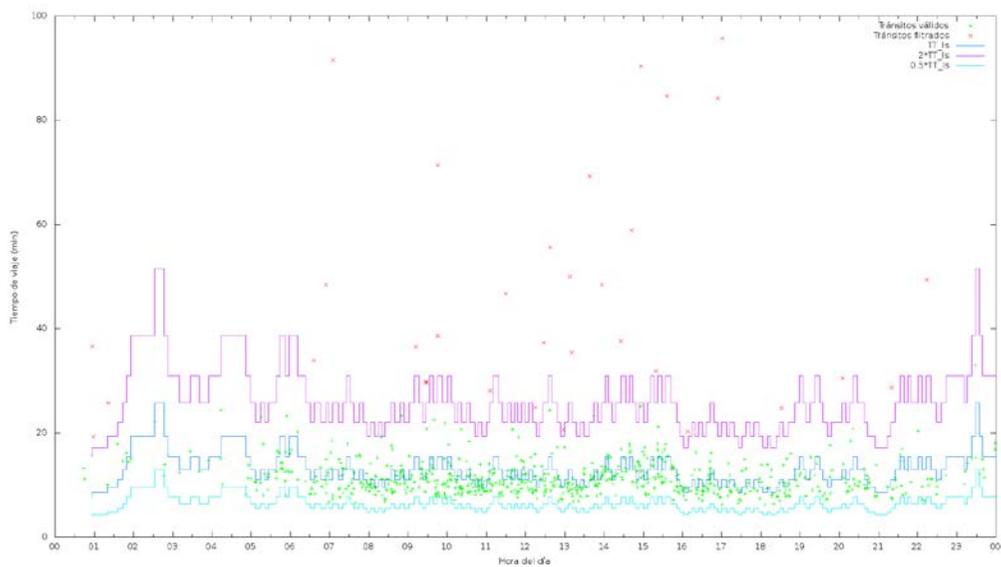


Imagem 183: Classificação tráfego com algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sem ajuste SBT 1 – SBT2

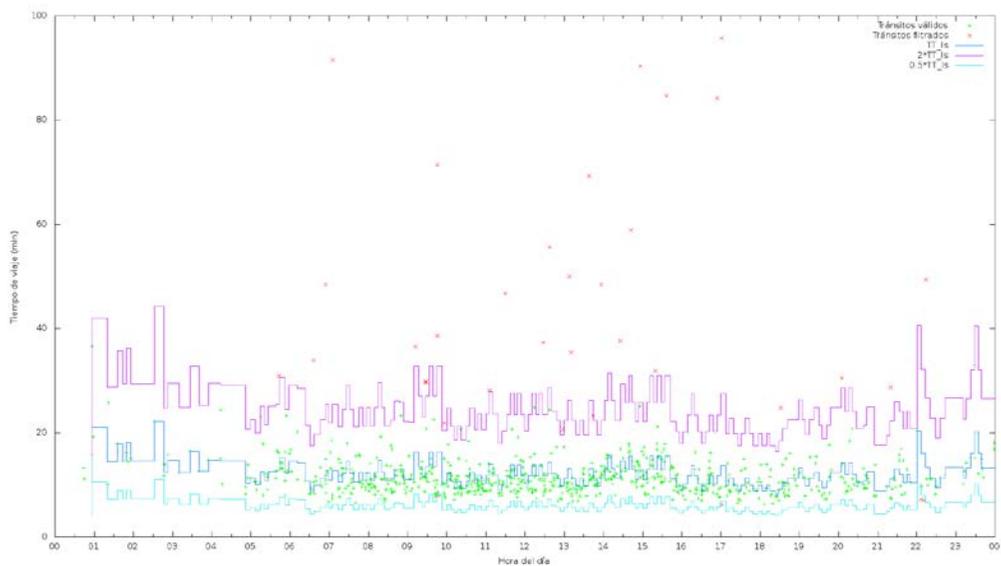


Imagem 184: Classificação tráfego com algoritmo  $\alpha = 5$  com ajuste Km/h SBT 1 – SBT2

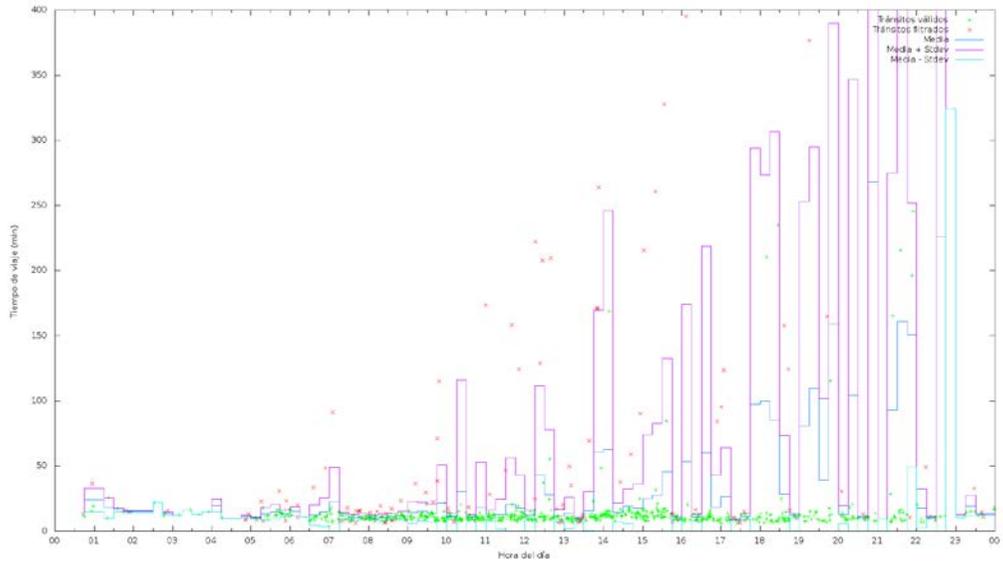


Imagen 185: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 1 – SBT2

### Situación normal de tráfico SBT 2- SBT 1

En el cuerpo del documento se han incluido todas las gráficas de este itinerario salvo las que corresponden al algoritmo  $\alpha$  con el ajuste adicional por periodos en los que no hay detección de tránsitos, que se incluyen en este apartado.

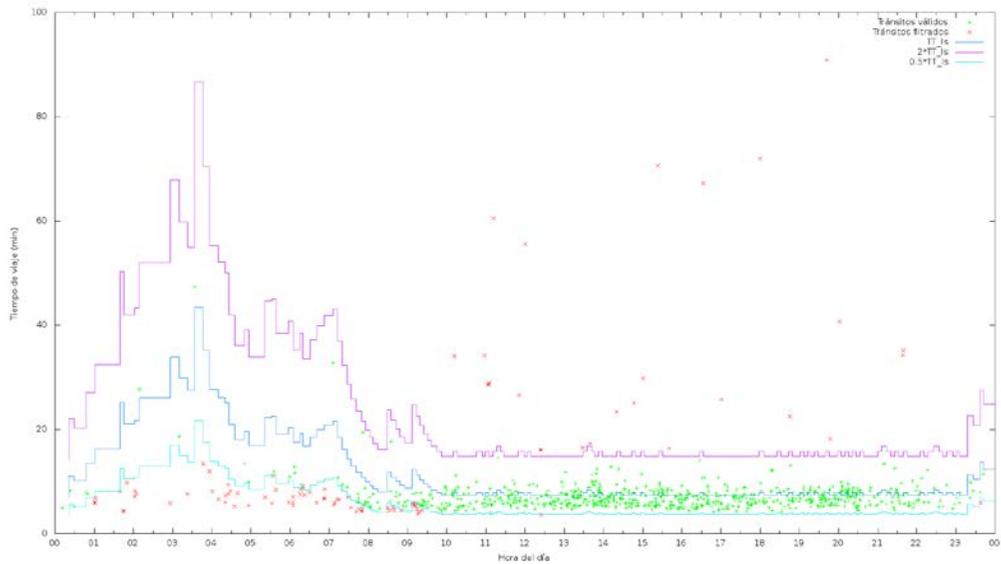


Imagen 186: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  con ajuste Km/h SBT 2 – SBT1

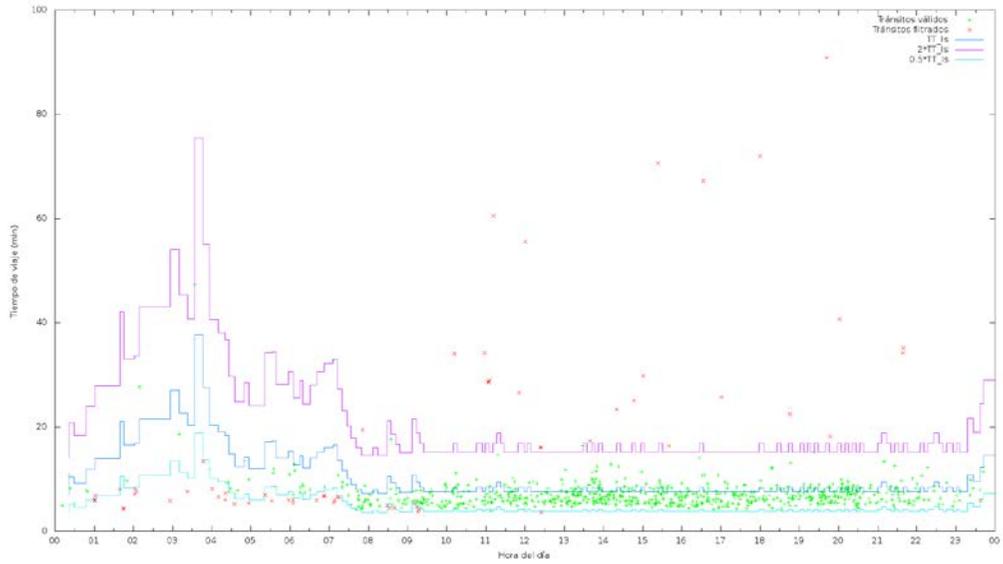


Imagem 187: Classificação trânsitos com algoritmo  $\alpha = 5$  com ajuste Km/h SBT 2 – SBT1

**Situación normal de tráfico SBT 1- SBT 7**

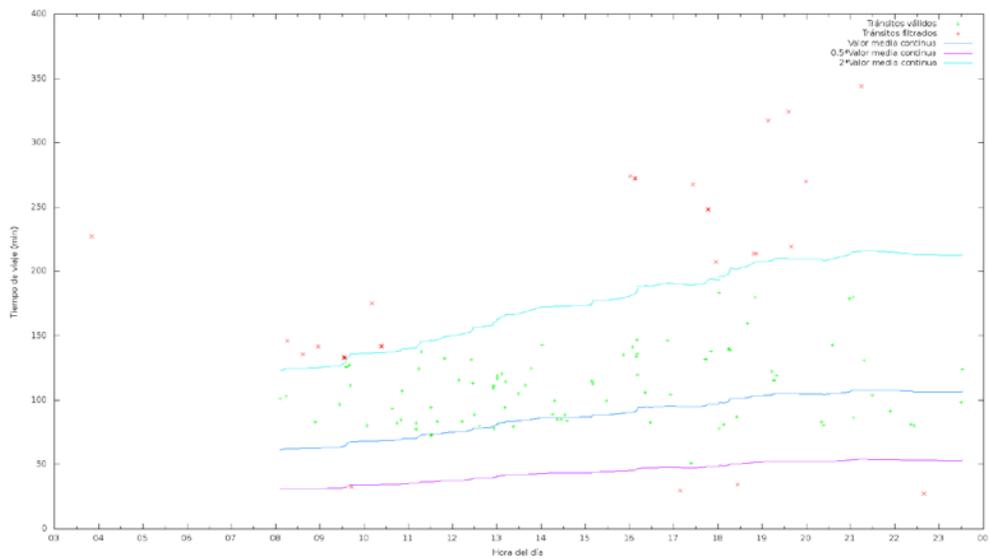


Imagem 188: Classificação trânsitos com algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 1 – SBT7

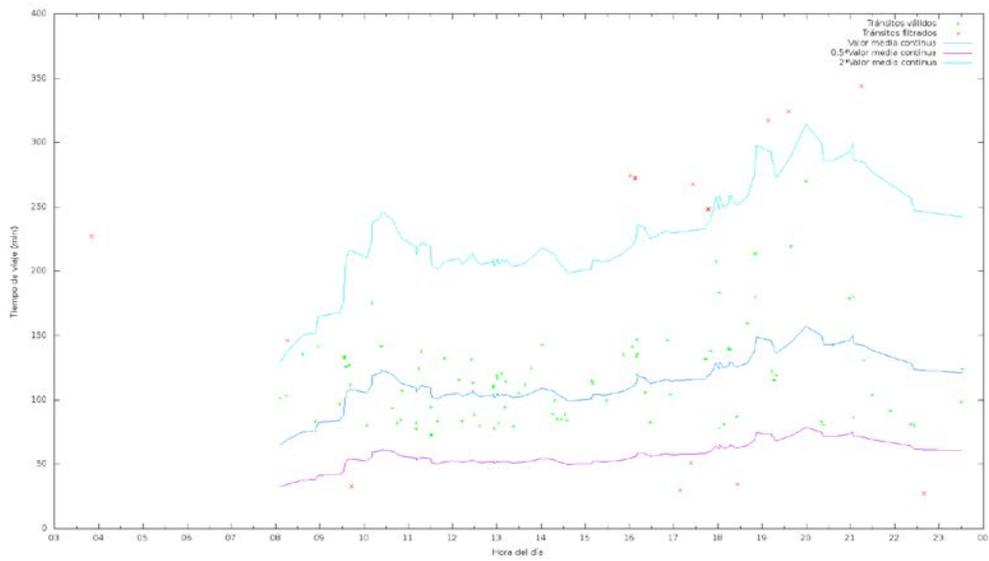


Imagen 189: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 1 – SBT7

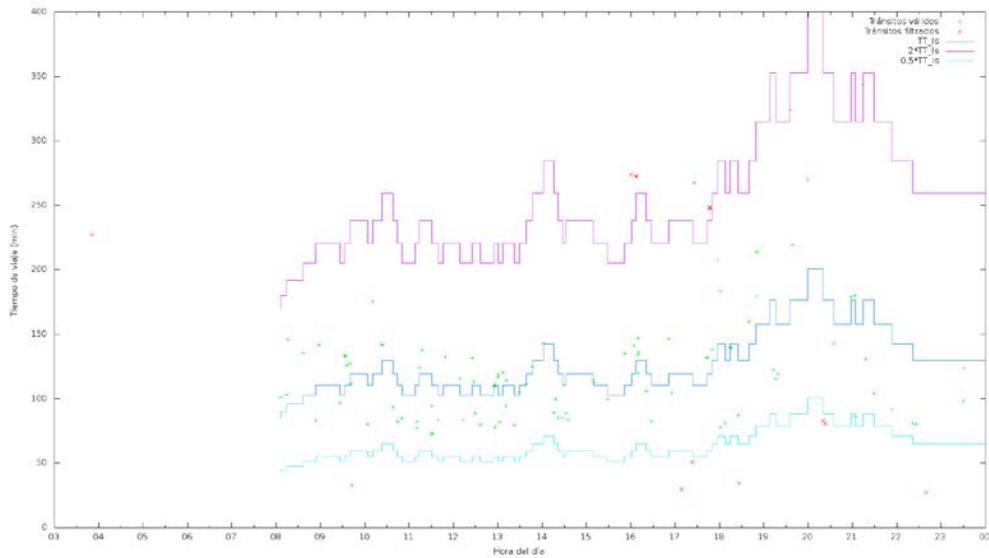


Imagen 190: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 1 – SBT7

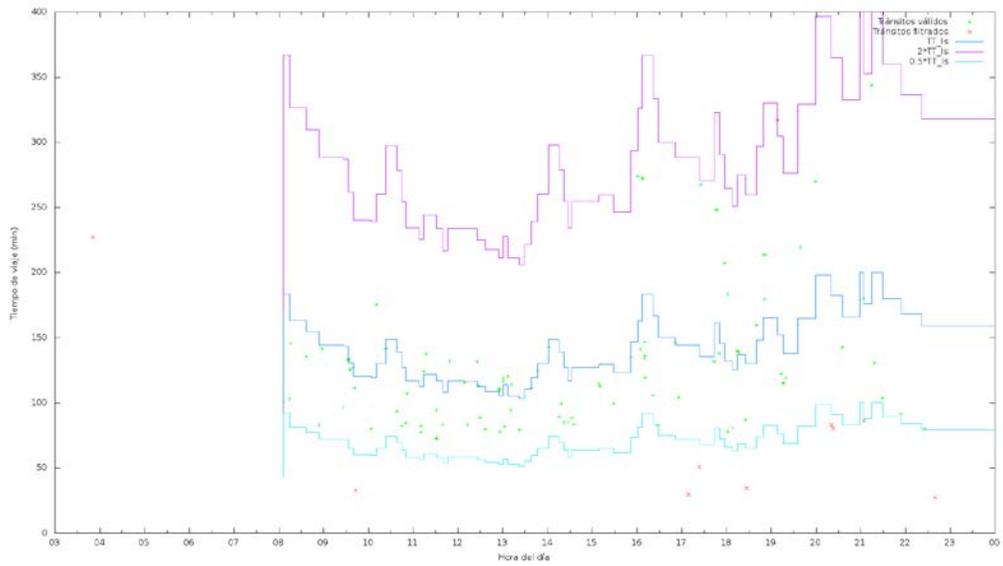


Imagen 191: Clasificación transitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 1 – SBT7

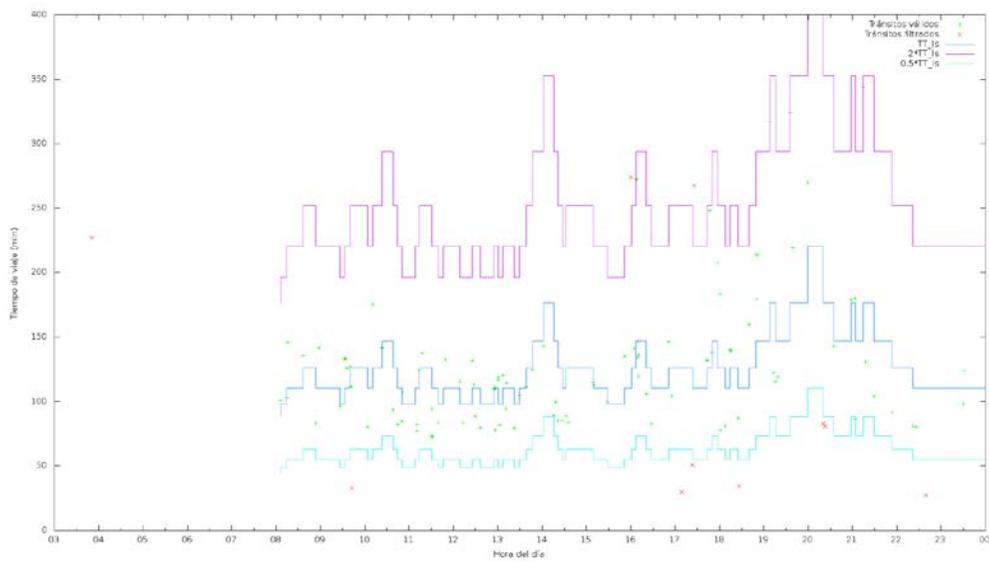


Imagen 192: Clasificación transitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 1 – SBT7

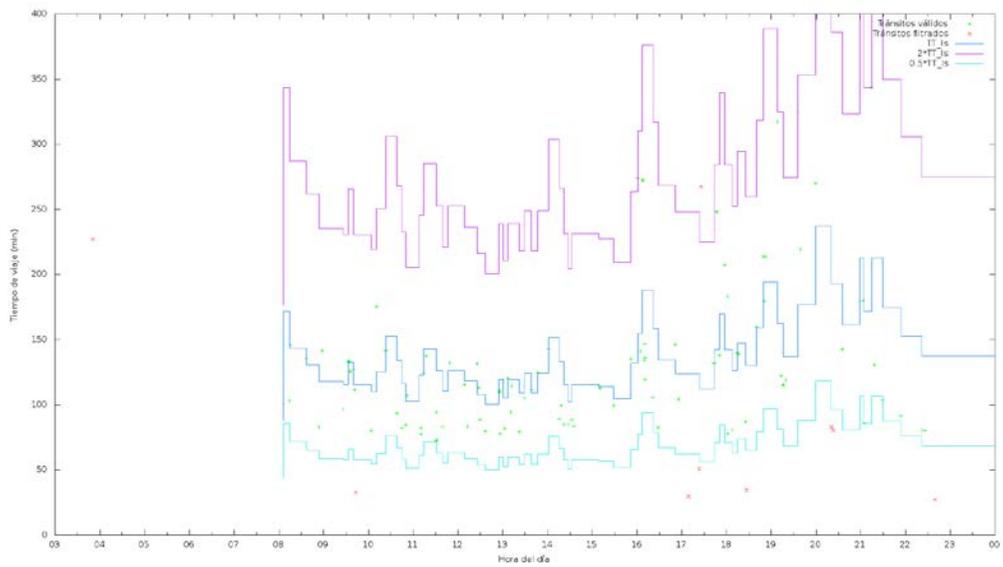


Imagen 193: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  con ajuste SBT 1 – SBT7

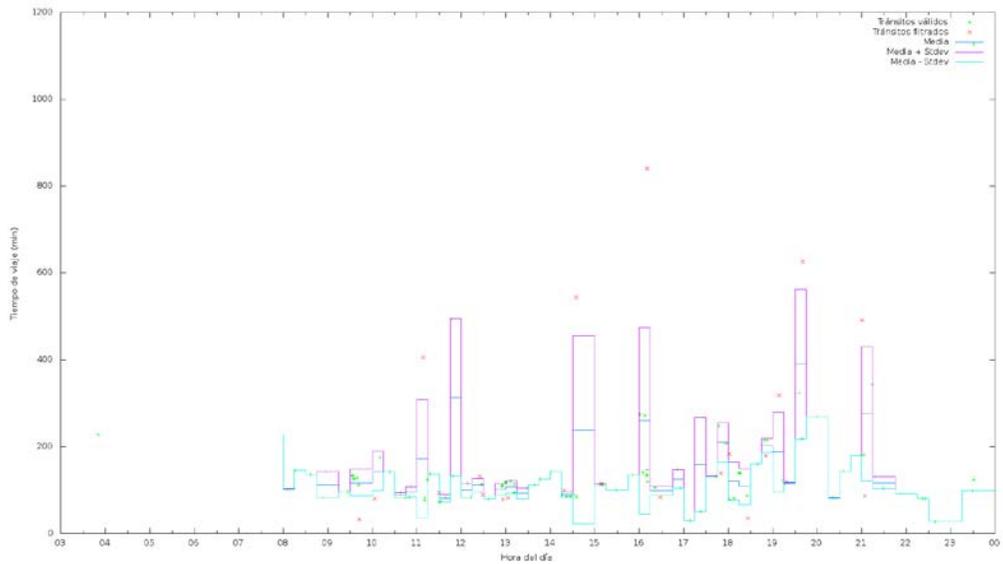
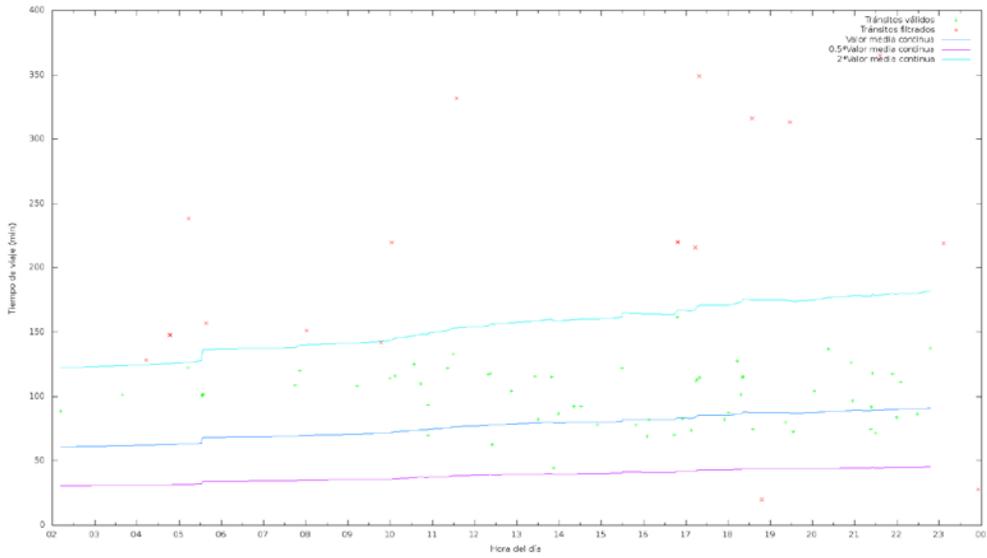
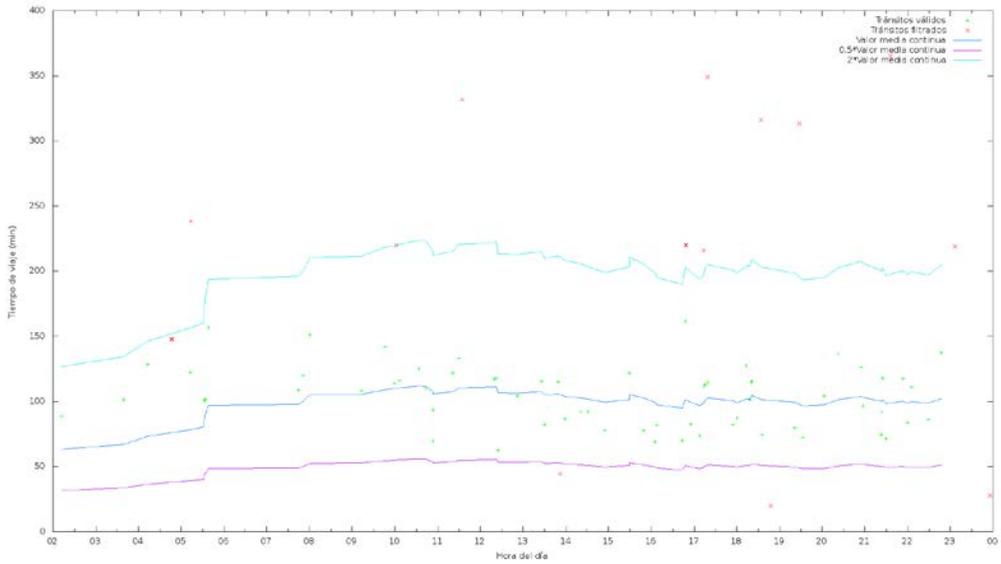


Imagen 194: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 1 – SBT7

**Situación normal de tráfico SBT 7- SBT 1**



*Imagen 195: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 7 – SBT 1*



*Imagen 196: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 7 – SBT 1*

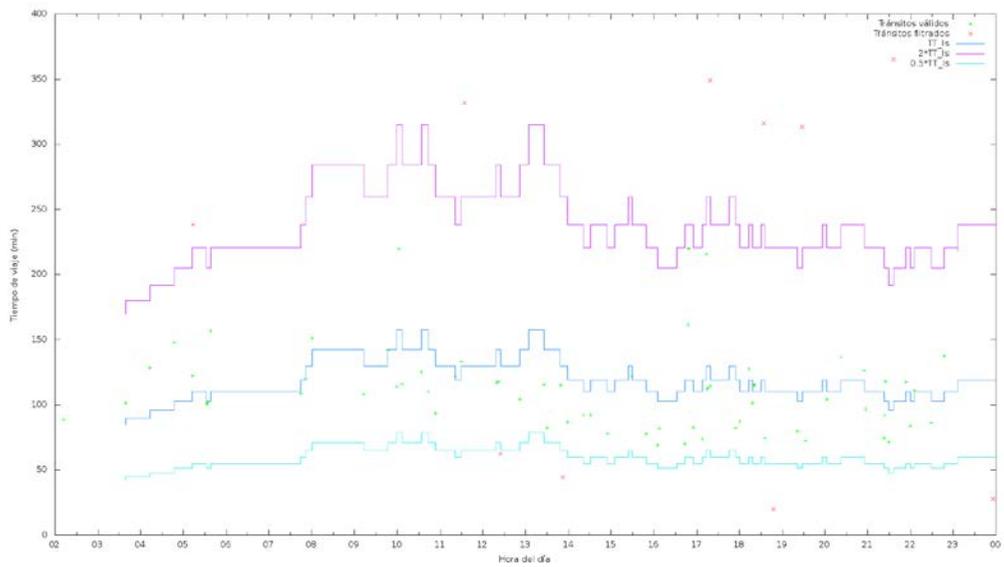


Imagem 197: Classificação tráfego com algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  sem ajuste SBT 7 – SBT 1

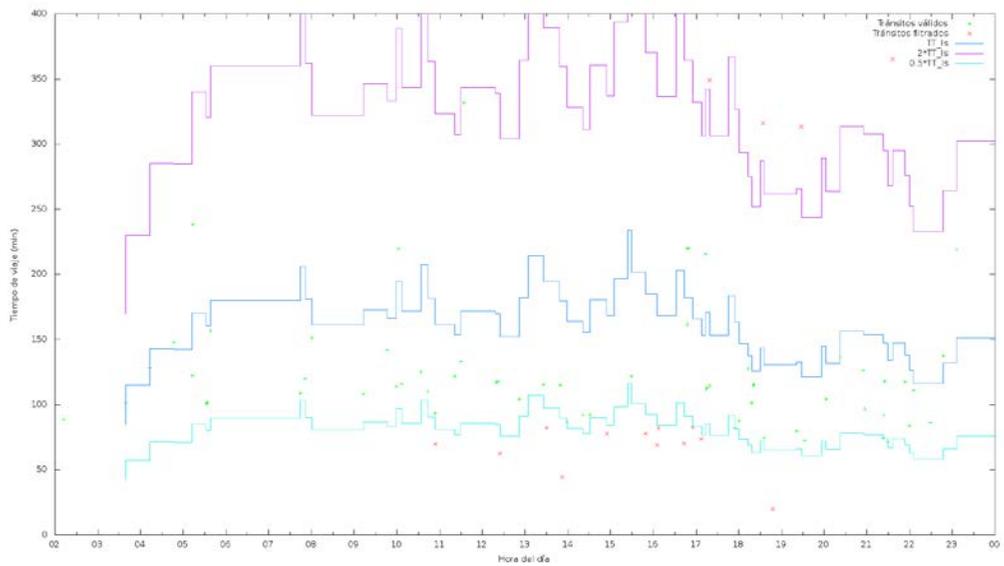


Imagem 198: Classificação tráfego com algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  com ajuste SBT 7 – SBT 1

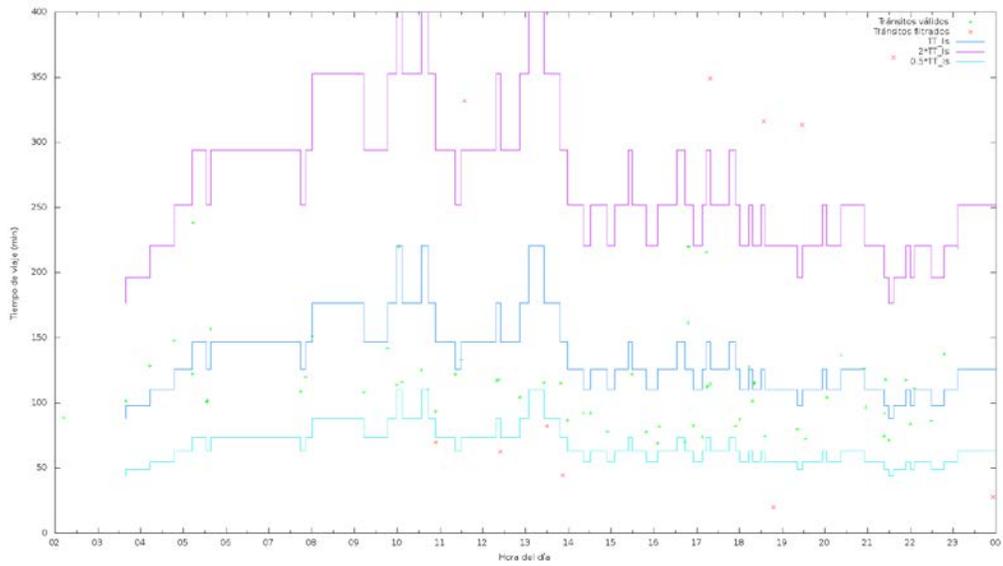


Imagen 199: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 1

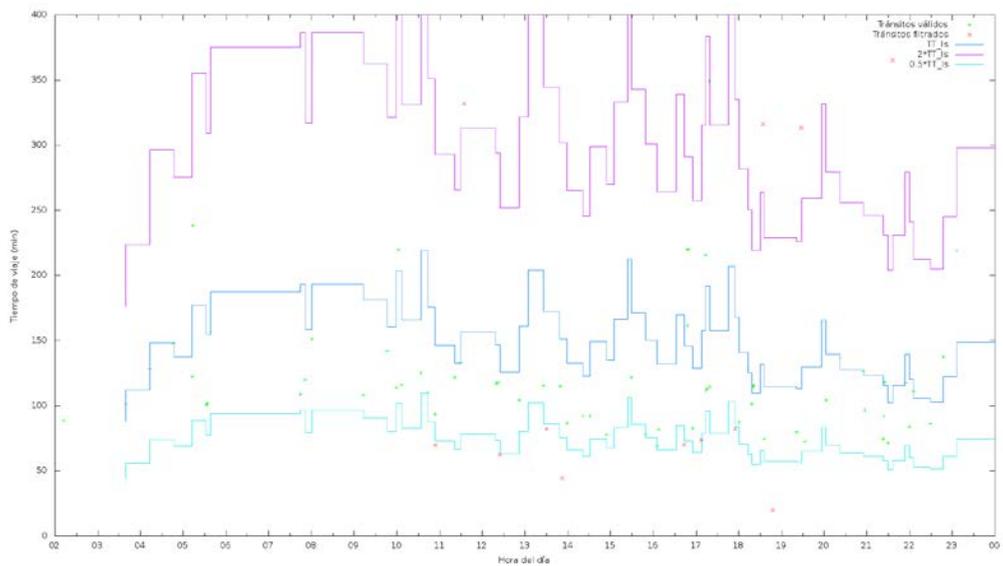


Imagen 200: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 1

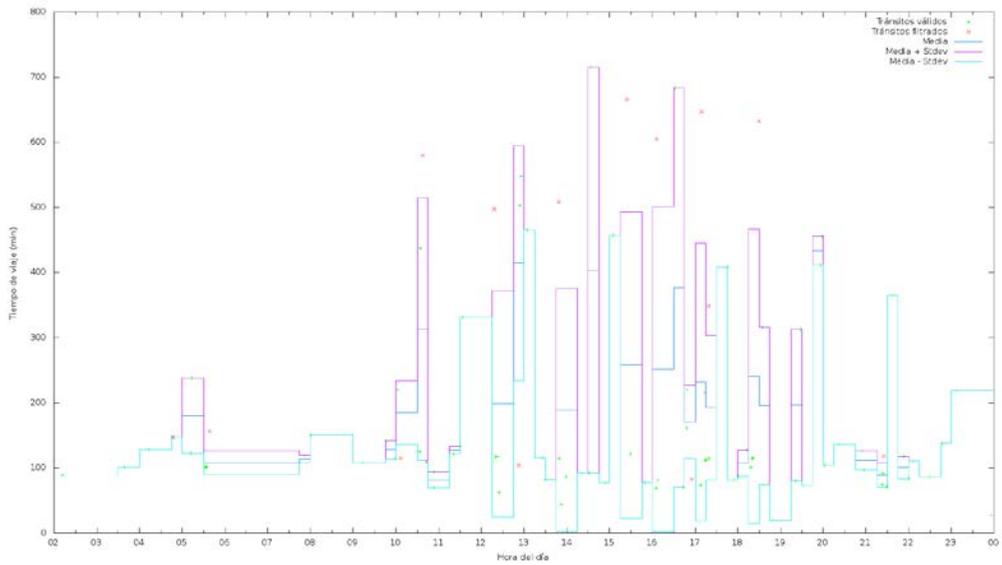


Imagen 201: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 7 – SBT 1

**Situación normal de tráfico SBT 2- SBT 7**

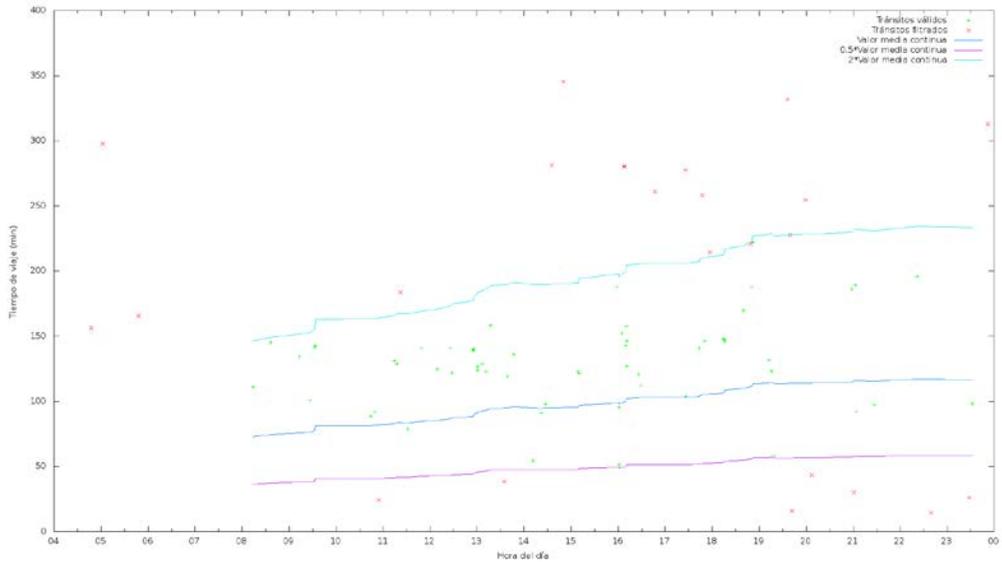


Imagen 202: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 2 – SBT 7

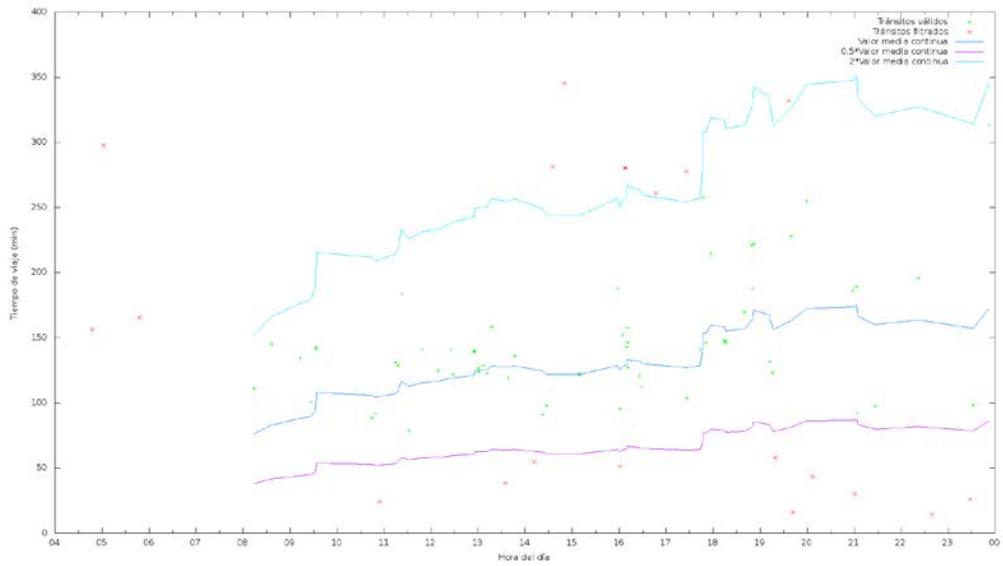


Imagem 203: Classificação trânsitos com algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 2 – SBT 7

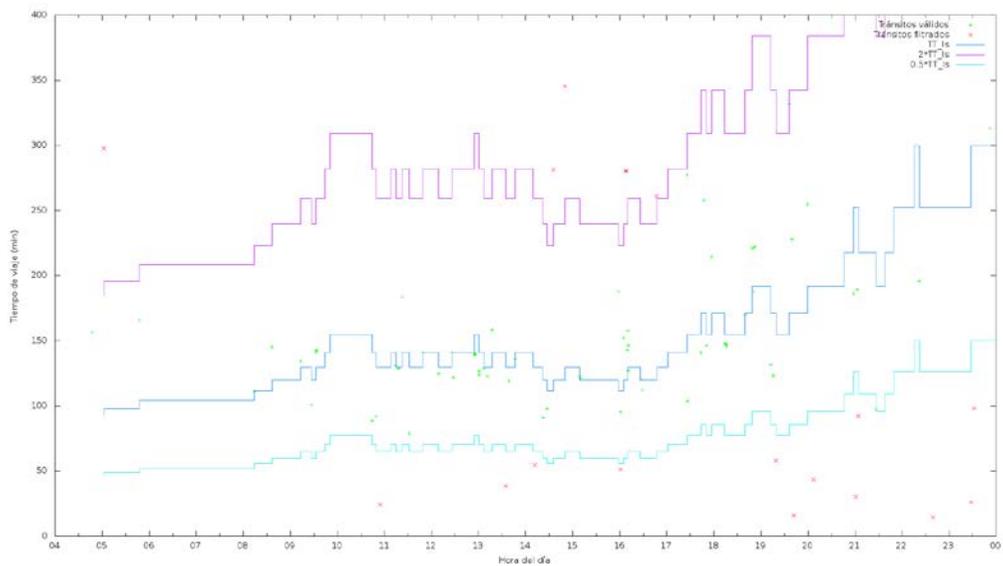


Imagem 204: Classificação trânsitos com algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 2 – SBT 7

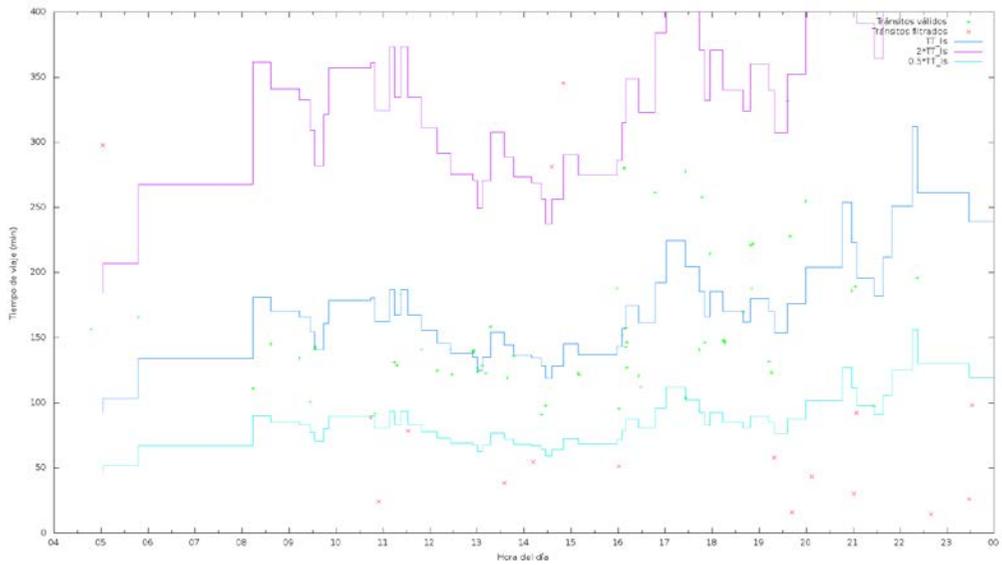


Imagen 205: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  con ajuste SBT 2 – SBT 7

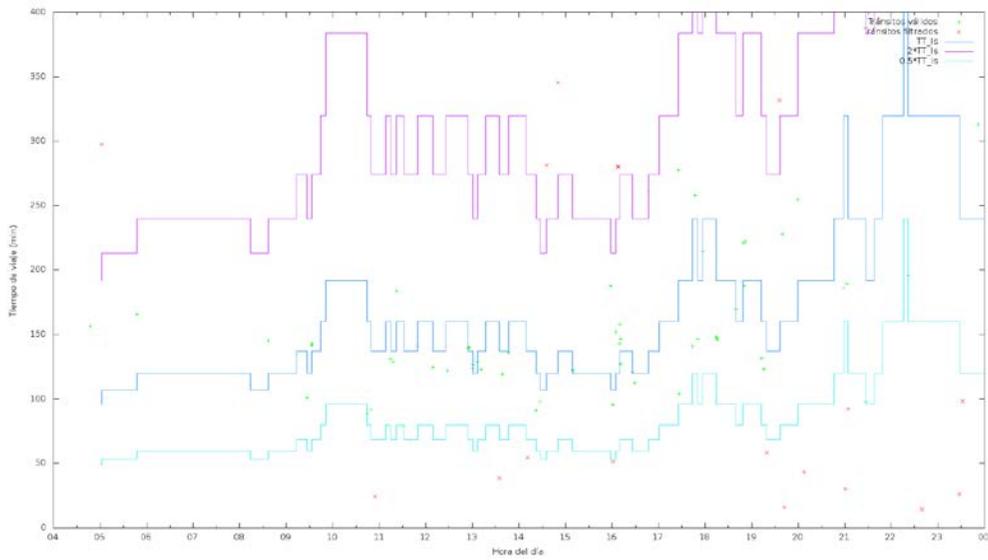


Imagen 206: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  sin ajuste SBT 2 – SBT 7

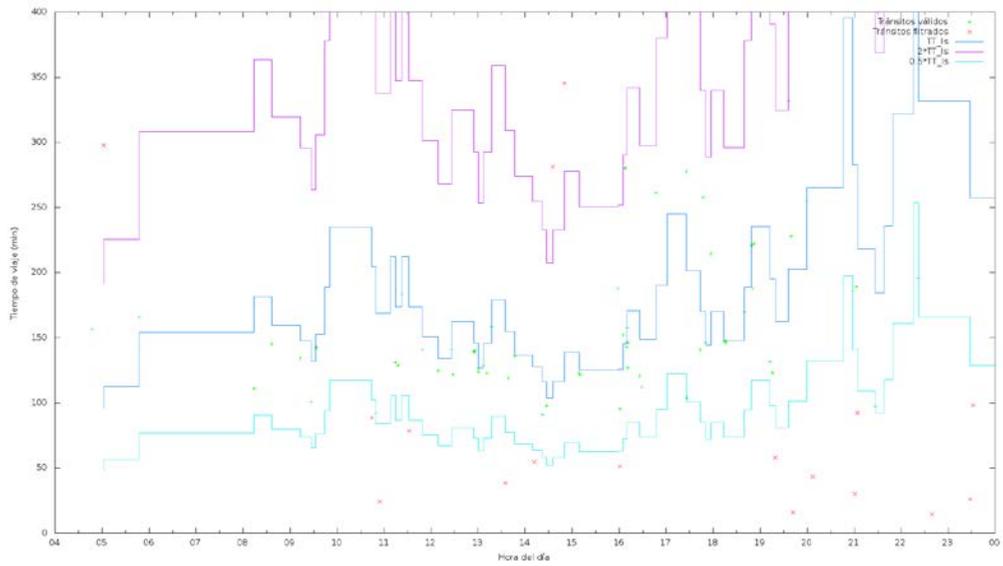


Imagen 207: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 2 – SBT 7

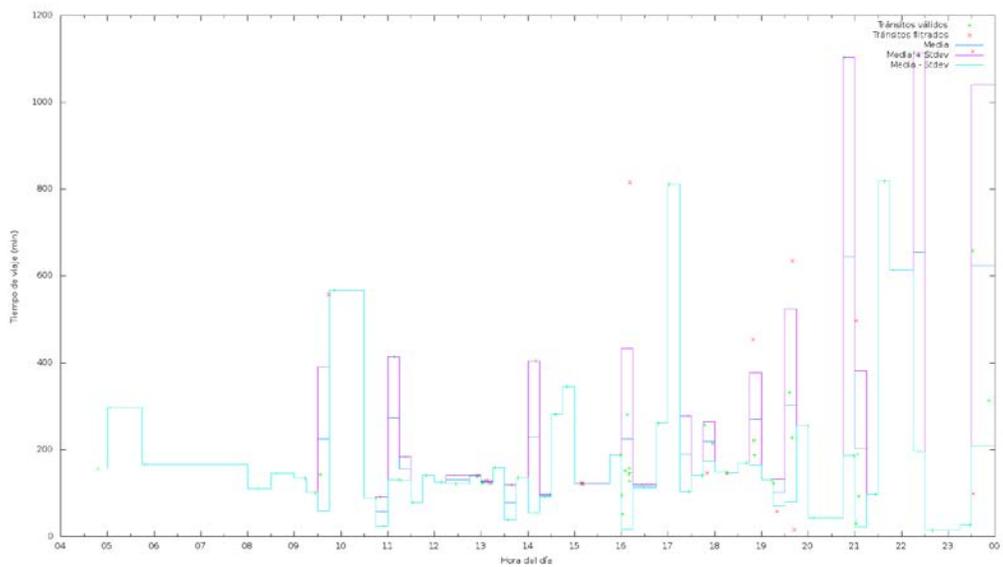
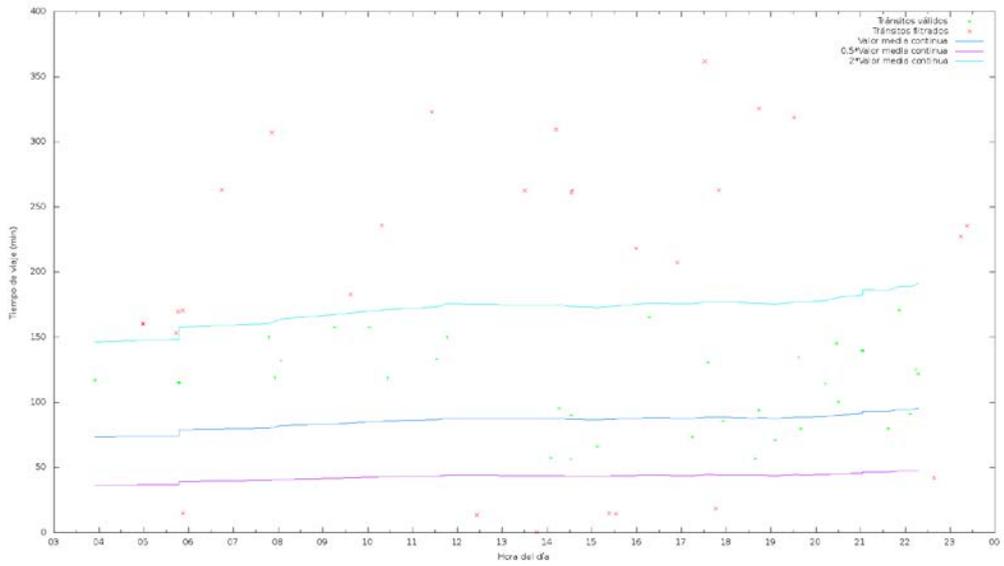
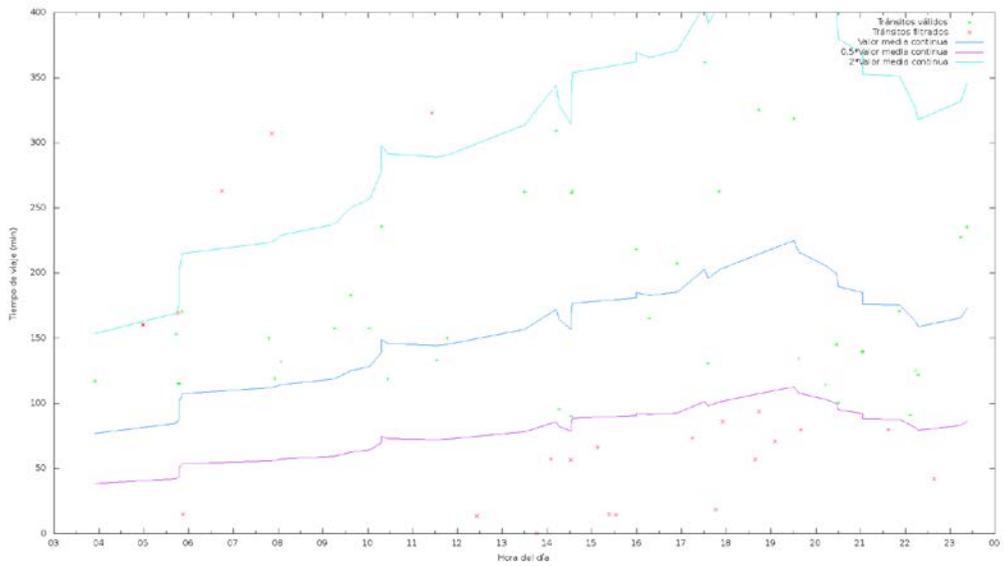


Imagen 208: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 2 – SBT 7

**Situación normal de tráfico SBT 7- SBT 2**



*Imagen 209: Clasificación transitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 7 – SBT 2*



*Imagen 210: Clasificación transitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 7 – SBT 2*

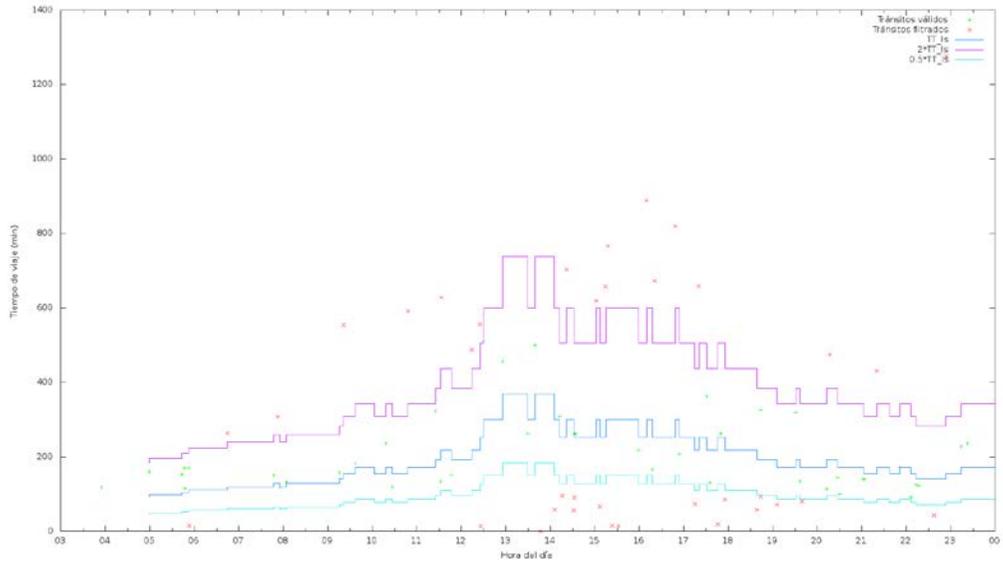


Imagen 211: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 2

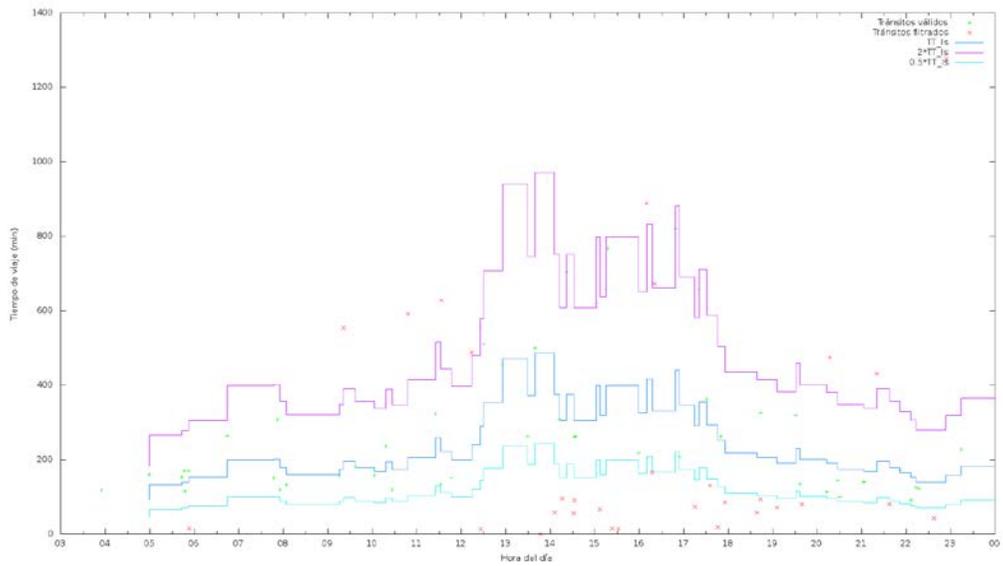


Imagen 212: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 2

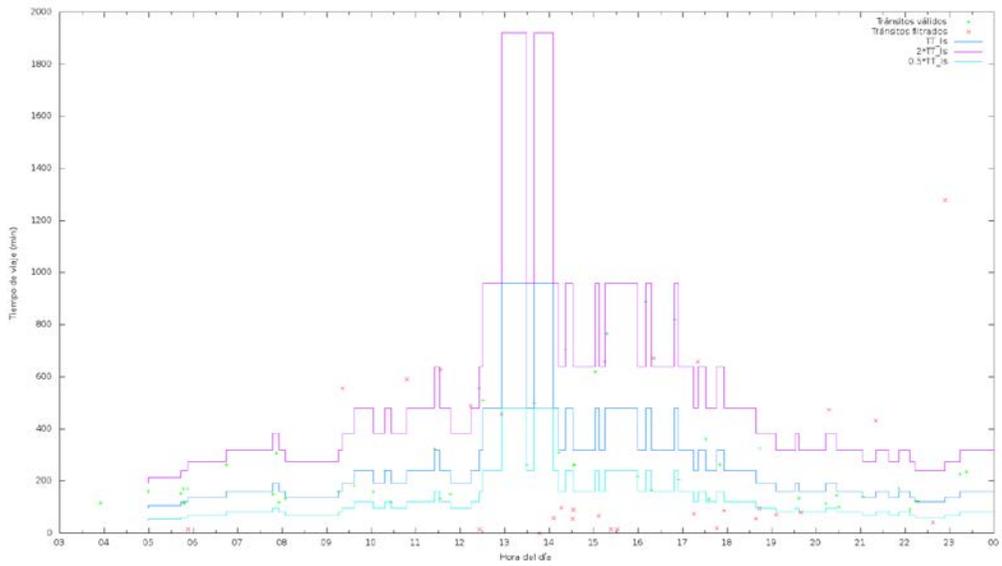


Imagen 213: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 2

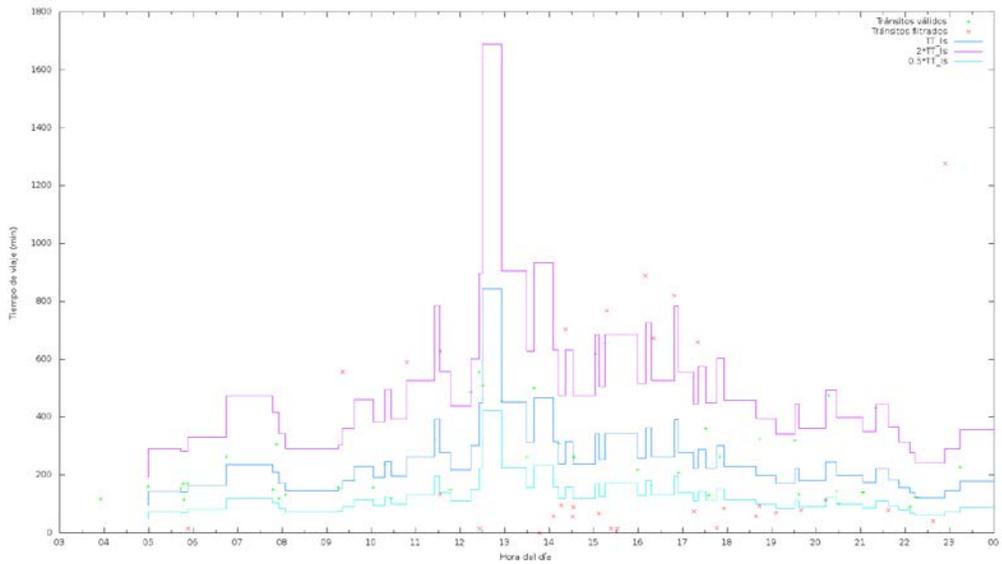


Imagen 214: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 2

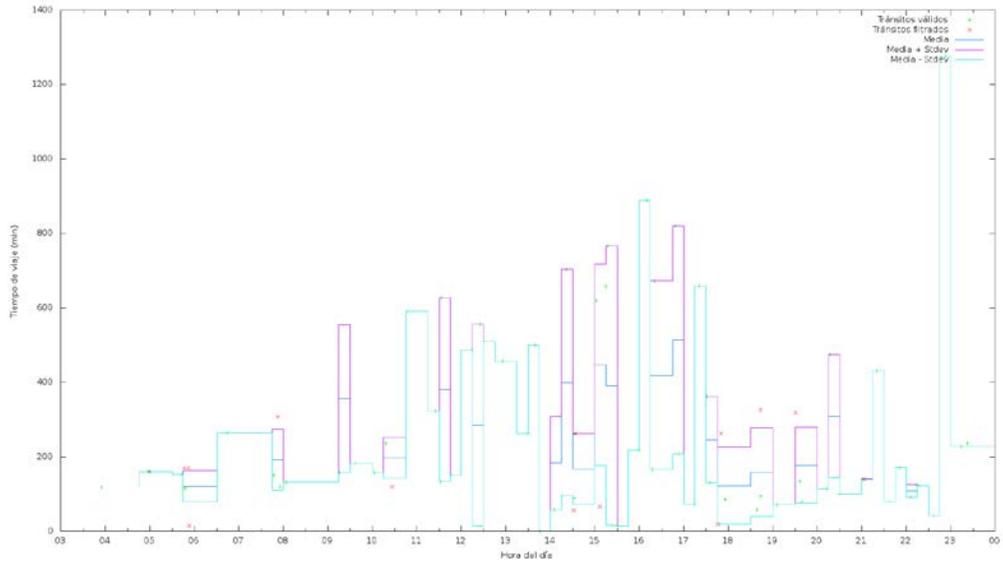


Imagem 215: Classificação trânsitos com algoritmo  $\sigma$  SBT 7 – SBT 2

**Situação normal de tráfico SBT 1- SBT 6**

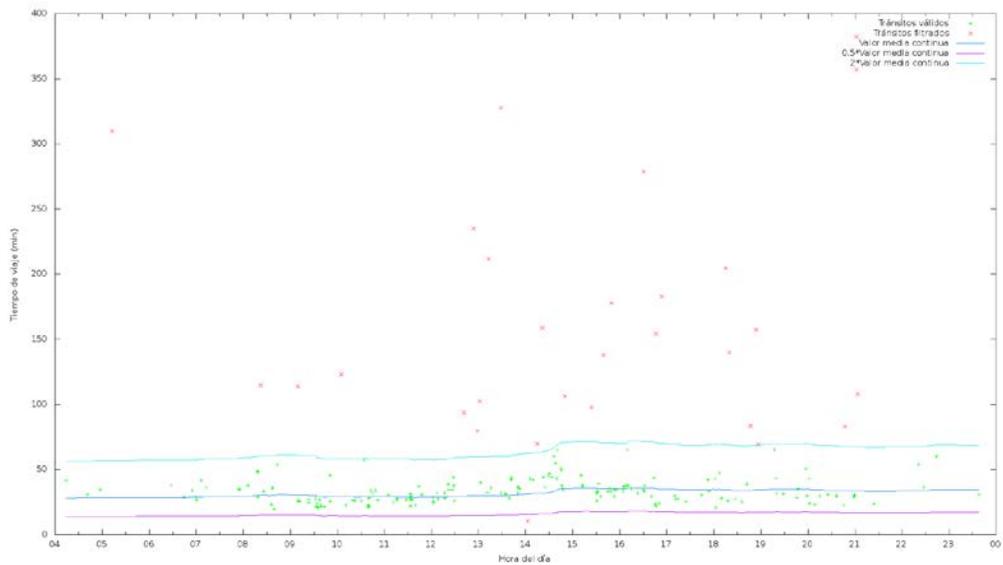


Imagem 216: Classificação trânsitos com algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 1 – SBT 6

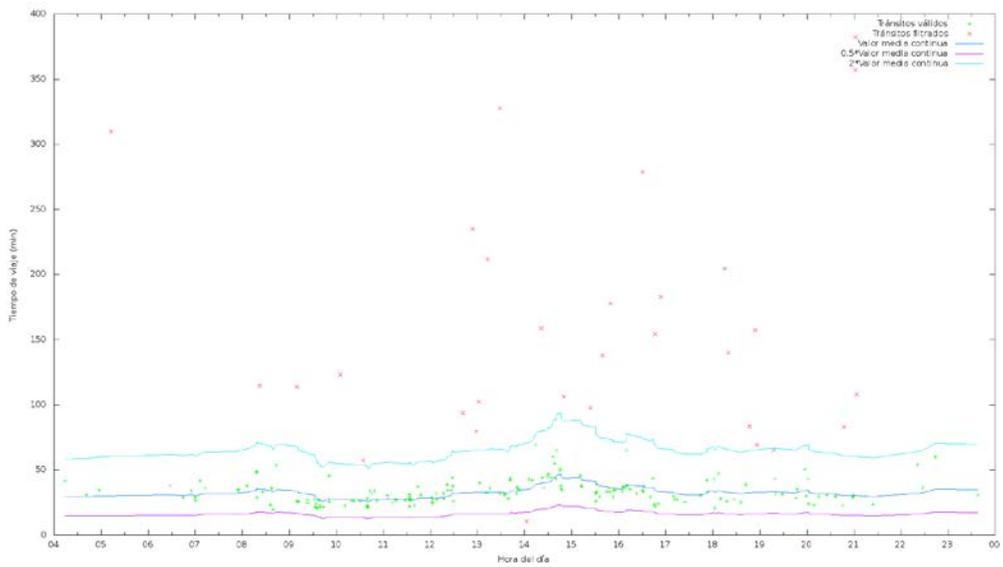


Imagen 217: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 1 – SBT 6

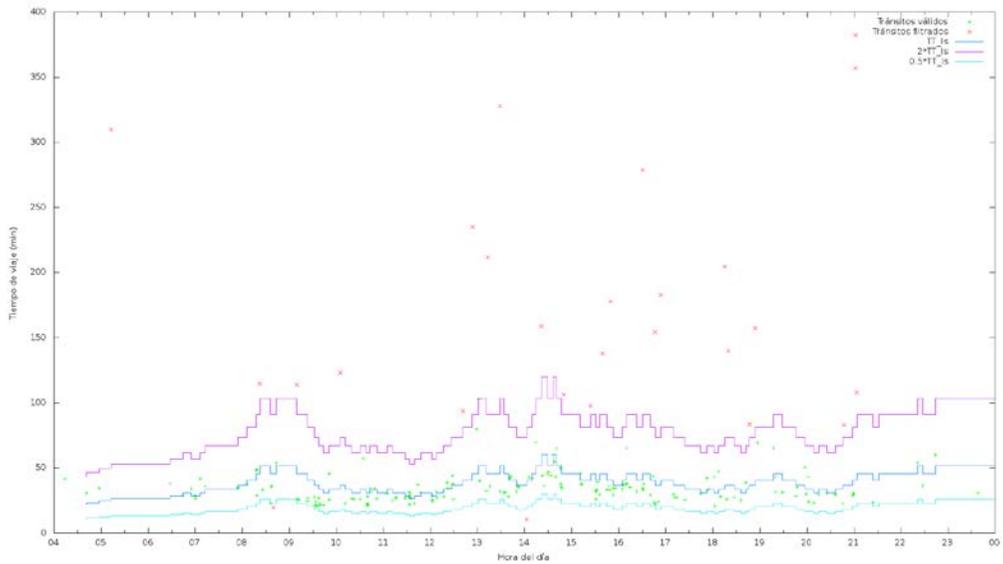


Imagen 218: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 1 – SBT 6

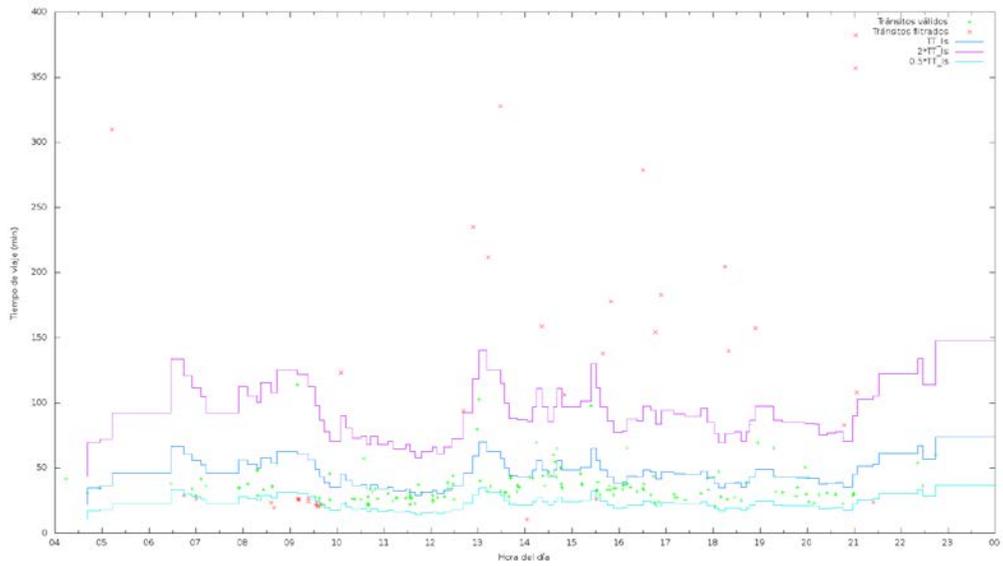


Imagem 219: Classificação trânsitos com algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  com ajuste SBT 1 – SBT 6

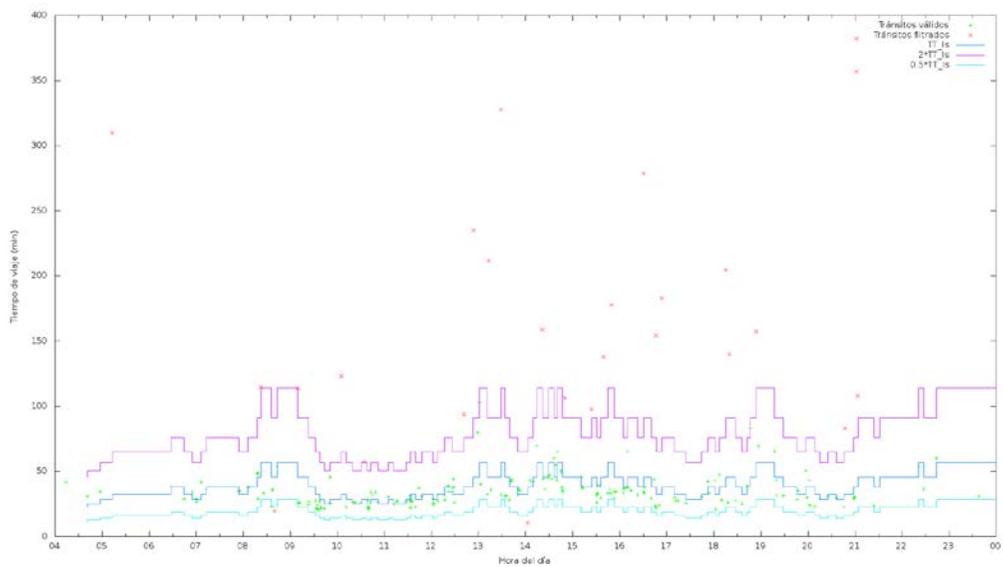


Imagem 220: Classificação trânsitos com algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  sin ajuste SBT 1 – SBT 6

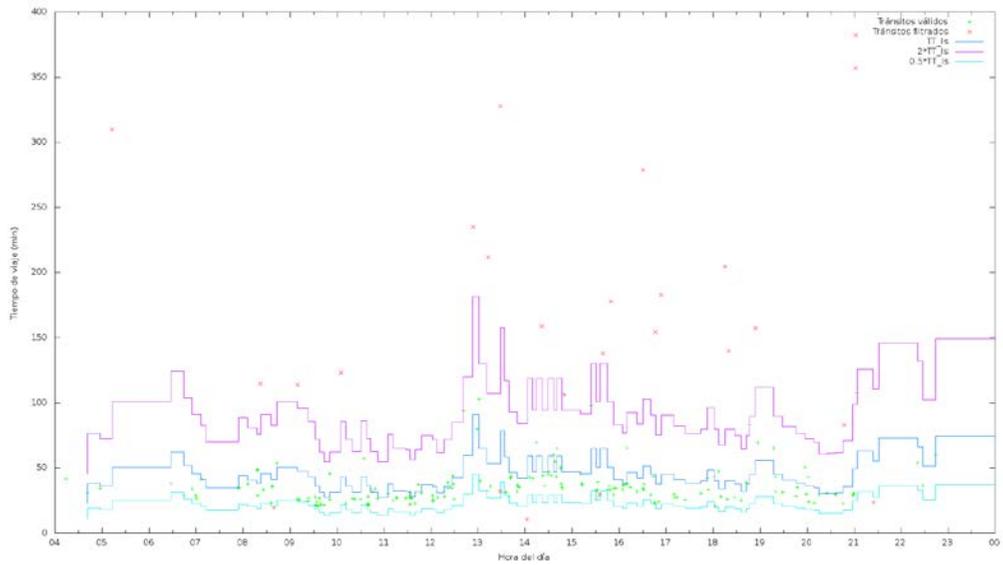


Imagen 221: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  con ajuste SBT 1 – SBT 6

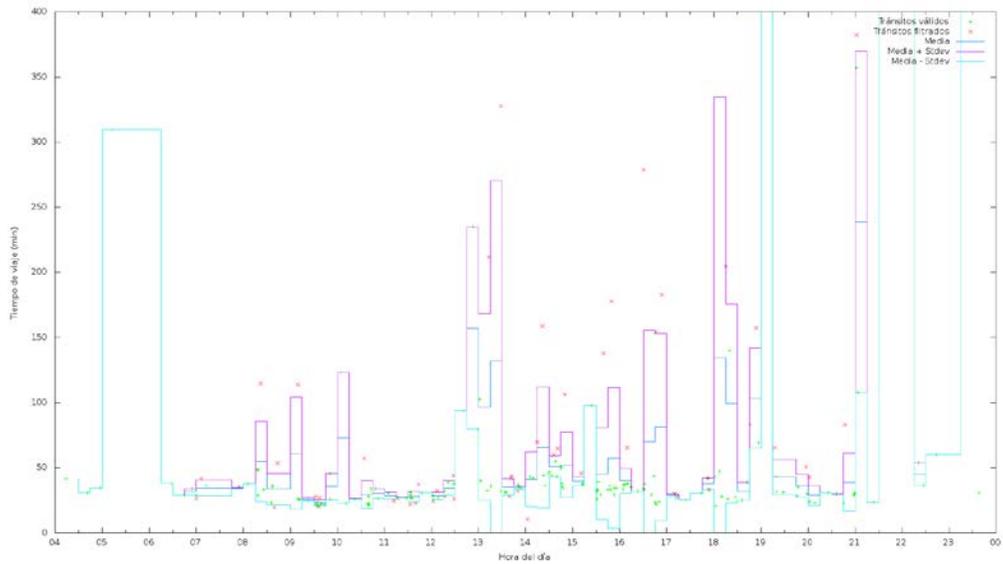
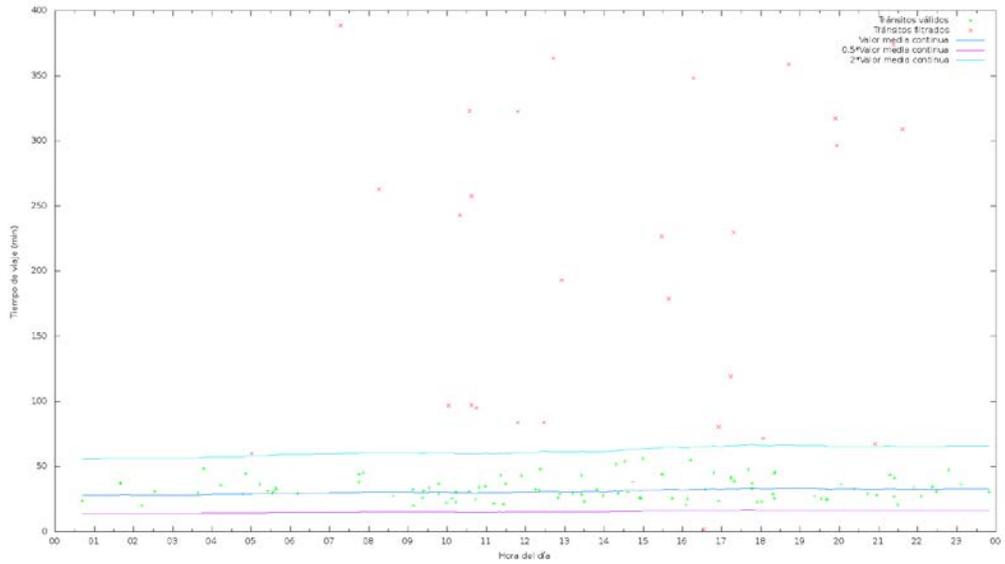
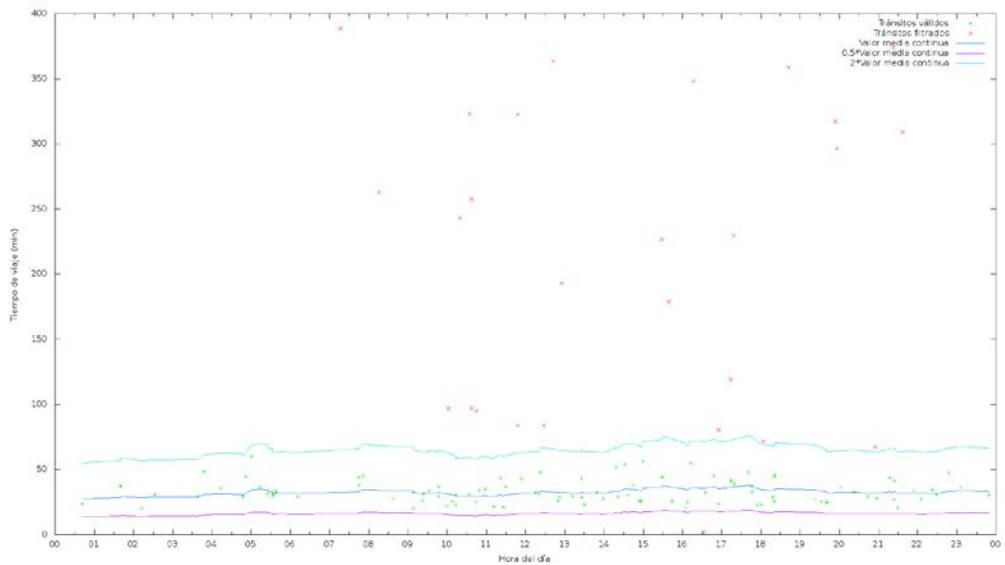


Imagen 222: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 1 – SBT 6

**Situación normal de tráfico SBT 6- SBT 1**



*Imagen 223: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 6 – SBT 1*



*Imagen 224: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 6 – SBT 1*

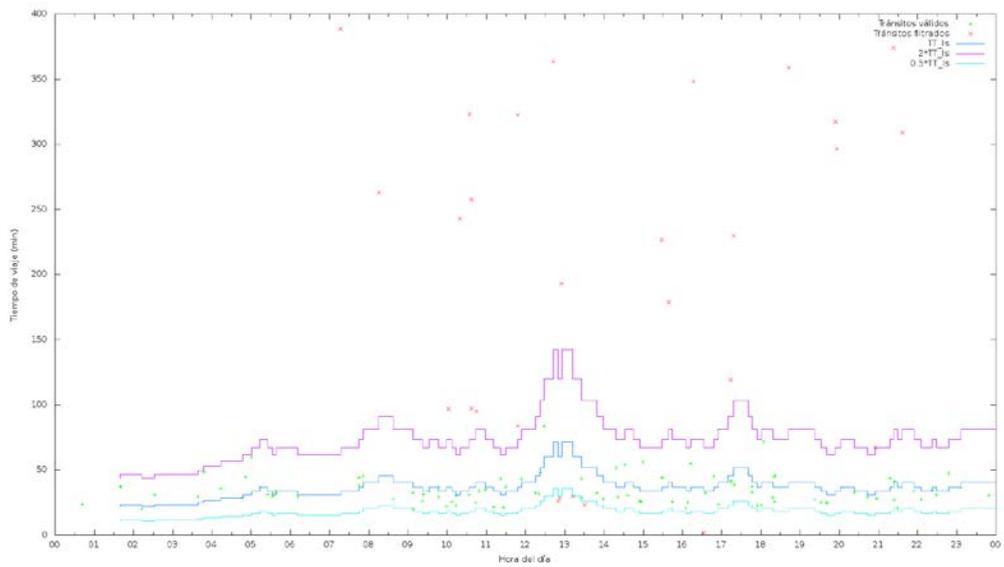


Imagem 225: Classificação trânsitos com algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  sin ajuste SBT 6 – SBT 1

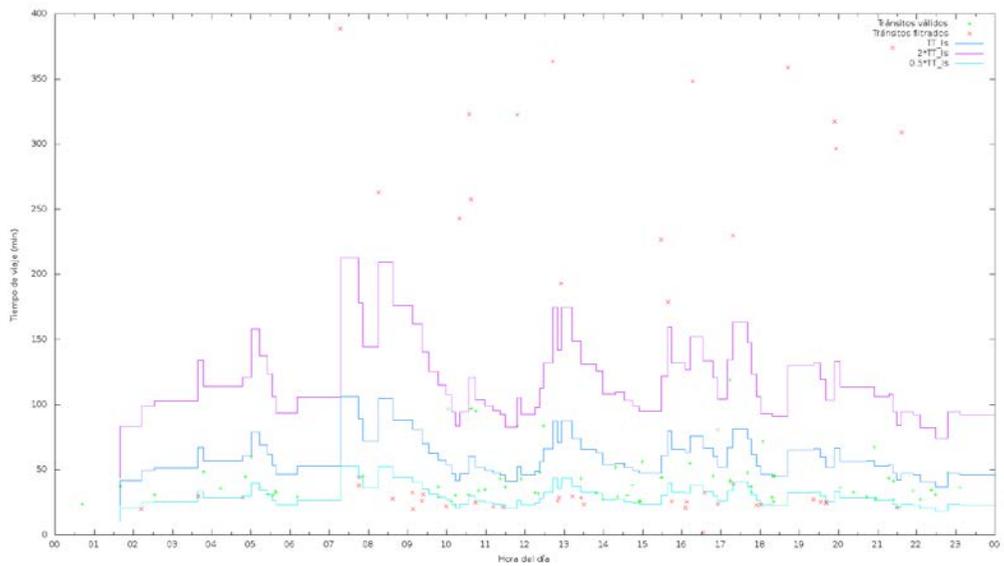


Imagem 226: Classificação trânsitos com algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  con ajuste SBT 6 – SBT 1

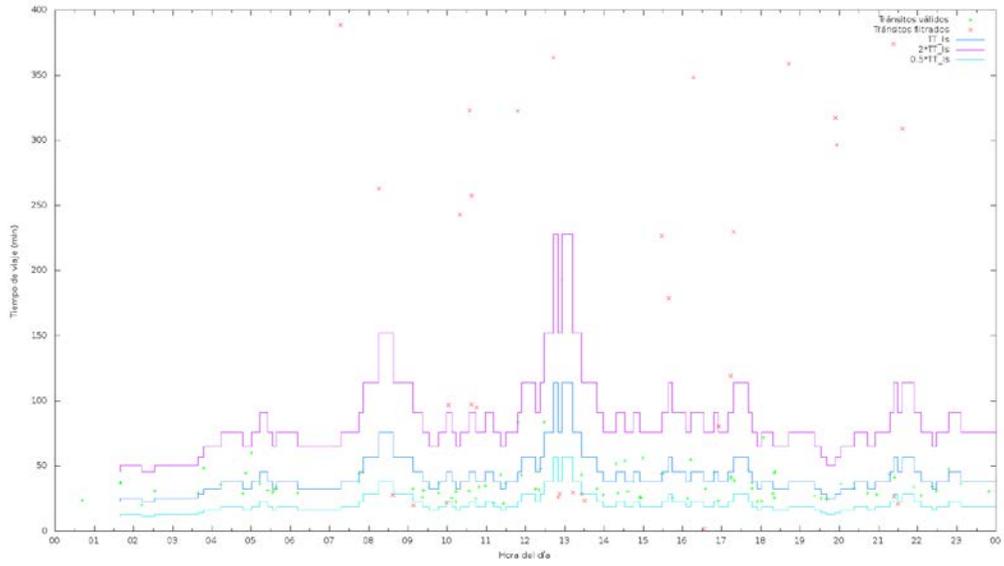


Imagen 227: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 1

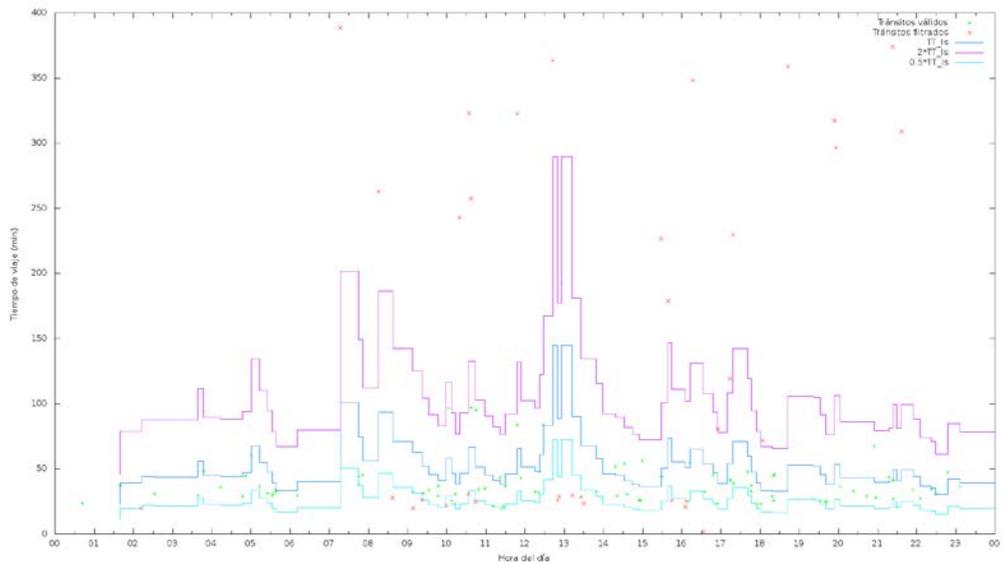


Imagen 228: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 6 – SBT 1

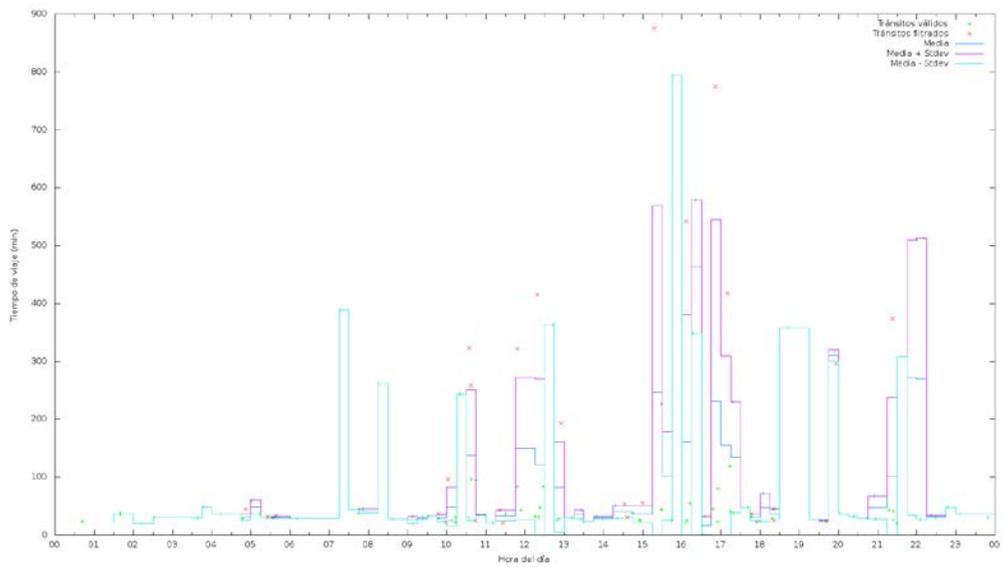


Imagem 229: Classificação trânsitos com algoritmo  $\sigma$  SBT 6 – SBT 1

**Situação normal de tráfico SBT 2- SBT 6**

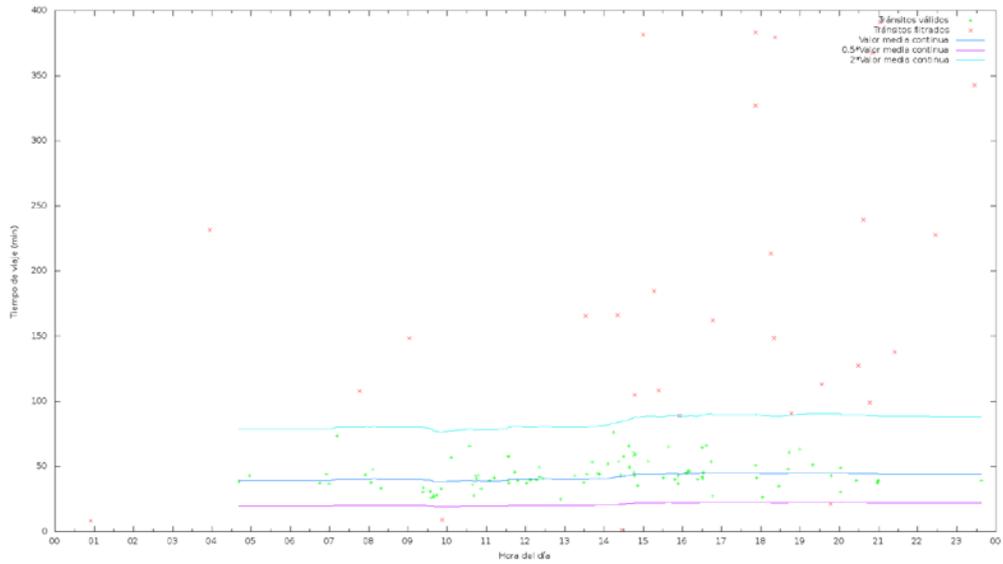


Imagem 230: Classificação trânsitos com algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 2 – SBT 6

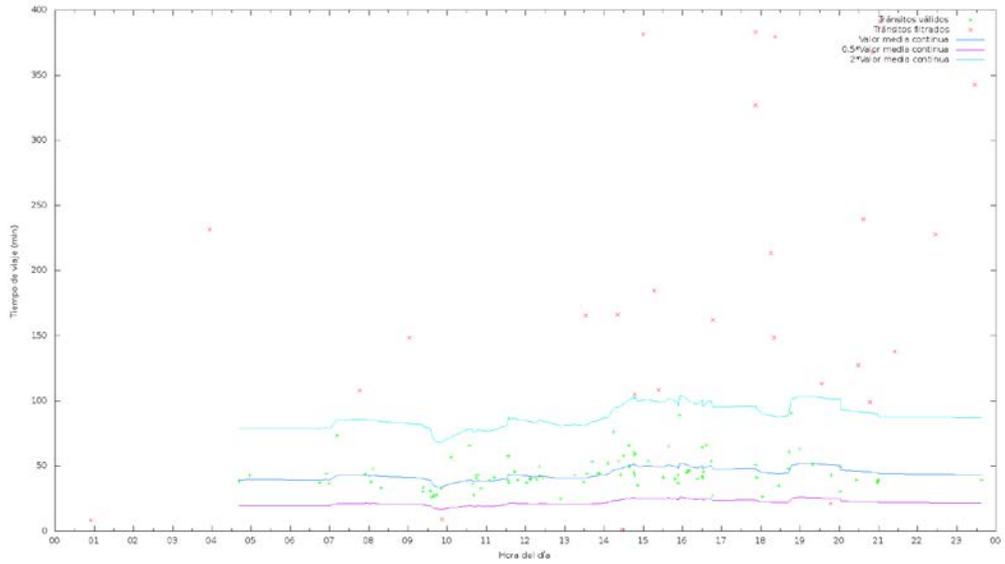


Imagen 231: Clasificación transitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 2 – SBT 6

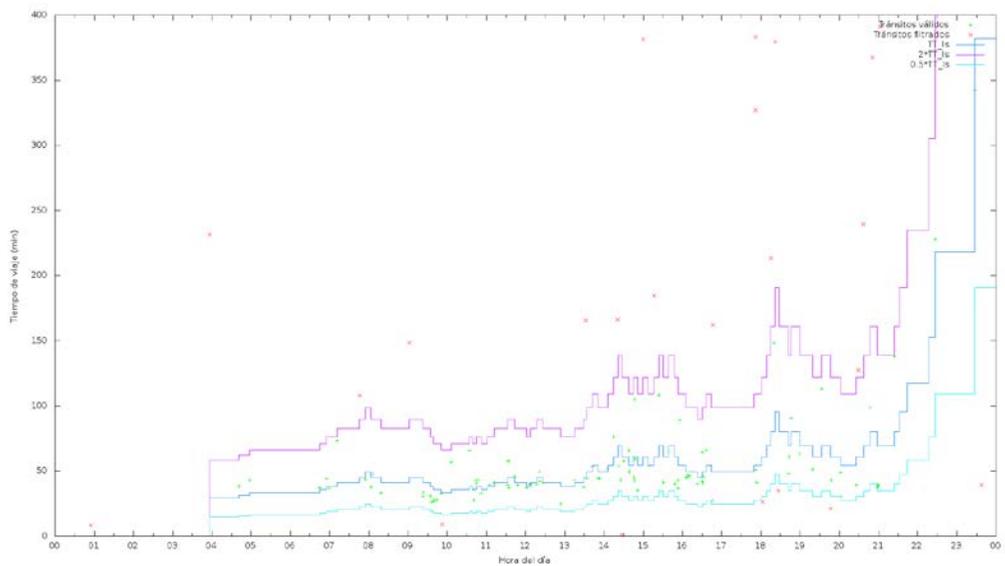


Imagen 232: Clasificación transitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 2 – SBT 6

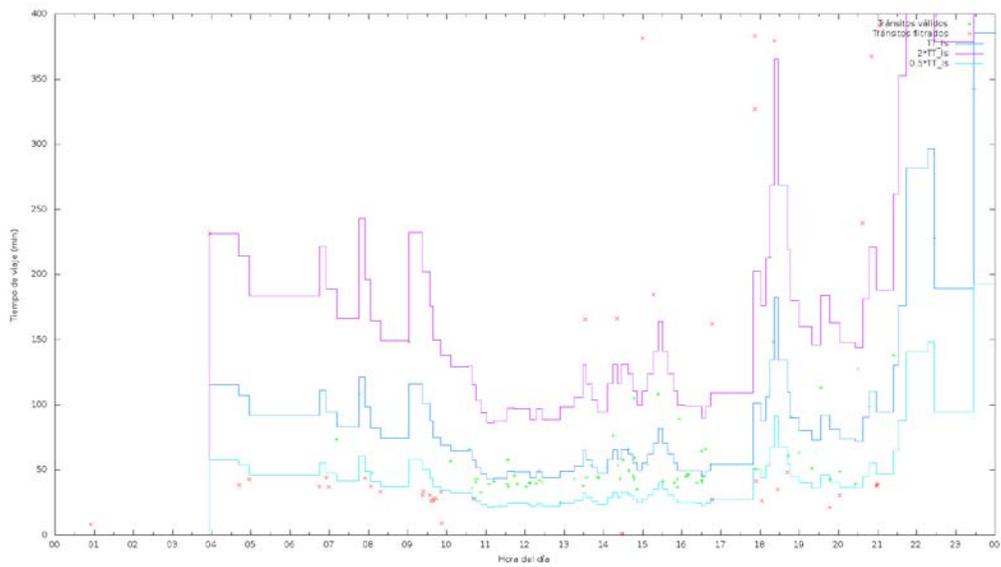


Imagem 233: Clasificación transitos con algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  con ajuste SBT 2 – SBT 6

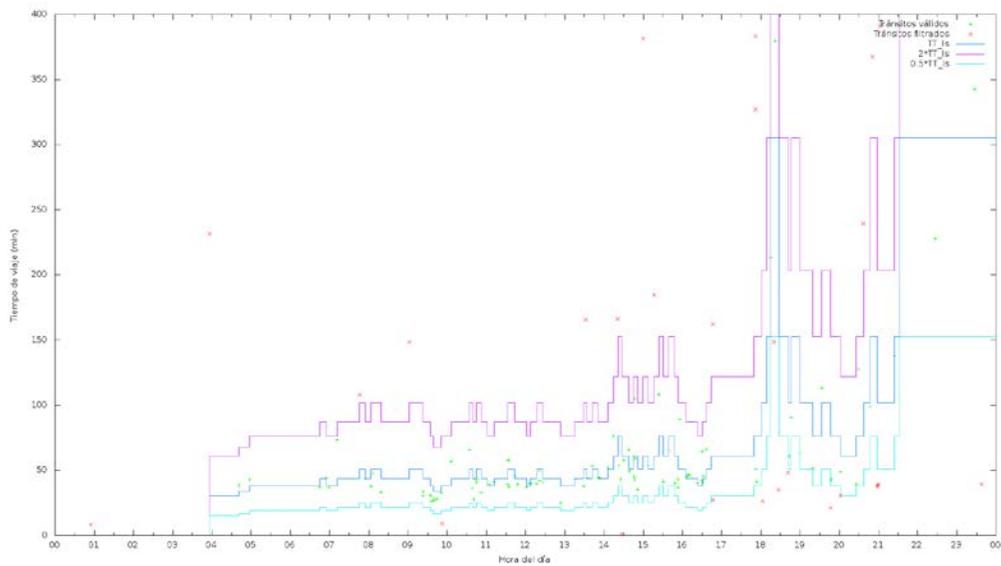


Imagem 234: Clasificación transitos con algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  sin ajuste SBT 2 – SBT 6

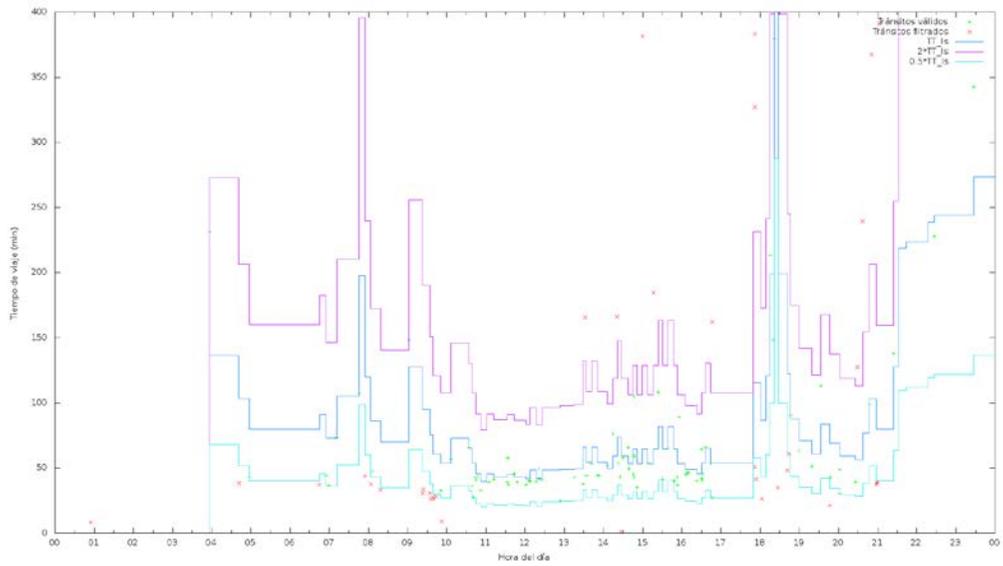


Imagen 235: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  con ajuste SBT 2 – SBT 6

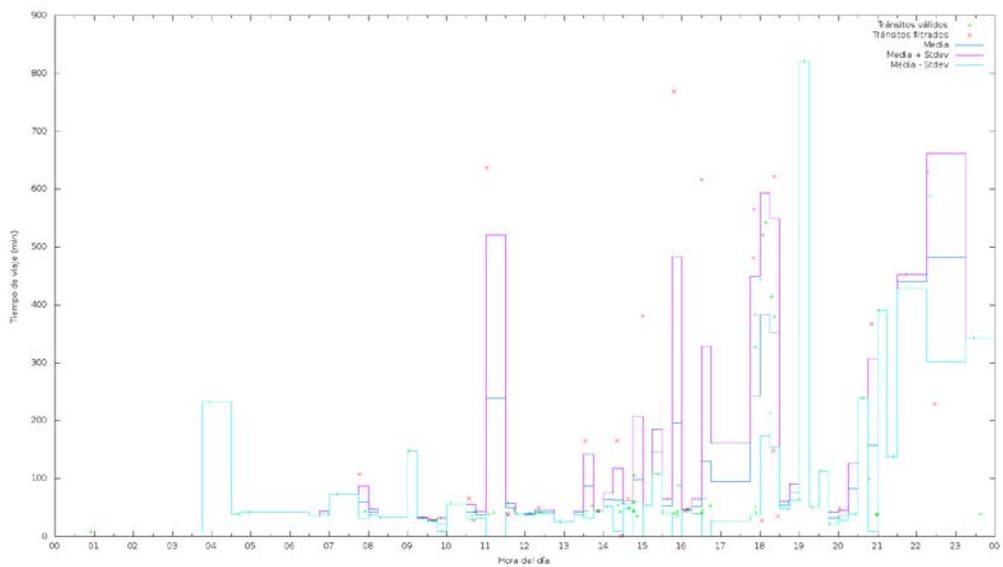
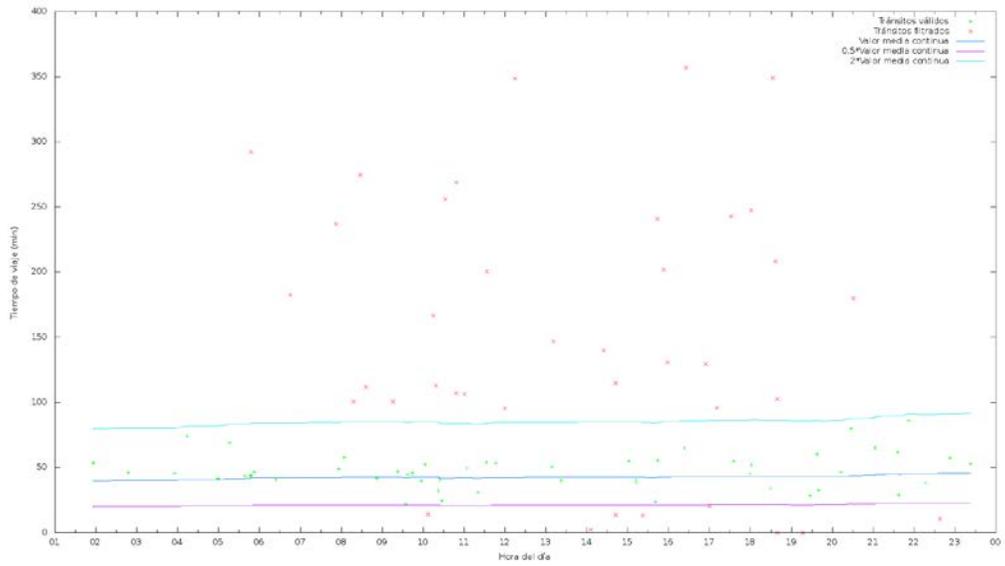
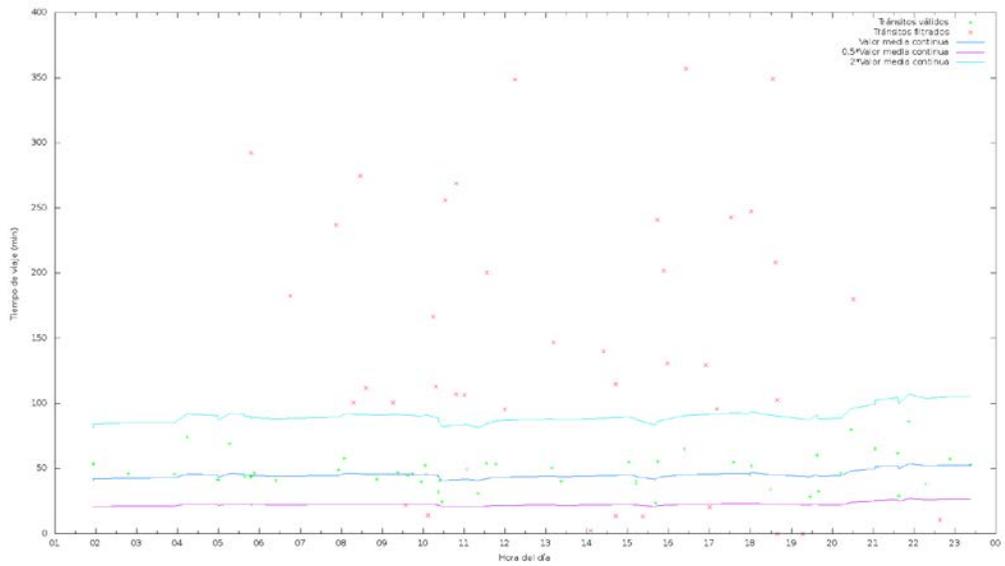


Imagen 236: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 2 – SBT 6

**Situación normal de tráfico SBT 6- SBT 2**



*Imagen 237: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 6 – SBT 2*



*Imagen 238: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 6 – SBT 2*

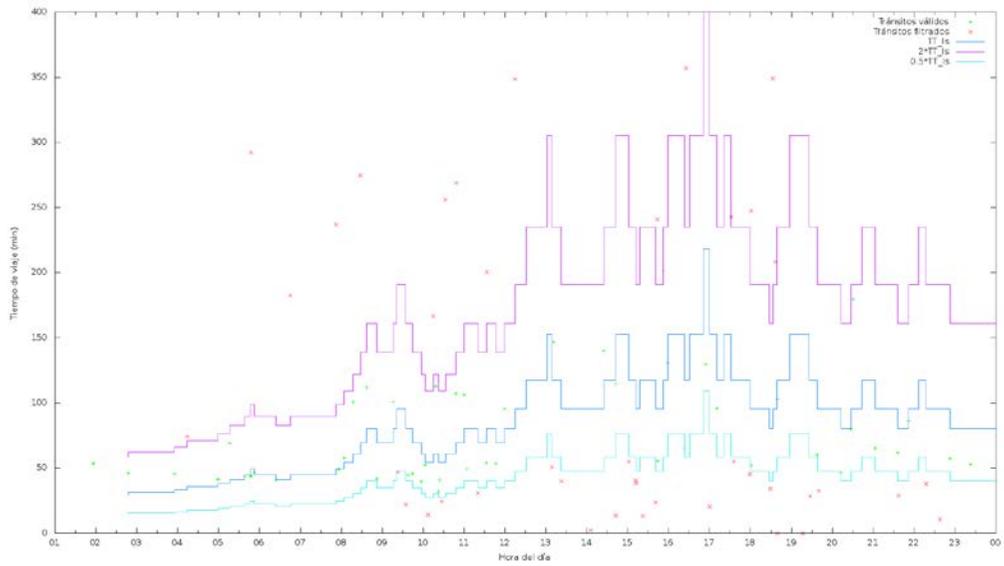


Imagen 239: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 2

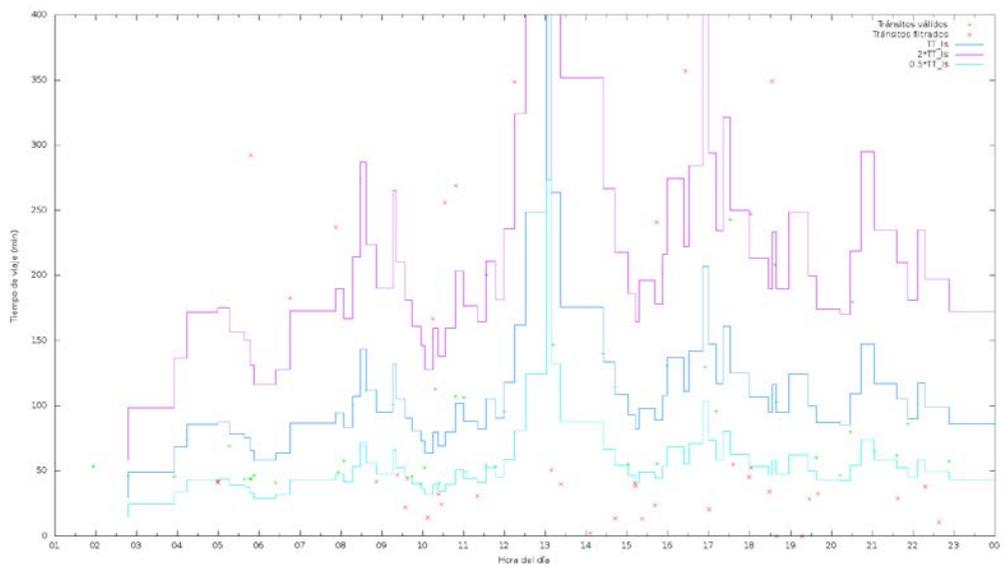


Imagen 240: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h con ajuste SBT 6 – SBT 2

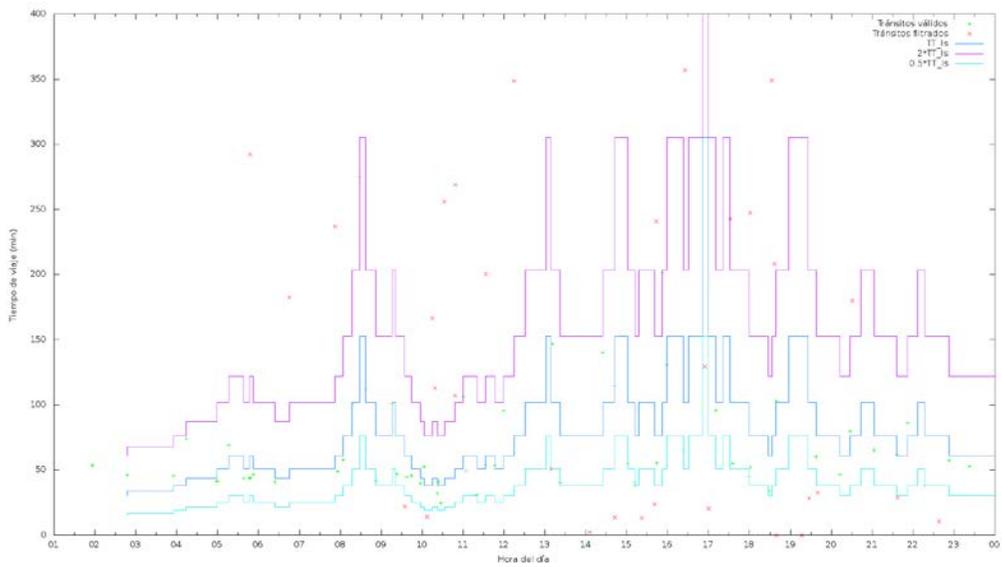


Imagen 241: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  sin ajuste SBT 6 – SBT 2

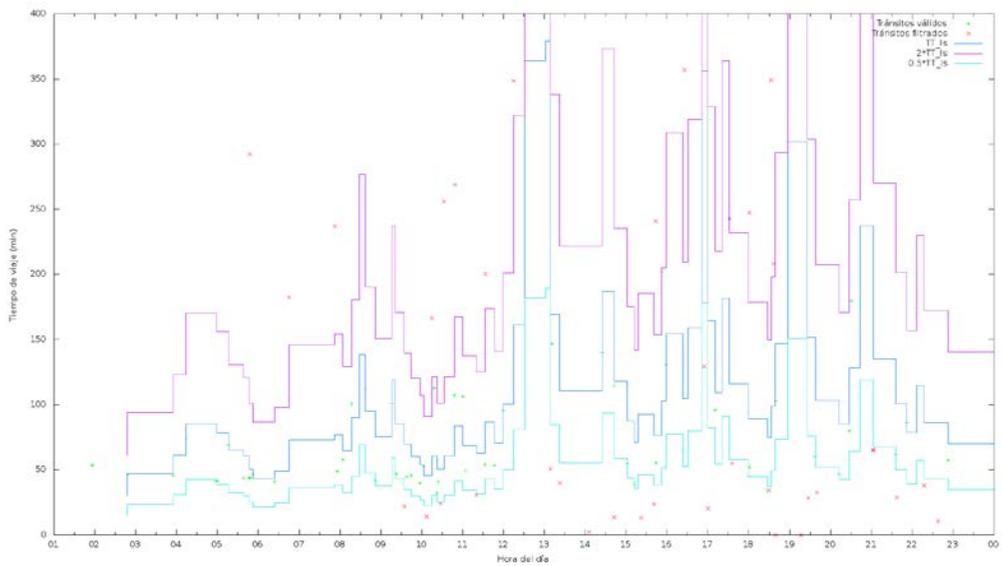


Imagen 242: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  con ajuste SBT 6 – SBT 2

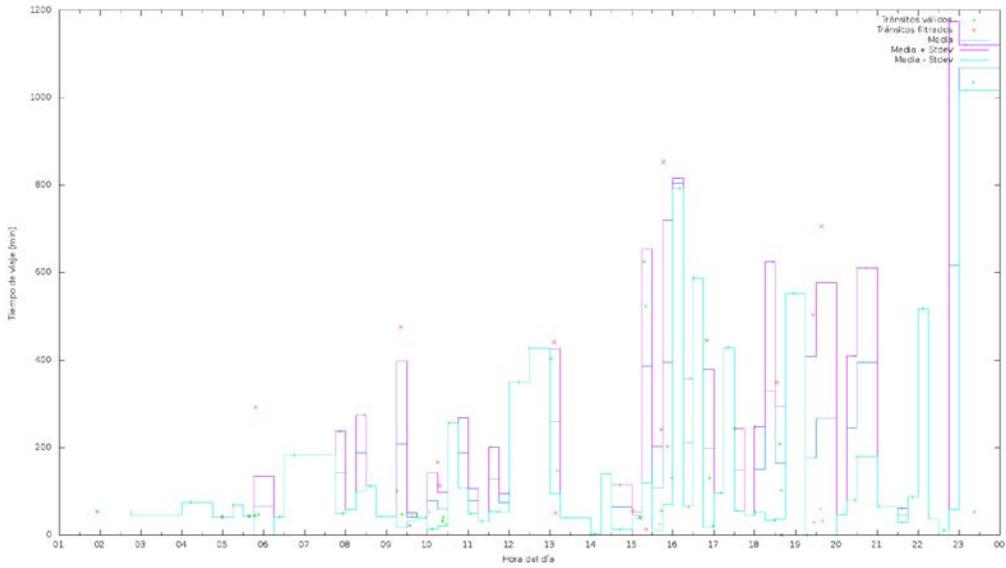


Imagen 243: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 6 – SBT 2

**Situación normal de tráfico SBT 6- SBT 7**

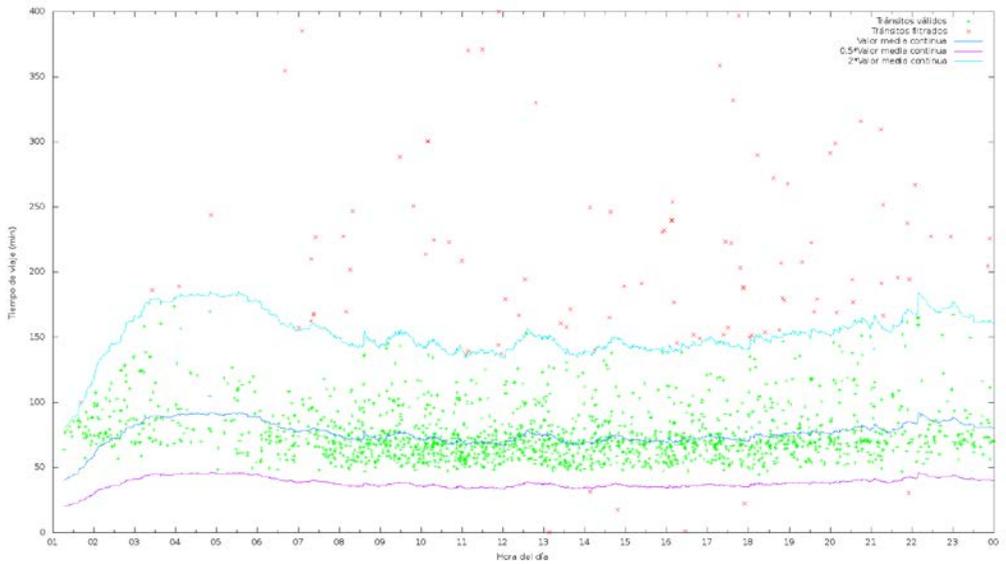


Imagen 244: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 6 – SBT 7

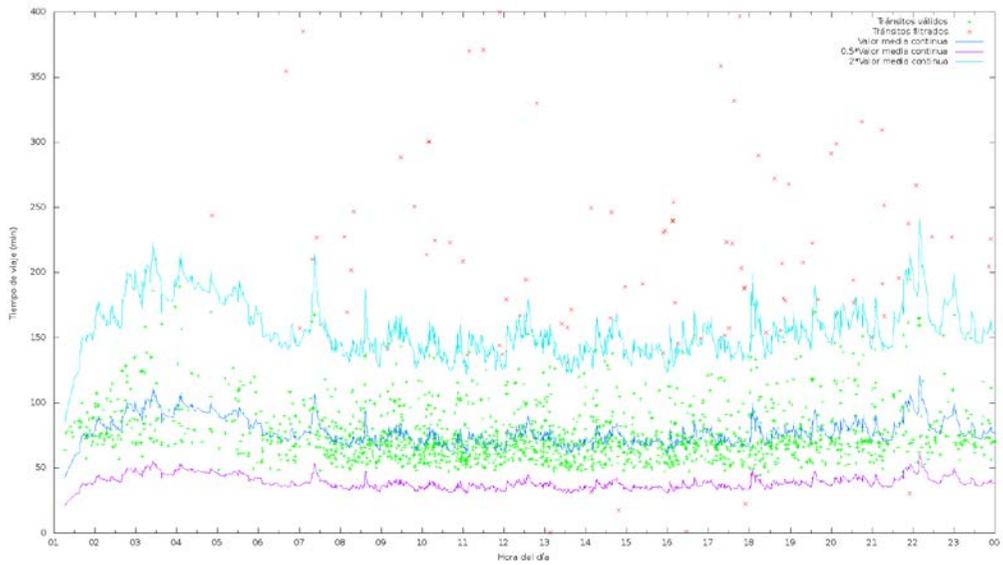


Imagen 245: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 6 – SBT 7

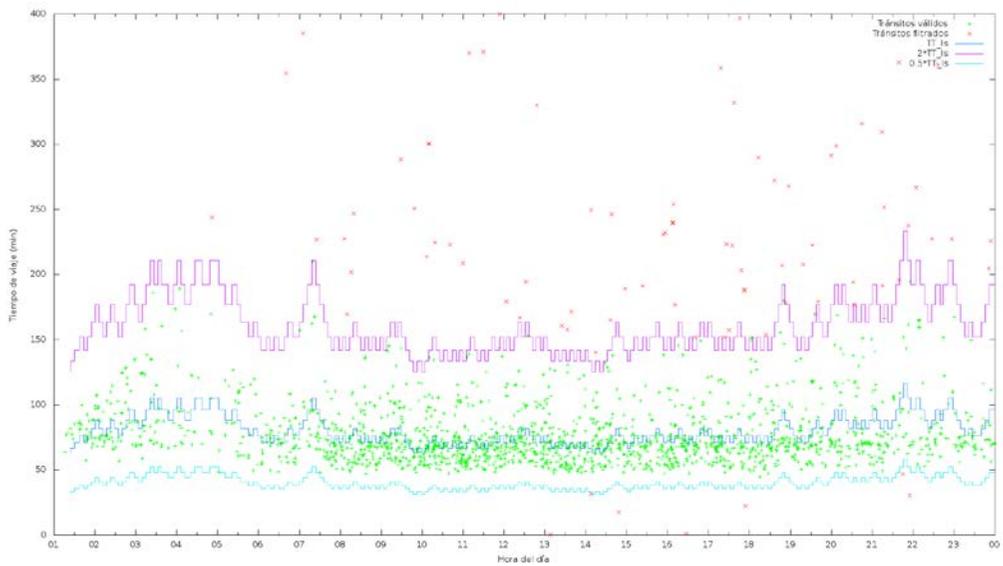


Imagen 246: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 3$  Km/h sin ajuste SBT 6 – SBT 7

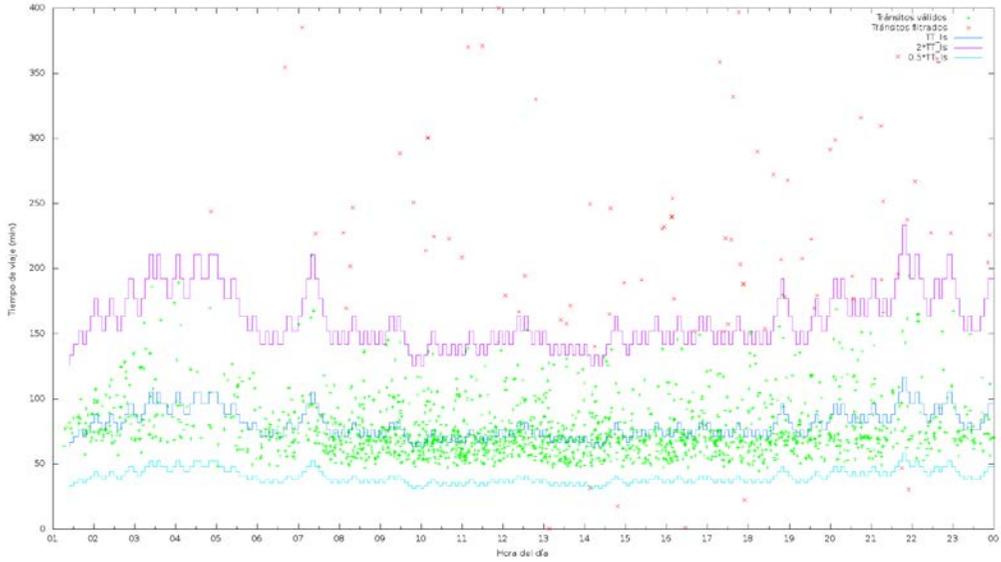


Imagem 247: Classificação trânsitos com algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  com ajuste SBT 6 – SBT 7

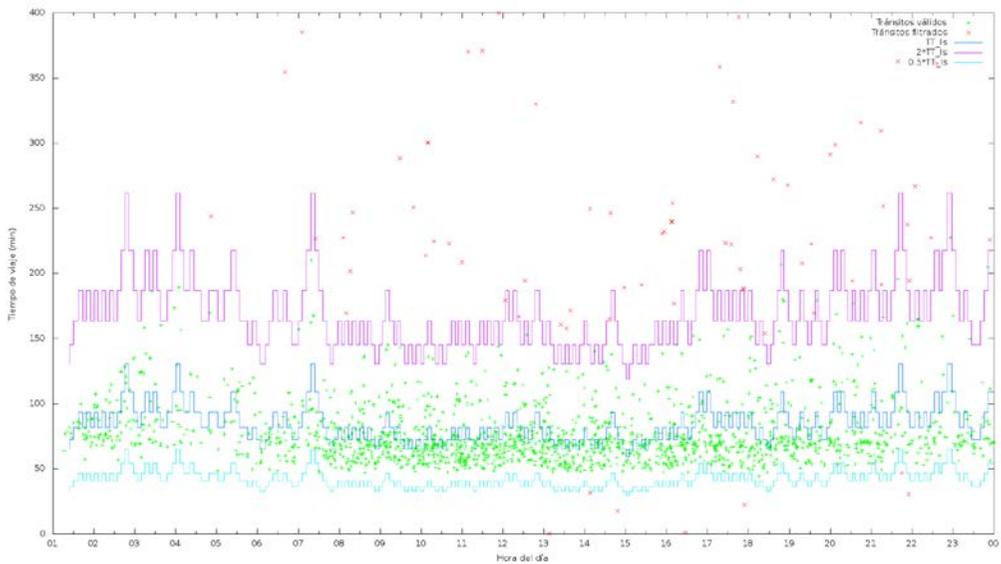


Imagem 248: Classificação trânsitos com algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  sin ajuste SBT 6 – SBT 7

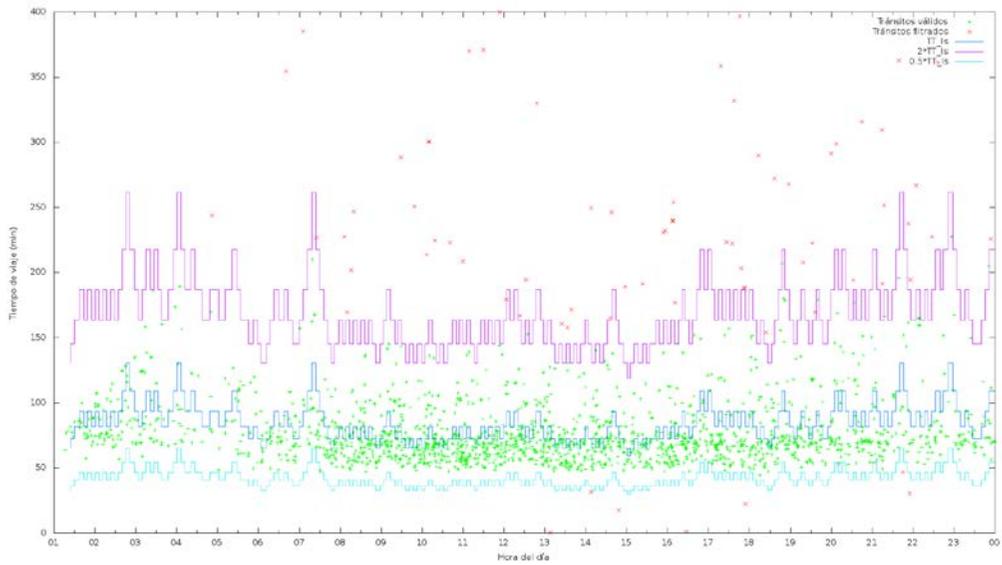


Imagen 249: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5 \text{ Km/h}$  con ajuste SBT 6 – SBT 7

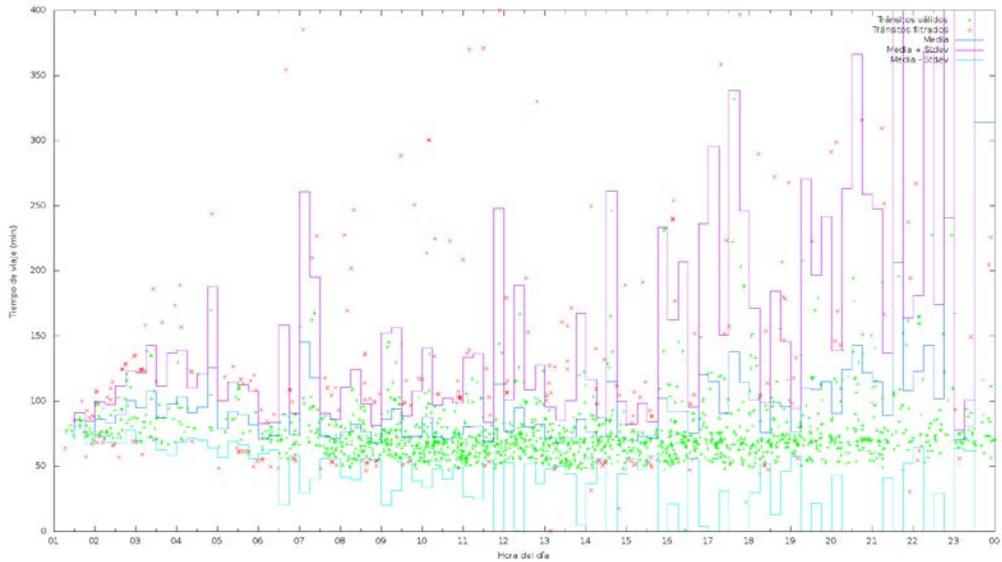
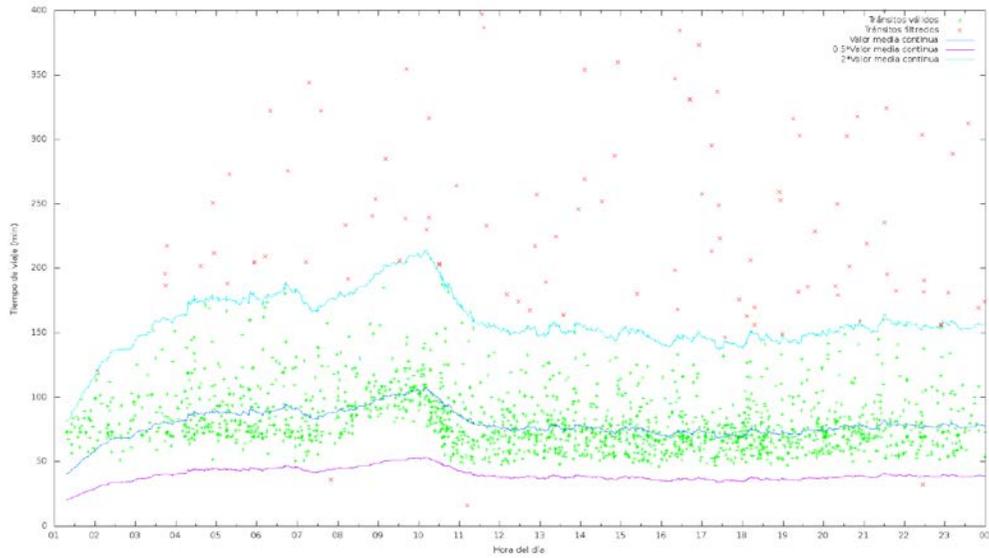
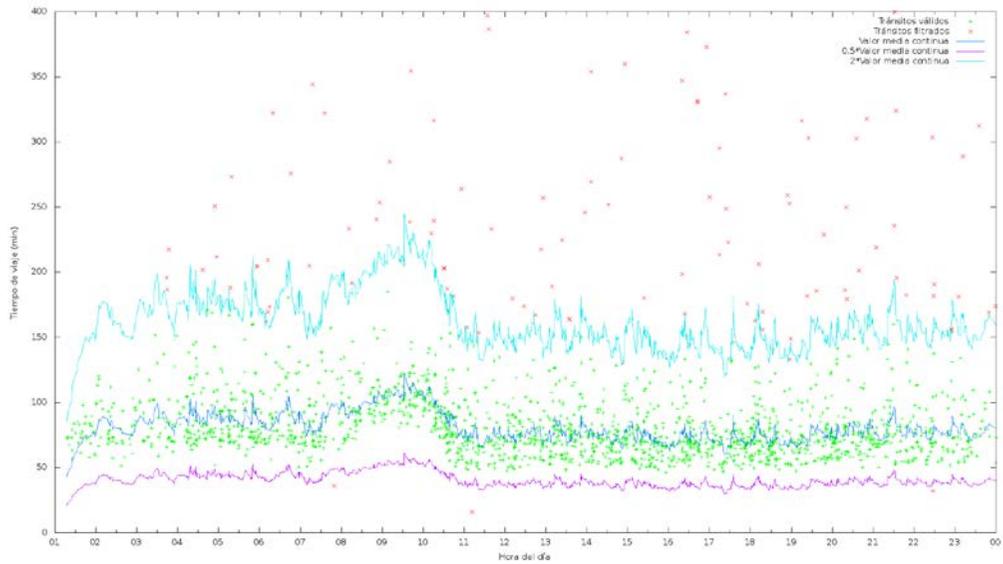


Imagen 250: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 6 – SBT 7

**Situación normal de tráfico SBT 7- SBT 6**



*Imagen 251: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,02$  SBT 7 – SBT 6*



*Imagen 252: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\beta = 0,1$  SBT 7 – SBT 6*

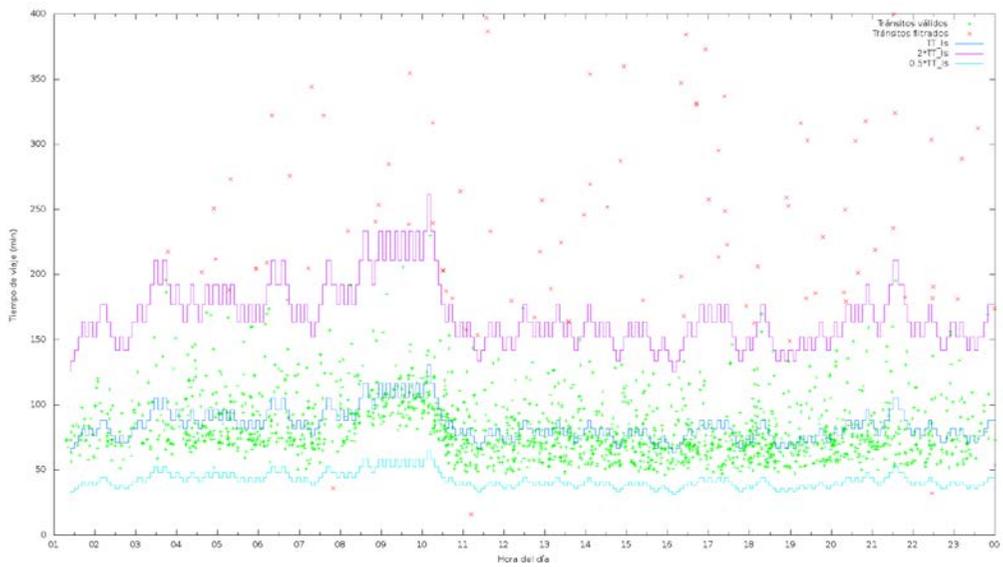


Imagem 253: Classificação tráfego com algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  sem ajuste SBT 7 – SBT 6

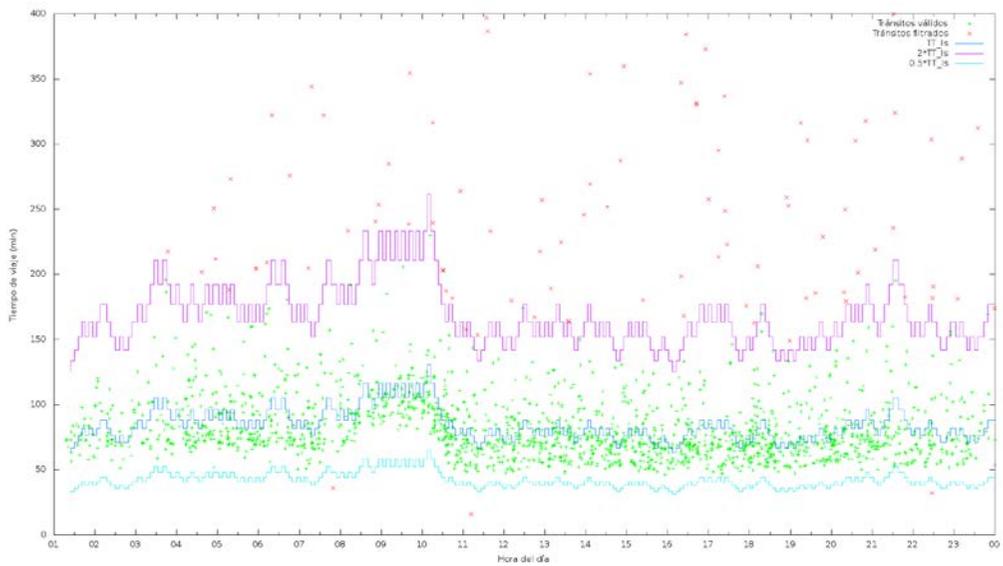
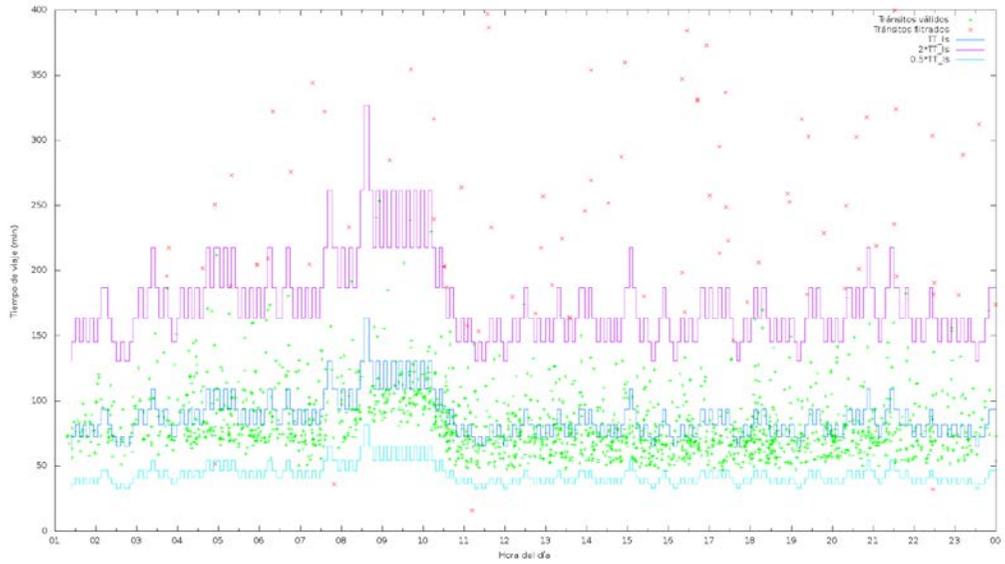
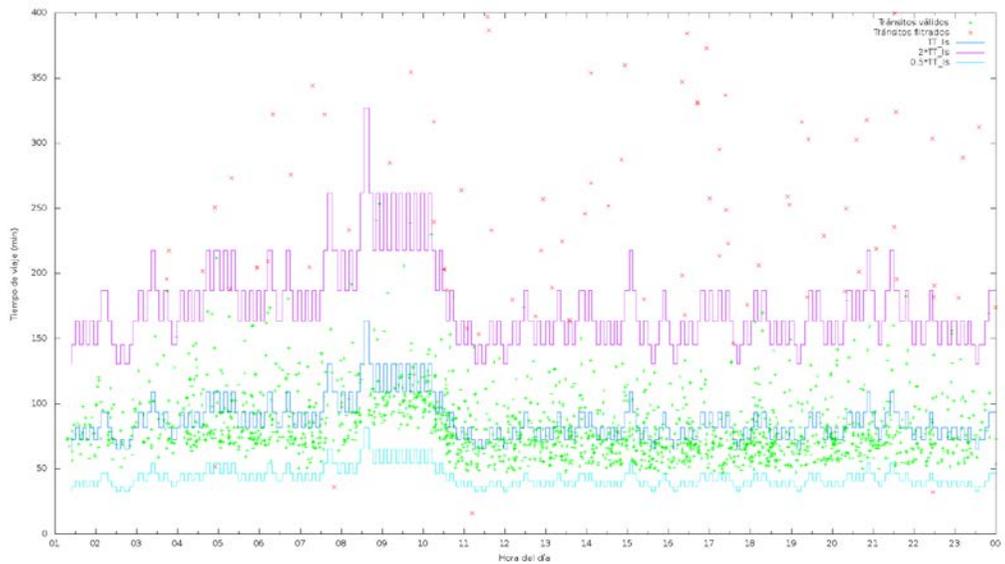


Imagem 254: Classificação tráfego com algoritmo  $\alpha = 3 \text{ Km/h}$  com ajuste SBT 7 – SBT 6



*Imagen 255: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h sin ajuste SBT 7 – SBT 6*



*Imagen 256: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\alpha = 5$  Km/h con ajuste SBT 7 – SBT 6*

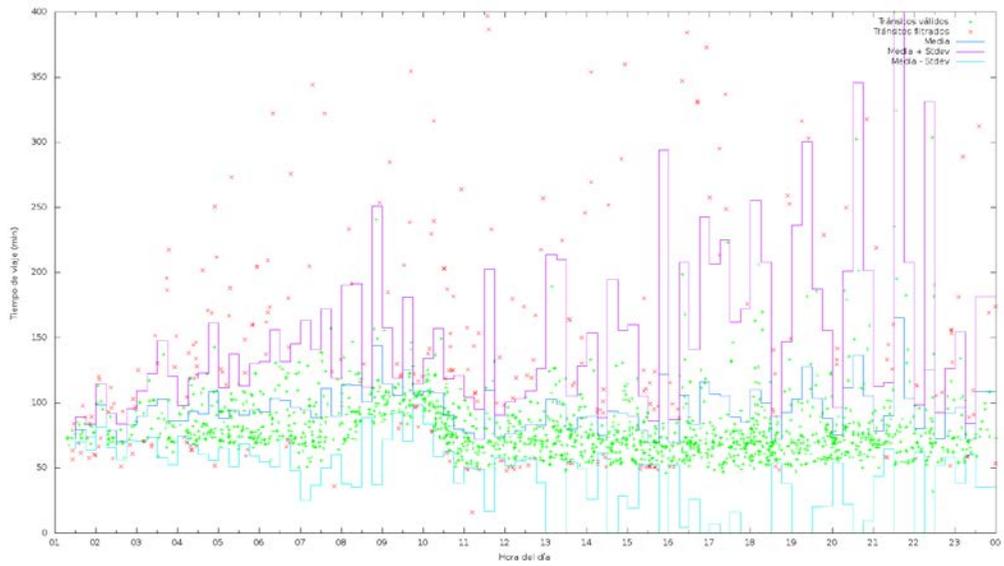


Imagem 257: Clasificación tránsitos con algoritmo  $\sigma$  SBT 7 – SBT 6