

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
Tecnologías de la Información y sus Aplicaciones

**Estudio de la Optimización del Tráfico Rodado  
Mediante el Ajuste de los Ciclos de Semáforos  
por Algoritmos Genéticos en Dispositivos de  
Computación Paralela Usando Modelización  
Discreta: Ejemplos de Aplicación**

Autor: Javier Jesús Sánchez Medina

Director: Enrique Rubio Royo

Director: Manuel J. Galán Moreno

Diciembre de 2007,  
Las Palmas de Gran Canaria







*A Irene (Haku)*



# Agradecimientos

La elaboración de este trabajo ha sido posible gracias a muchas personas.

- Gracias Yoli. Tu paciencia no deja de sorprenderme cada día. Creo que has creído más en que esto llegaría a buen puerto, que yo mismo. No te importaron los recortes económicos. No te importaron los recortes en el tiempo de pareja. Siempre paciente y siempre una palabra de ánimo, la total confianza en mis posibilidades. Y todo esto con Sol, o con tormenta. Eres de esas personas que te ayudan a caminar aun cuando tienen una espina clavada en su propio pie. GRACIAS.
- Gracias Irene. Tienes sólo un año recién cumplido y tu maravillosa existencia es una fuente inagotable de energía para seguir. Tu sonrisa hace superfluas todas las preocupaciones.
- Gracias Manolo. Eres más que un director de tesis. Con todos los matices del ser humano que eres, encarnas al científico y al profesor que quiero llegar a ser. Gracias por tu paciencia y por las enriquecedoras discusiones de ciencia, historia, religión, política, etcétera.
- Gracias Enrique por tu afecto y apoyo, y por soportar con tolerancia mis rarezas, mis radicalismos, y mi *e-xcepticismo*.
- Gracias a mis padres Matilde y Carlos, y a mis hermanos Manolo, Rubén, Iván y Diego; que han tenido que sufrirme estos años estresado, de mal humor y siempre ausente.
- Gracias a la Doctora Doña María Luisa Sein-Echaluce Lacleta de la Universidad de Zaragoza y a Don Hilario Rodríguez González del Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife; por su gentileza, facilitándonos los datos necesarios para esta Tesis.
- Gracias a Aristóteles, Ibn al-Haytham, Copérnico, Descartes, Newton, Darwin, Maxwell, Von Newman, Barricelli, Holland, Sterling, y cientos de gigantes más que han prestado sin reparos sus hombros a este humilde y diminuto colega.
- Y por último, gracias a todo aquel o aquella a quien este granito de arena le pueda servir para aportar otros granos de arena al avance de la Ciencia, bien sea corroborando, o bien refutando las hipótesis que aquí se plantean; pues así funciona esto.



# Resumen

En la presente Tesis se describe un nuevo modelo para la optimización del tráfico rodado en una ciudad, en particular para la optimización de los ciclos de los semáforos de una red de tráfico con respecto a un criterio establecido *a priori*. Con tal fin, se ha diseñado un nuevo modelo, el cual es la principal aportación de este trabajo. El modelo presentado se basa en la combinación de tres elementos:

1. El uso de un *Cluster Beowulf* como Multicomputador MIMD de gran relación calidad/precio, gran escalabilidad y flexibilidad;
2. El uso de una optimización no determinística con Algoritmos Genéticos;
3. El uso de Microsimuladores de Tráfico basados en Autómatas Celulares, dentro de la Función de Ajuste del Algoritmo Genético.

Esta nueva metodología se ha aplicado a dos casos reales: “Las Ramblas” en Santa Cruz de Tenerife ([1] y 6.2); y “La Almozara” en Zaragoza ([2] y 6.3). Los resultados parecen satisfactorios y esperanzadores.

Además, se han realizado varios estudios relativos a:

- La escalabilidad del modelo propuesto (apartado 5.2);
- El uso de simuladores de tráfico determinísticos en lugar de estocásticos (apartado 5.3);
- La conveniencia del uso de una codificación binaria Gray para los cromosomas (apartado 5.4);
- Se ha diseñado una nueva representación visual de la evolución del Algoritmo Genético para su ajuste fino (apartado 5.5);
- El funcionamiento del sistema propuesto en una situación de congestión severa (apartado 5.6);
- La extensión del modelo para que englobe criterios tales como la minimización de la emisión de gases con efecto invernadero y de la ocupación de la red (apartado 5.7).



# Abstract

Throughout this Thesis it is described a new model for the optimization of urban road traffic, focusing on the optimization of traffic light cycles according to a previously established criterium. The new model is the main contribution of this work. It consists of the combination of three elements, namely:

1. *Beowulf Clusters* as MIMD Multicomputers with a great price/performance ratio, scalability and flexibility.
2. Genetic Algorithms as non deterministic optimization technique.
3. And Cellular Automata based Microsimulators within the Fitness Function of the Genetic Algorithm.

The new model has been applied to two real test cases: “Las Ramblas” in Santa Cruz de Tenerife ([1] and 6.2), and “La Almozara” in Saragossa ([2] and 6.3). Results seem sound and encouraging.

Besides, more research have been accomplished around the new model:

- The scalability of the model has been studied (5.2)
- In section 5.3 it is considered whether or not using deterministic traffic simulators, instead of stochastic simulators.
- The suitability of Gray code as for the chromosome encoding is analyzed in 5.4
- A new visual representation has been designed, in order to fine tuning the Genetic Algorithm (5.5)
- The performance of the system in a congested scenario has been also analyzed (5.6)
- Finally, it is studied the inclusion of new criteria in a multicriteria fitness function, considering, for instance, the minimization of greenhouse emissions and the occupancy of the network (5.7).



# Contenidos

<b>I</b>	<b>Memoria</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Descripción del Problema</b>	<b>7</b>
2.1	Descripción del Problema . . . . .	7
2.2	Formulación del Problema . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Estado del Arte</b>	<b>13</b>
3.1	ATIS – S. Avanzados de Info. a los Conductores . . . . .	14
3.2	ATMS – S. de Gestión Avanzada del Tráfico . . . . .	15
3.3	ATOS – S. Avanzados de Opt. del Tráfico . . . . .	19
3.3.1	Optimización de una Única Intersección . . . . .	19
3.3.2	Lógica Difusa . . . . .	20
3.3.3	Redes de Petri . . . . .	21
3.3.4	Redes Neuronales . . . . .	21
3.3.5	Aproximaciones Híbridas . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Metodología</b>	<b>25</b>
4.1	Descripción General de la Metodología Propuesta . . . . .	25
4.2	Dispositivo de Computación Paralela – <i>Cluster Beowulf</i> . . . . .	27
4.2.1	Hardware . . . . .	27
4.2.2	Software . . . . .	28
4.3	Algoritmo Genético . . . . .	29
4.3.1	Criterio de Optimización. Función de Ajuste . . . . .	29
4.3.1.1	Criterios de Optimización Estudiados . . . . .	30

4.3.2	Codificación de los Cromosomas . . . . .	31
4.3.3	Población Inicial . . . . .	32
4.3.3.1	Generación de Números Aleatorios . . . . .	33
4.3.4	Estrategia de Selección . . . . .	33
4.3.5	Operador de Cruce . . . . .	34
4.3.6	Operador Mutación . . . . .	34
4.4	Modelo de Simulación de Tráfico desarrollado . . . . .	36
4.4.1	Simulador de Autómatas Celulares . . . . .	37
4.4.2	Modelo de CA para la Simulación de Tráfico . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Propuesta de Resolución</b>	<b>41</b>
5.1	Introducción . . . . .	41
5.2	Estudio de escalabilidad . . . . .	41
5.2.1	Evolución del <i>Fitness</i> . . . . .	43
5.2.2	Estudio del Tiempo de Ejecución . . . . .	45
5.2.3	Comparación de la Optimización . . . . .	45
5.2.4	Conclusiones . . . . .	50
5.3	Sim. Determinística Vs. Sim. Estocástica . . . . .	51
5.3.1	Experimentos Realizados . . . . .	52
5.3.2	Resultados . . . . .	53
5.3.3	Conclusiones . . . . .	55
5.4	Cod. Binaria Gray Vs. Cod. Entera . . . . .	58
5.4.1	Codificación Entera . . . . .	58
5.4.2	Operador de Cruce . . . . .	58
5.4.3	Operador de Mutación . . . . .	59
5.4.4	Resultados . . . . .	60
5.4.5	Conclusiones . . . . .	65
5.5	Estudio Visual y Estadístico de Evolución del G.A. . . . .	66
5.5.1	Explicación de la Representación Estadística Creada . . . . .	66
5.5.2	Resultados . . . . .	67
5.5.3	Variación del Tamaño de la Población . . . . .	67

5.5.4	Variación de la Probabilidad de Mutación . . . . .	75
5.5.4.1	Probabilidad de Mutación Fija . . . . .	75
5.5.4.2	Probabilidad de Mutación Variable . . . . .	76
5.5.5	Conclusiones . . . . .	79
5.6	Estudio de Funcionamiento en Congestión . . . . .	81
5.6.1	Tests Realizados . . . . .	83
5.6.2	Parámetros Muestreados . . . . .	85
5.6.2.1	Restricciones Asumidas . . . . .	86
5.6.2.2	Resultados Obtenidos . . . . .	87
5.6.3	Discusión . . . . .	88
5.6.4	Conclusiones . . . . .	90
5.7	Nuevos Criterios para Opt. Multicriterio . . . . .	92
5.7.1	Volumen de Vehículos . . . . .	92
5.7.2	Emisión de Gases . . . . .	93
5.7.3	Ocupación de la Red . . . . .	94
5.7.4	Estudio Estadístico . . . . .	95
5.7.4.1	Casos Estudiados . . . . .	95
5.7.4.2	Resultados . . . . .	95
5.7.5	Conclusiones . . . . .	98
<b>6</b>	<b>Aplicaciones</b> . . . . .	<b>101</b>
6.1	Introducción . . . . .	101
6.2	Las Ramblas en Santa Cruz de Tenerife . . . . .	101
6.2.1	La Zona de Las Ramblas en Santa Cruz de Tenerife . . .	101
6.2.2	Colaboración con el Departamento de Tráfico . . . . .	104
6.2.3	Preprocesado de los Datos . . . . .	109
6.2.4	Formulación del Objetivo de Optimización . . . . .	109
6.2.5	Restricciones del Problema . . . . .	111
6.2.5.1	Calles con Poco Tráfico . . . . .	111
6.2.5.2	Semáforos Optimizados . . . . .	111
6.2.6	Resultados . . . . .	112

6.2.7	Conclusiones . . . . .	116
6.3	La Almozara en Zaragoza . . . . .	117
6.3.1	La Zona de La Almozara en Zaragoza . . . . .	117
6.3.2	Colaboración con el Departamento de Tráfico . . . . .	121
6.3.3	Preprocesado de los Datos . . . . .	122
6.3.4	Formulación del Objetivo de Optimización . . . . .	123
6.3.5	Restricciones del Problema . . . . .	124
6.3.5.1	Calles Incluidas en el Modelo . . . . .	124
6.3.6	Resultados . . . . .	124
6.3.7	Conclusiones . . . . .	126
<b>7</b>	<b>Conclusiones y Líneas Futuras</b>	<b>129</b>
7.1	Conclusiones de la Tesis . . . . .	129
7.2	Líneas de Investigación Futura . . . . .	132
7.2.1	Aplicación del Modelo a más Casos . . . . .	133
7.2.2	Extensión del Modelo . . . . .	133
7.2.2.1	Opt. Consumo Energético / GHG . . . . .	134
7.2.2.2	Motores Combustión Vs. Nuevos Motores . . . . .	135
7.2.2.3	Extensión a Modelo Dinámico . . . . .	135
<b>8</b>	<b>Bibliografía Utilizada</b>	<b>137</b>
<b>II</b>	<b>Apéndices</b>	<b>149</b>
<b>A</b>	<b>Restricciones para Las Ramblas</b>	<b>151</b>
A.1	Calles Incluidas o Descartadas del Modelo . . . . .	151
A.1.1	Calles Incluidas . . . . .	151
A.1.2	Calles Descartadas del Modelo . . . . .	151
A.2	Aproximaciones para Cálculo de la Matriz O-D . . . . .	153
A.2.1	Matriz de Probabilidades de Origen-Destino . . . . .	156
A.3	<i>Stages</i> por cada Intersección . . . . .	157
A.4	Máximos y Mínimos de Cada <i>Stage</i> . . . . .	159

<b>B Restricciones para La Almozara</b>	<b>161</b>
B.1 Calles Incluidas o Descartadas del Modelo . . . . .	161
B.1.1 Calles Incluidas . . . . .	161
B.1.2 Calles Descartadas del Modelo . . . . .	161
B.2 Aproximaciones para Cálculo de la Matriz O-D . . . . .	163
B.2.1 Matriz de Probabilidades de Origen-Destino . . . . .	163
B.3 <i>Stages</i> por cada Intersección . . . . .	164
B.4 Máximos y Mínimos de Cada <i>Stage</i> . . . . .	165
<b>C Codificación Gray</b>	<b>167</b>
<b>D Orden de Actualización S. Determinista</b>	<b>171</b>



# Índice de figuras

2.1	Ejemplo de Grafo de Tráfico . . . . .	11
4.1	Codificación de los Cromosomas . . . . .	31
4.2	Rutas en el Modelo de Autómatas Celulares Mejorado . . . . .	39
5.1	Red Escala_1 . . . . .	42
5.2	Red Escala_1 Discretizada . . . . .	42
5.3	Escala_2 . . . . .	43
5.4	Escala_3 con Detalle Ampliado . . . . .	44
5.5	Escala_4 con Detalle Ampliado . . . . .	45
5.6	Evolución del <i>Fitness</i> para cada Escala . . . . .	46
5.7	Mejora del <i>Fitness</i> para cada Escala . . . . .	47
5.8	Ratio de Tiempo para cada Escala de Red de Tráfico . . . . .	48
5.9	Comparación entre Modelos RanSim, FixSim y Propio . . . . .	48
5.10	Comparación entre Modelos LISim y Propio . . . . .	49
5.11	Histogramas de Tres Cromosomas para el la Red Escala_3 . . . . .	52
5.12	Comparación para la Escala_1 . . . . .	56
5.13	Regresión Lineal para la Escala_1 . . . . .	56
5.14	Comparación para la Escala_2 . . . . .	56
5.15	Regresión Lineal para la Escala_2 . . . . .	56
5.16	Comparación para la Escala_3 . . . . .	56
5.17	Regresión Lineal para la Escala_3 . . . . .	56
5.18	<i>Crossover</i> de Dos Puntos, a Nivel de Gen . . . . .	59
5.19	<i>Crossover</i> de Dos Puntos, a Nivel de Bit . . . . .	60

5.20	Zona “Las Ramblas” . . . . .	61
5.21	Vista de Pájaro de Las Ramblas (Obtenida de <i>Google Maps</i> ) . . . . .	61
5.22	Comparación del <i>Crossover</i> a Nivel de Bit o de Gen . . . . .	62
5.23	Valores Destacables para <i>Crossover</i> a Nivel de Bit o de Gen . . . . .	62
5.24	<i>Fitness</i> , <i>Crossover</i> a N. de Bit y 500 vs. 200 individuos . . . . .	63
5.25	Mejor y Peor Eje., <i>Crossover</i> a N. de Bit y 500 vs. 200 indiv. . . . .	63
5.26	Figura Explicativa del Histograma Tridimensional . . . . .	67
5.27	<i>Fitness</i> Medio y Std. para los 5 Casos de Tamaño de Población . . . . .	69
5.28	Vista 3D. Mejores Resultados para 50 Individuos . . . . .	70
5.29	Vista 3D. Mejores Resultados para 100 Individuos . . . . .	70
5.30	Vista 3D. Mejores Resultados para 200 Individuos . . . . .	71
5.31	Vista 3D. Mejores Resultados para 300 Individuos . . . . .	71
5.32	Vista 3D. Mejores Resultados para 500 Individuos . . . . .	72
5.33	Vista 3D. 50 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	72
5.34	Vista Zenital. 50 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	72
5.35	Vista 3D. 100 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	73
5.36	Vista Zenital. 100 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	73
5.37	Vista 3D. 200 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	73
5.38	Vista Zenital. 200 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	73
5.39	Vista 3D. 300 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	73
5.40	Vista Zenital. 300 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	73
5.41	Vista 3D. 500 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	74
5.42	Vista Zenital. 500 Individuos y 30 Ejecuciones . . . . .	74
5.43	<i>Fitness</i> Medio y Std. para 4 Casos de P. de Mutación Fija . . . . .	76
5.44	Vista Zenital. Mutación Fija de 0.005 . . . . .	77
5.45	Vista Zenital. Mutación Fija de 0.01 . . . . .	77
5.46	Vista Zenital. Mutación Fija de 0.02 . . . . .	77
5.47	Vista Zenital. Mutación Fija de 0.05 . . . . .	77
5.48	<i>Fitness</i> Medio y Std. para 3 Casos de P. de Mutación Variable . . . . .	78
5.49	Vista Zenital. Mutación Variable. Factor de Mutación de 0.97 . . . . .	79
5.50	Vista Zenital. Mutación Variable. Factor de Mutación de 0.975 . . . . .	79

5.51	Vista Zenital. Mutación Variable. Factor de Mutación de 0.98 . . .	79
5.52	Zona de Estudio en “La Almozara” – Zaragoza . . . . .	82
5.53	Distritos en La Almozara . . . . .	83
5.54	Vista de Pájaro de La Almozara (Obtenida de <i>Google Maps</i> ) . .	83
5.55	<i>Fitness</i> para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico . . . . .	88
5.56	Incremento del <i>Fitness</i> para las 11 Situaciones de Tráfico . . . .	89
5.57	TOC/SOC para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico . . . .	90
5.58	Incremento del TOC/SOC para las 11 Situaciones de Tráfico . .	91
5.59	Las Ramblas – Probabilidad de Salida Vs. SOC Medio . . . . .	96
5.60	Las Ramblas – Tasa de Salida Vs. SOC Medio . . . . .	96
5.61	Las Ramblas – Probabilidad de Salida Vs. TE Medio . . . . .	96
5.62	Las Ramblas – Tasa de Salida Vs. TE Medio . . . . .	97
5.63	Las Ramblas – SOC Medio Vs. TE Medio . . . . .	97
5.64	Las Ramblas – Std. SOC Vs. Std. Total Emissions . . . . .	97
5.65	La Almozara – Probabilidad de Salida Vs. SOC Medio . . . . .	99
5.66	La Almozara – Mean SOC Vs. TE Medio . . . . .	99
5.67	La Almozara – Std. SOC Vs. Std. Total Emissions . . . . .	99
6.1	Zona “Las Ramblas” . . . . .	102
6.2	Vista de Pájaro de Las Ramblas (Obtenida de <i>Google Maps</i> ) . .	103
6.3	Las Islas Canarias con Santa Cruz de Tenerife Destacada . . . .	104
6.4	Ejemplo de Discretización de Topología . . . . .	105
6.5	Zona de Las Ramblas en Santa Cruz de Tenerife . . . . .	106
6.6	Las Ramblas Discretizada – 1 <sup>a</sup> mitad . . . . .	107
6.7	Las Ramblas Discretizada – 2 <sup>a</sup> mitad . . . . .	108
6.8	Evolución del <i>Fitness</i> para las 150 Optimizaciones Realizadas .	113
6.9	Tiempos Suministrados Vs. los T. Optimizado(Resultados) . . .	114
6.10	Resultados con Soluciones Suministradas vs. Optimizadas . . .	115
6.11	Histograma de los <i>Fitness</i> de las 150 Opt. Vs. <i>Gaussiana</i> . . . .	116
6.12	La Almozara . . . . .	117
6.13	Distritos en La Almozara . . . . .	118

6.14	Vista de Pájaro de La Almozara (Obtenida de <i>Google Maps</i> ) . . .	119
6.15	“La Almozara” Discretizada – 1 <sup>er</sup> Tercio . . . . .	120
6.16	“La Almozara” Discretizada – 2 <sup>o</sup> Tercio . . . . .	121
6.17	“La Almozara” Discretizada – 3 <sup>er</sup> Tercio . . . . .	122
6.18	<i>Fitness</i> para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico . . . . .	125
6.19	Incremento del <i>Fitness</i> para las 11 Situaciones de Tráfico . . . . .	126
C.1	Conversión de Binario a Código Gray . . . . .	167
D.1	Ejemplo de Grafo . . . . .	171

# Índice de tablas

5.1	Estadísticas de las cuatro escalas de red de Tráfico . . . . .	42
5.2	Estadísticas de las Tres Escalas de Red Probadas . . . . .	55
5.3	Valores de los Parámetros Testeados . . . . .	64
5.4	Tests Efectuados Variando el Tamaño de la Población . . . . .	68
5.5	Estadísticas de los Experimentos – Probabilidades Fijas . . . . .	75
5.6	Estadísticas de los Experimentos – Probabilidades Variables . . . . .	78
5.7	Situación Actual de Entrada de Tráfico (Periodos) . . . . .	84
5.8	Periodos de Entrada de Tráfico Usados en los Tests . . . . .	84
5.9	Casos Test: Generaciones del GA . . . . .	85
5.10	Relación entre la Velocidad y el Factor de Emisión . . . . .	94
5.11	Estadísticas de las Dos Redes Estudiadas . . . . .	95
A.1	Matriz de Origen-Destino de Las Ramblas . . . . .	156
A.2	<i>Stages</i> de la Intersección #16 . . . . .	157
A.3	<i>Stages</i> de la Intersección #13 . . . . .	157
A.4	<i>Stages</i> de la Intersección #17 . . . . .	157
A.5	<i>Stages</i> de la Intersección #18 . . . . .	157
A.6	<i>Stages</i> de la Intersección #19 . . . . .	158
A.7	<i>Stages</i> de la Intersección #20 . . . . .	158
A.8	<i>Stages</i> de la Intersección #22 . . . . .	158
A.9	<i>Stages</i> de la Intersección #24 . . . . .	158
A.10	<i>Stages</i> de la Intersección #118 . . . . .	158
A.11	<i>Stages</i> de la Intersección #25 . . . . .	158
A.12	<i>Stages</i> de la Intersección #115 . . . . .	159

A.13 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #16 . . . . .	159
A.14 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #13 . . . . .	159
A.15 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #17 . . . . .	159
A.16 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #18 . . . . .	159
A.17 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #19 . . . . .	159
A.18 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #20 . . . . .	160
A.19 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #22 . . . . .	160
A.20 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #24 . . . . .	160
A.21 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #118 . . . . .	160
A.22 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #25 . . . . .	160
A.23 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #115 . . . . .	160
B.1 Matriz de Origen-Destino para “La Almozara” . . . . .	164
B.2 <i>Stages</i> de la Intersección #15 . . . . .	164
B.3 <i>Stages</i> de la Intersección #41 . . . . .	164
B.4 <i>Stages</i> de la Intersección #11 . . . . .	164
B.5 <i>Stages</i> de la Intersección #3 . . . . .	164
B.6 <i>Stages</i> de la Intersección #9 . . . . .	165
B.7 <i>Stages</i> de la Intersección #4-44 . . . . .	165
B.8 <i>Stages</i> de la Intersección #44 . . . . .	165
B.9 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #15 . . . . .	165
B.10 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #41 . . . . .	165
B.11 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #11 . . . . .	166
B.12 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #3 . . . . .	166
B.13 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #9 . . . . .	166
B.14 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #4-44 . . . . .	166
B.15 Rangos de los <i>Stages</i> de la Intersección #44 . . . . .	166
C.1 Operador Booleano XOR . . . . .	168
C.2 Ejemplos de Conversión de Binario a Gray . . . . .	168
D.1 Dependencias para el grafo $\mathbb{G}$ de la figura D.1 . . . . .	171

**Parte I**

**Memoria**



# Capítulo 1

## Introducción

La eficiencia en la gestión del tráfico rodado no es solamente un factor del confort para las mayores ciudades del mundo. También, debido a su uso generalizado, puede convertirse en un serio problema socio-económico, en el caso de una mala gestión.

La contaminación acústica, el consumo de combustibles fósiles, el ahorro energético, la generación de gases contaminantes, o su repercusión en el cambio climático debido al efecto invernadero; son todos aspectos de vital importancia para las sociedades industrializadas, que están íntimamente relacionados con la gestión del tráfico.

El incesante proceso de sobrecarga de tráfico rodado que se está dando en todas las urbes, hace necesaria la búsqueda de nuevas soluciones que optimicen las infraestructuras de tráfico existentes. En la inmensa mayoría de los casos no es viable su simple ampliación, debido principalmente a los elevados costes, la carencia de espacio disponible y al inevitable impacto medioambiental que esta supondría. Antes de afrontar su ampliación se hace preciso optimizar las infraestructuras existentes con el objeto de mejorar al máximo sus prestaciones.

Uno de los problemas más relevantes en la gestión del tráfico es la optimización de los ciclos de los semáforos<sup>1</sup>. En numerosos trabajos (v.g. [3], [4],[5],[6], [7],[8]) se demuestra la gran influencia que los ciclos de los semáforos

---

<sup>1</sup>Ciclo de Semáforo: Secuencia de estados (Rojo, Verde, etc.) por los que pasa un determinado semáforo y que se repite de manera cíclica. La programación de los semáforos en ciclos es la más común.

tienen en el flujo de tráfico resultante. Por esta razón se ha diseñado un nuevo modelo, que es la principal aportación de la presente Tesis, para la resolución de este problema.

Para afrontar el problema de la optimización de los ciclos de semáforo se propone un modelo basado en la combinación de tres técnicas fundamentales, que son:

- *Cluster* de Computación Distribuída (*Beowulf*) como herramienta de computación;
- Algoritmos Evolutivos (Algoritmos Genéticos) como metodología de optimización;
- y Autómatas Celulares como herramienta de simulación del comportamiento del tráfico.

*Cluster Beowulf*: Con el tiempo todas las aplicaciones requieren más potencia computacional. En el pasado, las supercomputadoras y otros dispositivos de cálculo masivo eran extremadamente costosos y totalmente fuera del alcance del gran público. Esta situación ha cambiado radicalmente en las últimas décadas, desde que en 1993 T. Sterling y D. Becker desarrollaran un dispositivo de computación distribuída sobre el sistema operativo Linux utilizando para ello componentes estándar del mercado (*off-the-shelf*). Este nuevo tipo de multicomputador MIMD, además de ser flexible y reutilizable, tiene una relación precio/prestaciones verdaderamente interesante, ([9], [10]).

Algoritmos Evolutivos: Los *Cluster Beowulf* son muy apropiados para la ejecución de tareas que pueden ser muy paralelizables, como son los Algoritmos Evolutivos. Los Algoritmos Evolutivos<sup>2</sup> (AE's) son una potente herramienta en la resolución de muy diversos problemas de optimización en el ámbito de las ingenierías [11], [12].

La resolución de problemas de optimización mediante AE's requiere cada vez más recursos computacionales porque la utilidad de estas herramientas

---

<sup>2</sup>Algoritmos Evolutivos: Algoritmos de optimización metaheurística que utilizan una población de soluciones y mecanismos inspirados en la evolución biológica, como el cruce, la mutación y la selección de los mejor adaptados.

se justifica en problemas de gran envergadura, donde los métodos clásicos de optimización fallan por la complejidad y la escala de dichos problemas.

La efectividad de los AE's ha sido demostrada en varios problemas test de gran dificultad de resolución (Problemas NP-completos[13]<sup>3</sup>), en aplicaciones de gran complejidad, y en tareas que forman parte de aplicaciones más complejas.

Básicamente, las líneas de actuación con los problemas de gran complejidad utilizando los AE's son las siguientes:

- La utilización de técnicas híbridas. Estas combinan la potencia de búsqueda de los AE's con métodos clásicos o estrategias alternativas que se han mostrado eficaces en la resolución de dichos problemas [14].
- La utilización de técnicas de paralelización [15]. Existen análisis matemáticos de los Algoritmos Genéticos (variante de los AE) en los que se demuestra que estos funcionan de una manera implícitamente paralela [16]. Este hecho se ha podido comprobar empíricamente en [17].

Autómatas Celulares: La Simulación del Tráfico es una tarea extremadamente compleja. Hay dos tipos de simuladores de tráfico. El primer tipo son los simuladores macroscópicos, que están basados en la dinámica de flúidos. En ellos el tráfico es considerado como un fluido continuo. En segundo lugar están los simuladores microscópicos. En estos modelos el tráfico se considera como un conjunto de partículas discretas que interactúan siguiendo un conjunto de reglas bien definidas. En la última década se ha establecido la creencia generalizada de que los simuladores microscópicos son más cercanos a la realidad que los macroscópicos, para el modelado del tráfico. Un tipo de modelo microscópico con gran aceptación es el modelo de Autómatas Celulares.

---

<sup>3</sup>Problemas NP-Completos: En Teoría de la Complejidad los problemas NP-Completos son los problemas de más difícil solución en el conjunto de problemas NP (Problemas No-Determinísticos de solución en un tiempo Polinómico). Estos problemas son la más pequeña subclase de los problemas NP que puede ser concebida, fuera del conjunto de problemas P (problemas determinísticos con resolución en tiempo polinómico). Esto es así porque una solución determinística en tiempo polinómico a cualquier problema NP-Completo sería también la solución de cualquier problema NP.

La literatura científica está repleta de trabajos que utilizan modelos macroscópicos para el tráfico ([18] y [19]). En los años 50 del siglo XX aparecieron algunas teorías llamadas teorías continuas de primer orden (*first order continuum theories*) para el tráfico en las autopistas. En los años 70 y más tarde aparecieron otros modelos de segundo orden para corregir las deficiencias de los primeros ([20], [21], [22], [23], [24], [25]). En [26] se cuestionan seriamente los modelos de segundo orden debido a varios problemas, por ejemplo predicciones de flujo negativo del tráfico, y velocidades negativas bajo ciertas condiciones.

Hoy en día los simuladores microscópicos se utilizan ampliamente. Su principal problema es que son más lentos en tiempo de ejecución que los simuladores macroscópicos. Una notable excepción a esto son los Autómatas Celulares, cuyos tiempos de ejecución son similares a los conseguidos con los simuladores macroscópicos.

Por eso se ha desarrollado un simulador de tráfico basado en Autómatas Celulares. En esta Tesis se propone un modelo de tráfico inspirado en el modelo SK [27] y el modelo SchCh [28]. El modelo SchCh es una combinación de un modelo del tráfico en las autopistas (Nagel-Schreckenberg [29]) y un modelo muy sencillo del tráfico en las ciudades (Biham-Middleton-Levine [30]). El modelo SK añade el “smooth braking” (frenado suave) al modelo para evitar cambios abruptos en la velocidad. Se ha desarrollado un modelo inspirado en el modelo SK debido a sus mejores resultados en todos los tests mostrados en el trabajo [31].

Una ventaja adicional de este simulador es que permite la evaluación de parámetros en cada individuo (célula), como pueden ser en nuestro caso el consumo de combustible, la emisión de elementos contaminantes (gases, ruidos, etc.) u otros.

# Capítulo 2

## Descripción del Problema

### 2.1 Descripción del Problema

En la actualidad, la gestión del tráfico rodado es un área que incluye un elevado número de problemas no resueltos en su total extensión, siendo cada uno de ellos un reto en sí mismo. El esfuerzo de investigación que da cuerpo a esta Tesis está dirigido a uno de ellos en particular: *La optimización de los tiempos asignados a cada una de las fases de los semáforos.*

Los argumentos que sirven de base para escoger este problema particular son, principalmente dos:

1. Como se demuestra en numerosas investigaciones (V.g. [3],[4],[5],[6],[7],[8]) los ciclos de los semáforos tienen una gran influencia en el comportamiento del tráfico rodado de las ciudades.
2. En la actualidad, los semáforos son una infraestructura de control de tráfico que está ampliamente implantada en la mayoría de las ciudades del mundo. Esto hace que la aplicación de los resultados de este trabajo de investigación pueda ser inmediata, sin tener que esperar a la implantación de infraestructuras de tipo experimental<sup>1</sup>, que siempre es

---

<sup>1</sup>V.g. Sistemas Avanzados de Navegación en los Vehículos (con por ejemplo, predicción de rutas óptimas), Conducción Automática de Vehículos, Redes de Sensores de Tráfico de Última Generación (por ejemplo, mediante reconocimiento de imágenes), etc. Véase el capítulo 3.

lenta y costosa.

A continuación se describe el problema concreto que se trata de resolver a lo largo del presente trabajo. Actualmente la mayoría de los semáforos son controlados mediante la programación de unos ciclos que dictan los estados sucesivos por los que van pasando. Cada ciclo está asociado a una intersección, es decir, que puede regir a varios semáforos. Cada fase del ciclo (o *stage*) se compone de los estados en los que están todos los semáforos de esa intersección durante un tiempo determinado.

La duración de las fases suele ser establecida por ingenieros de tráfico basándose en su experiencia, y en el mejor de los casos, en resultados de simulaciones. Sin embargo las combinaciones posibles jugando con la duración de cada fase es vastísima. En el momento de la realización de este documento no parece existir ningún método determinístico que permita encontrar esa combinación *óptima*.

En este punto es donde esta Tesis plantea el uso de técnicas de optimización no determinísticas para elegir la combinación (o combinaciones) de las duraciones de las fases que de (den) lugar al mejor rendimiento de la red de tráfico<sup>2</sup>.

Una posible resolución de este problema pasa por, previo establecimiento de los valores mínimo y máximo de duración de cada fase, fijar la duración total de cada ciclo, y con esas restricciones buscar la combinación óptima. En el modelo que aquí se defiende, se ha optado por no fijar la duración total del ciclo, en aras de dotarlo de una mayor flexibilidad en la búsqueda de combinaciones óptimas.

Un punto destacable del modelo que aquí se plantea, es que se realiza una optimización global. Con esto se quiere decir que se considerará de manera con-

---

<sup>2</sup>Es preciso puntualizar que cuando se hace uso de funciones de ajuste multicriterio puede suceder que sea imposible llegar a un único punto óptimo. En estos casos suele aparecer la llamada Frontera de Pareto. Esta es una hipersuperficie compuesta por los puntos que comparten un mismo valor de la función de ajuste (óptimo). Esta situación da libertad al diseñador para elegir una solución u otra en función de otros criterios adicionales.

En el modelo que se plantea en esta Tesis se usa una función de ajuste monocriterio. Sin embargo, también se han incluido los primeros resultados de investigación en la línea de la extensión de esta función a una multicriterio, en cuyo caso se debería tratar una hipotética superficie de Pareto.

junta la optimización de muchas intersecciones (múltiples ciclos) englobando a un tiempo toda una red.

## 2.2 Formulación del Problema

Sean:

- I Un grafo no dirigido  $\mathbb{G}$ , que representa la red de tráfico, compuesto por  $N$  nodos, donde  $N$  es el número de intersecciones,  $A$  las aristas, y donde cada arista representa el camino entre dos intersecciones contiguas;
- II Una tupla de enteros no negativos  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_N\}$ , siendo cada elemento  $l_i$ , el número de fases del nodo (intersección)  $i$ , donde  $M = \max\{l_i\}_{i=1}^N$ ;
- III El subconjunto de matrices escalonadas de enteros no negativos  $C_{N \times M}$ , en las cuales cada fila  $i$  tiene  $l_i$  elementos diferentes de 0 y se completa hasta  $M$  elementos con ceros; y donde  $C_{ij}$  es la duración de la fase número  $j$ , perteneciente al ciclo correspondiente al nodo (intersección)  $i$ .

*El objetivo consiste en obtener la matriz perteneciente al subconjunto  $C_{N \times M}$  que optimice el valor de la Función de Ajuste<sup>3</sup> que se expone a continuación.*

Para todos los estudios realizados en esta tesis, excepto los que se detallan en los apartados 5.2 y 5.3, la función de ajuste es el valor absoluto del número

---

<sup>3</sup>Función de Ajuste (*Fitness Function*): Es una aplicación matemática del espacio de búsqueda (*Search Space*) en el cuerpo  $\mathbb{R}$ , que se utiliza para establecer una ordenación entre los puntos del espacio de búsqueda atendiendo al criterio que define dicha Función de Ajuste.

El concepto procede de la Teoría de la Evolución Darwinista [32] y refleja el nivel de adaptación de un individuo (genotipo o cromosoma) al medio. Este nivel de adaptación guarda una proporcionalidad directa con la probabilidad de reproducción del individuo, y por ende, de que sus genes se preserven en la siguiente generación.

La definición de la Función de Ajuste se debe a John Holland en [33] en su Teorema de los Esquemas (*Schema Theorem*). Este teorema es el fundamento matemático de los Algoritmos Genéticos. Establece que en el límite, la probabilidad de obtener una solución óptima tiende a 1, cuando el número de generaciones tiende a infinito. Se debe enfatizar que el Teorema de los Esquemas no demuestra que se vaya a obtener una solución óptima, sino, más bien, que la probabilidad de obtenerla tiende a 1. Por ello, esta metodología se engloba en los llamados métodos de optimización estocásticos o no determinísticos.

de vehículos que han abandonado la red en el transcurso de la simulación. En el apartado 4.3.1 se explica con más detalle.

En la figura 2.1 se presenta un ejemplo de grafo de tráfico. Está compuesto por 6 nodos o intersecciones y 14 aristas. En la ecuación 2.1 se tiene una tupla L ejemplo en la cual se refleja el número de fases por las que pasan los semáforos asociados a cada una de las 6 intersecciones. En la ecuación 2.2 se representa el valor máximo de L, M. Por último, en la ecuación 2.2 se muestra una matriz  $C_{65}^k$  posible para este ejemplo. Se trata de buscar la matriz  $C_{65}^{opt}$  que maximice la función de ajuste especificada.

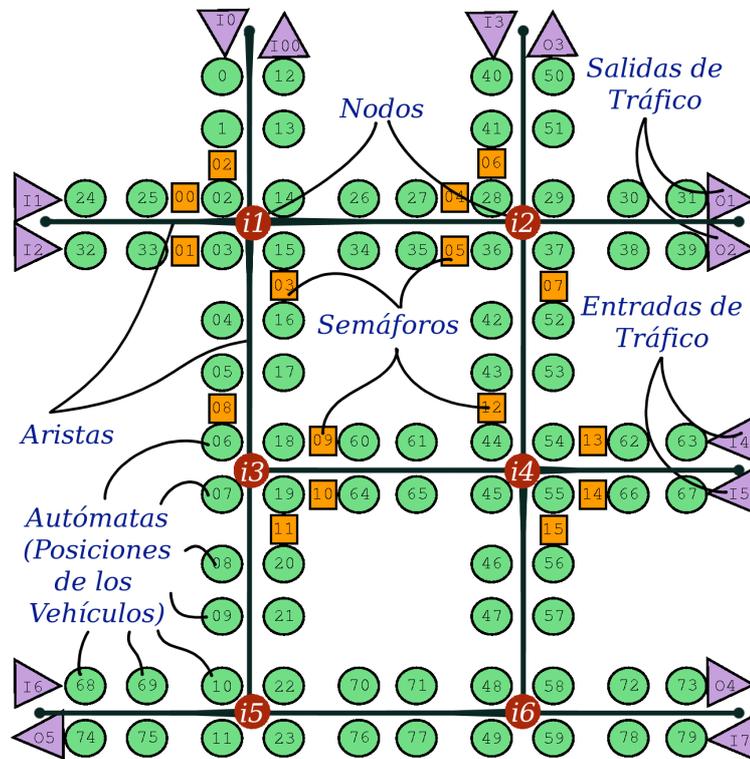


Figura 2.1: Ejemplo de Grafo de Tráfico

$$L = \{ 3 \ 3 \ 5 \ 4 \ 3 \ 4 \} \tag{2.1}$$

$$M = 5 \tag{2.2}$$

$$C_{65}^k = \left\{ \begin{array}{ccccc} 10 & 4 & 3 & 0 & 0 \\ 4 & 5 & 6 & 0 & 0 \\ 12 & 12 & 4 & 3 & 5 \\ 4 & 4 & 3 & 10 & 0 \\ 3 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 10 & 10 & 4 & 4 & 0 \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

# Capítulo 3

## Estado del Arte

En este capítulo se quiere dar una visión del espectro de trabajos de investigación relacionados con el modelo que sostiene esta Tesis.

Se han clasificado los trabajos en tres grupos. En primer lugar se tienen los trabajos agrupados dentro de las siglas ATIS (*Advanced Traveler Information Services*) que son aquellos trabajos centrados en los servicios avanzados de información a los conductores. Por otra parte, se pueden agrupar otros trabajos en un segundo grupo etiquetado con las siglas ATMS (*Advanced Traffic Management Systems*) que significa sistemas avanzados de gestión del tráfico. Finalmente, otros trabajos de investigación concernientes al tráfico pueden agruparse en un tercer subconjunto que se puede denominar ATOS (*Advanced Traffic Optimization Systems*) y donde aglutinarían aquellas propuestas de sistemas avanzados de optimización del tráfico, en los cuales el tráfico no sólo es gestionado, sino que también se intenta su optimización de manera automática sin la ayuda de la experiencia de expertos humanos.

Esta clasificación tiene unos límites borrosos y muchos trabajos podrían saltar a otra categoría se fija la atención en algún aspecto particular. Sin embargo, puede ser de utilidad para adquirir una ordenación mental inicial del campo de investigación en el cual se mueve la presente Tesis.

### 3.1 ATIS – Servicios Avanzados de Información a los Conductores

Los servicios avanzados de información a los conductores son aquellos servicios facilitados a los usuarios de la red de tráfico que pueden potencialmente ayudarles a tomar decisiones que reduzcan el tiempo de sus trayectos. Hay muchas iniciativas en este sentido. Seguidamente se ofrecen algunos ejemplos.

En la referencia [34], el autor realiza un estudio empírico del impacto de los ATIS en la calidad de la red de los servicios de transporte mediante la aplicación del modelo *DynaMIT*<sup>1</sup>[35]. Los principales resultados son que el guiado dinámico de ruta puede mejorar los tiempos de los trayectos de los conductores, tanto de los guiados como de los no guiados, y también mejora el rendimiento de la infraestructura de tráfico existente.

En [36] un modelo de alta resolución de simulación del tráfico en autopistas basado en autómatas celulares se aplica a un sistema de información de tráfico. El sistema tiene la virtud de facilitar una simulación del estado actual del tráfico sin usar sensores de tráfico como espiras detectoras. Este sistema también tiene la virtud de realizar estimaciones de la situación futura de tráfico (en 30 minutos y en 60 minutos). Un *applet* de java en una página web permite el acceso a los usuarios a esta información.

---

<sup>1</sup>*DynaMIT*: Asignación dinámica de red para la gestión de la información a los conductores

## 3.2 ATMS – Sistemas de Gestión Avanzada del Tráfico

Los sistemas de gestión avanzada del tráfico son aquellos sistemas que facilitan la labor de los técnicos que gestionan el tráfico. Existen muchas iniciativas en este área, la mayoría centradas en la simulación del tráfico. A continuación se muestran algunos ejemplos notables.

En [37], el modelo *Integration* ha sido usado para simular el tráfico de la zona metropolitana de Salt Lake en EE.UU. Esta investigación tiene varios elementos de interés. El primero es que parecen demostrar factibilidad del modelado de una red de gran escala con un nivel de detalle microscópico. En segundo lugar, se explica como han logrado la superación de los inconvenientes que supone la ingente colección de datos necesaria para construir y calibrar una simulación microscópica con una red de una escala tan grande. En tercer lugar se describen las oportunidades y aplicaciones del uso de una herramienta de simulación microscópica en contraposición a herramientas macroscópicas.

El modelo *MITSIM* se utiliza en [38] para evaluar aspectos tanto del sistema de control de tráfico como de las configuraciones de las vías de acceso en el proyecto *Central Artery/Tunnel* en Boston (EE.UU.). Este modelo incluye explícitamente predicción de tráfico, información de tráfico variable con el tiempo y enrutado de tráfico dinámico.

El modelo *AIMSUN2* ha sido usado para simular las Rondas en Barcelona [39]. Utiliza computadores paralelos para reducir el tiempo de ejecución.

En el trabajo [40] se utilizan supercomputadores vectoriales para simular el tráfico utilizando modelos basado en Autómatas Celulares en el menor tiempo posible.

El modelo *INTELSIM* se usa en [41] y [42]. En estos trabajos se desarrolla un modelo tipo car-following con aceleración lineal para la simulación realista del tráfico orientado a aplicaciones ITS. Los autores argumentan que el modelo propuesto facilita perfiles de aceleración continuos en lugar de los perfiles escalonados que se usan comúnmente. Los tiempos de reacción a la

frenada<sup>2</sup>([43]) son simulados. Por último, los autores argumentan que el buen funcionamiento que parece tener su modelo lo hacen apropiado para situaciones tipo *car-following*<sup>3</sup> y *stop-and-go*<sup>4</sup>, resultando adecuado para su uso en ITSs<sup>5</sup>.

En otro trabajo ([42]) los mismos autores comparan muchas metodologías tipo *car-following* con su modelo, y también con datos de campo.

En [44] se propone un modelo de alta fidelidad para la simulación de un gran volumen de tráfico a nivel regional. Su modelo utiliza conceptos de los modelos de autómatas celulares y de *car-following*. En este trabajo se propone el concepto de ocupación del espacio (*Space Occupancy* – SOC) utilizado para medir la congestión del tráfico.

Su propósito es simular un gran volumen de tráfico con un menor tiempo de ejecución utilizando algoritmos eficientes en un ordenador personal. Al igual

---

<sup>2</sup>Tiempo de reacción a la frenada (Brake reaction time): Es el intervalo de tiempo entre el instante en el cual un conductor reconoce la existencia de un objeto o riesgo en su trayectoria hasta que acciona los frenos. Este intervalo incluye el tiempo requerido para tomar la decisión de que se requiere frenar.

<sup>3</sup>Modelo Car-Following: También conocidos como modelos de tiempo continuo. Todos los modelos Car-following tienen en común que están definidas por ecuaciones diferenciales ordinarias para describir la velocidad ( $v_\alpha$ ) y posición ( $x_\alpha$ ) de los vehículos completamente.

Se asume que los estímulos de entrada de los conductores son tres:

- la propia velocidad ( $v_\alpha$ );
- la distancia entre el vehículo y el que le precede o líder (*Net Distance*), de parachoques a parachoques, ( $s_\alpha := x_{\alpha-1} - x_\alpha - l_{\alpha-1}$ ) al vehículo líder  $\alpha - 1$  ( $l_{\alpha-1}$  denota la longitud del vehículo);
- y la velocidad  $v_{\alpha-1}$  del vehículo líder

La ecuación del movimiento de cada vehículo se caracteriza por una función de aceleración que depende de estos estímulos de entrada:

$$\ddot{x}_\alpha(t) = \dot{v}_\alpha(t) = F(v_\alpha(t), s_\alpha(t), v_{\alpha-1}(t))$$

En general, el comportamiento de un vehículo  $\alpha$  no depende sólo de su líder inmediato  $\alpha - 1$ , sino de los  $n_\alpha$  vehículos que tiene delante. La ecuación del movimiento en esta forma más generalizada sería la siguiente:

$$\dot{v}_\alpha(t) = f(x_\alpha(t), v_\alpha(t), x_{\alpha-1}(t), v_{\alpha-1}(t), \dots, x_{\alpha-n_\alpha}(t), v_{\alpha-n_\alpha}(t))$$

<sup>4</sup>Ondas *Stop-And-Go*: Retenciones de tráfico

<sup>5</sup>*Intelligent Transportation Systems* (ITSs): Sistemas de Transporte Inteligentes. Son las técnicas avanzadas que se aplican al procesamiento, control, y gestión del tráfico.

que en nuestro caso, basan su simulador en conceptos de autómatas celulares. Aunque su modelo parece más preciso que el que se utiliza en la presente Tesis, en esta se da un paso más allá, utilizando el simulador dentro de un algoritmo genético para optimizar el tráfico (no solamente simularlo).

En [45], el Dr. Tveit, un veterano investigador de la *SINTEF*<sup>6</sup>, explica que un tiempo de ciclo común (*common cycle time*<sup>7</sup>) a todos los semáforos de un conjunto de intersecciones es una aproximación peor que ciclos independientes para cada intersección. Sus conclusiones parecen correctas y convincentes, y por este motivo se tienen en cuenta en la aproximación de la presente Tesis. En la metodología del modelo planteado, cada intersección tiene tiempos de ciclo independientes.

En [46] se propone el uso de señales de tráfico sensibles (*Responsive Signals*<sup>8</sup>), combinado con la capacidad de la red como criterio de control (el lugar del coste total del trayecto). La capacidad de la red se maximiza si las señales funcionan para equilibrar la densidad de tráfico en las zonas más cargadas de la red. Este es un nuevo ejemplo de optimizaciones locales múltiples en lugar de una optimización global como la que se realiza con la metodología que se propone en esta Tesis.

En [47] se presenta un sistema basado en gestión del conocimiento para la gestión de la congestión del tráfico. El modelo propuesto incluye un algoritmo de fusión de datos, un algoritmo de selección del plan de control apropiado y por último presenta el plan propuesto con una explicación del proceso de razonamiento llevado a cabo para ayudar a las decisiones de los operadores de tráfico. También en este trabajo se presenta un ejemplo de validación para mostrar la capacidad del sistema de reducir la congestión. Desde nuestro punto de vista, aunque esta propuesta parece una aproximación muy interesante, tanto la se-

---

<sup>6</sup>SINTEF: Fundación para la Investigación Científica e Industrial en el Instituto Noruego de Tecnología.

<sup>7</sup>*Common cycle time*: Programación muy sencilla del grupo de semáforos de una intersección o grupos de intersecciones. Todos los semáforos comparten una longitud de ciclo. El punto de inicio del ciclo o secuencia de fases (*stages*) puede ser diferente para cada semáforo pero todos recorren el mismo ciclo con cierto desfase entre ellos.

<sup>8</sup>*Responsive Signals*: Señales de tráfico capaces de adaptar su estado a la situación de tráfico actual en sus inmediaciones.

lección de la estrategia de control, como la estimación del tráfico futuro están basados en la experiencia de ingenieros de tráfico. En lugar de esto, en el modelo propuesto en este trabajo, se usa una combinación de dos técnicas ampliamente aceptadas y probadas. Además, se usa una estimación más precisa del tráfico futuro mediante microsimulación, y un algoritmo genético para la optimización del flujo de tráfico.

## 3.3 ATOS – Sistemas Avanzados de Optimización del Tráfico

### 3.3.1 Optimización de una Única Intersección

En [48] se controla una intersección aislada aplicando técnicas basadas en la teoría de control de sistemas lineales para resolver el problema del modelo de tráfico lineal. La principal contribución de esta investigación reside en el desarrollo de una metodología que utiliza la tecnología disponible para aliviar la congestión recurrente de una intersección aislada, causada por la gran demanda de transporte existente.

En [49] los autores presentan un modelo de las colas de cada carril en una única intersección de dos calles de dos carriles cada una, que tiene como variable independiente el tiempo. También presentan una metodología que según los autores, permite la determinación de esquemas de conmutación de tráfico óptimos.

El propósito del trabajo presentado en [50] es la optimización de cada intersección considerando sólo información local. Además, según los autores, este sistema puede adaptarse a fluctuaciones del tráfico a corto y largo plazo. En el modelo que defiende esta Tesis se realiza una optimización global en lugar de múltiples optimizaciones locales. Parece claro que la metodología que se plantea en esta Tesis puede explotar mucho más eficientemente la infraestructura de tráfico existente.

En [51] se publica un trabajo muy interesante. En esta investigación la red de tráfico se considera compuesta de intersecciones que deben de ser optimizadas de manera independiente. Proponen el uso de algoritmos de aprendizaje por refuerzo<sup>9</sup> para optimizar lo que consideran un problema de decisión

---

<sup>9</sup>Aprendizaje por Refuerzo: (*Reinforcement Learning*) subárea de lo que se denomina *Machine Learning*, y que tiene que ver con la manera en que un agente debería tomar acciones en un entorno de manera que se maximice la recompensa a largo plazo. El aprendizaje por refuerzo trata de encontrar una política que relacione los estados en los que se puede encontrar un agente con las acciones que este debería tomar.

*Machine Learning* es un subcampo dentro de la Inteligencia Artificial cuyo objetivo es el diseño y desarrollo de algoritmos y técnicas que permitan a los ordenadores “aprender”.

multi agente. En esta Tesis se plantea un enfoque diferente, dado que se considera que una optimización global que tenga en consideración a un tiempo todas las intersecciones de una zona puede dar mejores frutos; incluso en el caso de que optimizaciones locales puedan reducir el tiempo medio de espera de los vehículos, como parece que sucede en los resultados obtenidos en este trabajo.

### 3.3.2 Lógica Difusa

En [52] se propone la optimización local de una intersección en Tiempo Real. Este sistema se basa en Lógica Difusa. Se coincide con esta investigación en que una optimización adaptativa puede ser de gran interés (se testeó en [17]); sin embargo, una optimización global de la red de tráfico puede ser una aproximación más completa al problema.

En [53] los autores presentan un sistema de control difuso para alargar o acortar el ciclo de los semáforos. Mediante el uso de semáforos con sensores, se puede aumentar el ciclo del semáforo en cuestión cuando este detecta que hay muchos vehículos pasando, o por el contrario puede reducirlo cuando sólo pasan pocos vehículos. En este trabajo se simulan los resultados observándose una incremento en la eficiencia mediante el uso de estos semáforos. Este trabajo realiza una adaptación local para un único semáforo en lugar de una optimización global.

### 3.3.3 Redes de Petri

En [54] se utilizan las Redes de Petri<sup>10</sup> para representar de manera modular las redes de tráfico urbano. Una característica de interés de esta investigación es la posibilidad de representar los retardos (*Offset-time*<sup>11</sup>) entre los ciclos de diferentes semáforos de una manera empotrada en el mismo modelo. Aunque este es trabajo de interés, sólo se optimiza la coordinación entre ciclos de diferentes semáforos. En contraposición, la metodología que se plantea en esta Tesis es mucho más flexible porque implícitamente se optimiza sólo los *offsets* sino también la duración de cada fase o estado del ciclo (*stage*).

Otro trabajo que hace uso de las Redes de Petri es el que se referencia en [55]. En esta investigación se usan la Redes de Petri para controlar una única intersección por medio de controladores lógicos programables (*Programmable Logic Controllers - PLCs*). También en esta investigación se comparan tres métodos de modelado de los semáforos de una intersección y llegan a la conclusión de que el más apropiado es el combina las Redes de Petri con los PLCs.

### 3.3.4 Redes Neuronales

En [56] los autores presentan una aproximación basada en Redes Neuronales (NN) para optimizar el ciclo de los semáforos. La Red Neuronal se usa para implementar la función de control de los semáforos. El entrenamiento de la NN se alimenta exclusivamente con datos reales. El principal problema de

---

<sup>10</sup>Redes de Petri: representación matemática de un sistema distribuido discreto. Las redes de Petri fueron definidas en los años 1960 por Carl Adam Petri. Son una generalización de la teoría de autómatas que permite expresar eventos concurrentes.

Una red de Petri está formada por lugares, transiciones y arcos dirigidos. Los arcos conectan un lugar a una transición o una transición a un lugar. No pueden haber arcos entre lugares ni entre transiciones. Los lugares contienen un número cualquiera de fichas. Las transiciones se disparan, es decir consumen fichas de una posición de inicio y producen fichas en una posición de llegada. Una transición está habilitada si tiene fichas en todas sus posiciones de entrada.

En su forma más básica, las fichas que circulan en una red de Petri son todas idénticas. Se puede definir una variante de las redes de Petri en las cuales las fichas pueden tener un color (una información que las distingue), un tiempo de activación y una jerarquía en la red.

<sup>11</sup>Offset-time: El tiempo que transcurre desde que un semáforo cambia su estado a verde hasta que el siguiente semáforo, por ejemplo en una rambla, cambia también a verde.

que adolece esta aproximación es que necesita de sistemas con un módulo de adquisición de datos on-line. De momento la disponibilidad de estos sistemas es muy escasa.

El tiempo de desfase (*Offset Time*) entre dos semáforos se optimiza en [57] haciendo uso de Redes Neuronales. Aunque la metodología que se propone no trata explícitamente el parametro de desfase, se enfoca la optimización del tráfico de una manera mucho más flexible.

### 3.3.5 Aproximaciones Híbridas

El proyecto *TRANSIMS*<sup>12</sup> usa modelos basados en autómatas celulares para simular el tráfico de la ciudad de Fortworth en Dallas (EE. UU.) utilizando computación paralela ([59]). Este artículo presenta una aproximación al problema que se basa permitir cierta holgura en la programación de las rutas óptimas, que son recalculadas cada día. Comenzando con un plan de rutas inicial, se ejecuta la microsimulación basada en rutas. Los resultados de la microsimulación son realimentados al enrutador, que redefine las rutas para un porcentaje de todos los trayectos.

En [60] se utiliza una aproximación “ad hoc” para optimizar una red de tráfico consistente en 9 intersecciones. Utilizan los Algoritmos Genéticos como técnica de optimización, sobre una única máquina. En la función de evaluación se utiliza el modelo *CORSIM*<sup>13</sup> en la función de evaluación del Algoritmo Genético. En este trabajo la escalabilidad no está resuelta. Los autores reconocen que es un sistema a medida no escalable. Nuestro sistema tiene la deseable cualidad de la escalabilidad gracias al uso un Cluster Beowulf como dispositivo de computación paralela, y a la evaluación paralela de los individuos del algoritmo genético.

En [62] se propone el concepto de Tiempo Óptimo en Verde (*Optimal Green*

---

<sup>12</sup> *TRANSIMS* (*TR*ansportation *AN*alysis and *SIM*ulation *S*ystem): [58]Es un sistema de simulación basado en agentes, que simula segundo a segundo los movimientos de personas y vehículos en una red metropolitana de gran escala.

<sup>13</sup> *CORSIM*: Corridor Traffic Simulation Model ([61]) – Modelo de Simulación de Tráfico en un Callejón.

*Time*). Los autores dicen en su trabajo que mediante este algoritmo se reduce el tiempo medio de espera por vehículo, al tiempo que se mejora la media de velocidad de los vehículos utilizando reglas difusas y Redes Neuronales. Según los autores, mediante simulación este método parece ser mucho más eficiente que usar tiempos fijos de ciclo de los semáforos. La Red Neuronal Difusa mejora de manera consistente el tiempo medio de espera, la velocidad de los vehículos y el consumo de combustible. Este trabajo sólo tiene en cuenta una pequeña cantidad de semáforos (dos intersecciones cercanas). Se coincide con los autores en la poca eficiencia de los ciclos fijos de los semáforos.

En [63] se publica un trabajo interesante en el cual se combinan un Algoritmo Genético y simulación de tráfico. En esta investigación se presenta un sistema de enrutado y planificación horaria para vehículos de transportes de carga. Utilizan los Algoritmos Genéticos (GAs) como técnica de optimización. El objetivo del GA es la minimización del coste del trayecto. También se propone y prueba en una red real un algoritmo de enrutado dinámico de vehículos. El modelo de simulación del tráfico es macroscópico.

Otro trabajo muy interesante se presenta en [64]. En este se formula un modelo de asignación dinámica tipo *Dynamic System-Optimal (DSO)*<sup>14</sup> para una red urbana congestionada con un determinado número de intersecciones con semáforos. También combinan simulación del tráfico con Algoritmos Genéticos. El propósito de este trabajo es asignar a cualquier conductor una ruta. El GA se utiliza para minimizar el tiempo total de trayecto. Se utiliza un modelo macroscópico para estimar los retardos del tráfico. El problema DSO se resuelve primero con tiempos fijos de semáforo, y también optimizando los tiempos de semáforo.

---

<sup>14</sup>Dynamic System-Optimal (DSO): Política de asignación de ruta a los conductores en una red. Se caracteriza por que se asume que los conductores cooperarán entre ellos, escogiendo entre las opciones que se les brinde, aquellas que beneficien a todo el sistema en lugar del beneficio particular de cada uno. Aunque esta política puede ser tachada de irreal, puede ser un marco útil para evaluar varias estrategias de gestión de tráfico.



# Capítulo 4

## Metodología

### 4.1 Descripción General de la Metodología Propuesta

Con el objetivo de la resolución del problema planteado en el capítulo 2 se ha desarrollado una metodología basada en tres pilares:

- Un multicomputador MIMD<sup>1</sup> tipo *Cluster Beowulf*;
- Un Algoritmo Genético;
- y Un Simulador de Tráfico Microscópico.

El multicomputador ha sido elegido como herramienta de computación intensiva dadas las prestaciones de este tipo de computadores paralelos, la excelente relación calidad/precio, y los requerimientos de computación necesarios para el algoritmo genético y sobretodo para el simulador microscópico de tráfico.

En segundo lugar se ha optado por usar un algoritmo genético porque es una técnica de optimización no determinística que parece ser sumamente apropiada para un problema de optimización combinatoria como el que se afronta, para

---

<sup>1</sup>MIMD: Flujo de instrucciones múltiple y flujo de datos múltiple (*Multiple Instruction stream Multiple Data stream*). Es un ordenador paralelo, o un conjunto de máquinas que funcionan de manera asíncrona e independiente. Tanto los datos como las instrucciones del programa paralelo se ejecutan de manera independiente.

el cual no se conoce una solución determinística, y con un espacio de búsqueda tan grande que hace inviables búsquedas intensivas.

Por último, el tercer pilar sobre el que se asienta la metodología propuesta es un Simulador de Tráfico del tipo de los Microsimuladores, basado a su vez en los Autómatas Celulares.

A continuación se describen con detalle cada uno de los tres elementos.

## 4.2 Dispositivo de Computación Paralela – *Cluster Beowulf*

Con el tiempo, las aplicaciones informáticas requieren cada vez más y más potencia computacional. En el pasado, los computadores de más potencia eran extremadamente caros y prohibitivos para la mayoría de los usuarios potenciales.

Esta situación ha variado dramáticamente en los últimos años desde que en 1994 T. Sterling y D. Becker ([65]) desarrollaran un clúster de computación distribuída (*distributed computing cluster*) sobre el sistema operativo Linux y utilizando componentes hardware estándar para PCs (*Off the shelf*).

Este nuevo tipo de multicomputador MIMD tiene las virtudes de ser flexible, escalable, reusable y masivamente paralelo, además de una estupenda relación calidad/precio. Con todo esto, parece claro que este dispositivo es muy apropiado para ejecutar algoritmos genéticos, los cuales pueden ser altamente paralelizables. Además, al estar compuesto de elementos estándar PC, ello permite que se utilice Software Libre (*Free Software*<sup>2</sup>).

El sistema propuesto se basa en un *Cluster Beowulf* de cinco nodos. Dado que este tipo de dispositivos es muy escalable, ello permite poder afrontar muy diversas escalas de red de tráfico con el mismo sistema, simplemente ampliando el hardware.

### 4.2.1 Hardware

Cada nodo del *cluster* consiste en un ordenador personal con un microprocesador Pentium IV a 3.06 GHz, un Gigabyte de memoria RAM tipo DDR y un disco duro de 80 Gigabytes a 7200 revoluciones por minuto. Los equipos están interconectados a través de un *switch* Gigabit Ethernet. Cada equipo dispone exactamente del mismo hardware, excepto el equipo principal, que dispone de una tarjeta de red extra para la conexión externa del *cluster*.

---

<sup>2</sup>Free Software: (*Software Libre*) Software cuyo código está disponible bajo un tipo de licencia que permite a los usuarios usar, cambiar y mejorarlo y distribuirlo modificado o no. Generalmente es un *Software* desarrollado de manera pública y colaborativa

### 4.2.2 Software

Cada nodo tiene instalado el sistema operativo Red Hat 9 en él — Kernel 2.4.20-28.9, glibc versión 2.3.2 y gcc versión 3.3.2. Para la programación paralela también fue necesaria la instalación del software LAM/MPI (LAM 6.5.8, MPI 2).

Para la programación del algoritmo genético existen numerosas librerías. Sin embargo, para tener un control fino de la aplicación, se decidió desarrollar todos las rutinas del algoritmo genético en ANSI C, utilizando los comandos MPI para la programación paralela.

En lo referente al programa paralelo se ha seguido el paradigma maestro/esclavo de programación paralela. En la aplicación hay dos tipos de procesos: un proceso maestro y uno o varios procesos esclavos. El proceso maestro se encarga de la mayor parte del algoritmo genético:

- Generación de la población inicial,
- Distribución de los cromosomas entre los esclavos para que efectúen la correspondiente evaluación,
- Recopilación de las evaluaciones de la población,
- Selección de los individuos mejor adaptados,
- Cruce de los individuos seleccionados, y
- Mutación de algunos individuos.

Los procesos esclavo se encargan de:

- Recoger el cromosoma que envía el proceso maestro,
- Realizar la evaluación del mismo, y
- Enviar de vuelta el valor de evaluación correspondiente al proceso maestro.

## 4.3 Algoritmo Genético

### 4.3.1 Criterio de Optimización. Función de Ajuste

Tras haber probado varios criterios, se encontraron los mejores resultados utilizando el siguiente criterio:

*El valor absoluto del número de vehículos que han abandonado la red en el transcurso de la simulación.*

Durante la simulación de tráfico que se realiza, que se explicará en la sección 4.4, se crean muchos vehículos tal y como si llegaran a los puntos de entrada de la zona acotada que bajo estudio. Además, a lo largo de la simulación también sucede que muchos vehículos alcanzan el punto de destino, que es un punto de salida de la zona. En ese caso, esos vehículos son extraídos de la red.

El número de vehículos que alcanzan esos puntos de salida ilustra significativamente cómo ha ido la simulación con respecto a la eficacia de la red de tráfico, facilitando que el mayor número de vehículos la crucen en el menor tiempo posible. Además, este parámetro permite comparar objetivamente el comportamiento del tráfico con una programación de semáforos frente al comportamiento con otra combinación.

Con respecto al criterio de optimización elegido es preciso puntualizar lo siguiente:

1. Para cualquier combinación de tiempos (cromosoma) que se evalúe la situación inicial de ocupación de la red de tráfico es la misma.
2. Para cualquier combinación de tiempos (cromosoma) que se evalúe el número de iteraciones que dura la simulación de tráfico es el mismo.

Teniendo lo anterior en consideración, parece claro que el cromosoma, o los cromosomas que den lugar a que un número máximo de vehículos abandonen la red de tráfico, es o son soluciones deseables para el problema formulado en la sección 2.2. También parece lógico que si un cromosoma da lugar a que un determinado número de vehículos abandonen la red, esta solución sea

considerada siempre como una solución mejor con respecto a cualquier otro cromosoma que de lugar a que un menor número de vehículos hayan salido de la red.

#### 4.3.1.1 Criterios de Optimización Estudiados

Durante el desarrollo de la presente Tesis se han probado los siguientes criterios de optimización:

- Tiempo medio en la red – Mean Elapsed Time, MET. Durante la simulación se almacenan el tiempo de llegada y salida de cada vehículo. Con esos valores es fácilmente calculable el número de iteraciones de simulador empleadas por cualquier vehículo para abandonar la red. Una vez que la simulación finaliza, se calcula el valor medio de esa diferencia teniendo en cuenta todos los vehículos que lograron salir de la red;
- Los valores de la desviación típica de los tiempos en la red para todos los vehículos que salieron durante la simulación;
- Una combinación lineal entre la desviación típica y la media de los tiempos de los vehículos en la red;
- Una combinación lineal entre el MET y el número total de vehículos que abandonaron la red durante la simulación;
- La densidad media de ocupación de la red. Para calcular este parámetro se divide la red en pequeños fragmentos y se calcula la media del número de vehículos presentes en cada fragmento.

En el proceso de búsqueda del o los criterios de optimización más apropiado se encontró una situación inesperada. Si se incluía la minimización del MET en la evaluación, se inducía a que el algoritmo evolucionara en una dirección no deseada. Los cromosomas que colapsaran la red más rápido eran los que obtenían un mejor valor de *fitness*. Esto sucedía porque sólo unos pocos vehículos lograban salir de la red (en muy pocas iteraciones, por estar cerca de sus correspondientes salidas) antes de que la red se bloqueara.

Si bien, el tiempo medio en la red puede ser una medida significativa en situaciones concretas; en el sistema propuesto no vale como criterio de optimización por lo dicho. Sin embargo, sí que se ha utilizado en el estudio de escalabilidad (sección 5.2) y para comparar las simulaciones determinísticas y las estocásticas, como se puede ver en la sección 5.3. En estos dos trabajos iniciales se ha utilizado simplemente el Tiempo Medio en la Red (M.E.T.) como función de ajuste (*fitness function*).

### "Stages" de las Intersecciones $i0$ e $i1$

G: Verde, O: Ámbar, R: Rojo

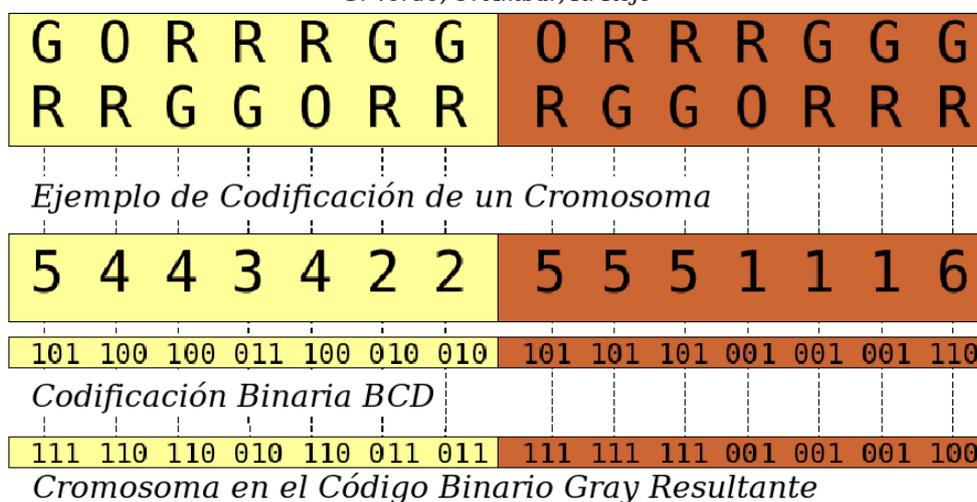


Figura 4.1: Codificación de los Cromosomas

#### 4.3.2 Codificación de los Cromosomas

En la figura 4.1 se presenta un ejemplo con la codificación de cromosoma que se ha utilizado para la realización de esta Tesis doctoral. En la figura se representa el cromosoma correspondiente a una red de tráfico muy sencilla, consistente en dos intersecciones con dos semáforos en cada una de ellas.

Bajo la red de tráfico se han puesto los estados o *stages*<sup>3</sup> de cada semáforos separados en dos regiones, una para cada una de las dos intersecciones. El estado de cada semáforo puede ser Verde (G), Ámbar (O) o Rojo (R). Esta

<sup>3</sup>Stage: En un instante determinado, cada uno de los estados asociados a una intersección, que contiene un conjunto de semáforos.

secuencia de fases (*stages*) es preestablecida (suministrada por el departamento de tráfico a cargo de la zona de que se trate) y se repite *ad infinitum* – o hasta que se detenga la simulación correspondiente.

En la misma figura, bajo la secuencia de fases se muestra un cromosoma hipotético. Cada entero significa el tiempo (segundos) de la duración de la correspondiente fase.

El objetivo del sistema que se propone es optimizar la duración de cada fase para obtener el mejor comportamiento de tráfico posible para la red sometida a estudio.

Como puede observarse en la figura 4.1, tras varios pasos se produce una traducción de la cadena de enteros a una codificación binaria tipo Código Gray (Black – [66]). Como se comentará, se ha realizado un estudio ([67]) del cual parece deducirse que es muy ventajoso el utilizar este tipo de codificación. En la sección 5.4 se explica esto con mayor detalle. Además, en el apéndice C se muestra una pequeña explicación del funcionamiento del código Gray utilizado.

El principal motivo por el cual se utiliza esta codificación Binaria Gray es porque está diseñado de manera que un cambio en el valor de un bit – por ejemplo, debido a una mutación – provoca que el valor entero de la duración de la fase correspondiente sólo aumente o disminuya una unidad. Esta es una característica deseable porque hace que el espacio de búsqueda se ajuste a la métrica de distancia de *Hamming*.<sup>4</sup>

### 4.3.3 Población Inicial

En la creación de cada individuo de la población inicial, se elige un valor aleatorio para la duración de cada *stage*, dentro de un rango que ha sido preestablecido “*a priori*”.

---

<sup>4</sup>Distancia de *Hamming*: El número de bits en que difieren dos cadenas binarias. Más formalmente, la distancia de *Hamming* entre dos cadenas A y B es  $\sum |A_i - B_i|$  ([68]).

En Teoría de la Información se denomina Distancia de *Hamming* entre dos cadenas de igual longitud al número de posiciones para las cuales el símbolo correspondiente es diferente. En otras palabras, mide el número de sustituciones requeridas en una de las dos cadenas para que sea igual a la otra, o el número de errores en una cadena con respecto a la otra. Por ejemplo, la Distancia de *Hamming* entre 11111 y 01101 es 2.

Fue definida en [69] por Richard W. Hamming.

#### 4.3.3.1 Generación de Números Aleatorios

Para la generación de los números aleatorios se ha empleado el generador MT19937 de Makoto Matsumoto y Takuji Nishimura, conocido como el "Mersenne Twister". Este generador ha pasado los tests estadísticos DIEHARD, como puede verse en [70]. Las semillas que se utilizan para alimentar a este generador se obtienen del dispositivo '/dev/urandom' de que se dispone en el sistema operativo Red Hat 9.

#### 4.3.4 Estrategia de Selección

Se ha elegido una combinación de dos estrategias clásicas de selección:

- El Truncado y
- El Elitismo

Esto significa que, en cada generación, un pequeño grupo de individuos– los mejores dos individuos en el modelo que propone esta Tesis – son clonados a la siguiente generación. El resto de la siguiente generación se crea cruzando los individuos de un subconjunto con los mejor evaluados – habitualmente un 66% de la población.

Esta combinación parece la más apropiada, entre el conjunto de estrategias de selección probadas, para el problema planteado.

A continuación se explican sucintamente otras estrategias de selección probadas:

- Elitismo: La población se ordena de mejor a peor evaluados. Entonces, un pequeño grupo de los mejores (élite) son clonados a la siguiente generación;
- Truncado: La población se ordena por *fitness*. Luego la población se divide en dos subconjuntos. El primero (aquellos con mejor *fitness*) es seleccionado para sobrevivir y el segundo simplemente se descarta;

- Torneo: Se escogen aleatoriamente pequeños grupos de individuos. El individuo con mejor fitness de cada grupo es seleccionado;
- Torneo Aleatorio: Este es muy similar al anterior, con la diferencia de que no siempre se escoge al mejor de cada grupo. Esa decisión dependerá de una función de probabilidad;
- Selección Lineal de Ruleta: Cada individuo tiene una probabilidad de supervivencia que es proporcional a su valor de fitness;
- Elitismo combinado con Torneo Aleatorio.

### 4.3.5 Operador de Cruce

Se han probado varios operadores de cruce (Cruce Uniforme, Cruce en dos puntos usando puntos fijos y utilizando dos puntos aleatorios) y se llegó a la conclusión de que, al menos para el problema concreto que se plantea en esta Tesis, el mejor era el tercero.

Su funcionamiento es sencillo. Dados dos individuos “padre”, se escogen dos puntos aleatorios a lo largo de la longitud del cromosoma. Se cortan los dos cromosomas por esos mismos puntos obteniéndose tres pedazos de cada uno de ellos. Los nuevos individuos “hijo” son el resultado de intercambiar el trozo central de ambos cromosomas “padre”.

El modo en que la codificación Binaria Gray afecta a este operador se explica con detalle en la sección 5.4.

### 4.3.6 Operador Mutación

El operador mutación es muy sencillo. Simplemente se elige aleatoriamente un bit del cromosoma elegido para sufrir una mutación y se invierte su valor. La probabilidad de mutación determina qué individuos deben sufrir una mutación.

Para el caso objetivo de esta Tesis se ha elegido una probabilidad de mutación variable. Tras varios tests se ha llegado a la conclusión de que, al menos para este problema, los resultados hacen recomendable el uso de una

probabilidad de mutación variable (ver apartado 5.5.4 y [67]). El valor de la probabilidad de mutación empieza con un valor muy alto que va decreciendo generación tras generación al multiplicarlo por un factor en el rango  $(0,1)$ , hasta que, al final de la evolución, se aproxima a un valor de probabilidad del orden de la inversa del tamaño de la población utilizado.

## 4.4 Modelo de Simulación de Tráfico desarrollado

La simulación del tráfico de vehículos es conocida por su dificultad. En la actualidad se usan principalmente dos tipos de modelo. El primero es el grupo de modelos macroscópicos. Están basados en la Dinámica de Fluidos y abstraen el flujo de tráfico como si se tratara de un fluido continuo.

El otro grupo de modelos de simulación de tráfico es el de los microsimuladores. En este tipo de simulación el tráfico está considerado como compuesto por partículas discretas que siguen un conjunto de reglas.

En la última década se ha establecido la creencia generalizada de que los simuladores microscópicos son más cercanos a la realidad que los macroscópicos para el modelado del tráfico. Un tipo de modelo microscópico con gran aceptación es el modelo de autómatas celulares.

La literatura científica está repleta de trabajos que utilizan modelos macroscópicos para el tráfico ([18] y [19]). En los años 50 del siglo XX aparecieron algunas teorías llamadas teorías continuas de primer orden (*first order continuum theories*) para el tráfico en las autopistas. En los años 70 y más tarde aparecieron otros modelos de segundo orden para corregir las deficiencias de los primeros ([20], [21], [22], [23], [24], [25]).

En [26] se cuestionan seriamente los modelos de segundo grado debido a varios problemas, por ejemplo predicciones de flujo negativo del tráfico, y velocidades negativas bajo ciertas condiciones. En [71] estos modelos macroscópicos parecen renacer de sus cenizas en virtud de varias modificaciones en su formulación. Sin embargo, se sigue considerando que los microsimuladores son más apropiados para capturar los comportamientos de “grano fino” de los vehículos, además de que también permiten la asignación de propiedades cuantitativas o cualitativas a los vehículos individuales, lo cual puede ser de gran utilidad para refinar el criterio de optimización en el futuro.

Hoy en día los simuladores microscópicos se utilizan ampliamente. Su principal problema es que son más lentos a la hora de ejecutarlos que los

simuladores macroscópicos. Una notable excepción a esto son los Autómatas Celulares, cuyos tiempos de ejecución son similares a los conseguidos con los simuladores macroscópicos.

Por todo ello, se ha desarrollado un Simulador de Tráfico basado en Autómatas Celulares.

#### 4.4.1 Simulador de Autómatas Celulares

Los simuladores basados en los Autómatas Celulares están basados en la teoría desarrollada por John Von Neumann [72] al final de los años cuarenta del pasado siglo, en el grupo de Lógica de Ordenadores de la Universidad de Michigan.

Los Autómatas Celulares son sistemas dinámicos discretos cuyo comportamiento se especifica en términos de relación local. El espacio se muestrea en una red de celdas, y cada celda almacena unos pocos bits. Según avanza el tiempo, cada celda decide su próximo estado dependiendo del estado de sus celdas vecinas, y siguiendo unas pocas reglas comunes a todas.

En el modelo de Autómatas Celulares no sólo se muestrea el espacio en un conjunto de celdas, sino que también el tiempo, y por consiguiente la velocidad, son discretizados. El tiempo continuo se transforma en iteraciones. En el momento de la discretización se establece una relación entre tiempo e iteraciones, como por ejemplo  $1(s.) \equiv 1(it.)$ . Por consiguiente, la velocidad pasa de *metros por segundo* a *celdas por iteración*.

En el trabajo [31] se puede ver una lista de modelos microscópicos de tráfico y un estudio comparativo entre ellos. Aunque los resultados no son concluyentes los autores argumentan que los modelos con menor número de parámetros parecen tener mejores resultados.

Para el modelo defendido en esta Tesis, se ha desarrollado un modelo de tráfico basado en el modelo SK<sup>5</sup>[27] y el modelo SchCh<sup>6</sup> [28]. El modelo SchCh es una combinación de un modelo del tráfico en las autopistas

---

<sup>5</sup>Stephan Krauss, el autor.

<sup>6</sup>Andreas Schadschneider y Debashish Chowdhury, los autores.

(Nagel-Schreckenberg [29]) y un modelo muy sencillo del tráfico en las ciudades (Biham-Middleton-Levine [30]). El modelo SK añade el frenado suave (*smooth braking*) al modelo para evitar cambios abruptos en la velocidad. Debido a sus mejores resultados en todos los tests mostrados en el trabajo [31] el modelo SK ha servido como inspiración para el desarrollo del modelo que se plantea en esta Tesis.

Una ventaja adicional de este simulador es que permite la evaluación de parámetros en cada individuo (célula), como pueden ser el consumo de combustible, la emisión de elementos contaminantes(gases, ruidos, etc.) u otros.

#### 4.4.2 Modelo Mejorado de Autómatas Celulares para la Simulación de Tráfico

Basado en el modelo de Autómatas Celulares se ha desarrollado un modelo no lineal para la simulación del comportamiento del tráfico rodado. La estructura base es la misma que en los Autómatas Celulares estándar. Sobre esta base se han añadido dos niveles nuevos de complejidad mediante la creación de dos nuevas abstracciones denominadas *paths* (rutas) y *vehicles* (vehículo).

- *paths*: son subconjuntos no excluyentes del conjunto de celdas de la red total. Por cada par formado por una celda de entrada a la red y una celda de salida de la red existe un *path*. Para hacer esto, en cada *path* se almacena una colección de las posiciones posibles y para cada una de ellas un vector con las siguientes posiciones permitidas. En la figura 4.2 se pretende ilustrar esta idea.
- *Vehicles* es un vector de estructuras, cada una de ellas con las siguientes propiedades:
  1. Posición: La celda en la cual se encuentra el vehículo. Obviamente, en cada celda sólo puede estar presente un único vehículo.
  2. Velocidad: La velocidad actual del vehículo. Significa el número de celdas por iteración que avanza el vehículo a cada iteración del

simulador.

3. *Path*: Cada vehículo está unívocamente relacionado con un *path* en el modelo.

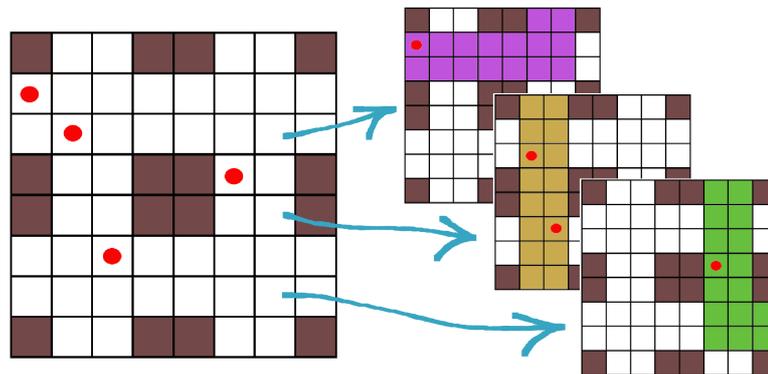


Figura 4.2: Rutas en el Modelo de Autómatas Celulares Mejorado

Estas son las reglas que se aplican a la actualización de la posición de cada vehículo en el sistema propuesto.

1. Un vehículo intenta acelerar hasta la máxima velocidad permitida. Si no tiene ningún obstáculo en su camino, como otro vehículo o un semáforo en rojo, cada vehículo acelerará a un ritmo de una celda por iteración más, cada iteración.
2. Si un vehículo puede alcanzar una posición ocupada previamente por otro vehículo, el primero reducirá su velocidad y ocupará la celda anterior al precedente.
3. Si un vehículo llega a una celda que tiene delante un semáforo en rojo, parará.
4. *Smooth Braking*: Una vez se haya actualizado la posición del vehículo se pasa a actualizar su velocidad. Para hacer esto se tienen en cuenta las celdas libres frente al vehículo.

5. *Multi-lanning*: Cuando un vehículo está intentando avanzar o actualizar su velocidad, se le permite considerar posiciones en carriles paralelos si la celda inmediata está ocupada.

De esta manera se tiene multitud de vehículos siguiendo diferentes *paths* en la misma red de celdas. Otra manera de ver este modelo sería como un conjunto de  $N_{paths}$  redes de autómatas celulares funcionando en paralelo sobre los mismos puntos físicos (ver la figura 4.2).

# Capítulo 5

## Propuesta de Resolución

### 5.1 Introducción

En el capítulo 4 se ha explicado con detalle el modelo que se plantea en esta Tesis, cuyo principal objetivo es la optimización de los tiempos de los semáforos en una red de tráfico urbana. Una vez diseñado este modelo se han ido realizando estudios con el objeto de validarlo, probarlo en distintas situaciones, descubrir sus puntos fuertes y débiles, y en definitiva, explorar la potencialidad del mismo.

A continuación se detalla lo más significativo de este proceso de estudio del modelo propuesto. Este capítulo se ha organizado en diferentes secciones de acuerdo, principalmente, con las respectivas publicaciones que se han derivado del desarrollo de esta Tesis.

### 5.2 Estudio de escalabilidad

En esta sección se exponen los resultados de un trabajo de investigación, presentado en el congreso OPTDES IV<sup>1</sup>, en el cual se estudió la escalabilidad del modelo propuesto en esta Tesis.

El estudio se realizó con cuatro escalas de red de tráfico. Sus estadísticas se muestran en la tabla 5.1. Con estas cuatro escalas se ha estudiado el tiempo de

---

<sup>1</sup>Optimization y Design in Industry IV, Tokio, Japón, (26-30 de Septiembre de 2004)

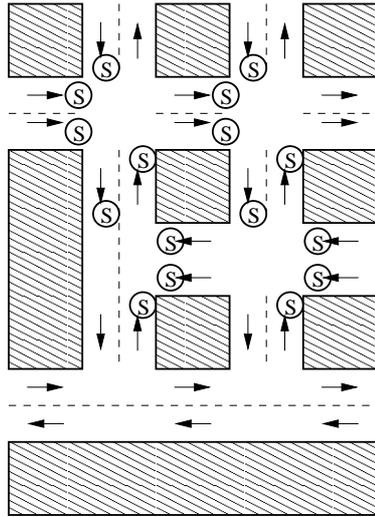


Figura 5.1: Red Escala\_1

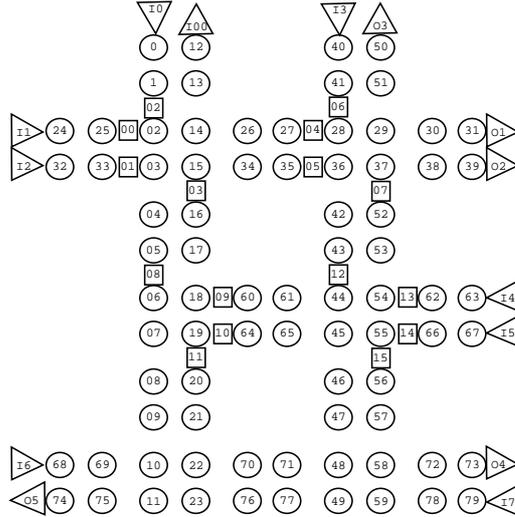


Figura 5.2: Red Escala\_1 Discretizada

	Celdas	Semáforos	Intersecciones	Entradas	Salidas	Tamaño Cromosoma
Escala_1	80	16	4	6	8	96 bytes
Escala_2	202	24	12	14	14	192 bytes
Escala_3	248	40	20	18	18	320 bytes
Escala_4	1176	160	80	36	36	640 bytes

Tabla 5.1: Estadísticas de las cuatro escalas de red de Tráfico

ejecución y la evolución del valor de la función de ajuste (*fitness function*). En la tabla 5.1, “Celdas” significa el número de celdas (autómatas) presentes en cada red. Las celdas se sitúan aproximadamente a una distancia de 7 metros entre sí. Esta distancia es una distancia comúnmente usada y es aproximadamente el espacio que necesita un coche medio en una situación de máxima ocupación de la red, como un atasco. “Semáforos” es el número de semáforos presentes en la red estudiada. “Intersecciones”, “Entradas” y “Salidas” son el número de intersecciones, de celdas de entrada y de salida respectivamente, para cada caso. Finalmente, “Tamaño Cromosoma” significa el tamaño en bytes de cada cromosoma en cada tamaño de red.

En las figuras 5.2 (Escala 1), 5.3 (Escala 2), 5.4 (Escala 3) y 5.5 (Escala 4) se representan las cuatro redes con las que se ha realizado este estudio. Como se mostró en 2.1, en todas esas figuras se representa cada semáforo con un rectángulo, y las entradas y salidas con triángulos.

A continuación se enumeran los valores de determinados parámetros, que

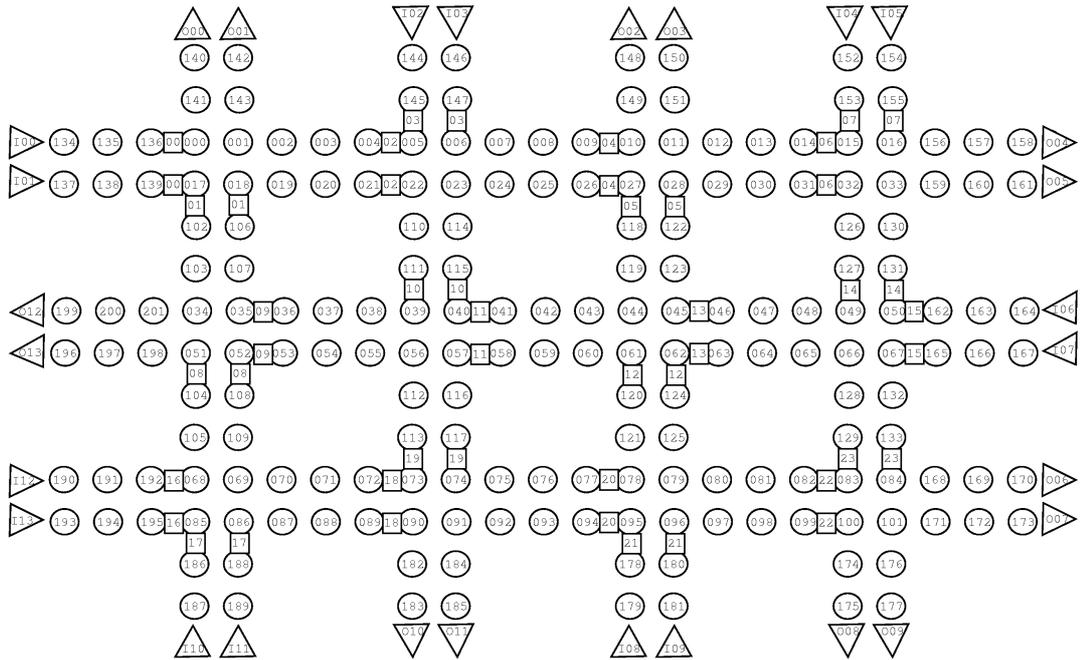


Figura 5.3: Escala\_2

han sido comunes a los experimentos realizados con las cuatro escalas de red:

- El tamaño de la población es de 200 individuos.
- Cada ejecución del algoritmo genético evoluciona durante 200 generaciones.
- Se ha utilizado una probabilidad de mutación variable. Su valor inicial es de 0.75 y decrece por un factor de 0.975.
- La relación entre el tiempo y las iteraciones es de una iteración por segundo. Este valor está escogido porque un segundo es aproximadamente el tiempo de respuesta de un conductor humano.
- Por último, cada simulación tenía una duración de 1500 iteraciones.

### 5.2.1 Evolución de los Valores de la Función de Ajuste

Como se explicó en la sección 4.3.1, para este estudio de escalabilidad inicial se ha utilizado como función de ajuste el Tiempo Medio en la Red (M.E.T.)

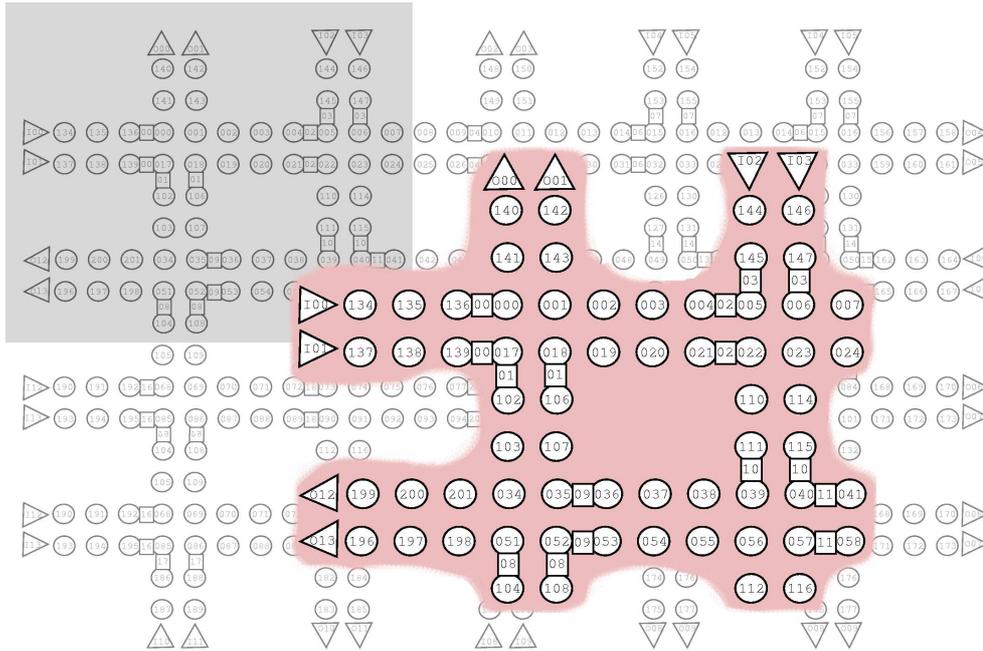


Figura 5.4: Escala\_3 con Detalle Ampliado

de los vehículos.

Por cada escala de red se lanzaron 30 ejecuciones del algoritmo genético.

A continuación se representan tres gráficas para cada caso:

- Evolución de los Mejores Valores de *Fitness*: Secuencia formada por el mejor valor de *fitness* de cada generación en la evolución del algoritmo genético que alcanzó un mejor *fitness* en la última generación.
- Evolución del Valor de *Fitness* Medio: Se representa el valor promedio entre las evoluciones de los mejores *fitness*, generación por generación.
- Desviación Típica de los Valores del *Fitness*: Desviación Típica entre las evoluciones de los mejores *fitness* de las 30 ejecuciones.

En la figura 5.6 se representan estas curvas para las cuatro redes estudiadas.

La figura 5.7 muestra la mejora en el *fitness* lograda para cada escala. En esta gráfica se representa con dos barras por caso, la mejora del *fitness* para la mejor ejecución, y la mejora media respectivamente.

La conclusión con esos resultados es que se tiene la convergencia de la optimización para los cuatro casos en 200 generaciones. La mejora media del

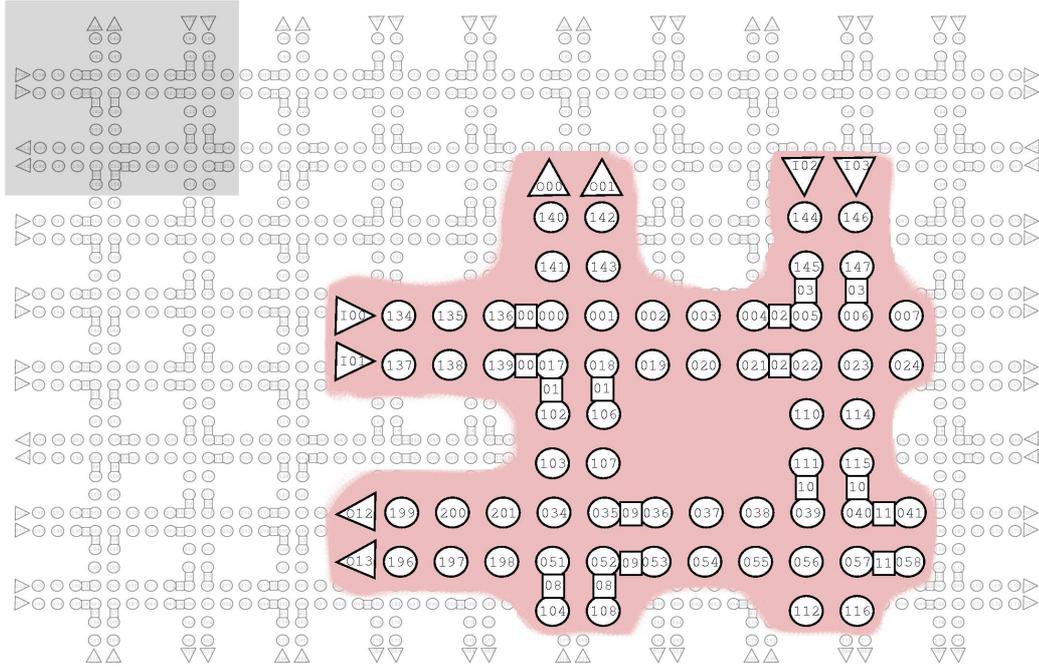


Figura 5.5: Escala\_4 con Detalle Ampliado

$fitness$  se mantiene siempre por encima del 30%.

### 5.2.2 Estudio del Tiempo de Ejecución

El objetivo de este apartado es observar el comportamiento del sistema en cuanto a requerimientos computacionales, al aumentar el tamaño de la red estudiada. En la figura 5.8 se muestra el valor medio del tiempo de ejecución, y el valor relativo de este tiempo frente al tamaño de la población, al tamaño del cromosoma, y al producto de ambos, respectivamente.

En esta figura se puede apreciar como la relación entre la escala de la red y el tiempo de ejecución se mantiene estable, excepto, quizás, para la Escala\_4, en cuyo caso sería recomendable escalar el hardware. Esto es muy fácil de realizar, teniendo en cuenta que se usa un *Cluster Beowulf* como multicomputador. Sería, simplemente, añadir equipos al mismo.

### 5.2.3 Comparación de la Optimización

Finalmente, en este punto se llevaron a cabo comparaciones entre los resultados logrados con el modelo propuesto, y los que se obtienen con otros modelos muy

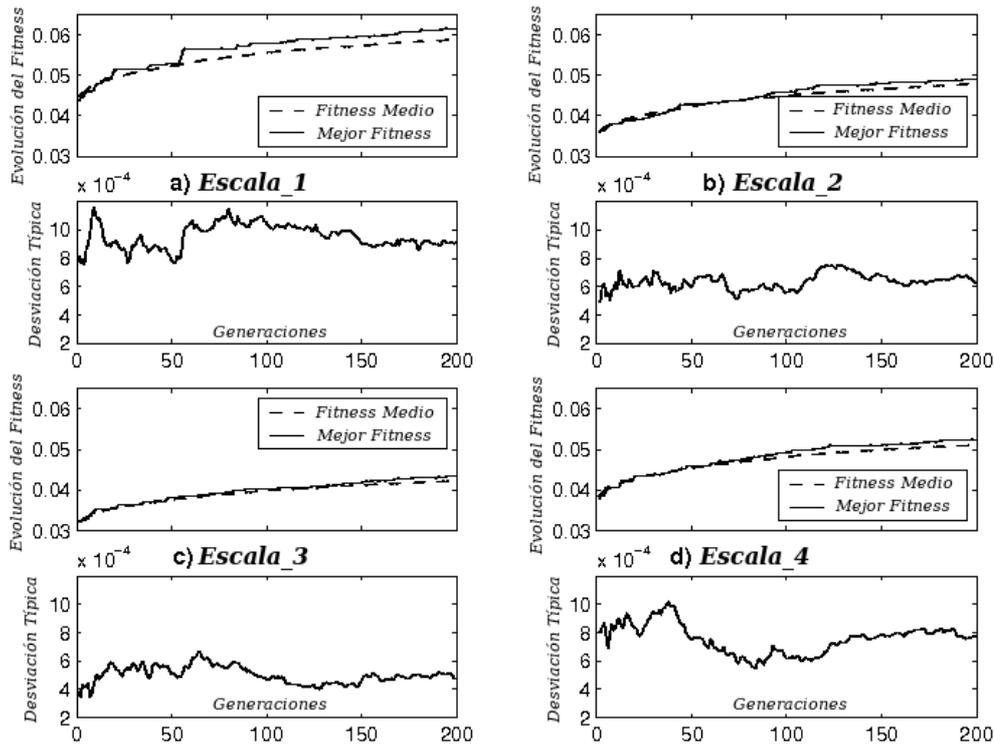


Figura 5.6: Evolución de los Mejores *Fitness*, *Fitness* medio, y Desviación Típica para cada Escala

sencillos. Los esquemas de asignación de estado a los semáforos con los que se efectuó la comparación fueron los siguientes:

- Asignación aleatoria del estado verde a uno de los semáforos de la intersección. A este modelo se lo denomina en este estudio RanSim.
- Asignación fija del mismo tiempo de estado verde a cada semáforo en un orden fijo. A este modelo se lo denomina en este estudio FixSim.
- Asignación del estado verde al semáforo con la cola de vehículos más larga. A este esquema de fuerte *feedback*<sup>2</sup> e Inteligencia Local se lo denomina en este estudio LISim. El siguiente semáforo que se pondrá en verde se decide en función del número de celdas ocupadas tras cada semáforo. El semáforo con un número mayor pasa a estar en verde. Si

<sup>2</sup>*Feedback* (o Realimentación): Dado un sistema tipo “caja negra” con una entrada y una salida, el *Feedback* es una parte de la salida que se “conecta” como una entrada más al sistema. De esta manera, la “caja negra” tiene información de su salida y puede corregir o mejorar su funcionamiento.

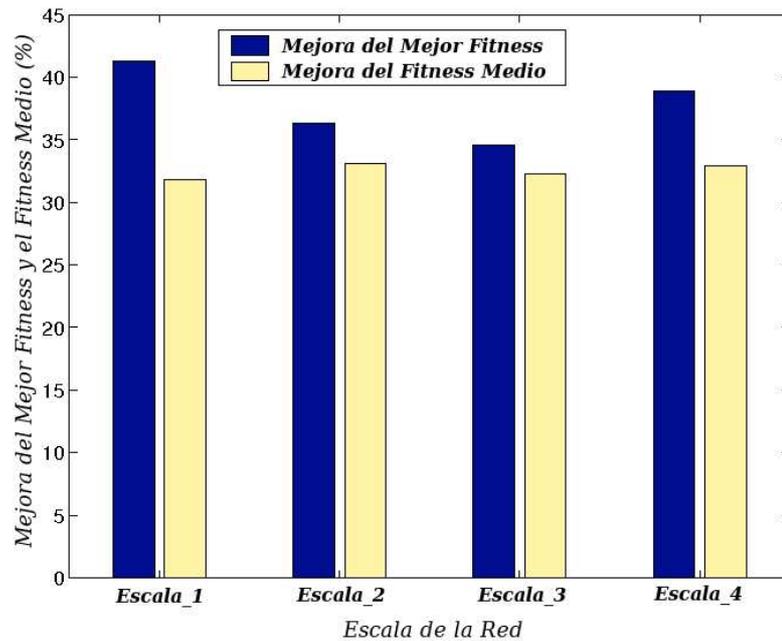


Figura 5.7: Mejora Percentual para los Mejores *Fitness* y *Fitness* Medios, para cada Escala

existe más de un semáforo con el número mayor de vehículos en cola se decide aleatoriamente.

En la figura 5.9 se presenta el tiempo medio de permanencia de los vehículos en la red para los modelos RanSim, FixSim y el modelo propuesto en esta Tesis. Se realizaron 10000 simulaciones para calcular los tiempos medios con los modelos FixSim y RanSim. Para calcular los resultados con el modelo propuesto en esta Tesis, se obtuvieron realizando la media de los obtenidos en 30 ejecuciones del algoritmo genético.

Adicionalmente, se presentan los resultados que se obtienen utilizando el esquema de asignación del estado “verde” LISim, que tiene un *feedback* muy fuerte e inteligencia local. En la figura 5.10 se muestra la comparación entre el LISim y el modelo propuesto. De nuevo se han usado 10000 simulaciones para calcular el tiempo medio de los vehículos en la red, para el caso del LISim; y para el modelo propio, se calcula con la media de 30 ejecuciones del algoritmo genético.

Algunas conclusiones pueden obtenerse de la observación de estas figuras. En la figura 5.9 se puede apreciar claramente una mejora con el sistema pro-

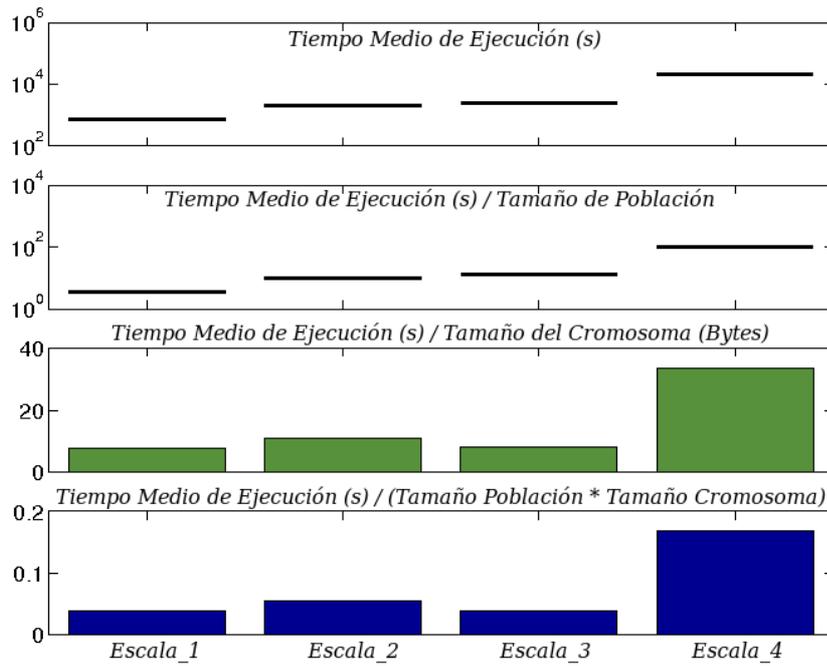


Figura 5.8: Ratio de Tiempo para cada Escala de Red de Tráfico

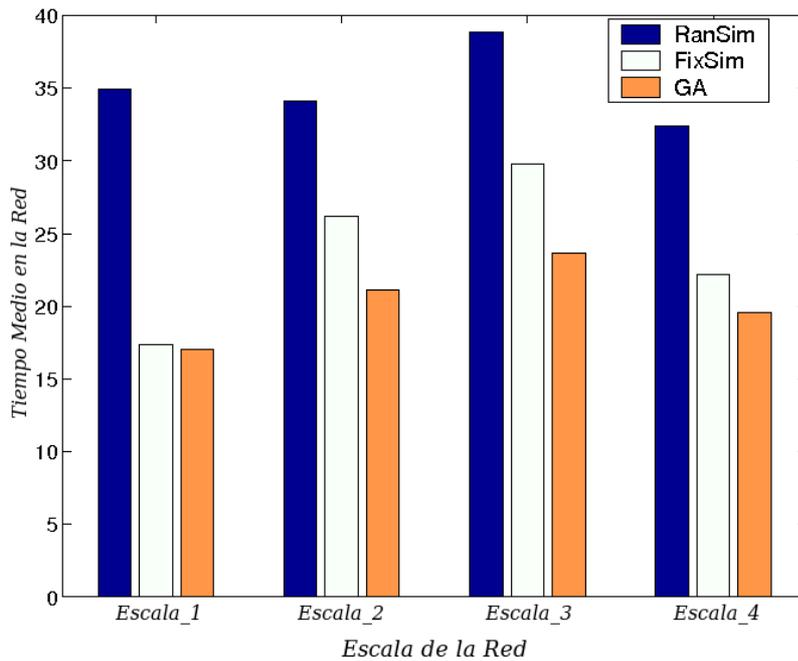


Figura 5.9: Comparación de los Tiempos Medios en la Red de los Modelos RanSim, FixSim y Propio

puesto frente a los resultados que se obtienen con las alternativas RanSim y FixSim, con independencia de la escala de la red. Esto parece garantizar que no da igual que secuencia sigan los semáforos, sino que realmente son susceptibles

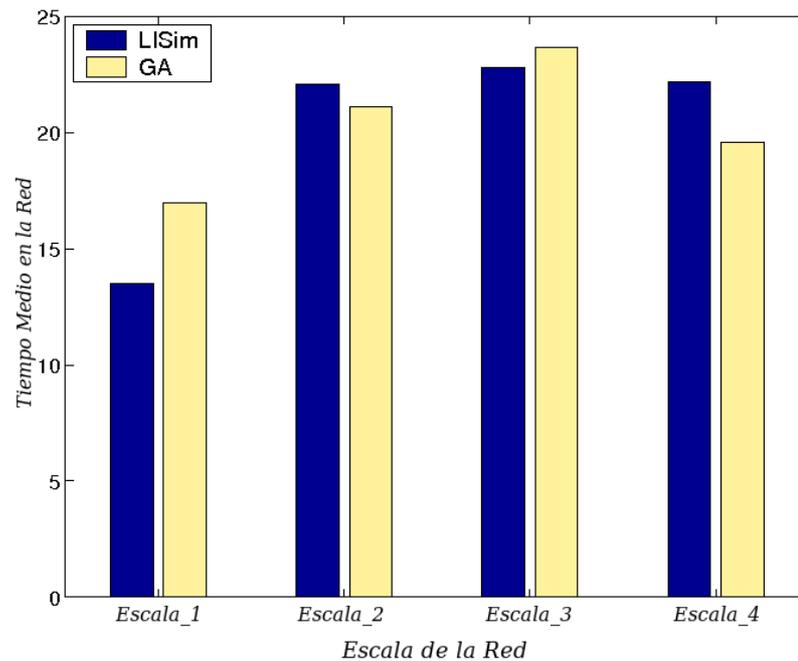


Figura 5.10: Comparación de los Tiempos medios en la Red de los modelos LISim y Propio

de optimización.

En la figura 5.10 se puede observar también una mejora de los resultados que se obtienen usando el sistema propuesto con respecto a los tiempos obtenidos con el LISim, excepto en el caso Escala\_1, donde sucede lo contrario. Ello puede ser debido a que, para una red tan pequeña, con tan pocas intersecciones y semáforos, una optimización global como la que se realiza en el modelo propuesto por esta Tesis, realmente puede no significar una gran mejora con respecto al uso de este tipo de sistemas basados en *feedback*.

Hay una cosa más que decir en cuanto a las figuras 5.9 y 5.10. Los tiempos medios son menores para la Escala\_4 que para la Escala\_3. Esto puede parecer un contrasentido, sin embargo tiene una explicación sencilla: 1500 iteraciones pueden no ser suficientes para que los vehículos que tienen asignadas las rutas más largas lleguen a su destino. Luego, los valores medios se calculan sólo con las rutas menores. Esto hace menor el resultado de este estadístico.

### 5.2.4 Conclusiones

Las conclusiones de este pequeño estudio inicial de escalabilidad son también breves. En primer lugar, parece probada la capacidad de escalabilidad del modelo planteado en este trabajo.

Por otra parte, el tipo de optimización que se realiza, que tiene en cuenta de manera global todas las intersecciones de la red parece más apropiado para redes de una escala no tan pequeña como la Escala\_1. Sin embargo, se obtienen resultados esperanzadores con un amplio abanico de escalas, incluso comparándolo con técnicas ampliamente usadas como el modelo LISim de *feedback* e Inteligencia Local.

## 5.3 Simulación Determinística Versus Simulación Estocástica

El modelo de optimización de los ciclos de los semáforos que se propone en esta Tesis depende de la realización de simulaciones de tráfico dentro de la función de evaluación del algoritmo genético.

Los simuladores de tráfico suelen ser estocásticos, dada la naturaleza intrínsecamente estocástica del tráfico. Sin embargo, una simulación estocástica implica que para cada combinación de tiempos (cromosoma) sea preciso realizar un conjunto de simulaciones y obtener valores estadísticos de estas, con el fin de evaluarlas consistentemente. Esto puede significar un sacrificio muy elevado en potencia computacional, mermando considerablemente la usabilidad del modelo propuesto.

En esta sección se ha incluido un estudio que compara un versión determinística de simulador de tráfico con una estocástica, con el fin de ver si es factible evaluar cada cromosoma con una única simulación determinística.

En el simulador de tráfico que se propone para el modelo planteado por esta Tesis existen tres variables que determinan que el simulador sea estocástico o determinista.

1. El orden de actualización de las celdas. En la versión estocástica el orden en el cual se actualizan las celdas es aleatorio. Para la versión determinística se ha diseñado una función recursiva – descrita en el Anexo D – que calcula el grafo de dependencias. Con esa función recursiva se prepara, al principio de la simulación, un orden de actualización que ayuda a que el simulador no llegue a una situación de *Deadlock*<sup>3</sup>, si bien, esto no se puede garantizar para cualquier situación<sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup>*Deadlock*: Situación de bloqueo mutuo entre dos o más procesos que intentan acceder a variables compartidas. Por ejemplo, sean dos procesos paralelos P1 y P2. P1 necesita un mensaje de P2 para proseguir, y enviar a P2 un mensaje para que este continúe su ejecución. Sin embargo P2, antes de enviar un mensaje para que P1 continúe su ejecución necesita a su vez que reciba de P1 un mensaje que le autorice a continuar. Esta situación, si se da, es irresoluble y ambos procesos detienen su ejecución.

<sup>4</sup>En situaciones extremas, con muchas intersecciones en poco espacio, y gran congestión, incluso el orden de actualización calculado con la función recursiva puede no ser suficiente

2. El instante de creación de los nuevos vehículos. En la versión estocástica existe una probabilidad de llegada de nuevo vehículo para cada entrada. Luego, el instante de creación de los nuevos vehículos depende de una variable aleatoria. Para la versión determinística se define un periodo de creación de nuevos vehículos proporcional a las estadísticas de entrada de tráfico real para cada punto de incorporación a la red.
3. La probabilidad de aceleración. En el caso determinístico, en el momento de la actualización de la velocidad de cada vehículo, si este tiene la posibilidad de incrementar su velocidad, acelerará siempre. Sin embargo, en el caso estocástico puede existir una variable aleatoria – probabilidad de aceleración – con un valor, normalmente mayor que 0.7, que determina si el vehículo finalmente acelera o no. Luego, en el caso estocástico el vehículo podría acelerar o no.

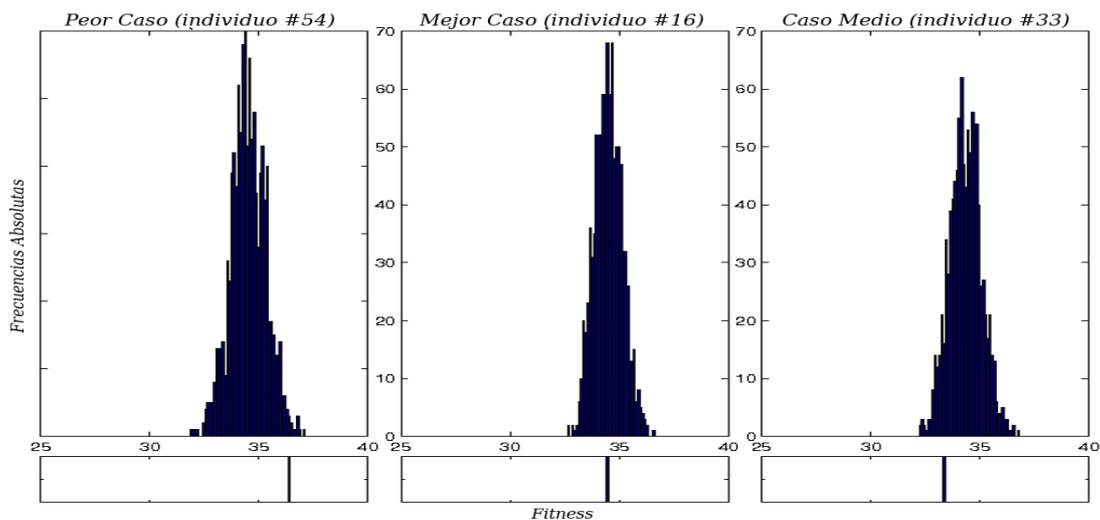


Figura 5.11: Histogramas de Tres Cromosomas para el la Red Escala\_3

### 5.3.1 Experimentos Realizados

Se han usado las tres escalas de red de tráfico Escala\_1, Escala\_2 y Escala\_3 para este experimento. Sus estadísticas se muestran en la Tabla 5.1.

para garantizar que no se llegue a situaciones de *Deadlock*, para una combinación de tiempos de los semáforos concreta (lejana de la combinación óptima).

Por cada tamaño de red se han lanzado 1000 simulaciones estocásticas y una determinística. El tamaño de la población en este caso es de 100 individuos. La duración de cada simulación fue de 1500 iteraciones.

### 5.3.2 Resultados

En este punto se presentan los resultados de los experimentos realizados. En la primera figura (5.11) se representan los histogramas de tres individuos para el caso de la red Escala\_3. Para todos los individuos se obtuvo el valor absoluto de la diferencia entre la media de los valores de *fitness* obtenidos con la simulación estocástica con respecto al valor de *fitness* obtenido con la simulación determinística. En la figura 5.11 se representan los individuos que obtuvieron el valor mayor de esa diferencia (peor caso), el valor menor (mejor caso) y el individuo con un valor más cercano a la media de las diferencias. En esta figura se representa en la parte superior los histogramas de los valores obtenidos con el simulador estocástico y en la parte baja se marca el valor obtenido con el simulador determinístico.

En esta figura se puede observar que el simulador estocástico sigue una distribución Gaussiana unimodal. Si a este hecho se le añade que se observa una baja dispersión en estos histogramas, se puede inferir que una evaluación que incluya a un simulador estocástico como el que se explica en esta sección es estocásticamente convergente. En otras palabras, se puede considerar la media aritmética de los valores de *fitness* obtenidos con el simulador estocástico como una representación significativa de cada individuo.

En segundo lugar se presentan seis gráficas, dos por cada escala de las redes estudiadas: figuras 5.12 y 5.13 para la Escala\_1; figuras 5.14 y 5.15 para las Escala\_2 y las figuras 5.16 y 5.17 para la Escala\_3. En las figuras 5.12, 5.14 y 5.16 se ha representado:

1. En la primera fila se ha representado el Tiempo Medio Transcurrido (MET) para ambos simuladores. Hay que observar que para el caso estocástico se representan los valores promedio de todas las ejecuciones.

2. En la segunda fila se representa el valor absoluto de la diferencia entre la media de los valores de *fitness* obtenidos con el simulador estocástico y el valor obtenido con el simulador determinístico.
3. Por último se representa la desviación típica de los valores obtenidos con el simulador estocástico.

De estas figuras se puede extraer que las dos curvas principales – media de los valores estocásticos y valores determinísticos – están muy correlacionados.

En las figuras 5.13, 5.15 y 5.17 se ha representado la función de regresión lineal y, para cada uno de los 100 individuos los valores de *fitness* medio del simulador estocástico frente a los valores determinísticos. Parece obvio que existe una gran correlación lineal entre las dos funciones. En este sentido, el caso denominado Escala\_3 demuestra un mejor ajuste a la recta de regresión lineal.

Por último, en la tabla 5.3.2 se presentan algunas estadísticas más. Nótese que, para cada escala, se tienen dos vectores de 100 elementos (uno por cada individuo). El primer vector contiene los valores medio del *fitness* de cada individuo utilizando el simulador estocástico. El segundo vector contiene los valores de *fitness* obtenidos del la simulación determinística que se ejecutó para cada individuo. En pro de la claridad se va a denotar la media de los valores estocásticos como  $x$  y los valores determinísticos como  $y$ .

Luego, cada  $x[i]$  significa la media de los valores obtenidos con las 1000 ejecuciones del simulador estocástico, y cada  $y[i]$  significa el valor de la evaluación determinística, en ambos casos para el individuo  $i$  de la población de 100 utilizada. En la primera columna se representa la escala de la red. En la segunda, etiquetado como  $\bar{y}$ , se representa la media del valor de la evaluación para el caso determinístico.  $Std(y)$  representa la desviación típica de cada individuo en el caso determinístico. Las siguientes dos columnas –  $\bar{x}$  y  $Std(x)$  – significan la media y la desviación típica de los valores medios representados por  $x$ , que se corresponden con el simulador estocástico. En la quinta columna está representado el valor del coeficiente de correlación de Pearson, calculado

Escala	$\bar{y}$	$Std(y)$	$\bar{x}$	$Std(x)$	$\rho$	M.E.D.	M.C.C.R.
Escala_1	27.6250	2.6149	27.9701	1.0832	0.7952	2.4595	63.90
Escala_2	31.3756	1.6793	31.4305	0.8630	0.8338	1.6786	74.49
Escala_3	34.8757	1.5745	34.8786	0.6929	0.9132	1.7214	70.87

Tabla 5.2: Estadísticas de las Tres Escalas de Red Probadas

como se muestra en la ecuación 5.1. La sexta columna representa la distancia euclídea media – etiquetada como M.E.D. (Mean Euclidean Distance) – entre la recta de regresión lineal y las muestras obtenidas para todos los individuos. Por último se tiene la media del coste computacional – etiquetado como M.C.C.R. (Mean Computational Cost Ratio) – que es la fracción entre el tiempo total de ejecución de las simulaciones estocásticas y el tiempo de la simulación determinística.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.1)$$

Un aspecto interesante remarcable de esta tabla es el hecho de que para cada escala el coeficiente de correlación de Pearson es siempre superior a 0.7. Esto confirma la existencia de una fuerte correlación lineal entre  $x$  e  $y$ . La última columna es también muy interesante. En ella se muestra el gran ahorro computacional que significa usar una única simulación determinística en lugar de muchas simulaciones estocásticas.

De las figuras 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17, y de la tabla 5.3.2 parece clara la existencia de un fuerte correlación lineal entre los valores obtenidos de ambos simuladores. Por consiguiente, todo indica que es aceptable usar una única simulación determinística para ordenar por *fitness* los individuos de las poblaciones del algoritmo genético.

### 5.3.3 Conclusiones

Al realizar los primeros trabajos de diseño del modelo propuesto en esta Tesis ([17]) se decidió utilizar una versión determinística de un simulador de tráfico en lugar de múltiples simulaciones estocásticas. Aunque se sabe que el com-

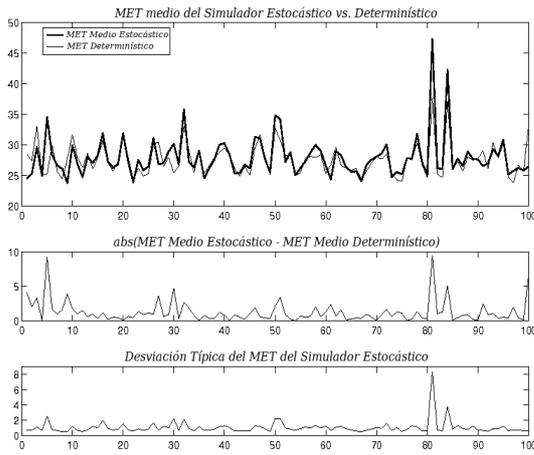


Figura 5.12: Comparación para la Escala\_1

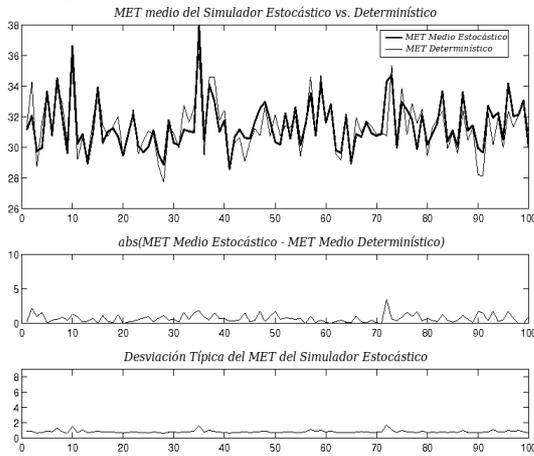


Figura 5.14: Comparación para la Escala\_2

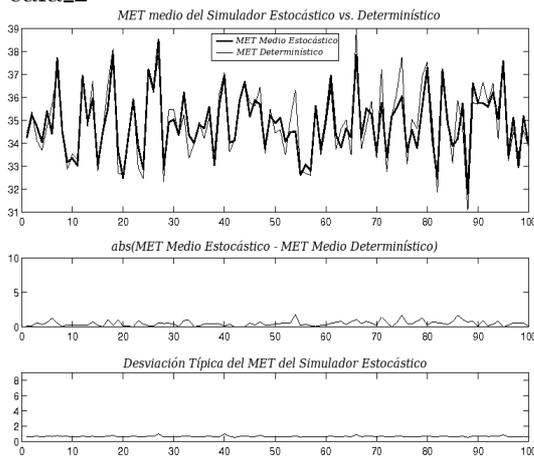


Figura 5.16: Comparación para la Escala\_3

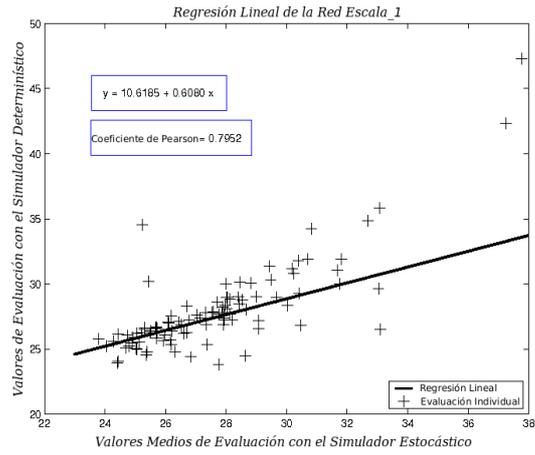


Figura 5.13: Regresión Lineal para la Escala\_1

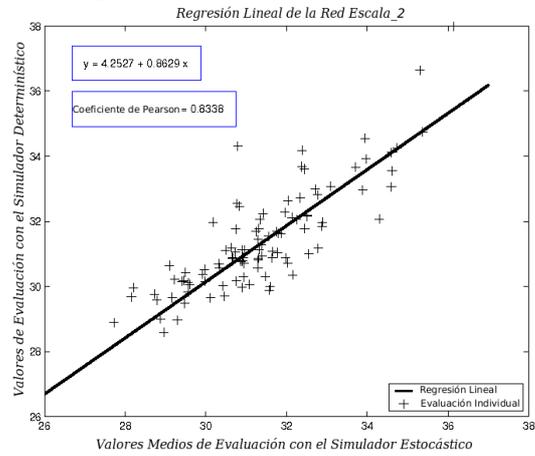


Figura 5.15: Regresión Lineal para la Escala\_2

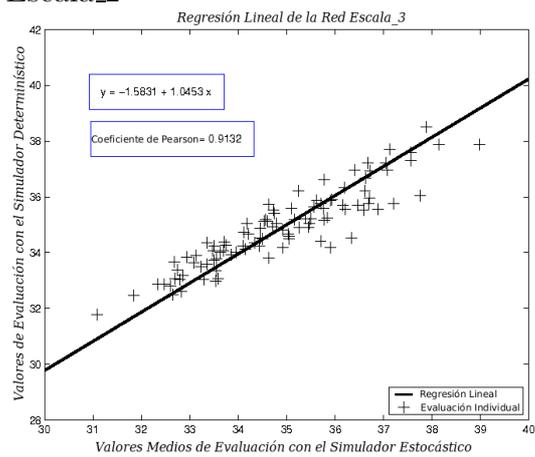


Figura 5.17: Regresión Lineal para la Escala\_3

portamiento del tráfico es intrínsecamente estocástico fue necesario tomar esta decisión porque de no hacerlo el peso computacional de la evaluación del algoritmo genético sería excesivamente alto como para que el modelo que se plantea sea práctico.

En un trabajo posterior ([73]) se dió justificación numérica a aquella decisión. Aunque los datos recogidos en esta sección no coinciden exactamente porque han sido actualizados para la confección de esta Tesis, se llega a las dos mismas conclusiones que ahora.

En primer lugar, se confirma que la simulación estocástica es un proceso estadístico convergente que puede ser tomado como patrón fiable. En segundo lugar, los resultados parecen demostrar que las salidas del simulador determinista y las del estocástico están fuertemente linealmente correladas.

Por consiguiente, el simulador de tráfico determinístico es perfectamente válido para asignar un valor de *fitness* a cada miembro de la población del algoritmo genético, además con un considerable ahorro computacional con respecto a la versión estocástica del mismo.

## 5.4 Codificación Binaria Gray Versus Codificación Entera

En esta sección se incluye un estudio que se ha realizado – publicado en [67] – comparando los resultados que se obtienen con el modelo propuesto en esta Tesis utilizando la codificación binaria Gray, que se explica en 4.3.2, frente a una codificación entera. Adicionalmente se compara la mutación variable frente a una mutación de probabilidad fija estándar.

### 5.4.1 Codificación Entera

En este apartado se explica cómo sería la codificación entera, en contraposición a la codificación Binaria Gray que se ha usado en el modelo planteado en esta Tesis, como se explica en 4.3.2.

En el apartado 4.3.2 se explica una codificación consistente en una secuencia de enteros, cada uno significando la duración de una fase (*Stage*). Cuando se codifica en binario se trataría simplemente de codificar cada uno de esas duraciones en código Gray, tal y como se explica que se hace en el anexo C. Sin embargo, si la codificación del cromosoma se hace con enteros, o como se dice en esta sección, a nivel de gen, se utiliza un vector de enteros para almacenar este cromosoma.

Usar una codificación binaria o no significa cambios en los operadores de cruce y mutación. Como se muestra en esta sección, el uso de un tipo de codificación u otra también tiene importantes diferencias en cuanto a los resultados de *fitness* que se alcanzan.

### 5.4.2 Operador de Cruce

En este apartado se describen las diferencias entre operadores de cruce, según se use una codificación binaria Gray o una codificación entera.

En la figura 5.18 se representa un fragmento de un cromosoma hipotético. Esta es la apariencia del cromosoma de un individuo para una red de tráfico

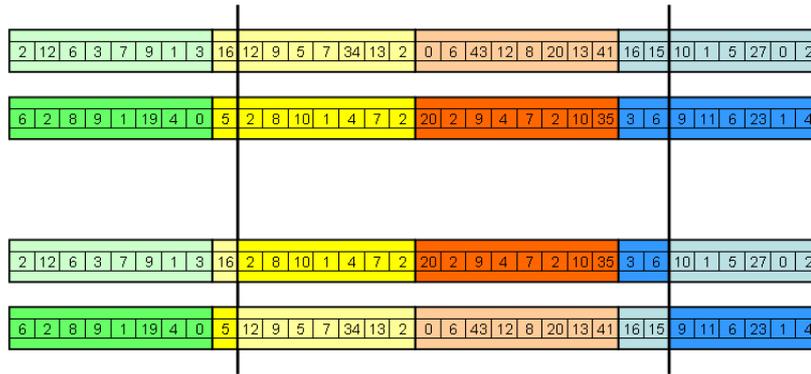


Figura 5.18: *Crossover* de Dos Puntos, a Nivel de Gen

muy sencilla, formada por cuatro intersecciones, con ciclos de ocho fases cada una. El significado de cada entero en esa figura es la duración en segundos de un determinado estado en una determinada intersección. Se ha denominado gen a cada uno de esos enteros con significado atómico.

Para este caso sencillo, cuando se ejecuta el operador de cruce a nivel de gen, dos individuos intercambian sus genes sin modificarlos. En otras palabras, la única alteración que sufren los genes es mediante la mutación.

La otra alternativa es el cruce a nivel de bit. La figura 5.19 pretende ilustrar este operador. En el anexo C se explica la codificación Gray utilizada.

Como puede verse en la figura 5.19, cuando se ejecuta el cruce a nivel de bit, el contenido de los genes puede sufrir modificaciones. Luego, el cruce a este nivel puede provocar mayor diversidad en los genomas de la población a medida que evoluciona el algoritmo genético.

### 5.4.3 Operador de Mutación

En cuanto a la mutación, la diferencia de usar una codificación binaria o entera es de fácil explicación. Cuando se utiliza la codificación binaria Gray, una vez que se decide que le “toca” a un determinado individuo sufrir una mutación, se escoge aleatoriamente un bit de su genoma y se sustituye su valor por otro valor binario obtenido aleatoriamente.

En el caso de mutación a nivel de Gen, para el individuo al que hay que mutar se elige de manera aleatoria una fase y se sustituye su valor entero por

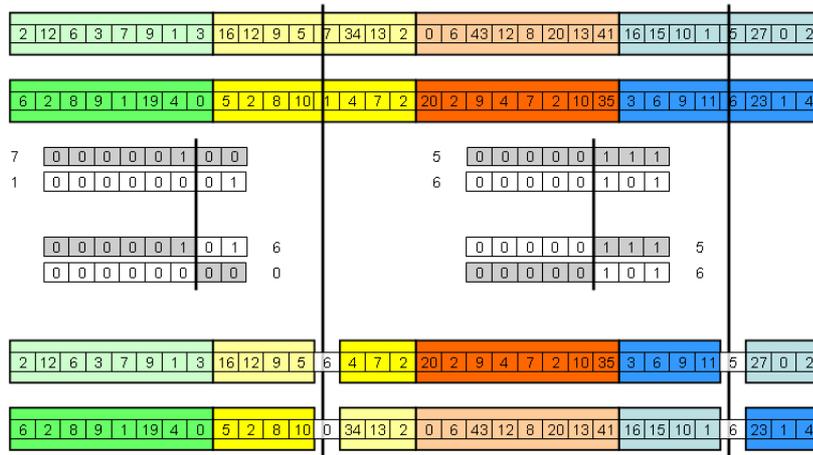


Figura 5.19: *Crossover* de Dos Puntos, a Nivel de Bit

un valor entero obtenido aleatoriamente, dentro del rango de valores posibles para esa fase.

#### 5.4.4 Resultados

Para realizar los estudios que se exponen en esta sección se utilizó como red de tráfico la red de la zona de “Las Ramblas” (5.20), situada en Santa Cruz de Tenerife. En la sección 6.2 se explica con detalle como se realizó la aplicación del modelo propuesto en esta Tesis a esta zona.

Se han llevado a cabo cuatro grupos de experimentos combinando los dos tipos de cruce y de mutación. Se ha llegado a la conclusión de que si se combina un cruce a nivel de bit con una mutación a nivel de bit se obtienen los mejores resultados. Para las otras tres posibilidades parece que se alcanza una convergencia prematura.

En los experimentos realizados para esta sección se han lanzado 30 ejecuciones del algoritmo genético por cada una de las cuatro combinaciones posibles de cruce y mutación.

Para la mutación a nivel de gen se ha usado una población de 1000 individuos.

En la figura 5.22 se ha representado la evolución de los mejores *fitness*. En cada experimento, generación por generación, se muestreaba el mejor valor de

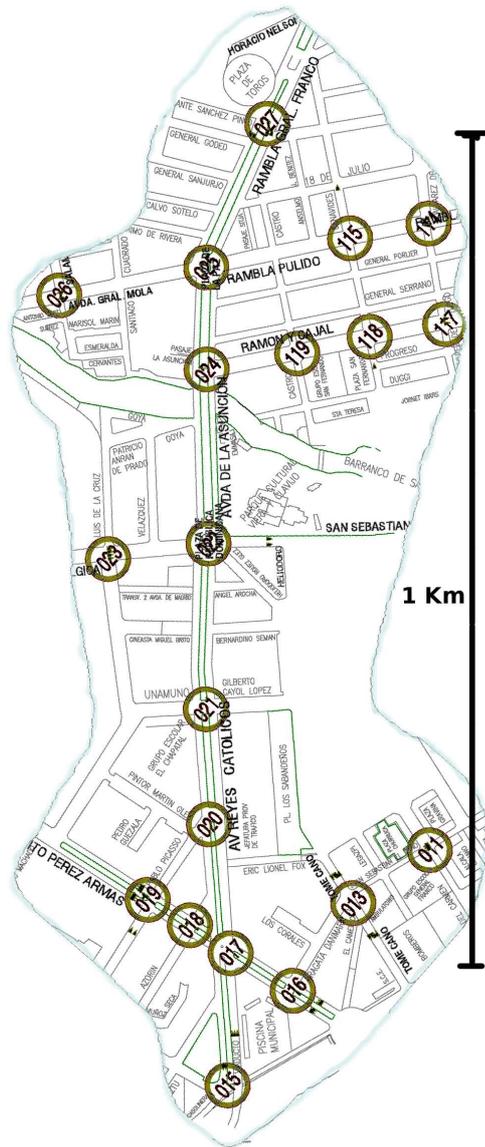


Figura 5.20: Zona “Las Ramblas”



Figura 5.21: Vista de Pájaro de Las Ramblas (Obtenida de *Google Maps*)

*fitness* obtenido.

En la parte alta de la figura 5.22 se representa la media de esos valores, y en la parte inferior la desviación típica, ambos estadísticos para los cuatro casos estudiados.

Es interesante observar que para la pareja formada por una mutación variable y un cruce a nivel de bit se obtuvieron los mejores valores. Además, en el resto de casos parece que se llega a una situación de convergencia prematura por haber encontrado algún máximo local.

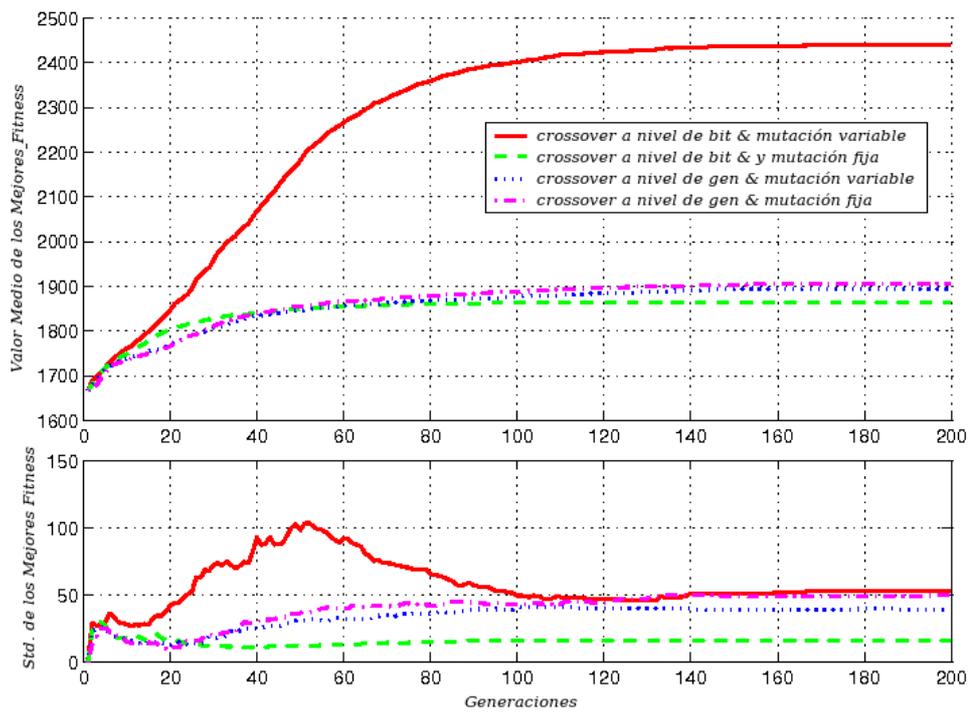


Figura 5.22: Comparación de la Evolución del *Fitness* usando *Crossover* a Nivel de Bit o de Gen

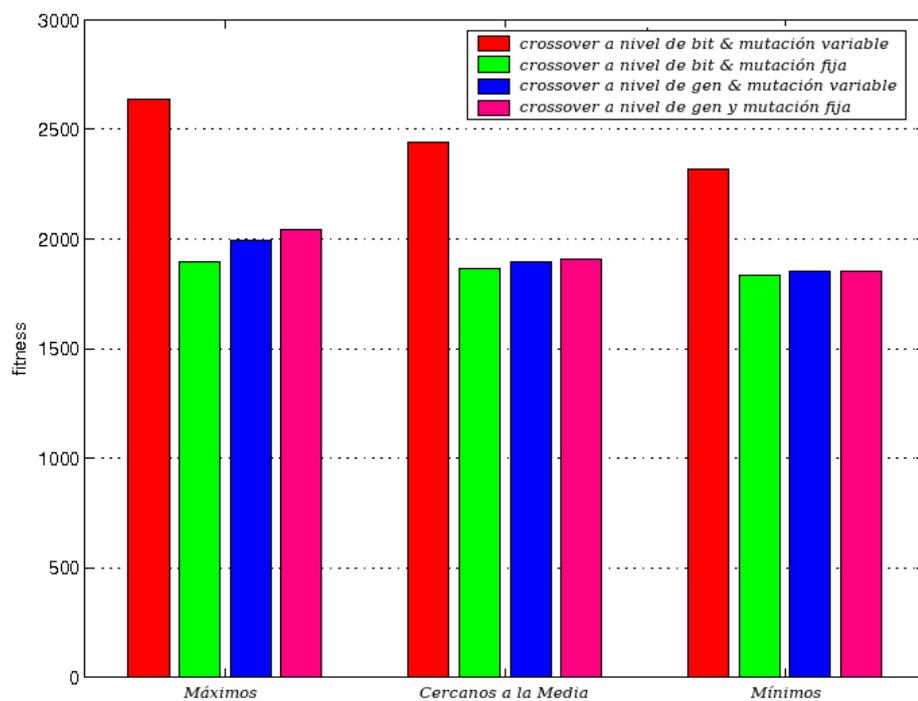


Figura 5.23: Valores Destacables de *Fitness* para el *Crossover* a Nivel de Bit o de Gen

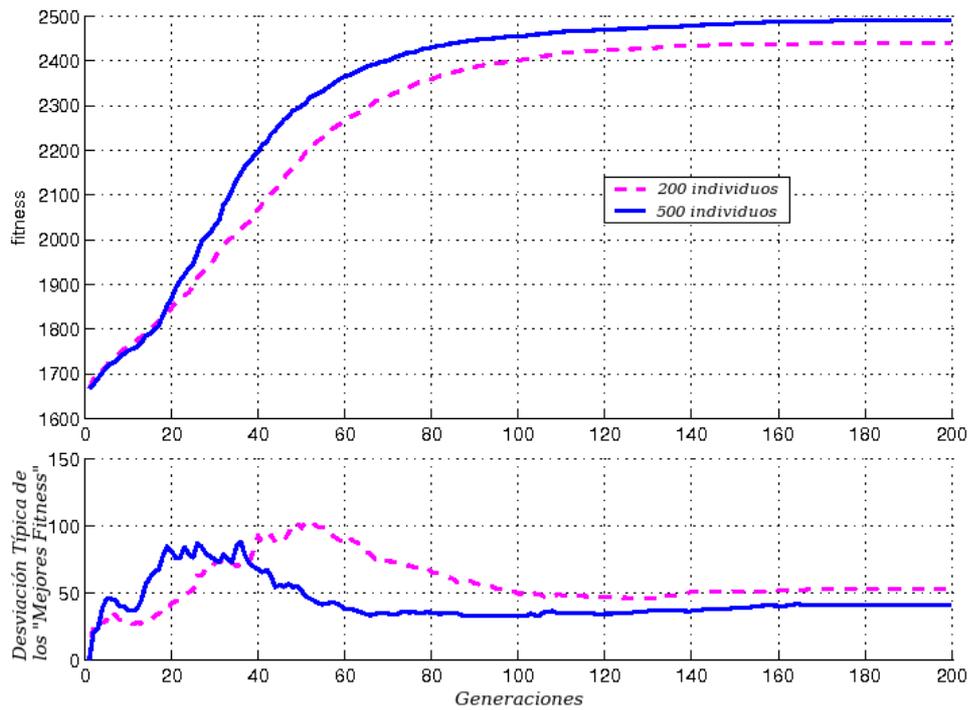


Figura 5.24: Media y Std. del *Fitness*, usando Crossover a Nivel de Bit y una Población de 500 vs. 200 individuos

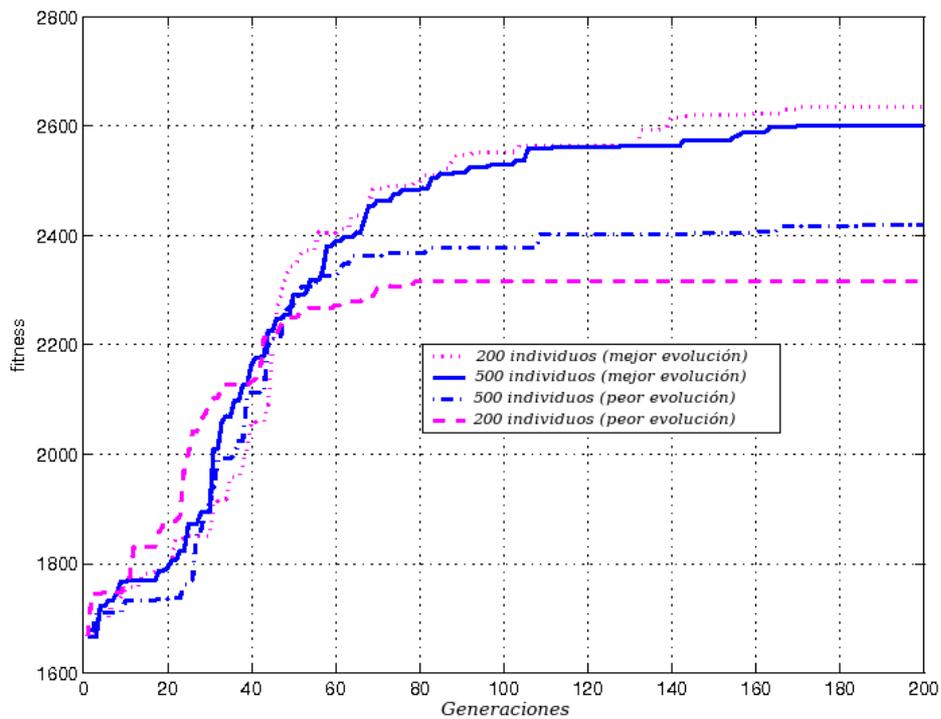


Figura 5.25: Mejor y Peor Ejecución, usando Crossover a Nivel de Bit y una Población de 500 vs. 200 individuos

En la figura 5.23 se representan los valores de *fitness* mejor, peor y más cercano al *fitness* medio.

El propósito de las figuras 5.24 y 5.25 es mostrar con evidencias como parece que una población de 200 individuos es suficiente para el caso que trata esta Tesis. En la figura 5.24 se representan la media y la desviación típica de los mejores *fitness* usando un cruce a nivel de bit y una mutación variable, con una población de 500 y de 200 individuos.

Aunque con 500 individuos se cubre una mayor superficie del espacio de soluciones, parece que con ambos tamaños de población se alcanza la convergencia a valores similares de *fitness* en alrededor de 120 generaciones.

En la figura 5.25 se representan la evolución del mejor y el peor para los dos tamaños de población. Como puede apreciarse, reducir la población a 200 individuos no implica empeorar las cotas de *fitness* alcanzadas.

Finalmente, en la tabla 5.4.4 se presentan algunas estadísticas interesantes. Especial atención merecen las dos primeras filas. Como se puede observar, se ahorra mucha potencia computacional si se utiliza un cruce a nivel de bit. Esto se debe a que con este tipo de cruce y la mutación variable uno puede permitirse el utilizar una población mucho más pequeña que con el cruce a nivel de gen.

Parámetro	C. a Nivel de Bit	C. a Nivel de Bit	C. a nivel de Gen	C. a nivel de Gen
	M. Variable	M. Fija	M. Variable	M. Fija
Consumo de Tiempo (s)	<b>3548.45</b>	<b>3607.51</b>	<b>18875.50</b>	<b>18915.48</b>
Tamaño de la Población	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>1000</b>	<b>1000</b>
Generaciones	200	200	200	200
Prob. de Mutación Inicial	0.999	0.005	0.999	0.005
Factor de Mutación	0.993	1	0.993	1

Tabla 5.3: Valores de los Parámetros Testeados

### 5.4.5 Conclusiones

De los estudios expuestos en esta sección se puede llegar a la conclusión de que, al menos para el caso particular objeto de estudio, la combinación de un cruce a nivel de bit con una mutación variable supone llegar a las mejores tasas de *fitness*, y un ahorro significativo de tiempo de computación.

Todo parece indicar que el cruce a nivel de bit permite que el algoritmo genético recorra el espacio de soluciones más rápido debido a la mayor variabilidad de los genes entre generaciones.

Además, con la combinación de mutación variable y cruce a nivel de bit se evita la convergencia prematura que se da en los otros casos.

## 5.5 Estudio Visual y Estadístico de la Evolución del Algoritmo Genético

El ajuste fino de un algoritmo genético es una tarea no exenta de cierta complejidad. Generalmente se realiza con el método de prueba y error, y una gran dosis de experiencia, en el caso de que se disponga de ella. A la hora de afrontar el ajuste fino del algoritmo genético utilizado en la metodología que propone esta Tesis se quiso disponer de alguna ayuda que agilizara este proceso.

Con ese fin se ha creado una representación tridimensional, publicada en el congreso ECT2006 ([74]). En pocas palabras, puede ser definida como la representación de la evolución, generación por generación, del histograma de los valores de *fitness* de la población.

El objetivo de la presente sección es exponer los resultados del ajuste fino del algoritmo genético haciendo uso de esta nueva visualización. A modo de ejemplo se ha procedido a realizar este ajuste variando el tamaño de la población y la probabilidad de mutación. Por lo tanto, se han realizado dos grupos de tests variando el tamaño de la población – apartado 5.5.3 – y la probabilidad de mutación – apartado 5.5.4.

### 5.5.1 Explicación de la Representación Estadística Creada

En la figura 5.26 se presenta un ejemplo sencillo. Generación por generación se calcula un histograma de 20 marcas con los valores de *fitness* de toda la población. Para la figura 5.26 se ha empleado una población con un tamaño de 50 individuos. Por ello, la suma de las 20 frecuencias absolutas es 50.

En ese gráfico tridimensional se representan los valores de frecuencias absolutas con puntos negros. Luego, haciendo uso de las herramientas de representación tridimensional del Matlab 7 `meshgrid` y `griddata` se interpola una superficie continua, facilitando la visualización y comprensión de la evolución estadística del *fitness*.

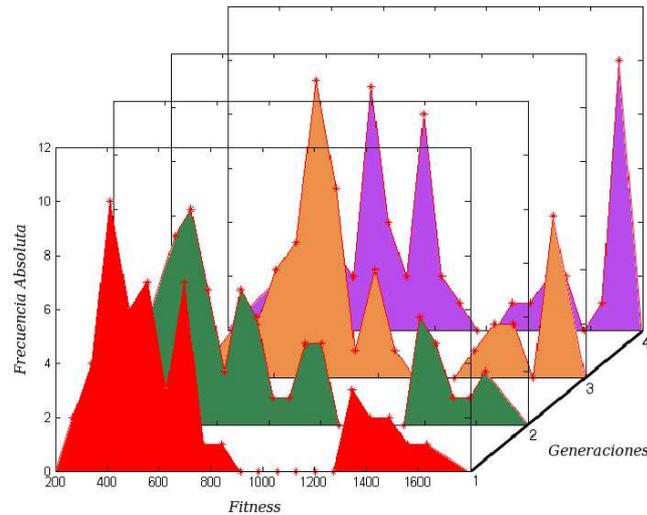


Figura 5.26: Figura Explicativa del Histograma Tridimensional

### 5.5.2 Resultados

Para realizar los estudios que se exponen en esta sección se utilizó como red de tráfico la red de la zona de “Las Ramblas” (5.20), situada en Santa Cruz de Tenerife. En la sección 6.2 se explica con detalle como se realizó la aplicación del modelo propuesto en esta Tesis a esta zona.

### 5.5.3 Resultados de la Variación del Tamaño de la Población

En la tabla 5.4 se representan los experimentos realizados variando el tamaño de la población. Para este conjunto de pruebas se ha usado una probabilidad de mutación variable. La probabilidad de mutación empieza con un valor muy elevado – 0.99 – y cada generación se reduce este por un factor de 0.973. Cada caso incluye 30 ejecuciones del algoritmo genético. En esta tabla también se representa el tiempo medio de ejecución. Como puede observarse, el tiempo de ejecución se mantiene bastante lineal con respecto al producto del número de generaciones por el tamaño de la población.

En la figura 5.27 se representa la media y la desviación típica de los valores de *fitness* para todos los individuos de las treinta ejecuciones, generación por generación. Como se puede observar, el *fitness* medio se incrementa a medida

	Tamaño de la Población (PS)	Generaciones del GA (NG)	Tiempo Medio de Ejecución (MET)(s)	$MET/(PS \times NG)$
1	50	50	235.1	0.094
2	100	100	953.1	0.095
3	200	200	3621.5	0.091
4	300	200	5319.5	0.089
5	500	200	8765.6	0.088

Tabla 5.4: Tests Efectuados Variando el Tamaño de la Población

que se aumenta el tamaño de la población alcanzando su mejor valor para una población de 500 individuos. En cuanto a la desviación típica, aumenta hasta el test con 200 individuos y luego decrece en los tests con 300 y 500 individuos. Ello significa que con una población de 200 individuos se logra la mayor diversidad en cuanto a los valores de *fitness*.

En las figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 y 5.32 se representan las “mejores” ejecuciones para cada tamaño de población, es decir, aquellas en las cuales se alcanzó el mejor valor de *fitness* en la última generación.

Es preciso puntualizar que para todos los tests realizados para esta sección se ha incluido en la población inicial las combinaciones de tiempos utilizadas actualmente (o en el momento en que se suministraron los datos) por el departamento de Tráfico del Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife. En las figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 y 5.32 se han marcado los valores de *fitness* obtenidos con esos valores – mediante simulación – con círculos rellenos en la primera generación.

Se observa claramente los mejores valores de *fitness* se obtienen con poblaciones superiores a 200 individuos.

A continuación se representan las gráficas correspondientes utilizando todos los resultados de *fitness* obtenidos para cada tamaño de población en las 30 ejecuciones (5.33, 5.34, 5.35, 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, 5.40, 5.41 y 5.42). En la representación tridimensional se destacan los valores de *fitness* con puntos negros. Además, con la ayuda de las herramientas de representación tridimensional del Matlab 7, se ha renderizado una superficie que facilita la comprensión de lo que sucede durante la evolución. En la visión zenital se facilita una imagen

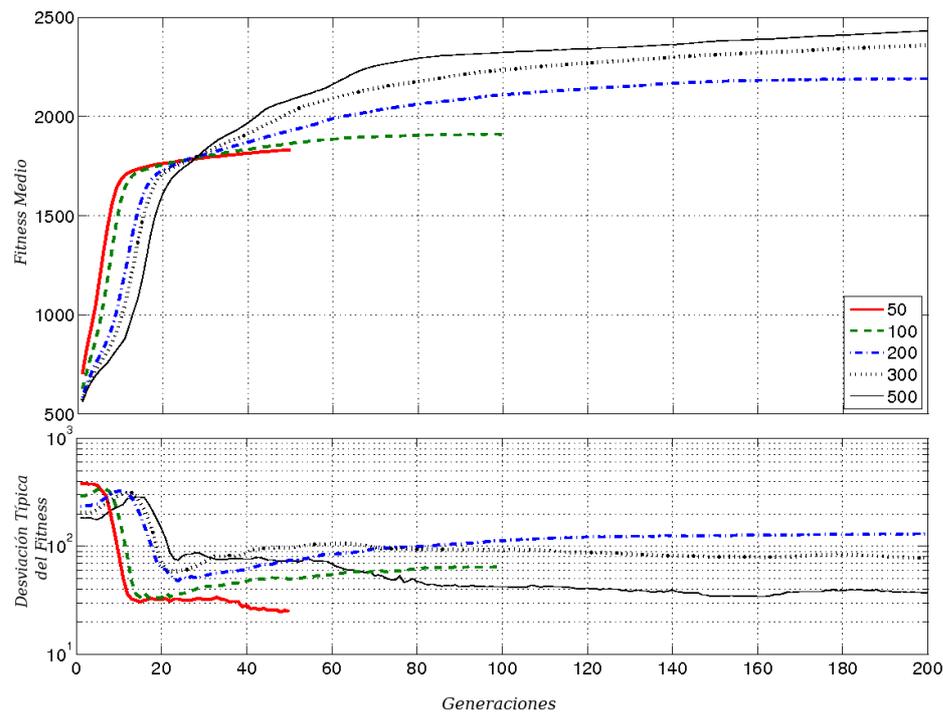


Figura 5.27: *Fitness* Medio y Desviación Típica para los Cinco Casos de Tamaño de Población

adicional justo desde la vertical de cada gráfica, que ayuda a la comprensión de la figura tridimensional.

De estas figuras pueden extraerse algunas conclusiones interesantes.

En primer lugar, las figuras zenitales – 5.34, 5.36, 5.38, 5.40 y 5.42 – muestran un agrupamiento de los valores de *fitness* en dos grupos, en las primeras generaciones. Uno está situado alrededor del valor 600 de *fitness*. El segundo está situado en el entorno de 1500. Este hecho es especialmente evidente en las figuras 5.34, y 5.36.

Todo parece indicar que las marcas agrupadas en el entorno de 1500 son causadas por los ciclos suministrados, e incluidas en la población inicial. El otro grupo es consecuencia de los tiempos generados aleatoriamente para el resto de la población inicial.

Un segundo aspecto de interés en esas figuras es que siempre existe un pico muy elevado al principio de la evolución, más o menos alrededor de un valor de *fitness* de 1700. Parece ser provocado por la inclusión de los tiempos

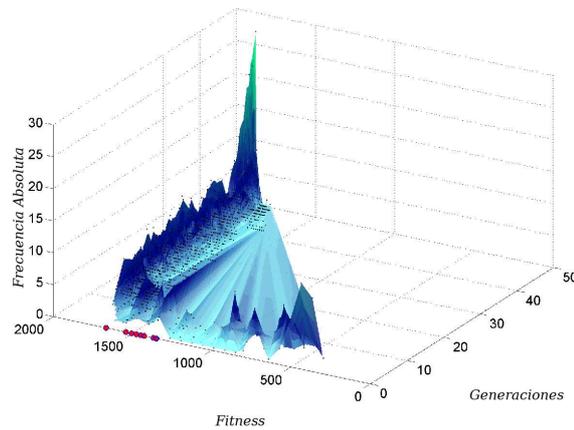


Figura 5.28: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: Ejecución con los Mejores Resultados – la número 26 – para un Tamaño de Población de 50 Individuos

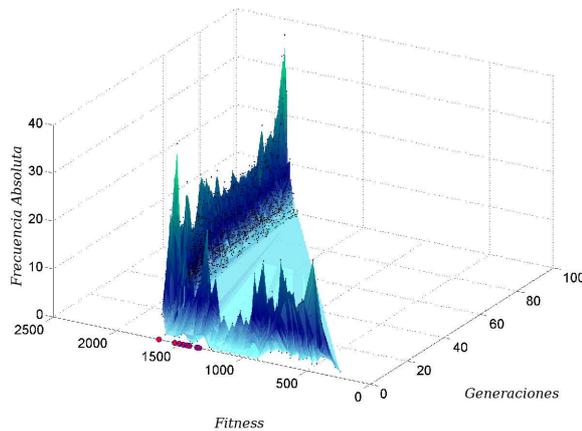


Figura 5.29: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: Ejecución con los Mejores Resultados – la número 27 – para un Tamaño de Población de 100 Individuos

suministrados. Se podría decir que la población inicial se mueve rápidamente hacia la zona de mayor *fitness*.

Esta zona, a la que se ha denominado “zona crítica”, es una zona de coincidencia de todas las gráficas de los experimentos realizados. Desde esta zona la evolución de las poblaciones puede tomar diferentes caminos. En el caso de una población de 50 individuos y tomando las muestras de las 30 ejecuciones, la población va más o menos en un mismo grupo de *fitness* hasta alcanzar un valor de 1900. En este trabajo se denomina a este camino se le denomina

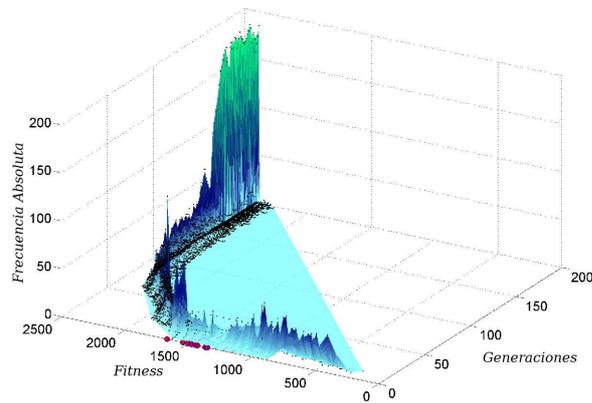


Figura 5.30: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: Ejecución con los Mejores Resultados – la número 17 – para un Tamaño de Población de 200 Individuos

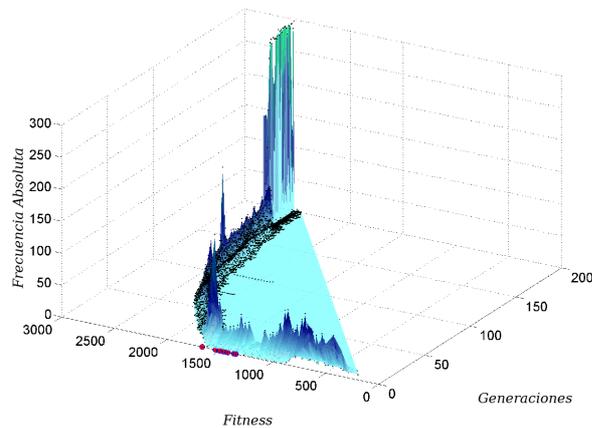


Figura 5.31: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: Ejecución con los Mejores Resultados – la número 07 – para un Tamaño de Población de 300 Individuos

Rama Filogenética <sup>5</sup>. En este caso parece que los *fitness* de las poblaciones no se dispersan mucho una vez han abandonado la zona crítica.

En el caso de una población de 100 individuos – figuras 5.35 y 5.36 – se puede observar que existe más de una rama filogenética de la generación cincuenta en adelante. Aunque la mayoría de los individuos están bastante

---

<sup>5</sup>Rama Filogenética (*Phylogenetic Branch*): En la teoría de la evolución, cada una de las “ramas” del árbol filogenético. Un árbol filogenético es un diagrama que muestra la evolución de los linajes de los organismos. Análogamente, en computación evolutiva se puede entender como rama filogenética a una representación de los individuos con cromosomas similares (con valores de *fitness* próximos), a lo largo de las generaciones.

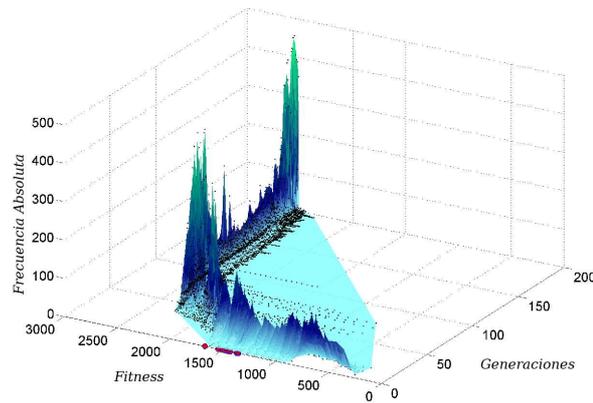


Figura 5.32: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: Ejecución con los Mejores Resultados – la número 13 – para un Tamaño de Población de 500 Individuos

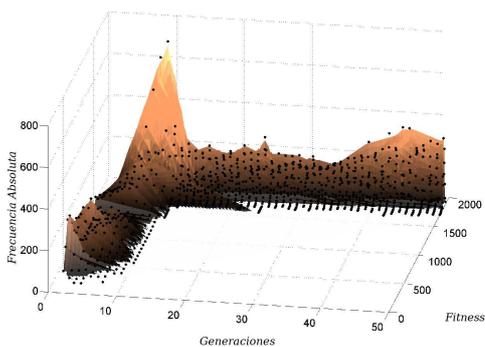


Figura 5.33: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: 50 Individuos, 30 Ejecuciones

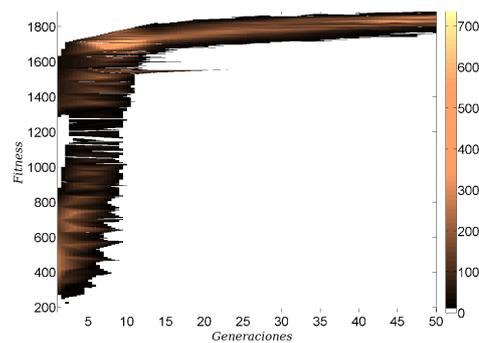


Figura 5.34: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: 50 Individuos, 30 Ejecuciones

juntos en una rama gruesa, dos ramas minoritarias abandonan la anterior y discurren hacia valores mejores de *fitness*. Estos resultados parecen indicar que con una población mayor se obtiene una mayor dispersión en la parte final de la evolución del algoritmo genético.

Si se considera ahora el caso de la población de 200 individuos – figuras 5.37 y 5.38 – se puede observar como existe claramente más de una rama filogenética, y la rama que logra los mejores valores de *fitness* es además la más gruesa, alcanzando valores cercanos a 2400. Esta es la rama más gruesa de los casos considerados en estos experimentos, como puede observarse en las

5.5. ESTUDIO VISUAL Y ESTADÍSTICO DE EVOLUCIÓN DEL G.A. 73

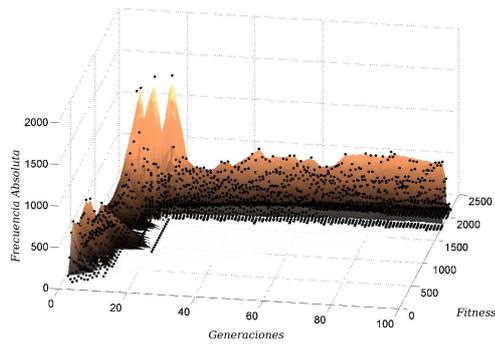


Figura 5.35: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: 100 Individuos, 30 Ejecuciones

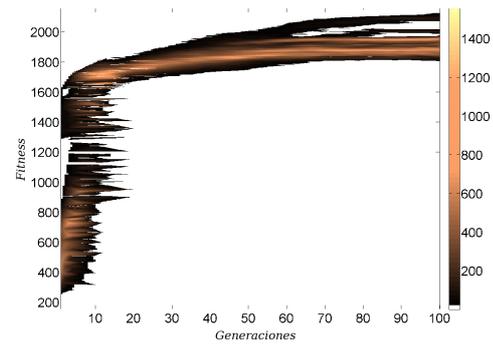


Figura 5.36: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: 100 Individuos, 30 Ejecuciones

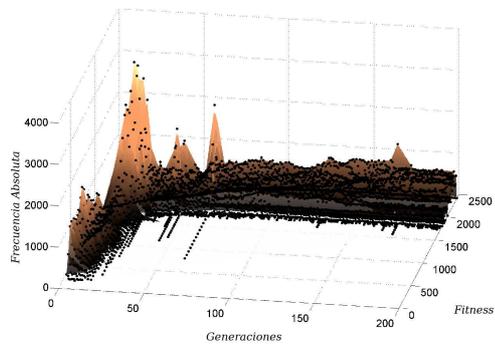


Figura 5.37: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: 200 Individuos, 30 Ejecuciones

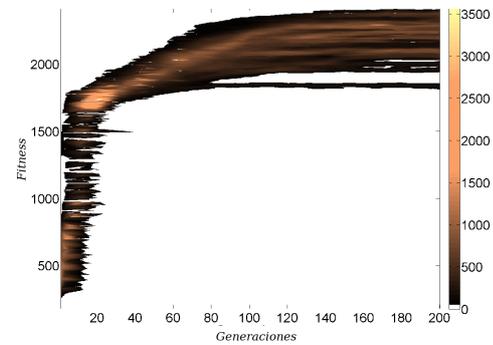


Figura 5.38: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: 200 Individuos, 30 Ejecuciones

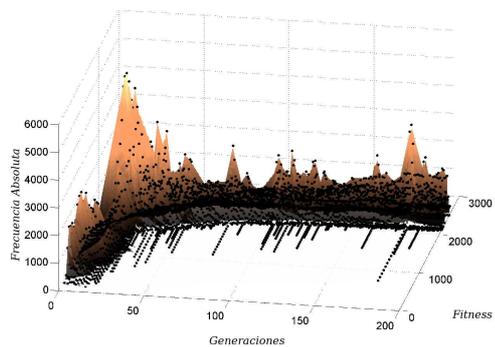


Figura 5.39: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: 300 Individuos, 30 Ejecuciones

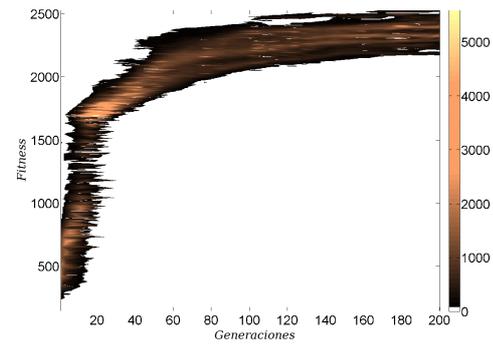


Figura 5.40: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: 300 Individuos, 30 Ejecuciones

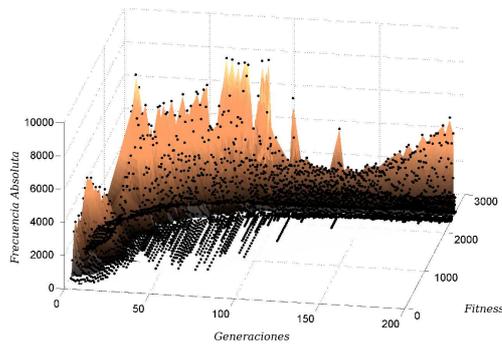


Figura 5.41: Vista 3D de la Evolución de los Histogramas: 500 Individuos, 30 Ejecuciones

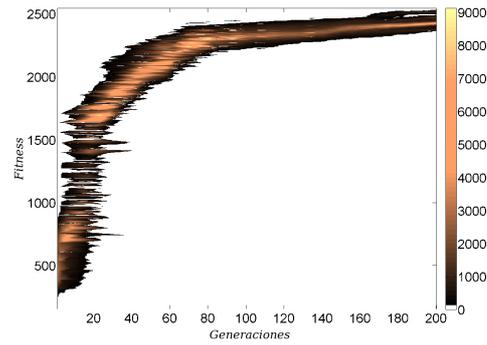


Figura 5.42: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: 500 Individuos, 30 Ejecuciones

figuras 5.34, 5.36, 5.38, 5.40 y 5.42.

Este hecho es consistente con la mayor desviación típica que se observó en la figura 5.27. Nuevamente, en este caso parece que una población mayor provoca una mayor dispersión de los valores de *fitness* de las poblaciones.

Sin embargo, si se aumenta aún más el tamaño de la población esta afirmación deja de ser válida. En las figuras 5.39, 5.40 – de tamaño de población 300 – y las figuras 5.41, 5.42 – con tamaño 500 – se muestra como se invierte la tendencia. Para el caso de 500 individuos parece como si todas las poblaciones convergieran a una rama filogenética bastante definida y estrecha, excepto en las últimas cuarenta generaciones donde una rama minoritaria escala a valores mejores de *fitness*.

Para el caso de 300 individuos existe más de una rama, aunque permanecen bastante juntas, casi como una única rama muy gruesa.

La menor dispersión de los valores de *fitness* al incrementar el tamaño de la población más allá de 200 individuos puede parecer extraña en una primera aproximación. Sin embargo, parece existir una dimensión crítica de población, con la cual la probabilidad de alcanzar el máximo global es próxima a 1, lanzando un número de ejecuciones del algoritmo apropiado. Una vez alcanzado ese tamaño, incrementar más el tamaño de la población simplemente puede influir en una convergencia más frecuente y en menos generaciones del algoritmo

genético, hacia ese valor de máximo global.

#### 5.5.4 Resultados con la Variación de la Probabilidad de Mutación

En esta subsección se van a exponer los resultados obtenidos al variar la probabilidad de mutación utilizando una probabilidad fija y una probabilidad variable con las generaciones. A lo largo de los experimentos aquí expuestos se ha empleado un tamaño de población de 200 individuos y el algoritmo genético se ha ejecutado durante 200 generaciones.

##### 5.5.4.1 Probabilidad de Mutación Fija

En primer lugar se han probado las cuatro probabilidades fijas de mutación que se muestran en la tabla 5.5. También se presentan en esta tabla el tiempo medio de ejecución para cada caso. Nuevamente se ejecutó 30 veces por cada valor de probabilidad el algoritmo genético.

# Test	Probabilidad de Mutación	Tiempo Medio de Ejecución (s)
1	1/200 (0.005)	3774.5
2	1/100 (0.01)	3747.8
3	1/50 (0.02)	3710.8
4	1/20 (0.05)	3710.8

Tabla 5.5: Estadísticas de los Experimentos Realizados Variando la Probabilidad de Mutación – Probabilidades Fijas

En la figura 5.43 se representan la media y desviación típica de todos los valores de *fitness* obtenidos de las 30 ejecuciones. En esta figura parece claro que, independientemente del valor de la probabilidad de mutación, se alcanzan valores de *fitness* similares – alrededor de 1900. El mismo efecto parece obtenerse con la desviación típica, con la excepción de algunas perturbaciones en las últimas 60 generaciones para el caso de una probabilidad de 0.005. En la figura 5.44 se representa a modo de ejemplo la visión zenital del caso con probabilidad 0.005. Como puede inferirse de la figura 5.43, los otros tres casos de mutación fija son muy similares al anterior.

De estos cuatro casos se puede extraer una conclusión: El espacio de soluciones es demasiado grande y su *orografía* es tan compleja que parece totalmente indicado usar una probabilidad de mutación variable para evitar el caer en máximos locales.

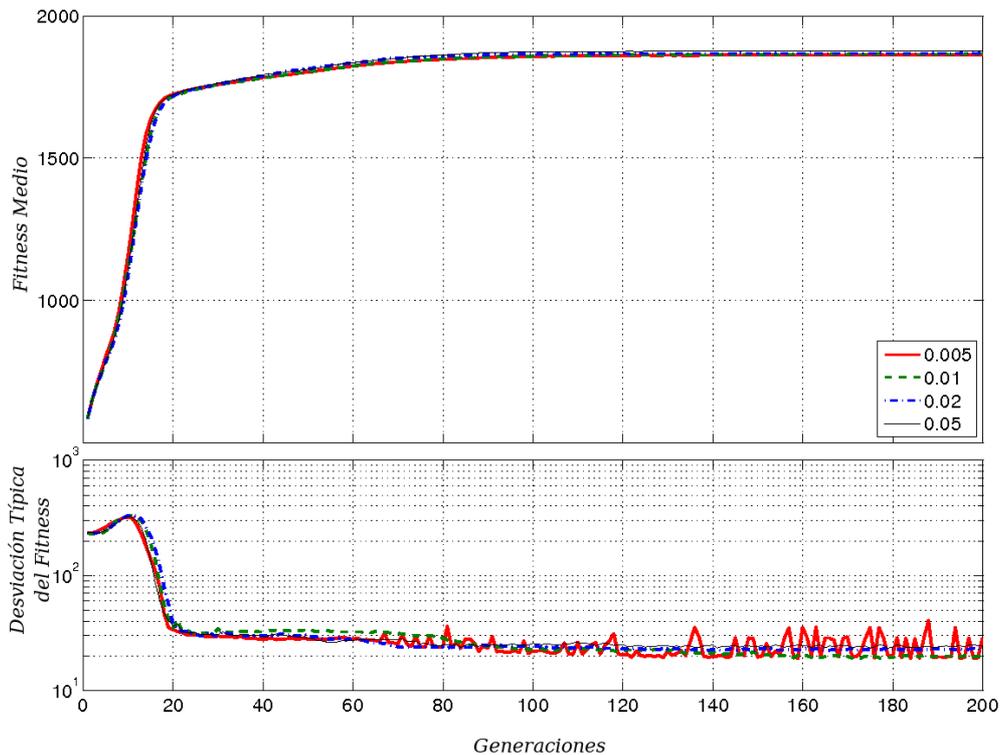


Figura 5.43: *Fitness* Medio y Desviación Típica para los 4 Casos Empleando Probabilidad de Mutación Fija

#### 5.5.4.2 Probabilidad de Mutación Variable

Una vez realizados los cuatro casos con probabilidad de mutación fija se realizaron pruebas utilizando una probabilidad variable. En estos experimentos se ha utilizado una hipermutación inicial, es decir una probabilidad de mutación muy alta – 0.99. A medida que transcurren las generaciones se va reduciendo esta probabilidad progresivamente multiplicándola por un factor. Este factor de mutación tiene un valor real mayor que 0 y menor que 1. También en estos experimentos se ha lanzado el algoritmo genético 30 veces.

## 5.5. ESTUDIO VISUAL Y ESTADÍSTICO DE EVOLUCIÓN DEL G.A. 77

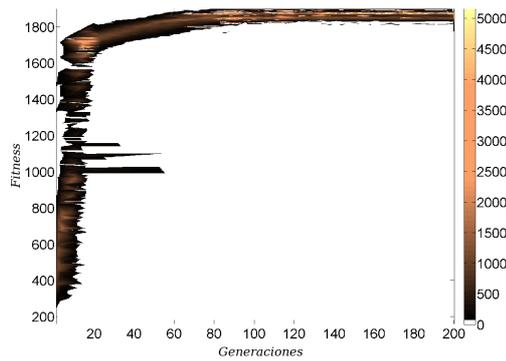


Figura 5.44: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: Probabilidad de Mutación Fija de 0.005

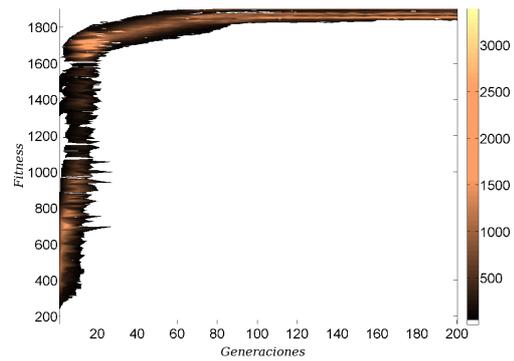


Figura 5.45: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: Probabilidad de Mutación Fija de 0.01

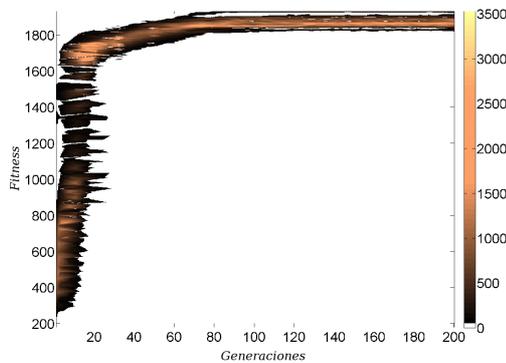


Figura 5.46: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: Probabilidad de Mutación Fija de 0.02

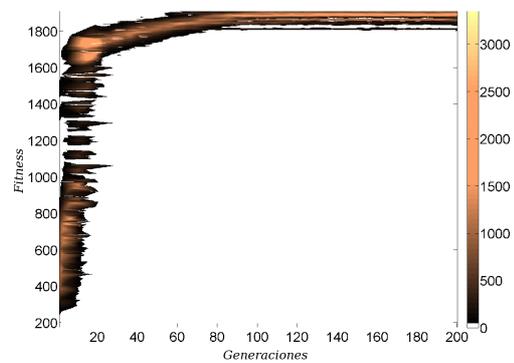


Figura 5.47: Vista Zenital de la Evolución del Histograma: Probabilidad de Mutación Fija de 0.05

En la figura 5.48 se representan las estadísticas de media y desviación típica para todos los valores de *fitness* obtenidos en las 30 ejecuciones del algoritmo genético.

Como puede apreciarse en la figura 5.48, existe una mayor desviación típica – casi un orden de magnitud – para los tres casos, con respecto a la que se obtiene con mutación fija. Además, los valores de *fitness* medio alcanzados mejoran sensiblemente, especialmente para los casos en los que se usó un factor de mutación de 0.975 y 0.98.

En la figuras 5.49, 5.50 y 5.51 se puede apreciar una situación totalmente diferente a la que se tiene en las figuras 5.44, 5.45, 5.46, 5.47. Con una pro-

# Test	Factor de Probabilidad de Mutación	Tiempo Medio de Ejecución (s)
1	0.97	3683.8
2	0.975	3594.2
3	0.98	3605.1

Tabla 5.6: Estadísticas de los Experimentos Realizados Variando la Probabilidad de Mutación – Probabilidad Variable

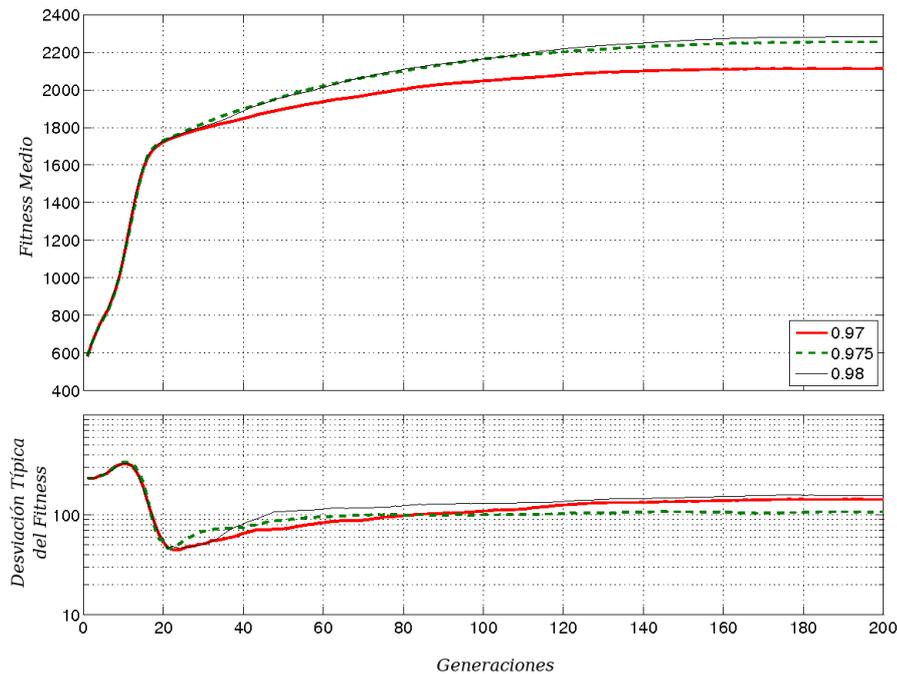


Figura 5.48: *Fitness* Medio y Desviación Típica para los 3 Casos de Probabilidad de Mutación Variable

babilidad variable se tienen muchas ramas filogenéticas. Especialmente, en el experimento con un factor de mutación de 0.98 se obtienen al menos 7 ramas diferentes, como puede observarse en la figura 5.51.

Todo parece indicar que, al menos para el problema cuya resolución motiva esta Tesis y con un tamaño de población de 200 individuos, una probabilidad de mutación fija impide que se alcance el máximo global. Sin embargo, una probabilidad de mutación variable ayuda a que se eviten máximos locales.

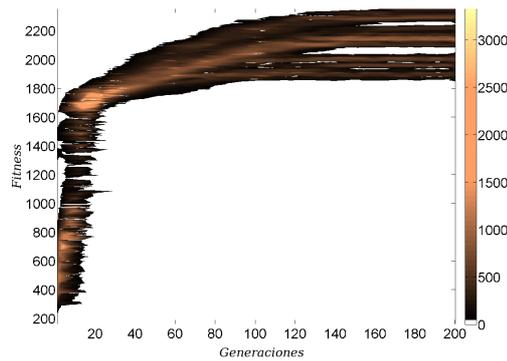


Figura 5.49: Vista Zenital de la Evolución del Histograma. Probabilidad de Mutación Variable. Factor de Mutación de 0.97

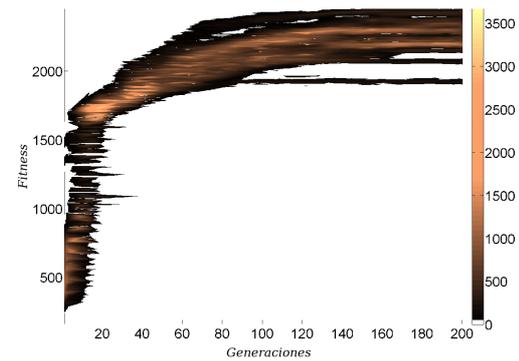


Figura 5.50: Vista Zenital de la Evolución del Histograma. Probabilidad de Mutación Variable. Factor de Mutación de 0.975

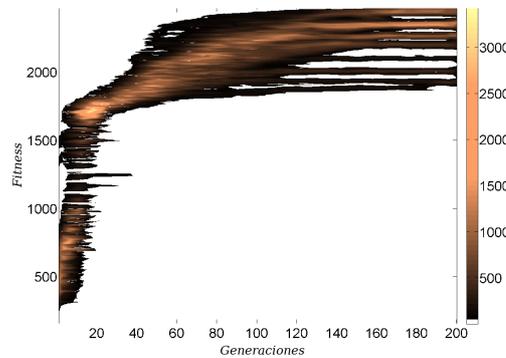


Figura 5.51: Vista Zenital de la Evolución del Histograma. Probabilidad de Mutación Variable. Factor de Mutación de 0.98

### 5.5.5 Conclusiones

En esta sección se han expuesto los resultados de un conjunto de experimentos que han permitido el logro de dos objetivos de interés para esta Tesis. No sólo se ha presentado un conjunto de tests que han permitido el ajuste fino del algoritmo genético utilizado; además, como subproducto de lo anterior, se ha esbozado una metodología de ajuste fino de los algoritmos genéticos. Esta metodología se basa en una nueva representación visual y estadística de la evolución de los mismos. Con esta visualización los especialistas pueden acceder a un conocimiento más profundo de cómo está funcionando un algoritmo

genético y ajustarlo óptimamente.

En los primeros experimentos – sección 5.5.3 – se han presentado los resultados obtenidos variando el tamaño de la población en un rango de 50 a 500 individuos. De este apartado se ha observado un incremento en el “*fitness*” medio alcanzado según se incrementa el tamaño de las poblaciones.

Sin embargo, la dispersión de la población disminuye cuando aumenta el tamaño de la población más allá de 200 individuos hasta los 500. Parece que esto es debido a que una vez alcanzado un tamaño crítico de población (aproximadamente en los 200 individuos para este caso), incrementarlo sólo supone que existen mayores garantías de llegar al máximo global más frecuentemente.

En el apartado 5.5.4 se presentaron los resultados de los experimentos realizados variando otro parámetro del algoritmo genético como es la probabilidad de mutación. La principal aportación de esta parte se puede resumir en una única frase: *si no vas a usar un tamaño de población muy grande necesitarás una probabilidad de mutación variable para evitar los máximo locales*, al menos, en el caso particular que es objeto de este estudio.

## 5.6 Estudio de Funcionamiento en Situación de Congestión

Es común que cuando el gobierno de una ciudad toma conciencia de la necesidad de mejorar su gestión del tráfico sea después de haber llegado a una situación de congestión en una parte o en la totalidad de la red de tráfico. Es en esta situación de gran complejidad cuando puede resultar más útil un modelo de optimización del tráfico que, aun en el caso de que no elimine totalmente la congestión, al menos la alivie parcialmente.

En la presente sección se expone un estudio cuyo principal objeto es el análisis del modelo propuesto en esta Tesis (en el capítulo 4) en escenarios de congestión severa. Se han simulado varias situaciones de congestión haciendo uso de una red de tráfico real. En concreto se trata de La Almozara (distrito número 7) en la ciudad de Zaragoza. Los resultados de este estudio están siendo revisados para su publicación en una revista internacional de impacto.

Esta red de tráfico, junto con “Las Ramblas” en Santa Cruz de Tenerife son los dos casos de aplicación que se han tomado, en virtud de acuerdos de colaboración con sendos ayuntamientos, para aplicar la metodología que se propone en esta Tesis Doctoral. En la sección 6.3 se explica con detalle el proceso de aplicación.

Hay que destacar que la escala de la zona utilizada para este trabajo es realmente grande. Muy pocas investigaciones abarcan una zona tan amplia en extensión.

Los resultados obtenidos con esta red de tráfico son alentadores. En todos los casos probados en nuestro entorno simulado se mejora el comportamiento del tráfico con respecto al que se obtiene si se usan los tiempos de semáforo que actualmente rigen en las intersecciones tratadas. Son particularmente notables las mejoras que se obtienen para los casos de mayor congestión.

El Ayuntamiento de Zaragoza ha facilitado gentilmente dos tipos de datos de tráfico. En primer lugar, se facilitaron datos topográficos de la zona y estadísticas del tráfico que la recorre a diario. En segundo lugar se facilitaron



explicación a que esta mejora sea tan pequeña puede ser la baja densidad de vehículos, que mengua la influencia de los semáforos en el comportamiento del tráfico.

En una segunda fase se han creado 10 situaciones hipotéticas de tráfico con distintos niveles de congestión, variando simplemente el caudal de tráfico que entra a la red. En este caso, la mejora obtenida con respecto a los resultados que se obtendrían usando los tiempos actuales es buena, y muy buena para los casos de mayor congestión.

A continuación se describe con detalle el estudio realizado.

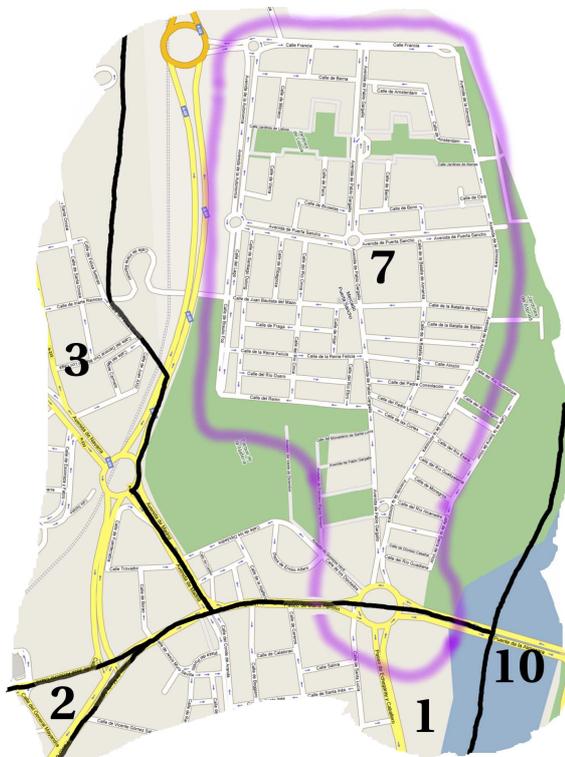


Figura 5.53: Distritos en La Almozara



Figura 5.54: Vista de Pájaro de La Almozara (Obtenida de *Google Maps*)

### 5.6.1 Tests Realizados

En las figuras 5.53 y 5.54 se muestra el distrito séptimo de la ciudad de Zaragoza, cuyo nombre es La Almozara. Se han incluido estas dos figuras aquí, además de estar en el apartado 6.3, para facilitar la lectura de esta Tesis.

En la figura 5.54 se quiere destacar la gran escala de la zona estudiada. En la sección B.1 se enumeran las calles tenidas en cuenta y las descartadas (por simplicidad) para este estudio.

En la tabla 5.7 se representa la entrada actual de vehículos a la red estudiada. Por cada punto de entrada se representa el periodo de creación de nuevos vehículos en el mismo. Cada entero significa el número de iteraciones del simulador entre dos instantes consecutivos de creación de nuevo vehículo. Esos valores se obtienen de las estadísticas de tráfico suministradas por el departamento de tráfico del Ayuntamiento de Zaragoza.

En la tabla 5.8 representan los periodos de creación de nuevos vehículos en toda las entradas correspondientes a los 10 casos hipotéticos de congestión. Nótese que para la situación número 0 se crea un nuevo vehículo cada iteración de la simulación. Esta es la peor situación posible de congestión del tráfico, en el modelo propuesto.

Celda de Entrada	Periodo	Celda de Entrada	Periodo
0	403	8	171
1	403	9	171
2	403	10	266
3	403	11	266
4	29	12	266
5	72	13	87
6	201	14	87
7	171	15	87

Tabla 5.7: Situación Actual de Entrada de Tráfico (Periodos)

Situación	Periodos
#0	0
#1	1
#2	2
#3	3
#4	5
#5	10
#6	20
#7	30
#8	50
#9	100

Tabla 5.8: Periodos de Entrada de Tráfico Usados en los Tests

Para este estudio se ha utilizado una población de 200 individuos en el Algoritmo Genético (GA). La convergencia del GA se da en un número diferente de generaciones, dependiendo de cada caso. Por lo tanto, y para no derrochar tiempo de computación, se ha fijado un número de generaciones máximo para cada caso, y se enumeran en la tabla 5.9. En la tabla 5.9 también se incluye el tiempo medio de ejecución por cada caso.

Como política de selección se ha utilizado la combinación de dos estándares:

Situación de Tráfico	#Generaciones	Tiempo de Ejecución (s)
Entrada Actual de Tráfico	400	18605
#0	400	30803
#1	300	24439
#2	250	20558
#3	250	19241
#4	250	18657
#5	200	13423
#6	200	11290
#7	200	10710
#8	200	10471
#9	200	9739

Tabla 5.9: Casos Test: Generaciones del GA

el Elitismo y el Truncado. Además, se ha empleado una probabilidad de mutación variable. El valor inicial es muy alto (0.9990) y decrece generación por generación, por un factor de 0.9875.

En cuanto al simulador de tráfico se han realizado simulaciones de 4000 iteraciones cada una.

En las figuras 6.15, 6.16 y 6.17 se representa la zona estudiada, una vez muestreada. La red completa incluye 2753 celdas.

### 5.6.2 Parámetros Muestreados

En esta prueba se ha utilizado una optimización de un único criterio. Se trata, como se explica en 4.3.1, del número de vehículos que abandonan la red de tráfico durante la simulación.

Durante el proceso de optimización, y por cada individuo, se han obtenido no sólo el valor de *fitness*, sino algunos otros parámetros. En concreto se ha muestreado también el la media del Estado de la Congestión (*State of Congestion* o SOC) ([44]) y la media del Tiempo de Ocupación (*Time of Occupancy* o TOC) ([75]).

$$SOC = \frac{N_c^o}{N_c^T} \quad (5.2)$$

$$TOC = \frac{N_{it}^o}{N_{it}^T} \quad (5.3)$$

$$S\bar{O}C = \frac{\sum_{i=0}^{N_{it}^T} \frac{N_c^o(i)}{N_c^T}}{N_{it}^T} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{it}^T} N_c^o(i)}{N_c^T * N_{it}^T} \quad (5.4)$$

$$T\bar{O}C = \frac{\sum_{c=0}^{N_c^T} \frac{N_{it}^o(c)}{N_{it}^T}}{N_c^T} = \frac{\sum_{c=0}^{N_c^T} N_{it}^o(c)}{N_c^T * N_{it}^T} \quad (5.5)$$

En las ecuaciones 5.2 y 5.3 se describen ambos parámetros.

En la ecuación 5.2,  $N_c^o$  es el número de celdas ocupadas por un vehículo, y  $N_c^T$  significa el número total de celdas de la red bajo estudio.

En lo referente a la ecuación 5.3,  $N_{it}^o$  significa el número de iteraciones del simulador que una celda particular permanece ocupada por algún vehículo, y por último  $N_{it}^T$  significa el número total de iteraciones que dura la simulación.

Como puede inferirse fácilmente de las ecuaciones 5.4 y 5.5, la media del SOC calculada entre todas las iteraciones del simulador tiene el mismo valor que la media del TOC calculada teniendo en cuenta a todas las celdas de la red de tráfico. En otras palabras, el valor medio de la tasa de celdas ocupadas, calculado a lo largo de todas las iteraciones del simulador, y el valor medio de la tasa de ocupación de cada celda considerando todas las celdas tienen el mismo valor.

Por ello, para este estudio se ha considerado sólo el valor medio del SOC. En lo que resta de esta sección a este estadístico se le denominará TOC/SOC.

### 5.6.2.1 Restricciones Asumidas

En B.1 se enumeran las calles que se incluyen y las que no fueron tenidas en cuenta para este experimento. Además, en B.2 están las acotaciones asumidas para la determinación de la matriz de probabilidad de Origen-Destino que se muestra en B.2.1.

### 5.6.2.2 Resultados Obtenidos

En la figura 5.55 se muestra el *fitness* máximo y medio obtenido para cada una de las situaciones de tráfico de la tabla 5.8.

Además, también se representa (con una línea horizontal) el valor de *fitness* resultante de simular con la entrada de tráfico, y los tiempos de los semáforos suministrados, es decir, la situación actual. Para este caso, 495 vehículos abandonaron la red.

En la figura 5.56 se muestra el incremento de los valores de *fitness* en porcentaje, haciendo uso de una escala logarítmica. Como puede observarse, el incremento máximo del *fitness* es siempre mayor al 40%, excepto para los dos casos más a la derecha. Para la situación número 9, el incremento es aproximadamente de un 7%. Para la situación actual, el incremento es mayor a un 10%.

El mejor valor de *fitness* obtenido una vez optimizados los tiempos de los semáforos es de 7139. Esto supone un incremento de 1442% con respecto al *fitness* que se obtiene de la simulación con los tiempos de los semáforos suministrados (495).

En la figura 5.57 se representan el valor máximo y medio del parámetro TOC/SOC (definido en 5.6.2). Este parámetro refleja la ocupación de la red de tráfico. Como puede apreciarse, existe una clara relación entre el valor del *fitness* – el número de vehículos de abandonan la zona – y la ocupación de la red. Este es un efecto previsible.

En la tabla 5.9 se incluyen el tiempo medio de ejecución para cada caso.

Por último, en la figura 5.58 se muestra que los mejores resultados son obtenidos para las 9 primeras situaciones. Para la situación número 9 se obtiene una mejora modesta, tanto para el parámetro TOC/SOC como para el *fitness*.

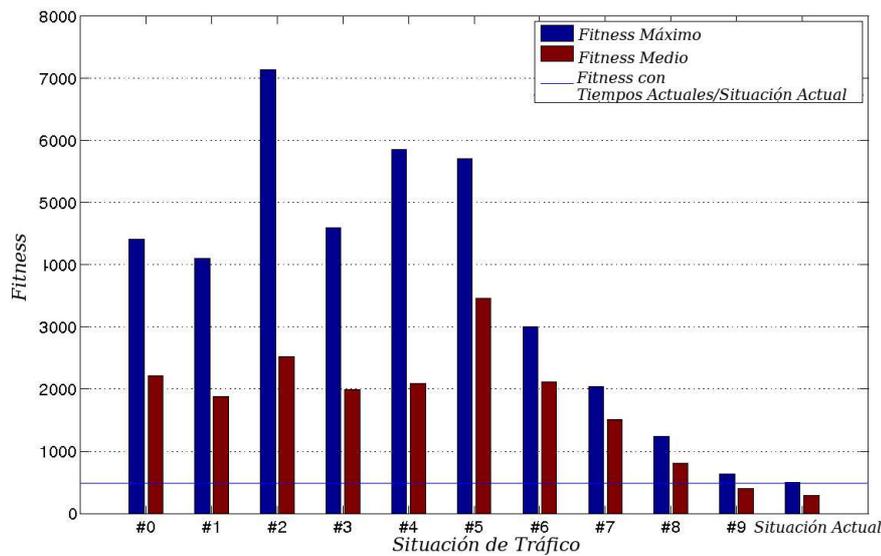


Figura 5.55: *Fitness* Máximo y Medio Obtenido para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico Testeadas

### 5.6.3 Discusión

Las figuras 5.55 y 5.56 son ilustrativas. En la última, los distintos escenarios de carga de tráfico están ordenados de mayor a menor congestión, y puede observarse que los mejores incrementos en el *fitness* se obtienen en las situaciones de mayor sobrecarga de tráfico.

Para la situación actual de tráfico se han obtenido resultados modestos con la optimización. Todo parece indicar que cuando la entrada de vehículos es tan baja como en este caso, de manera bastante independiente a la combinación de tiempos de los semáforos, el comportamiento de la red es similar. En otras palabras, es muy difícil mejorar el funcionamiento de una red de tráfico simplemente optimizando los tiempos de los semáforos, si su nivel de ocupación es muy bajo.

La figura 5.55 es muy clara. Los resultados de *fitness* de la simulación utilizando los tiempos optimizados son mucho mejores que los que se obtienen utilizando los tiempos suministrados. En las primeras 8 situaciones de tráfico se observa una gran mejora de *fitness*. Las situaciones 8, 9 y la que utiliza la entrada de tráfico suministrada tienen una mejora en el *fitness* más discreta.

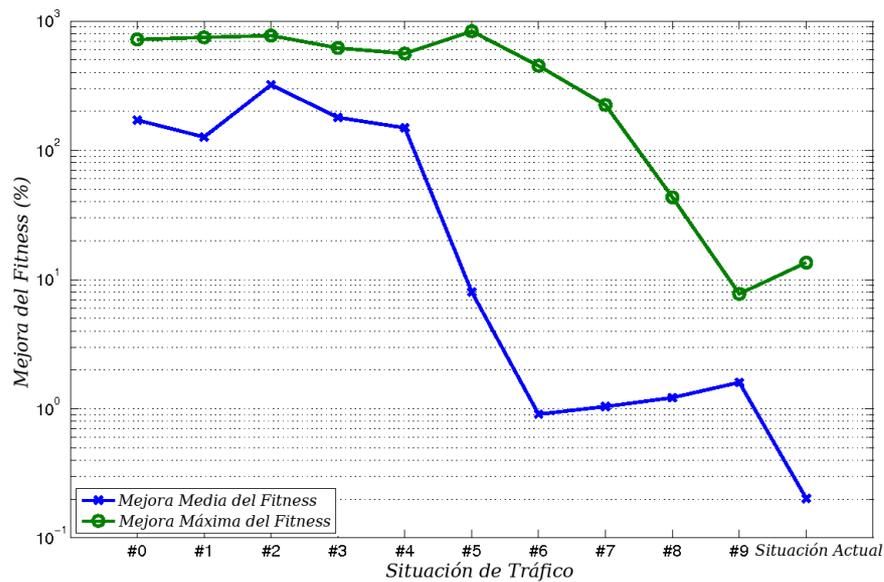


Figura 5.56: Porcentaje de Incremento del *Fitness* Máximo y Medio Obtenido para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico Testeadas

En la figura 5.56 se representa la mejora del *fitness* tras la optimización del algoritmo genético. En esta figura puede observarse que los mayores incrementos en el *fitness* durante la ejecución del algoritmo genético se dan para las situaciones de la número 0 a la número 7.

Las figuras 5.57 y 5.58 brindan una información de calado: parece existir una correlación entre el número total de vehículos que abandonan la red (el criterio de optimización) y su ocupación. Esto está del todo de acuerdo con el sentido común, y parece que puede ser un valioso indicador de un correcto funcionamiento del simulador de tráfico que se incluye en el modelo de optimización planteado en esta Tesis.

Si se concentra la atención en las figuras 5.55 y 5.57, en los 6 casos de test de mayor congestión se puede deducir un último aspecto de interés. Aunque los resultados son muy buenos para estos 6 casos, parece ser que los resultados obtenidos en las situaciones número 0 y 1 son ligeramente peores que los obtenidos en las otras cuatro situaciones.

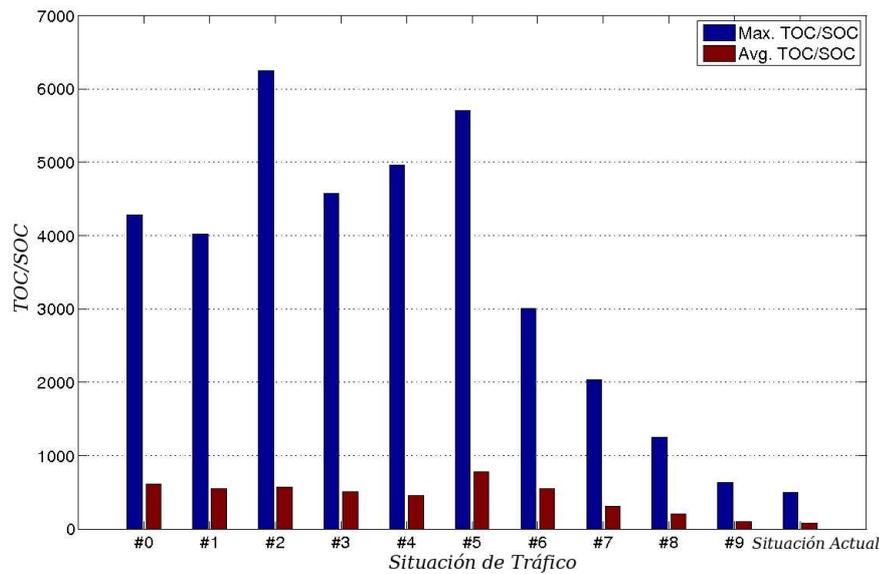


Figura 5.57: TOC/SOC Máximo y Medio Obtenido para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico Testeadas

#### 5.6.4 Conclusiones

A través de este estudio se ha expuesto el efecto que tiene una situación de congestión en el modelo de optimización de ciclos de semáforos que se plantea en la presente Tesis. Para ello se han utilizado datos reales del barrio de “La Almozara”. Usando estos datos se ha simulado el comportamiento del momento presente del tráfico en la zona. Al aplicar la metodología propuesta se han optimizado los tiempos de los ciclos de los semáforos lográndose mejoras en las estadísticas del tráfico con respecto a varios parámetros.

Una característica reseñable de este estudio es la escala de la red tratada, la cual es muy grande. Este estudio confirma el estudio expuesto en el apartado 5.2 en la conclusión que hacía referencia a la escalabilidad de la metodología propuesta. Ello es debido, como se explicó allí, a el paralelismo intrínseco de los algoritmos genéticos, y la facilidad de la extensión de los *Clusters Beowulf*.

Otro logro destacable del estudio que se comparte en esta sección es en lo que atañe al análisis del sistema en una situación simulada de congestión. No parece que existan en la literatura científica mucho trabajo hecho en este tema. Para el presente estudio se han diseñado 10 situaciones de congestión

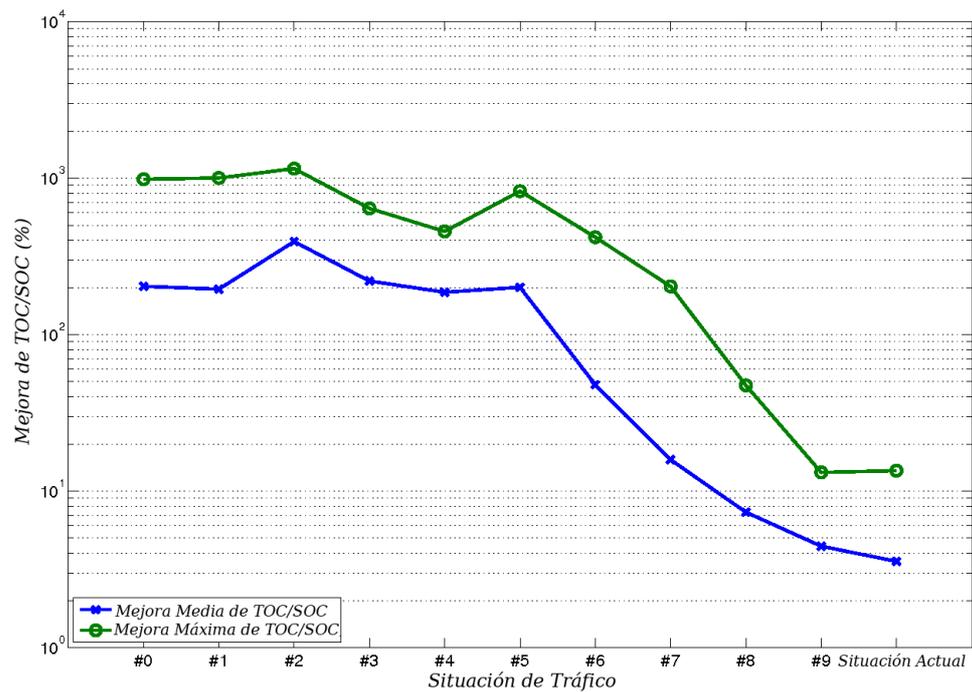


Figura 5.58: Porcentaje de Incremento del TOC/SOC Máximo y Medio Obtenido para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico Testeadas

hipotéticas y se han probado en el sistema. Los resultados parecen realmente prometedores, dado que se obtienen tasas de *fitness* muy buenas para todos los casos. Es de gran interés destacar que los casos de peor congestión son los que obtienen mejoras más significativas. Esto último es una gran noticia, dado que, obviamente, las redes con mayor congestión son justo aquellas más necesitadas de ser optimizadas.

## 5.7 Estudio de nuevos criterios para la extensión de la optimización monocriterio a multicriterio

Durante la realización de los trabajos de investigación concernientes a la metodología que se propone por medio de esta Tesis, se ha utilizado como criterio de optimización del algoritmo genético un único criterio. Este es el valor absoluto del número de vehículos que han abandonado la red una vez finaliza la simulación.

En los últimos estudios que se han realizado se ha llegado a la conclusión de la oportunidad de extender el modelo propuesto incluyendo una optimización multicriterio. En esta sección se explica los nuevos criterios que se han venido considerando como candidatos a formar parte de la función de evaluación. Las conclusiones expuestas en esta sección fueron publicadas en [76].

Básicamente, hasta ahora, se han considerado tres posibles criterios, que son:

- Volumen de vehículos que han abandonado la red (usado hasta ahora como único criterio).
- Emisiones de gases con efecto invernadero.
- Ocupación de la red de tráfico.

A lo largo de esta sección se va a explicar, para cada uno de ellos, qué parámetros se han considerado para su integración en una ecuación de *fitness* multiobjetivo.

### 5.7.1 Volumen de Vehículos

Como se comenta en la sección anterior, y se explicó en 4.3.1 se ha venido usando el número de vehículos que abandonan la red durante la simulación como valor de *fitness* en la metodología planteada en esta Tesis. Este es un valor absoluto. Para poder compararlo con los parámetros que se van a

usar para los criterios de emisiones y ocupación es necesario primero deducir algún parámetro equivalente al usado que sea relativo. Para el estudio que se presenta en esta sección se han derivado dos nuevos parámetros relativos que se han denominado Probabilidad de Salida y Tasa de Salida. Ambos son definidos en las ecuaciones 5.6 y 5.7 respectivamente. La Probabilidad de Salida es el número de vehículos que sale –  $N_v^l$  – dividido entre el número de vehículos que entra en la red –  $N_v^i$  – una vez que finaliza la simulación. La Tasa de Salida es un estadístico similar. Es el número de vehículos que dejan la red entre el número de vehículos que se quedan en la red, una vez ha finalizado la simulación.

$$Probabilidad\_de\_Salida = \frac{N_v^l}{N_v^i} \quad (5.6)$$

$$Tasa\_de\_Salida = \frac{N_v^l}{(N_v^i - N_v^l)} \quad (5.7)$$

### 5.7.2 Emisión de Gases

En [77] se demuestra que las emisiones de monóxido de carbono ( $CO$ ) y nitróxidos ( $NO_x$ ) están correladas linealmente con la velocidad de los vehículos. Este hecho puede apreciarse especialmente en las figuras 4 y 5 de esta investigación.

Con esto en mente se define un nuevo parámetro, que se ha denominado factor de emisión, simplemente como el valor escalar de la velocidad de cada vehículo, iteración por iteración. Parece lógico pensar que este parámetro, tan barato en cuanto a tiempo de computación, puede dar una idea aproximada del volumen de esos gases de efecto invernadero *emitidos* durante la simulación.

En los experimentos realizados se ha registrado, iteración por iteración, la suma total de las emisiones – *Total Emissions* (TE) – tal y como se muestra en la ecuación 5.8. En esta ecuación  $N_{cells}$  significa el número de celdas de la red de tráfico; y  $f_{EF}$  significa el Factor de Emisión del vehículo situado en la celda 'c' y en la iteración 'i'. Obviamente, cuando la celda no está ocupada, el

Velocidad (celdas por iteración)	Factor de Emisión
0	0
1	1
2	2
...	...

Tabla 5.10: Relación entre la Velocidad y el Factor de Emisión

valor de  $f_{EF}$  es 0.

$$TE = \sum_{c=0}^{N_{cells}-1} (f_{EF}(i, c)) \quad (5.8)$$

Todo parece indicar que la minimización del parámetro TE podría significar la minimización de las emisiones de monóxido de carbono y nitróxidos. Por lo tanto, parece claro de que merece la pena considerar la inclusión de este criterio en la optimización multicriterio que se pretende realizar.

En el estudio que se presenta en esta sección se han considerado dos estadísticos del parámetro TE, que son la media y la desviación típica, calculados ambos entre los valores de TE obtenidos a lo largo de todas las iteraciones del simulador.

### 5.7.3 Ocupación de la Red

En este apartado se van a explicar los parámetros referentes a la ocupación de la red que han sido estudiados. En 5.6 se definieron los parámetros Estado de la Congestión (*State of Congestion* o SOC) ([44]) y el Tiempo de Ocupación (*Time of Occupancy* o TOC) ([75]). Para la comodidad del lector se vuelven a incluir aquí las ecuaciones de sendos parámetros (5.9 y 5.10):

$$SOC = \frac{N_c^o}{N_c^T} \quad (5.9)$$

$$TOC = \frac{N_{it}^o}{N_{it}^T} \quad (5.10)$$

En la ecuación 5.9,  $N_c^o$  es el número de celdas ocupadas por un vehículo, y

	Las Ramblas	La Almozara
# Celdas	1643	2753
# Semáforos	42	17
# Entradas	26	16
# Salidas	20	18
# Iteraciones del Simulador	2000	4000

Tabla 5.11: Estadísticas de las Dos Redes Estudiadas

$N_c^T$  significa el número total de celdas de la red bajo estudio.

En lo referente a la ecuación 5.10,  $N_{it}^o$  significa el número de iteraciones del simulador que una celda particular permanece ocupada por algún vehículo, y por último  $N_{it}^T$  significa el número total de iteraciones que dura la simulación.

En la sección 5.6 también se demuestra que la media de ambos parámetros tienen el mismo valor (5.4 y 5.5). Por ello se ha escogido sólo uno de los dos para representar la ocupación de la red. Para este estudio se ha muestreado la media y la desviación típica del SOC a lo largo de toda la simulación.

## 5.7.4 Estudio Estadístico

### 5.7.4.1 Casos Estudiados

Para esta investigación se han utilizado dos redes de tráfico reales – figuras 6.1 y 6.12. La primera está situada en “Las Ramblas” en Santa Cruz de Tenerife. La segunda está situada en “La Almozara”, en Zaragoza. En la tabla 5.11 se muestran las estadísticas de ambas redes de tráfico.

### 5.7.4.2 Resultados

Para los dos casos bajo estudio se han lanzado 30 ejecuciones del algoritmo genético. Se han utilizado poblaciones de 200 individuos y el algoritmo genético evolucionaba durante 200 generaciones.

Una vez finalizadas las 60 ejecuciones del algoritmo genético se han muestreado los siguientes parámetros de las poblaciones finales: Probabilidad de Salida y Tasa de Salida; Estado de la Congestión (SOC) medio y desviación típica del SOC; y media y desviación típica del Emisiones Totales (TE). El

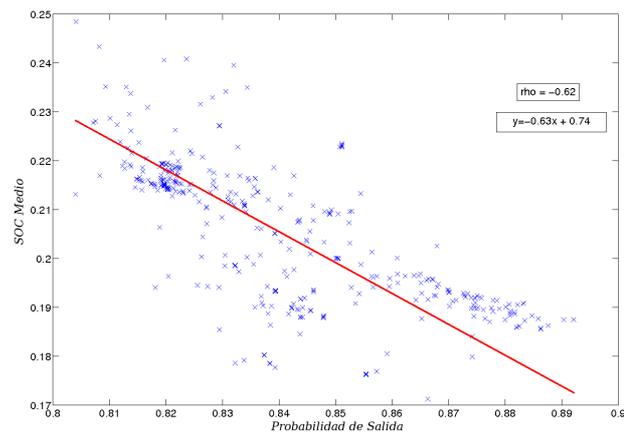


Figura 5.59: Las Ramblas – Probabilidad de Salida Vs. SOC Medio

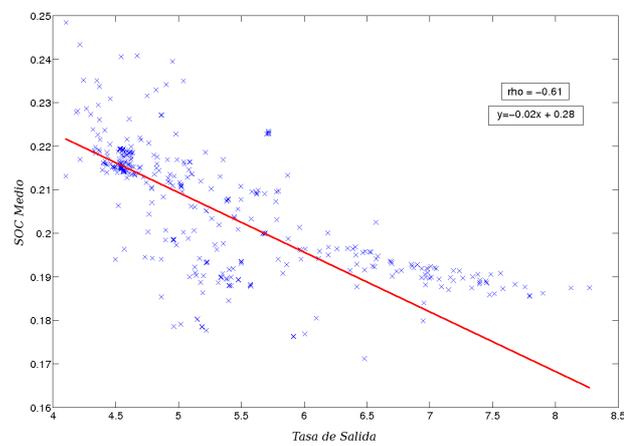


Figura 5.60: Las Ramblas – Tasa de Salida Vs. SOC Medio

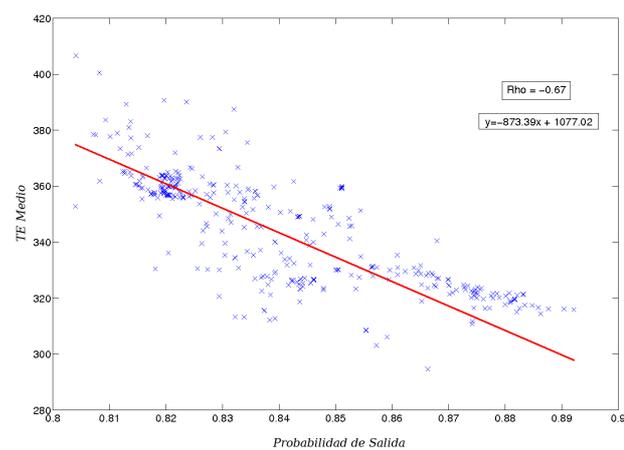


Figura 5.61: Las Ramblas – Probabilidad de Salida Vs. TE Medio

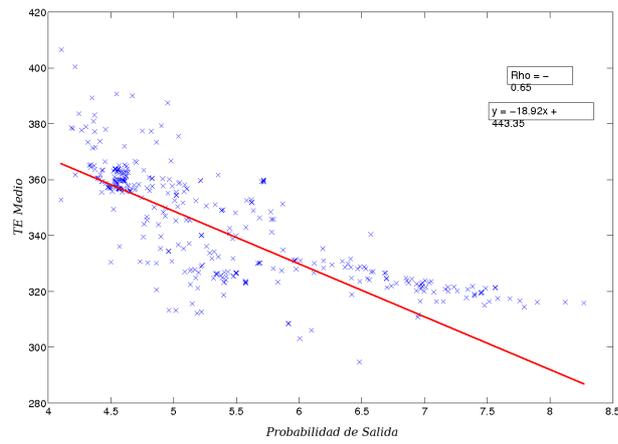


Figura 5.62: Las Ramblas – Tasa de Salida Vs. TE Medio

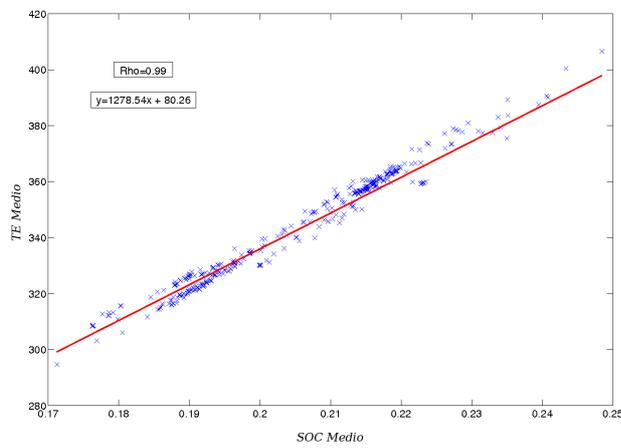


Figura 5.63: Las Ramblas – SOC Medio Vs. TE Medio

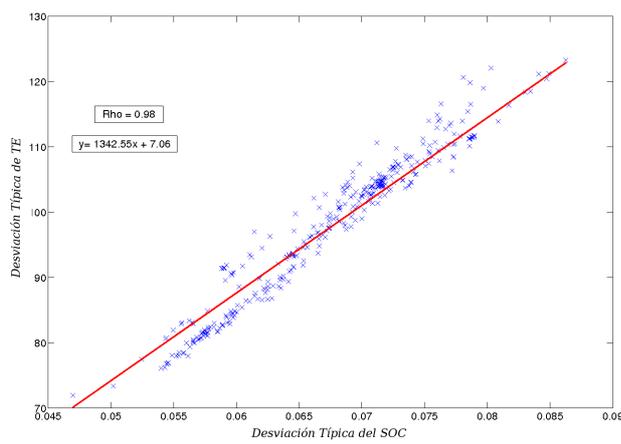


Figura 5.64: Las Ramblas – Std. SOC Vs. Std. Total Emissions

objetivo principal es estudiar si existe alguna correlación entre los parámetros correspondientes a los tres criterios.

Para tener una idea visual de la correlación se han representado, para los dos casos, seis parejas de parámetros en las figuras 5.59, 5.60, 5.61, 5.62, 5.63 y 5.64 – “Las Ramblas” – y tres parejas en las figuras 5.65, 5.66 y 5.67 – “La Almozara”. En estas figuras se ha representado además la función de regresión lineal usando el algoritmo de mínimos cuadrados, haciendo uso de las funciones *polyfit* y *polyval* de Matlab. Además se ha incluido también el coeficiente de correlación de *Pearson* (ecuación 5.11) en cada gráfica.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.11)$$

### 5.7.5 Conclusiones

En primer lugar, en las figuras 5.63, 5.64, 5.66 y 5.67 puede observarse que existe una correlación lineal fuerte y positiva entre el parámetro Estado de la Congestión (SOC) y el Emisiones Totales (TE) para ambas redes de tráfico, tanto con la media como atendiendo a la desviación típica. Este hecho es más patente en la figura 5.66, donde el coeficiente de *Pearson* es 0.99.

Parece claro que la ocupación y las emisiones no son en absoluto criterios ortogonales. Además, la correlación positiva implica que no se van a poder maximizar la ocupación de la red y las emisiones de gases de efecto invernadero en la misma hipotética función de ajuste (*fitness function*) multicriterio. Va a ser necesario decidirse por uno de los dos criterios para incluirlo en la *fitness function*.

Son, por tanto, criterios excluyentes. Esto confirma lo que cabría esperar siguiendo el sentido común. Una red congestionada tendrá mayores emisiones, y viceversa.

En segundo lugar, hay que señalar que la ocupación y las emisiones presentan correlación negativa con respecto al volumen de vehículos que abandonan la red. El grado de la correlación es mayor que uno.

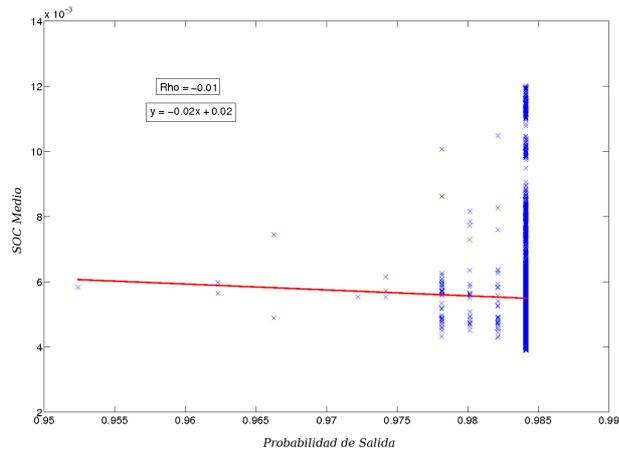


Figura 5.65: La Almozara – Probabilidad de Salida Vs. SOC Medio

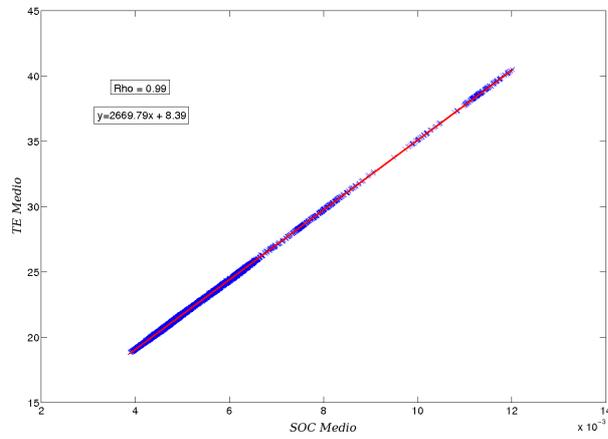


Figura 5.66: La Almozara – Mean SOC Vs. TE Medio

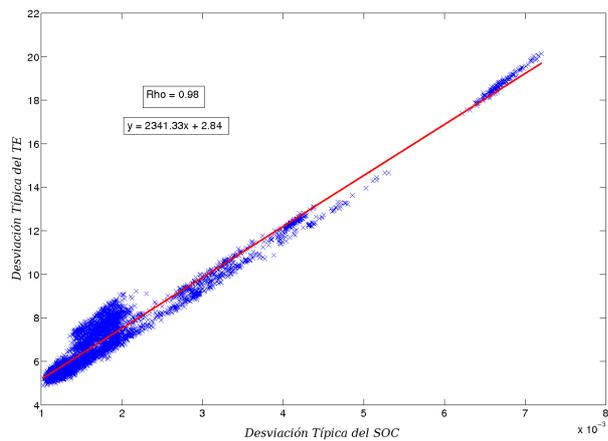


Figura 5.67: La Almozara – Std. SOC Vs. Std. Total Emissions

En las figuras 5.59 y 5.60 se puede ver una clara correlación negativa de grado mayor que uno entre la Probabilidad de Salida y el SOC medio, y entre la Tasa de Salida y el SOC medio respectivamente. La correlación negativa significa que a menor ocupación media mayor probabilidad de que un vehículo que entra en la red, la abandone. Esto confirma la intuición: Una red congestionada es muy probable que sea también una red con peor salida de flujo de vehículos.

En las figuras 5.61 y 5.62 se puede apreciar de nuevo que existe correlación negativa de grado mayor que uno, en este caso entre las Emisiones y la Probabilidad de Salida en el primer caso, y entre las Emisiones y la Tasa de Salida en el segundo caso. La correlación negativa significa que a mayor Probabilidad de Salida menor Emisión Total. En este caso se confirma nuevamente la intuición que dice que en una red congestionada es lógico que se produzca una mayor emisión de gases.

En cuanto a las comparaciones entre la Probabilidad de Salida y Tasa de Salida con la ocupación y las emisiones se ha llegado a un problema inesperado. La convergencia del algoritmo genético estaba en un estadio tan avanzado que los *fitness* de la población estaban todos concentrados en unos pocos valores. Ello provocó que se obtuvieran unas gráficas como la figura 5.65, sin suficiente diversidad en las muestras como para observar la relación entre los dos parámetros representados.

Considerando esta posibilidad sería necesario tomar muestras de los valores los parámetros no sólo en la última generación, sino en distintas generaciones, a lo largo de la evolución.

# Capítulo 6

## Aplicaciones

### 6.1 Introducción

El propósito de este capítulo es explicar con detalle los dos casos reales, en los cuales se ha aplicado el modelo que se propone en esta Tesis. Estos son una zona de la Ciudad de Santa Cruz de Tenerife, denominada comúnmente como “Las Ramblas”; y una zona de la Ciudad de Zaragoza conocida como “La Almozara”.

En virtud de sendos acuerdos de colaboración se han obtenido datos de tráfico de ambas zonas. Con ellos se ha podido aplicar, en un entorno simulado, el modelo de optimización de los ciclos de semáforo explicado en el capítulo 4. Como podrá verse, los resultados son esperanzadores, y motivan a avanzar en esta línea de investigación, en numerosos frentes.

### 6.2 Las Ramblas en Santa Cruz de Tenerife

#### 6.2.1 La Zona de Las Ramblas en Santa Cruz de Tenerife

Santa Cruz de Tenerife es una ciudad costera situada en el noroeste de Tenerife. Tenerife es la isla mayor y más poblada del archipiélago español de las Islas Canarias, situado en la costa noroccidental de África.





Figura 6.2: Vista de Pájaro de Las Ramblas (Obtenida de *Google Maps*)



Figura 6.3: Las Islas Canarias con Santa Cruz de Tenerife Destacada

Santa Cruz de Tenerife es la capital de la isla y está situada a  $28.47^\circ$  de latitud norte y  $16.25^\circ$  de longitud este. La ciudad tiene un área de unos  $150.56 \text{ km}^2$  y la pueblan 223148 habitantes – dato del ISTAC<sup>1</sup> de 1/01/2006. Además, esta ciudad concentra la mayor actividad comercial de Tenerife.

La economía de la ciudad se basa fundamentalmente en el sector servicios, con la excepción de una refinería.

En el distrito de Las Ramblas hay una gran concentración de almacenes, tiendas y algunos centros comerciales. Por tanto, la zona escogida es muy apropiada para probar el modelo propuesto en esta Tesis, por la intensa presencia de tráfico.

## 6.2.2 Colaboración con el Departamento de Tráfico

Una vez que se decidió tomar esta ciudad como caso test, el CICEI contactó con el concejal responsable de la gestión del tráfico, D. Hilario Rodríguez González. En seguida mostró interés en colaborar con el grupo, y facilitó todos los datos necesarios.

Se solicitaron tres tipos de dato. Primero se necesitaban datos topográficos de la zona escogida.

También se necesitaba una matriz de probabilidad de origen-destino, la cual es de gran utilidad para poder simular el tráfico en la zona y determinar el destino de cada nuevo vehículo que se crea. Sin embargo, no pudieron facilitar esta matriz. Por ello, pusieron a disposición del CICEI muchos datos

<sup>1</sup>Instituto Canario de Estadística

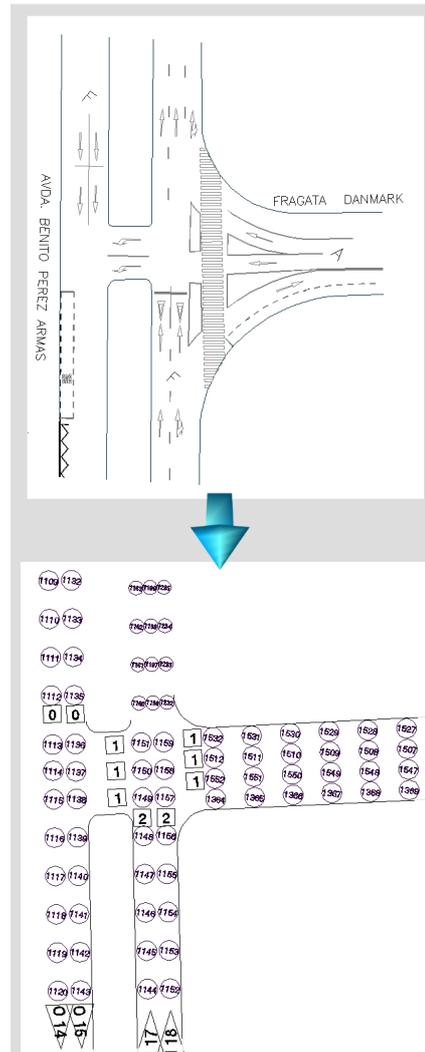


Figura 6.4: Ejemplo de Discretización de Topología

de estadísticas de Intensidades Medias Diarias (I.M.D.), con los cuales, y asumiendo ciertas restricciones que se enumeran en A.2, se ha podido calcular una matriz de Origen-Destino (A.2.1).

Esas estadísticas también son necesarias para simular la entrada de tráfico a la red en el mundo real.

Por último hacen falta los ciclos de semáforo que se usaban en la calle para poder realizar una comparación entre el comportamiento del tráfico simulado con sus tiempos y los tiempos optimizados haciendo uso del sistema propuesto en esta Tesis.



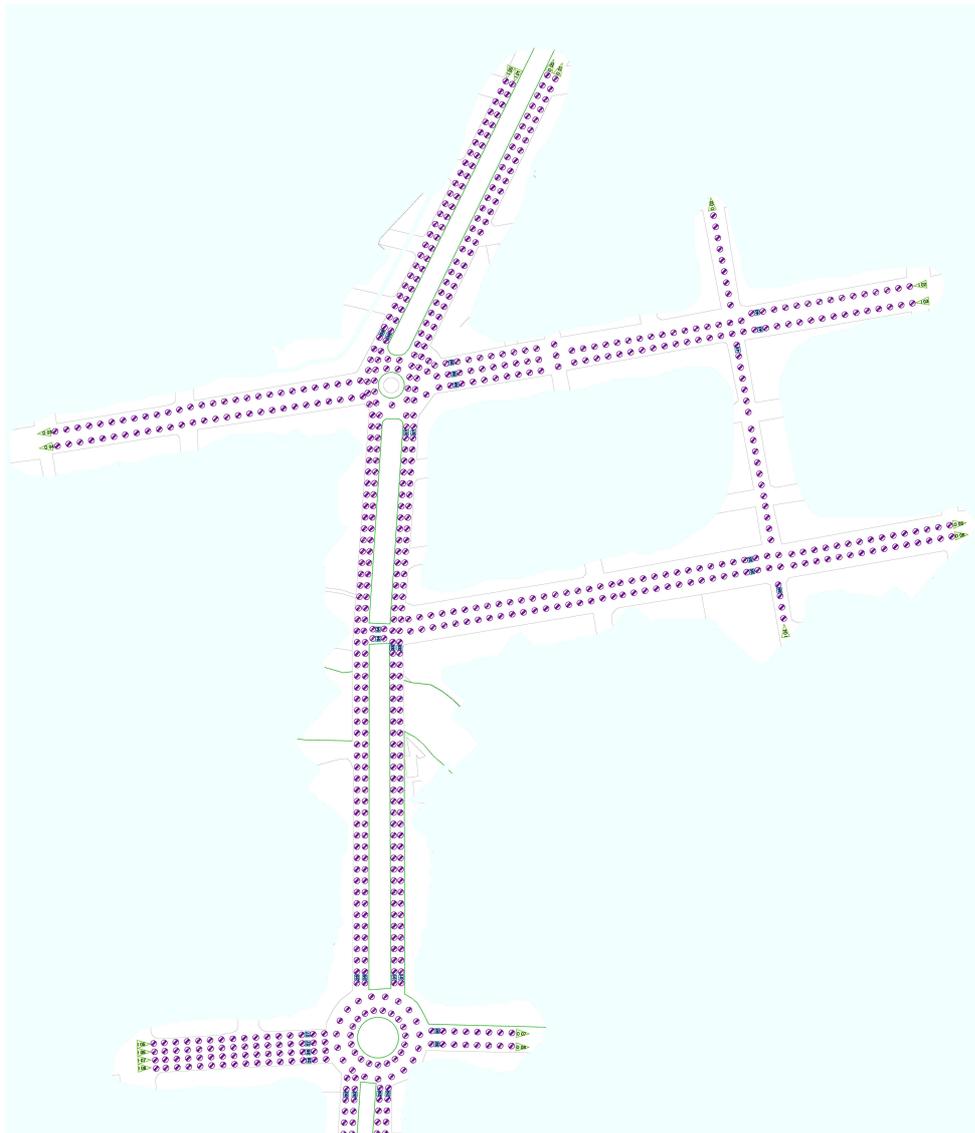


Figura 6.6: Las Ramblas Discretizada – 1ª mitad

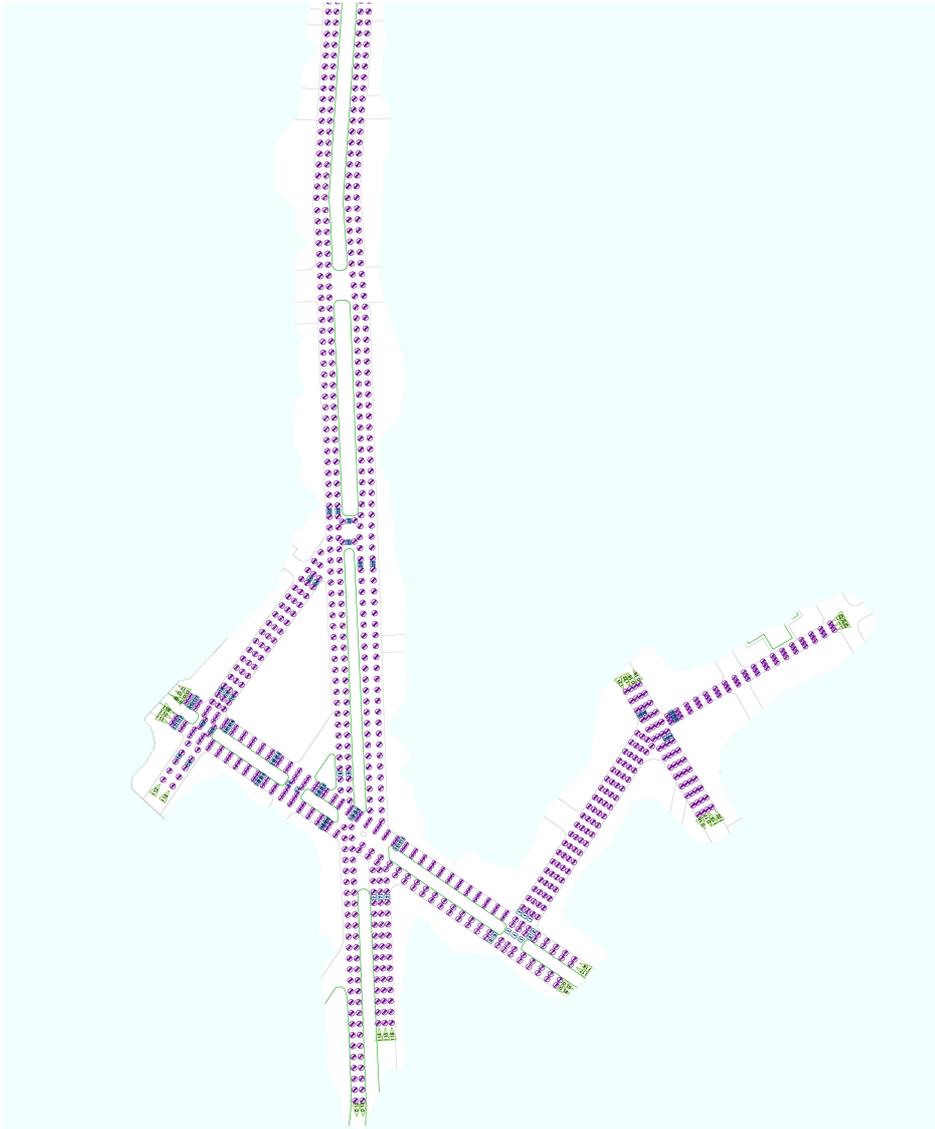


Figura 6.7: Las Ramblas Discretizada – 2ª mitad

### 6.2.3 Preprocesado de los Datos

A lo largo del presente apartado se explicará como se prepararon los datos facilitados para poder utilizarlos con el sistema propuesto en esta Tesis.

En la figura 6.4 se muestra un ejemplo del proceso de discretización de la topología facilitada. Como puede verse, se pasa de un mapa de calles y semáforos a un grafo como el de la figura 2.1. Entre cada dos celdas contiguas hay aproximadamente unos 7 metros. Esta es la distancia típica que se suele escoger para realizar el muestreo de una red, y es aproximadamente el espacio que un vehículo medio requiere cuando está en una zona de tráfico denso o un atasco.

Se aplica esta metodología de discretización a la red de tráfico que se muestra en la figura 6.5, obteniéndose la red discretizada que se presenta en dos mitades en las figuras 6.6 y 6.7. En esas figuras sólo se pretende dar una idea de la escala del problema tratado. En este caso, el grafo de la red de tráfico incluye 1643 celdas, 42 semáforos, 26 puntos de entrada de tráfico y 20 puntos de salida.

La concejalía responsable del tráfico del Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife facilitó gentilmente 9 juegos de ciclos de los semáforos de la zona tratada. El primer grupo tiene la etiqueta LC, que significa que esa es la combinación de tiempos que se aplica en el caso de que se pierda la comunicación con el Centro de Control. El resto de combinaciones se etiquetan desde R0 a R7.

### 6.2.4 Formulación del Objetivo de Optimización

En la sección 2.2 se formuló con detalle el problema al que se trata de dar solución mediante el modelo que se propone en esta Tesis. Por facilitar el trabajo al lector se transcribe aquí lo esencial.

Sean:

- I Un grafo no dirigido  $\mathbb{G}$ , que representa la red de tráfico, compuesto por  $N$  nodos, donde  $N$  es el número de intersecciones,  $A$  las aristas, y donde

cada arista representa el camino entre dos intersecciones contiguas;

- II Una tupla de enteros no negativos  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_N\}$ , siendo cada elemento  $l_i$ , el número de fases del nodo (intersección)  $i$ , donde  $M = \max\{l_i\}_{i=1}^N$ ;
- III El subconjunto de matrices escalonadas de enteros no negativos  $C_{N \times M}$ , en las cuales cada fila  $i$  tiene  $l_i$  elementos diferentes de 0 y se completa hasta  $M$  elementos con ceros; y donde  $C_{ij}$  es la duración de la fase número  $j$ , perteneciente al ciclo correspondiente al nodo (intersección)  $i$ .

*El objetivo consiste en obtener la matriz perteneciente al subconjunto  $C_{N \times M}$  que optimice el valor de la Función de Ajuste que se expone a continuación.*

La función de ajuste es el valor absoluto del número de vehículos que han abandonado la red en el transcurso de la simulación.

Para la zona urbana presentada en la figura 6.5 se tiene, una vez discretizada, un grafo  $\mathbb{G}$  como puede verse en las figuras 6.6, y 6.7; teniendo en cuenta las simplificaciones que se especifican en A.2 y la matriz de probabilidades de origen-destino expuesta en A.2.1, el objetivo es obtener una matriz duraciones de las fases de los ciclos de semáforos perteneciente al subconjunto  $C_{N \times M}$  que maximice la función de ajuste.

Esos tiempos deben estar en un rango predeterminado. Estos rangos son especificados por defecto o bajo criterios de los gestores de la red de tráfico, y para este caso se han usado los que se presentan en la sección B.4.

Finalmente, para resolver este problema se incluye en la población inicial 9 individuos con las 9 combinaciones de tiempos de los semáforos que se usan en la actualidad en la zona. Esto se hace para garantizar que se mejoran los resultados con respecto a los que se obtienen usando los ciclos suministrados.

### 6.2.5 Restricciones del Problema

En este apartado se especifican las restricciones asumidas para la aplicación de la metodología propuesta en esta Tesis al caso concreto que trata esta sección.

#### 6.2.5.1 Calles con Poco Tráfico

El modelo propuesto en esta Tesis depende de la fidelidad de la simulación con respecto al tráfico real en la red analizada. Ello significa que se necesitan estadísticas precisas de lo que sucede a pie de calle por dos motivos:

1. Para obtener una buena matriz de probabilidad de origen-destino que permita asignar el destino a cada nuevo vehículo que es creado en cada punto de entrada a la red modelada durante la simulación.
2. Para simular, de la manera más cercana a la realidad posible, el tráfico real y el tráfico que se deriva del uso de los tiempos optimizados por el sistema de optimización propuesta.

Por ello, cuanto más precisas y completas sean las estadísticas de tráfico disponibles, menor cantidad de simplificaciones será preciso asumir. En el apéndice A.1 las calles consideradas y descartadas del modelo son especificadas. En el apéndice A.2 hay una lista con las simplificaciones asumidas para calcular la matriz de origen-destino de este caso test.

#### 6.2.5.2 Semáforos Optimizados

En esta investigación no se han incluido aún a los peatones en el modelo. El principal objetivo de la optimización que se realiza es maximizar la capacidad de flujo de tráfico de la infraestructura. En investigaciones futuras se considerarán interrupciones al tráfico de vehículos, bien sean interrupciones esperadas, como las debidas a semáforos de peatones, trenes, tranvías o autobuses; bien sean interrupciones no esperadas, debidas a accidentes, manifestaciones, etcétera.

Un elemento fundamental para cualquier Sistema de Gestión de Tráfico Avanzado (ATMS) es la optimización de la red de tráfico de los peatones minimizando, por ejemplo, el tiempo de los trayectos. Un gran logro en el diseño de las infraestructuras de movilidad de vehículos y peatones sería desacoplar ambas redes. Ello es un objetivo alcanzable mediante el uso de túneles, pasos a nivel, puentes, etcétera.

Por otra parte, las consecuencias económicas y medioambientales del tráfico rodado son mucho mayores que las que se derivan del tráfico de peatones. Y por esta razón se ha empezado por optimizar la red de tráfico rodado como una primera aproximación a una optimización más amplia que incluya ambas redes.

En consecuencia, se han descartado del modelo los semáforos que afectan a los peatones, como los que controlan pasos de cebra. En A.1 se enumeran las calles descartadas.

## 6.2.6 Resultados

En esta sección se describen los experimentos realizados con los datos suministrados de esta zona por el Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife. Se han realizado 150 pruebas optimizando los tiempos de los ciclos de los semáforos. Adicionalmente, se ha simulado el comportamiento del tráfico haciendo uso de los tiempos de los ciclos que actualmente – o en el momento en que se obtuvieron los datos – rigen los semáforos de la zona de “Las Ramblas”.

En cada una de las 150 ejecuciones del algoritmo genético se utilizaron poblaciones compuestas por 200 individuos y la evolución se paraba en la generación número 250. En cuanto a las simulaciones, cada evaluación de un individuo supuso una simulación de 2000 iteraciones (2000 segundos en nuestro caso). El tiempo medio de ejecución de cada optimización fue de 4379.39 segundos (1 hora y 13 minutos).

En la figura 6.8 se representa la evolución del mejor valor de la función de ajuste (*fitness*) para las 150 ejecuciones realizadas. Ello significa que, generación por generación se tomó el mejor valor de *fitness* de la población, para

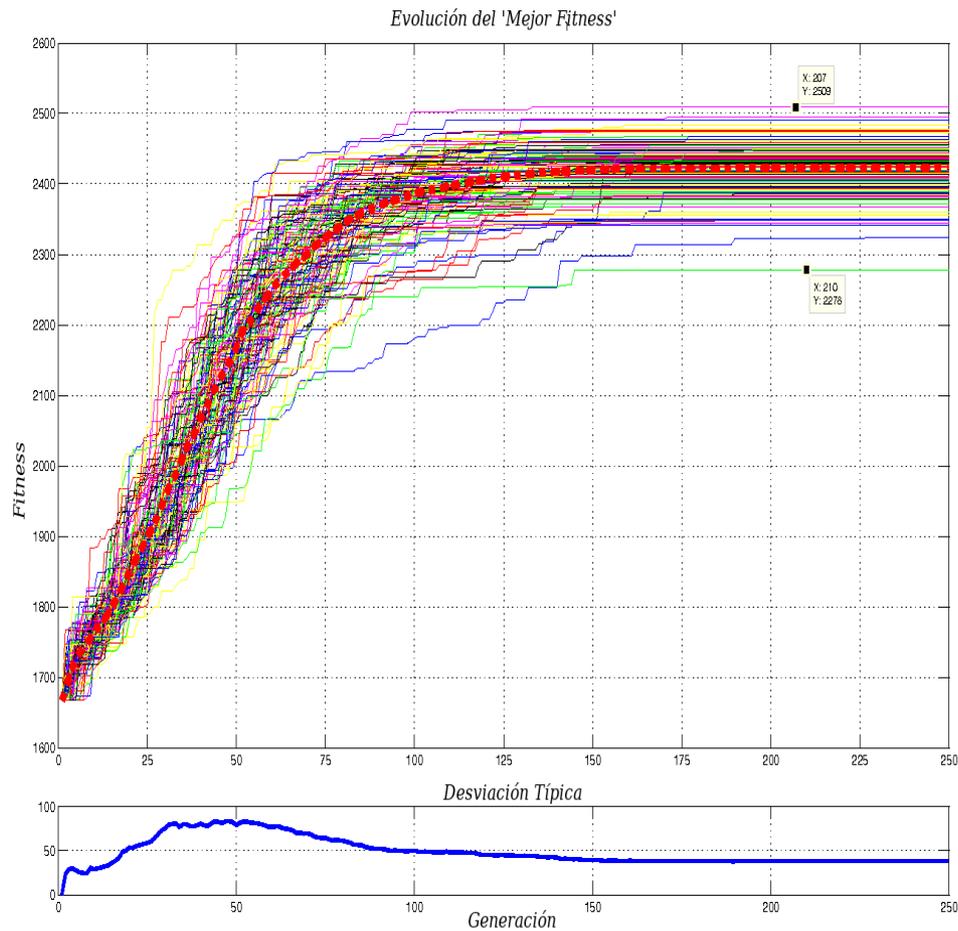


Figura 6.8: Evolución del *Fitness* (Media y Desviación Típica) para las 150 Optimizaciones Realizadas

todas las ejecuciones del algoritmo genético.

También se ha representado con una línea más gruesa el valor medio del mejor *fitness*, y en la parte baja de esta figura la desviación típica del mejor *fitness*. En esta figura se ve claramente que el algoritmo converge alrededor de la generación 200.

En la figura 6.9 se representan los resultados que se obtienen cuando se usan los ciclos facilitados por el Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife – los 9 primeros puntos marcados con un círculo. El resto de los puntos – marcados con aspas – de esa gráfica representan los resultados obtenidos usando los tiempos optimizados por el sistema propuesto en esta Tesis. Adicionalmente se ha representado con una línea horizontal el promedio del mejor *fitness* entre

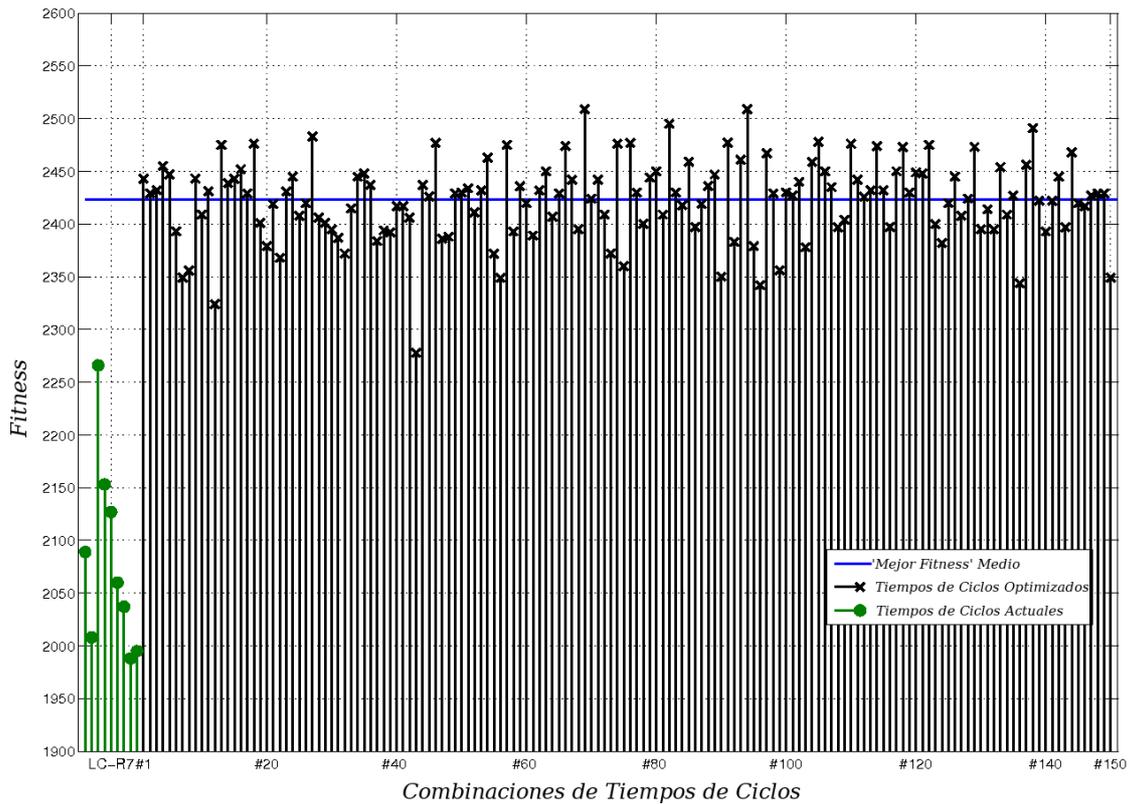


Figura 6.9: Resultados con los Tiempos Suministrados Vs. los Tiempos Optimizados

los 150 resultados obtenidos tras la optimización. Como puede observarse, hay una gran mejora al usar los ciclos resultantes de la optimización. Además, las 150 soluciones optimizadas parecen más consistentes que las 9 suministradas.

Como nota al margen se puede añadir que, debido a la naturaleza estocástica de la metodología de optimización que se propone, las soluciones siguen una distribución *gaussiana*<sup>2</sup>, que puede incluir valores extremos por arriba o por abajo de la media. En la figura 6.11 se muestra la distribución estadística de los valores de mejor *fitness* alcanzado por cada una de las 150 optimizaciones realizadas. Además se ha añadido la curva de una *gaussiana*

<sup>2</sup>Distribución Gaussiana (o Distribución Normal, o Campana de Gauss): Una distribución gaussiana de una variable aleatoria  $X$  con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2$ , es una distribución estadística cuya función de probabilidad es la siguiente:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6.1)$$

definida en el dominio  $(-\infty, \infty)$

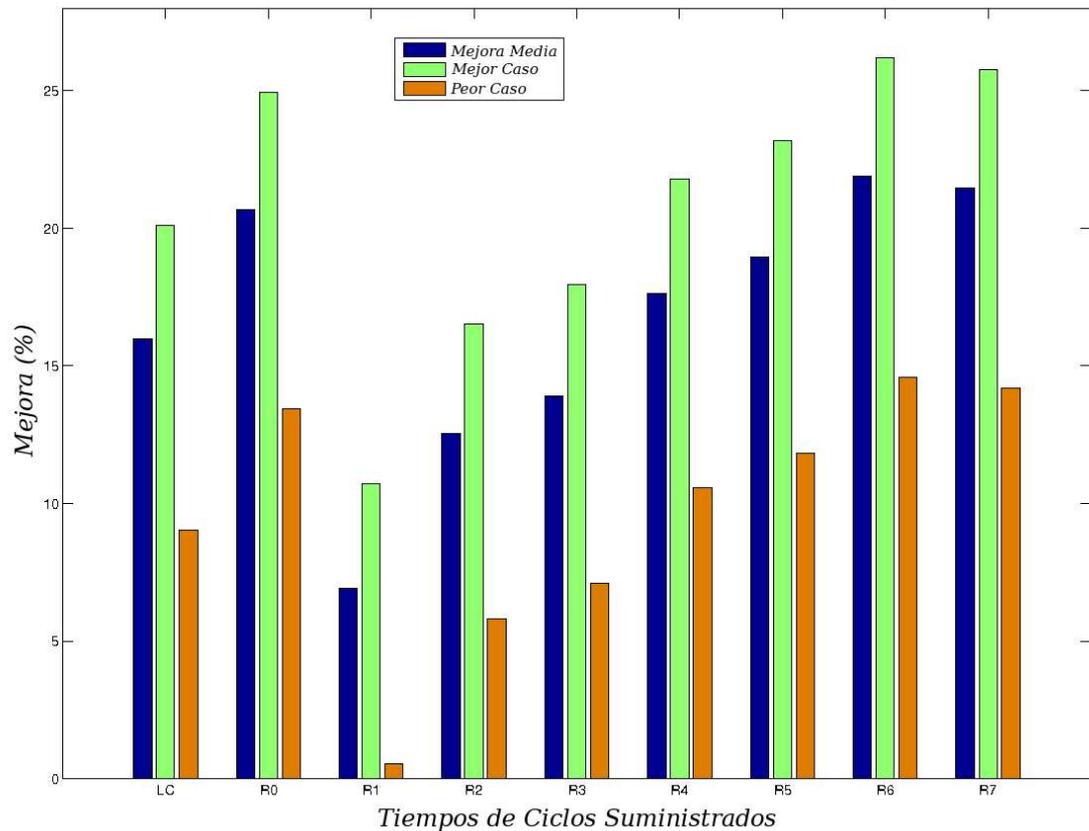


Figura 6.10: Comparación Escalada (%) entre los Resultados de las Soluciones Suministradas y las Optimizadas

con la misma media y desviación típica que esos 150 valores.

La figura 6.10 muestra el incremento en porcentaje de la media, el mejor y el peor de los 150 valores de mejor *fitness* alcanzados por las optimizaciones con respecto a los valores que se obtuvieron al simular cada una de las 9 soluciones facilitadas. Estas mejoras están dentro de un rango desde un 0.53% a un 26.21%. La mejora más pequeña supuso un incremento de 12 vehículos más abandonando la red de tráfico en el mismo número de iteraciones del simulador y se dio con la solución optimizada número 43 con respecto a la solución suministrada 'R1'. La mejora más amplia supuso una diferencia de 521 vehículos que se dio entre la solución optimizada número 69 y la solución suministrada 'R6'.

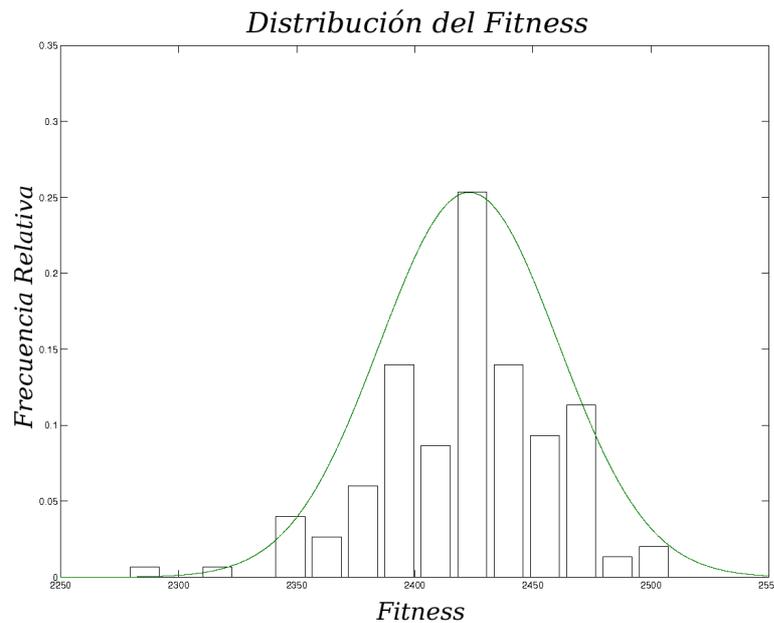


Figura 6.11: Histograma de los *Fitness* Alcanzados por las 150 Optimizaciones en Comparación a la *Gaussiana* Correspondiente

### 6.2.7 Conclusiones

La principal conclusión que se deduce de esta aplicación es que, en el entorno de simulación que se ha diseñado, se mejoran sensiblemente los resultados que se obtienen con los tiempos suministrados haciendo uso de a los tiempos que se producen mediante la metodología propuesta.

Se ha podido observar como es posible aplicar este modelo a un caso real, con el previo acopio de los datos estadísticos necesarios.

Las mejoras son tan holgadas que permiten albergar grandes esperanzas de que, cuando el sistema que se propone se aplique a pie de calle, se logre también la mejora del tráfico real. Estas mejoras supondrían un claro ahorro económico y energético, al mismo tiempo que una reducción importante del impacto medioambiental.

Es importante destacar que el sistema propuesto es intrínsecamente adaptable a requisitos particulares, tales como preferencias de rutas, duraciones mínimas o máximas de las fases, etc. En este sentido, el modelo es flexible y adaptable.

## 6.3 La Almozara en Zaragoza

### 6.3.1 La Zona de La Almozara en Zaragoza

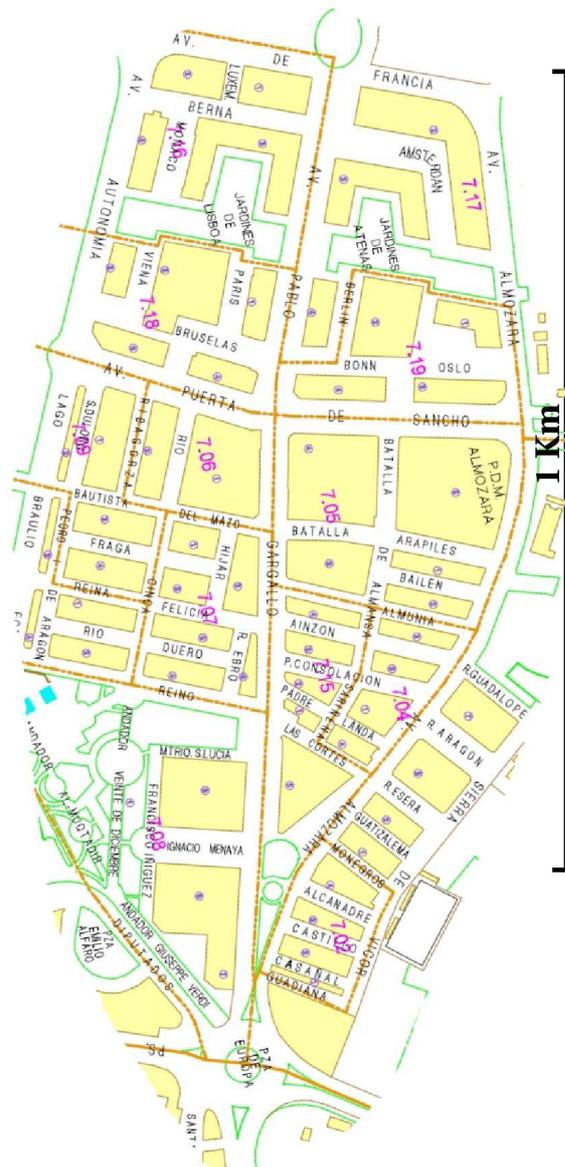


Figura 6.12: La Almozara

El barrio de La Almozara se sitúa en la margen derecha del río Ebro, al noroeste de Zaragoza capital – Latitud 41.39 grados Norte, Longitud 0.52 grados Oeste. Se encuentra flanqueado al norte por el Ebro y al sur por la línea ferroviaria y la autopista A-68.

El barrio de La Almozara, también conocido como barrio de La Química por

la cantidad de fábricas relacionadas con esa actividad industrial que alojó en el pasado, pertenece al Distrito Número 7 de los designados por el Ayuntamiento de Zaragoza. En los años 90 se dismantelaron las industrias químicas y el barrio pasó a ser enteramente residencial. La población es de 25767 habitantes.

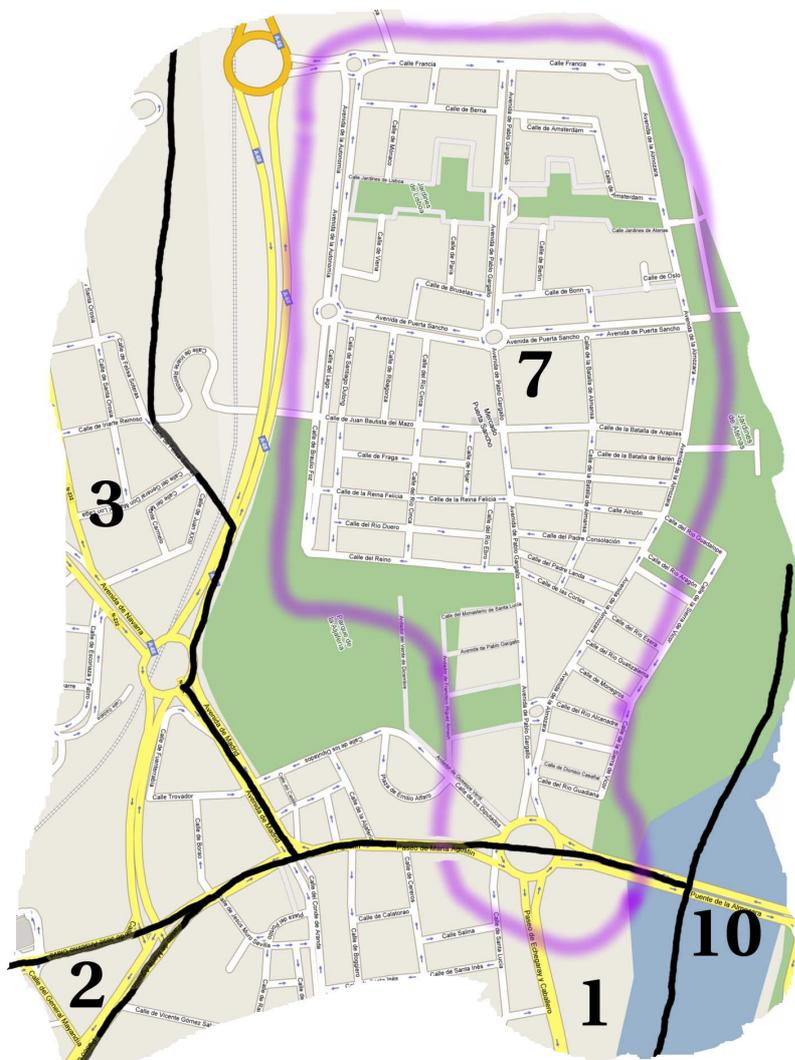


Figura 6.13: Distritos en La Almozara

Este distrito tiene una superficie total próxima a las 530 hectáreas. De ellas pueden considerarse todavía como huerta, o zona agrícola, algo menos de la mitad, alrededor de 225 hectáreas. Las restantes 305 hectáreas corresponden a casco urbano, viales ferroviarios y su entorno, y viales carreteros.

En la actualidad, la llegada del tren de alta velocidad a Zaragoza ha condicionado la reestructuración urbanística de grandes superficies en el barrio,



Figura 6.14: Vista de Pájaro de La Almozara (Obtenida de *Google Maps*)

entre ellas aquellas relacionadas con las antiguas estaciones de La Almozara y de Delicias, hoy la nueva Estación Intermodal Almozara-Delicias.

Por otro lado, la designación de Zaragoza como ciudad para celebrar la próxima Exposición Internacional va a condicionar la reestructuración de otras partes del barrio, particularmente las relacionadas con sus riberas.

La Plaza Europa es el punto de entrada más importante del barrio. La avenida Pablo Gargallo es la calle principal de La Almozara. El puente de La Almozara, situado junto a la Plaza de Europa, cruza el Ebro y permite la

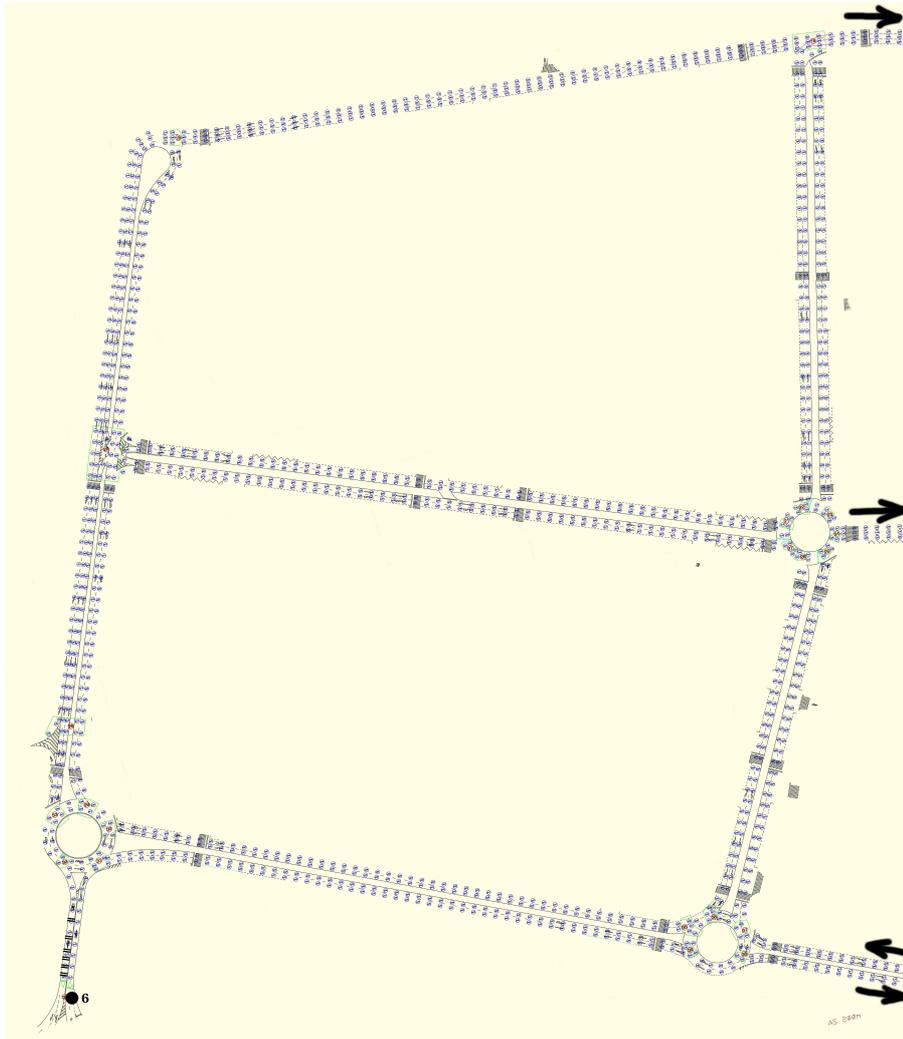


Figura 6.15: “La Almozara” Discretizada – 1<sup>er</sup> Tercio

comunicación del barrio con el ACTUR<sup>3</sup>; está situado en el lugar donde antes estaba un antiguo puente ferroviario que iba desde la Estación de El Portillo hasta la Estación del Norte.

La zona es principalmente residencial, por lo que la densidad de tráfico es relativamente baja. Esto hace que esta zona sea ideal para probar en la calle las soluciones óptimas que se pueden obtener con el modelo que se plantea en esta Tesis.

---

<sup>3</sup>ACTUR: ACTuaciones URbanísticas URgentes. Es un distrito de Zaragoza conocido también como el distrito Rey Fernando

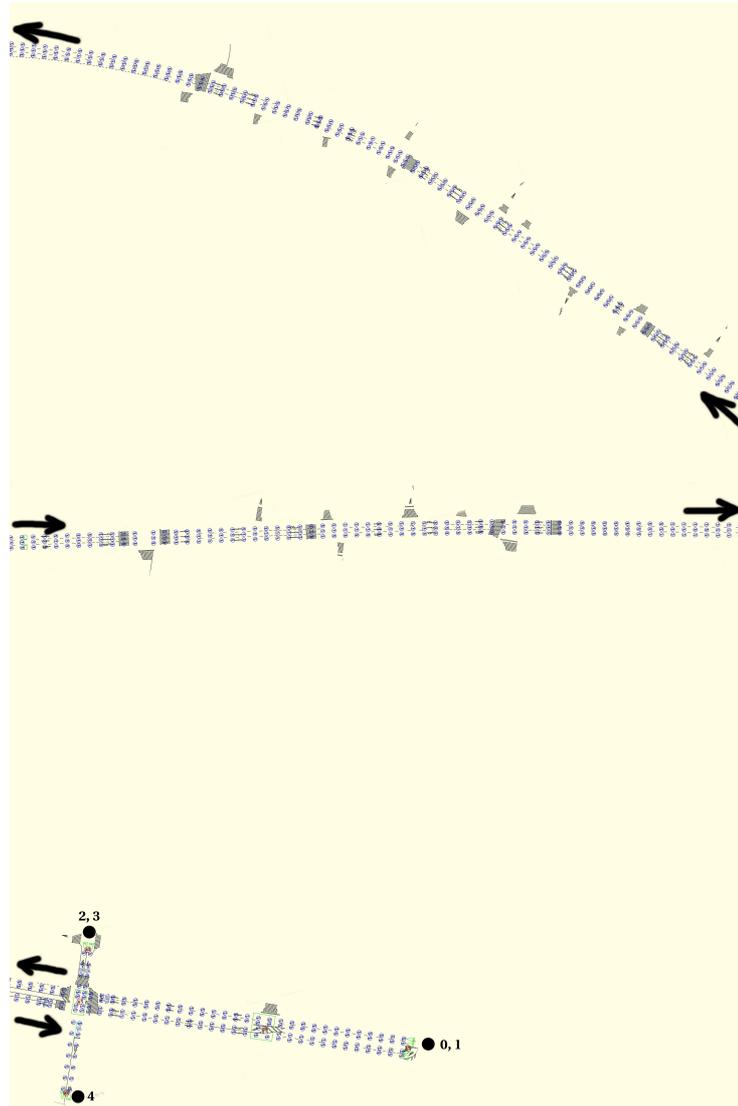


Figura 6.16: “La Almozara” Discretizada – 2º Tercio

### 6.3.2 Colaboración con el Departamento de Tráfico

La posibilidad de obtener datos de la ciudad de Zaragoza fue la principal motivación previa a la aplicación de la metodología que se propone en esta Tesis a un barrio de aquella ciudad. El contacto con la concejalía correspondiente se realizó a través de la profesora de la Universidad de Zaragoza, la Doctora Doña María Luisa Sein-Echaluce Lacleta. Ella se prestó a tramitar la correspondiente documentación con el Ayuntamiento de Zaragoza, y además de enviar todos los datos solicitados en papel, y también en un CD, por lo cual estamos muy agradecidos.

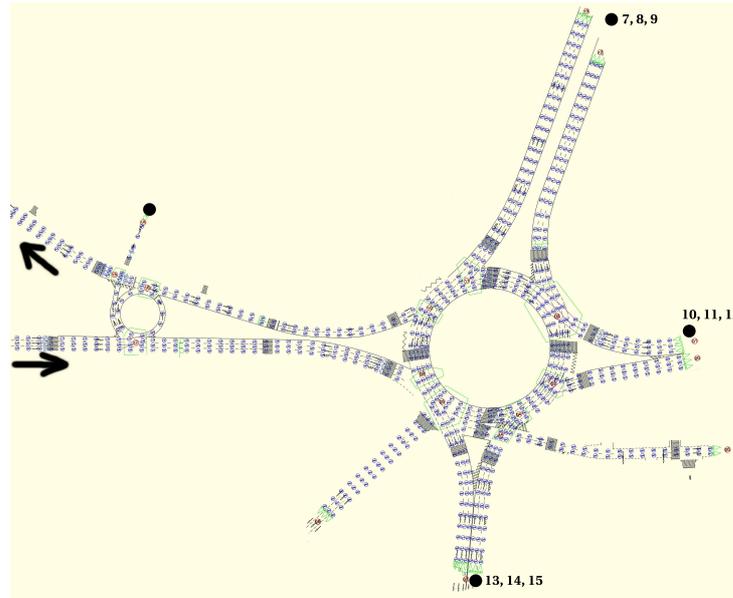


Figura 6.17: “La Almozara” Discretizada – 3<sup>er</sup> Tercio

En este caso se solicitaron los mismos datos que en el caso de Las Ramblas:

- Datos topográficos de la zona.
- Matriz de probabilidades de origen-destino, o en su defecto, suficientes estadísticas de tráfico para poder calcularla.
- Ciclos de semáforo de la zona.

Al igual que en el el caso de Las Ramblas, no fue posible obtener una matriz de probabilidad de origen-destino, y fue preciso estimar una con los datos de Intensidades Medias Diarias (I.M.D.) facilitados. Con estos y asumiendo las restricciones que se enumeran en B.2 se estimó la matriz de origen-destino del apartado B.2.1.

### 6.3.3 Preprocesado de los Datos

Con los datos facilitados se ha realizado un preprocesado de los datos, de idéntica manera a como se realizó para el caso de Las Ramblas (6.2.3). Se ha discretizado el mapa de la zona tal y como se muestra en la figura 6.4. También se ha muestreado una celda aproximadamente cada 7 metros, que es

la distancia que necesita un *coche medio* en una situación de atasco o de tráfico muy congestionado.

Una vez muestreada la zona (6.12) se obtiene el mapa, que se muestra en tres partes, en las figuras 6.15, 6.16 y 6.17. El objetivo de estas figuras es dar una idea de la escala del problema. El modelo de La Almozara incluye 2753 celdas, 17 semáforos, 16 entradas de tráfico y 18 salidas de tráfico.

### 6.3.4 Formulación del Objetivo de Optimización

En la sección 2.2 se formuló con detalle el problema al que se trata de dar solución mediante el modelo que se propone en esta Tesis. Nuevamente, por facilitar el trabajo al lector se transcribe aquí lo esencial.

Sean:

- I Un grafo no dirigido  $\mathbb{G}$ , que representa la red de tráfico, compuesto por  $N$  nodos, donde  $N$  es el número de intersecciones,  $A$  las aristas, y donde cada arista representa el camino entre dos intersecciones contiguas;
- II Una tupla de enteros no negativos  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_N\}$ , siendo cada elemento  $l_i$ , el número de fases del nodo (intersección)  $i$ , donde  $M = \max\{l_i\}_{i=1}^N$ ;
- III El subconjunto de matrices escalonadas de enteros no negativos  $C_{N \times M}$ , en las cuales cada fila  $i$  tiene  $l_i$  elementos diferentes de 0 y se completa hasta  $M$  elementos con ceros; y donde  $C_{ij}$  es la duración de la fase número  $j$ , perteneciente al ciclo correspondiente al nodo (intersección)  $i$ .

*El objetivo consiste en obtener la matriz perteneciente al subconjunto  $C_{N \times M}$  que optimice el valor de la Función de Ajuste que se expone a continuación.*

La función de ajuste es el valor absoluto del número de vehículos que han abandonado la red en el transcurso de la simulación.

Para la zona urbana presentada en la figura 6.12, se tiene, una vez discretizada un grafo  $\mathbb{G}$  como puede verse en las figuras 6.15, 6.16 y 6.17; teniendo en cuenta las simplificaciones que se especifican en B.2 y la matriz de probabilidades de origen-destino expuesta en B.2.1, el objetivo es obtener una matriz de duraciones de las fases de los ciclos de semáforos perteneciente al subconjunto  $C_{N \times M}$  que maximice la función de ajuste.

Esos tiempos deben estar en un rango predeterminado. Estos rangos son especificados por defecto o bajo criterios de los gestores de la red de tráfico. Para este caso se han usado los que se presentan en la sección B.4.

Finalmente, para resolver este problema se incluye en la población inicial 1 individuo con las combinación de tiempos de los semáforos que se usan en la actualidad en la zona, en un día laborable. Esto se hace para garantizar que se mejoran los resultados con respecto a los que se obtienen usando los ciclos suministrados.

### 6.3.5 Restricciones del Problema

En este apartado se especifican las restricciones asumidas para la aplicación de la metodología propuesta en esta Tesis al caso concreto que trata esta sección.

#### 6.3.5.1 Calles Incluidas en el Modelo

En el apartado B.1 se detallan las calles que han sido incluídas y las que han sido descartadas del modelo realizado de la zona de la Almozara, en función de los datos de los que se ha dispuesto.

### 6.3.6 Resultados

En la sección 5.6 se ha expuesto la aplicación de la metodología propuesta a la zona de la Almozara a través de un estudio relativo al comportamiento del sistema en una situación de congestión. Para facilitar la lectura de este tomo se ha transcrito a esta sección los resultados principales de esta aplicación.

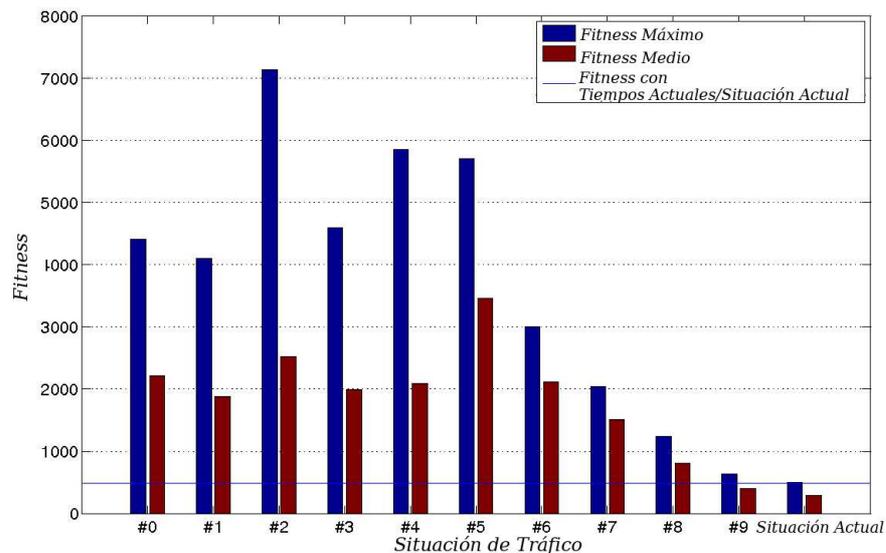


Figura 6.18: *Fitness* Máximo y Medio Obtenido para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico Testeadas

En el apartado 5.6.1 se explicó como se ha aplicado la metodología propuesta a esta red de tráfico persiguiendo un doble objetivo:

- En primer lugar se ha simulado la situación actual de tráfico en la zona y, con esa situación, se han optimizado los tiempos de los semáforos.
- En una segunda fase se han creado 10 situaciones hipotéticas de tráfico con distintos niveles de congestión, variando simplemente el caudal de tráfico que entra a la red, y luego se ha procedido nuevamente a la optimización de los semáforos para cada una de ellas.

En la figura 6.18 puede verse como se obtienen mejoras sustanciales con respecto a casi todas las situaciones hipotéticas planteadas. En esa figura se ha representado con dos barras el *fitness* máximo y medio para cada caso. Además, la línea horizontal marca el número de vehículos que abandonan la red simulando la situación actual; esto es, usando los tiempos de ciclos de semáforo actuales, y las estadísticas reales de tráfico suministradas.

En la figura 6.18 puede observarse que con la situación real de tráfico no se logran grandes mejoras en el *fitness*. Lo mismo sucede con la situación hipotética número 9 (la menos congestionada de todas). En ambos casos,

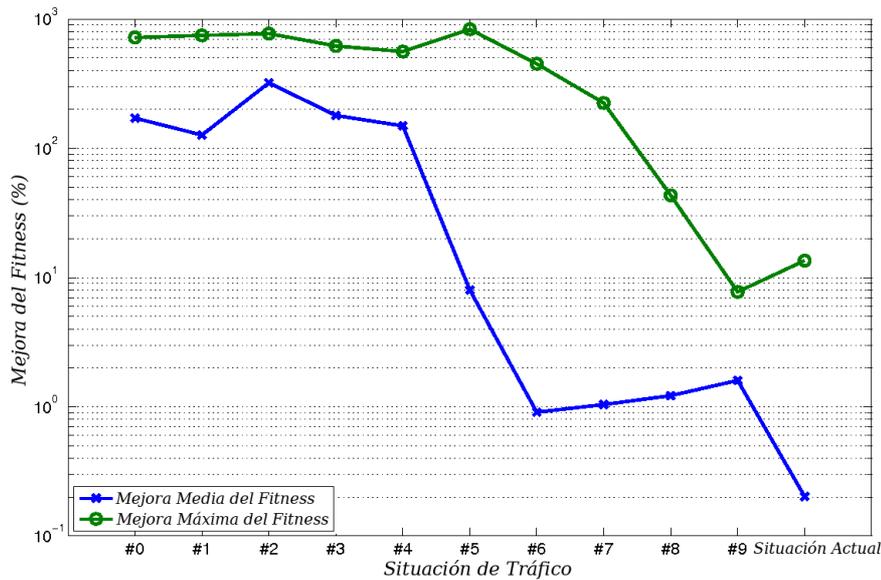


Figura 6.19: Porcentaje de Incremento del *Fitness* Máximo y Medio Obtenido para las 11 Situaciones de Entrada de Tráfico Testeadas

como se comenta en 5.6.3, los resultados modestos pueden ser debidos a que, con tan poca densidad de tráfico, la programación de los semáforos afecta relativamente poco al rendimiento de la red.

En la figura 6.19 se han representado en escala logarítmica los porcentajes de mejora para cada caso. En esta figura puede verse que para el peor caso (la situación hipotética número 9) la mejora del fitness máximo es de un 7%. Para la situación número 5 la mejora es superior al 800%.

### 6.3.7 Conclusiones

Los trabajos de investigación expuestos en esta sección y en la sección 5.6 demuestran la factibilidad de la aplicación a redes de gran escala del modelo de optimización de tráfico propuesto en esta Tesis. La mayoría de los trabajos de investigación en optimización del tráfico no abarcan áreas tan amplias en superficie.

Otra conclusión de la aplicación del modelo a esta zona es una característica muy deseable del modelo propuesto; esta es su excelente comportamiento en situaciones de tráfico de gran congestión. Esto lo hace aún más valioso dado

que en situaciones de gran densidad de tráfico es donde se necesitan, con mayor urgencia, avances en investigación que, al menos, palien estas situaciones.



# Capítulo 7

## Conclusiones y Líneas Futuras

### 7.1 Conclusiones de la Tesis

En la presente Tesis se ha descrito un nuevo modelo para la optimización del tráfico rodado en una ciudad. Dentro del conjunto de problemas relacionados con el tráfico se ha escogido la optimización de los semáforos, principalmente por dos razones:

- Están presentes en la mayoría de las redes de tráfico a partir de un tamaño de red;
- Está demostrado ([3],[4],[5],[6],[7],[8]) que la programación de los semáforos influye de forma decisiva en el funcionamiento de las infraestructuras de tráfico.

Se ha establecido como objetivo de la presente Tesis la optimización de los ciclos de los semáforos y para ello se ha diseñado un nuevo modelo, el cual es la principal aportación de este trabajo. El modelo presentado se basa en la combinación de tres elementos:

1. El uso de *Clusters Beowulf* como Multicomputador MIMD de gran relación calidad/precio, gran escalabilidad y flexibilidad;
2. El uso de una Optimización No Determinística con Algoritmos Genéticos;

3. El uso de Microsimuladores de tráfico basados en Autómatas Celulares, dentro de la *Fitness Function* (Función de Ajuste) del Algoritmo Genético.

Las ventajas más reseñables de este modelo son las siguientes:

- Es importante destacar que el sistema es intrínsecamente adaptable a requisitos particulares como, por ejemplo, preferencias de rutas, duraciones mínimas o máximas de las fases, etc. En este sentido, el modelo es flexible y adaptable;
- El modelo planteado es mantenible y sostenible a medio y largo plazo gracias al uso de Software Libre de fuente abierta y al uso de elementos hardware estándar del mercado (*Off-the-Shelf*);
- La escalabilidad del sistema está garantizada, pues se han usado los Algoritmos Genéticos como técnica de optimización, y un *Cluster Beowulf* como multicomputador MIMD. La combinación de ambas tecnologías garantiza la amplia escalabilidad de la metodología propuesta;
- El modelo parece tener un funcionamiento óptimo en situaciones de congestión.

Esta nueva metodología ha venido dando sus frutos durante el desarrollo de la Tesis. Como muestra se ha expuesto la aplicación a dos casos reales: “Las Ramblas” en Santa Cruz de Tenerife[1]; y “La Almozara” en Zaragoza[2]. Los resultados parecen satisfactorios y esperanzadores.

Además, con la nueva metodología que se plantea, se han realizado varios estudios, cuya parte más reseñable de ellas se ha incluido en este tomo.

En 5.2 se realizó un estudio que parece indicar que la metodología que se propone tiene la virtud de la escalabilidad. Esta es una característica totalmente deseable si se quiere un modelo de optimización práctico y flexible, que pueda ser aplicado con facilidad a gran número de redes de tráfico diferentes.

En otro estudio (5.3) se ha dado soporte a una hipótesis fundamental de esta Tesis: Se puede utilizar una simulación determinística en lugar de valores

estadísticos de muchas simulaciones estocásticas para la función de ajuste (*fitness function*) del algoritmo genético. Como se demostró, ello significa una reducción de varios órdenes de magnitud en el tiempo de ejecución del algoritmo genético, consiguiendo un sistema eficiente que hace un uso ajustado de la potencia de computación del dispositivo.

En 5.4 se estudia otro elemento fundamental de la metodología propuesta y es que, en el algoritmo genético se utilizan operadores a nivel de bit. Dicho de otra manera, se demuestra que una codificación binaria tipo Gray supone una gran mejora en los resultados.

Adicionalmente, en 5.5 se muestra una nueva visualización estadística y tridimensional de la evolución del Algoritmo Genético que permite realizar un ajuste fino del mismo. Esta nueva visualización es, en sí misma, un elemento de interés que puede ser útil para cualquiera que se encuentre ante la tesitura de ajustar los parámetros de un algoritmo genético.

En 5.6 se muestra un estudio que permite observar una característica realmente deseable del modelo de optimización de tráfico que se presenta: su excelente comportamiento en un escenario de tráfico congestionado. Es más, todo parece indicar que este sistema trabaja mejor cuanto más congestionada esté la red.

Por último, en 5.7 se exponen los pasos iniciales para extender la optimización monocriterio que se ha venido usando en este modelo a una optimización multicriterio. Uno de los aspectos más interesantes de este último estudio es que se han modelado criterios de emisión de gases de efecto invernadero y de ocupación de la red, adaptándose perfectamente al microsimulador basado en autómatas celulares que se usa en la presente Tesis.

## 7.2 Líneas de Investigación Futura

Las hipótesis y los trabajos que se exponen en este documento son sólo un primer paso. La realidad es que la investigación en esta materia está realmente abierta en muchos frentes y el modelo presentado puede jugar un interesante papel en muchos de ellos.

Algunas de las ideas que se manejan para la aplicación al modelo expuesto son las siguientes:

- Inclusión de otros elementos optimizables como los CMS (*Changeable Message Signs*<sup>1</sup>);
- Considerar en la optimización del tráfico posibles interrupciones del mismo, bien por fenómenos predecibles como peatones, tranvías, autobuses, etc.; bien por fenómenos imprevisibles como manifestaciones, accidentes, etc.;
- Estudiar diferentes perfiles de vehículos y de conductores;
- Migrar de LAM/MPI a Open MPI. La interfaz de programación paralela que se ha venido utilizando ha sido LAM/MPI. Dado que este software ya no va a seguir siendo actualizado y mantenido, se ha decidido realizar la migración a Open MPI<sup>2</sup>. Esta migración se ha efectuado ya sin problemas.

Como líneas de futuro cercano, que se realizarán tan pronto como se disponga de tiempo, mano de obra y financiación; se tienen principalmente dos:

- La aplicación del modelo a más casos;
- La extensión del modelo a un modelo dinámico y multicriterio.

---

<sup>1</sup>*Changeable Message Signs* (Señales de Tráfico Variables): Señales cuyo signo es reconfigurable electrónicamente

<sup>2</sup>La librería de programación paralela Open MPI implementa el estándar MPI 2 en fuente abierta (*Open Source*). Este estándar extiende la funcionalidad de la versión anterior del MPI con aspectos muy interesantes como la simetría en la red para la ejecución de los programas paralelos; la posibilidad de que los programas se ejecuten en redes más extensas que una red local, pudiendo ser redes MAN o WAN, o incluso redes heterogéneas como la misma INTERNET; y la ejecución en Sistemas Operativos de 32 o 64 bits. <http://www.open-mpi.org/>

### 7.2.1 Aplicación del Modelo a más Casos

En el estado actual del modelo propuesto se considera que sería de gran interés aplicarlo a más redes, de mayor entidad, de diferente naturaleza, etc.

Los casos susceptibles de ser tratados con el modelo propuesto podrían ser los siguientes:

- Zonas Residenciales: Estas se caracterizan por una presencia mayoritaria de vehículos particulares y transportes públicos;
- Zonas Comerciales: Presencia de vehículos particulares, vehículos de transporte ligero, vehículos de transporte pesado y transportes públicos;
- Zonas Industriales: Con presencia de transportes ligeros, transportes pesados, vehículos pesados y vehículos especiales;
- Zonas de enlace o intercomunicación (Estaciones ferroviarias, puertos, aeropuertos, etc.): Donde los vehículos pueden ser de transporte, vehículos particulares y transporte público.

Para ello se hace preciso el establecer colaboraciones con ayuntamientos de más ciudades, españolas o extranjeras. Es de esperar que, una vez se empiece por ciudades pequeñas, muchas otras muestren interés cuando el modelo propuesto en esta Tesis se de a conocer.

Un punto crucial en este plan de futuro es la aplicación en la calle de los tiempos optimizados. Con total seguridad, se encontrará una administración local con interés suficiente como para confiar en los resultados de una investigación que, hasta el momento presente, se ha aplicado solamente en un entorno simulado. Los positivos resultados obtenidos hasta el presente facilitarán este paso.

### 7.2.2 Extensión del Modelo

Otra línea de futuro que se plantea seriamente es la extensión y mejora del modelo. Esta extensión se plantea en distintos ámbitos:

### 7.2.2.1 Adaptación del Modelo para la Optimización-Minimización del Consumo Energético / Emisión de Gases con Efecto Invernadero de los Vehículos

En la actualidad parece existir un consenso global en relacionar la actividad humana con un proceso de calentamiento global más allá de los ciclos paleoclimáticos normales de nuestro planeta. El protocolo de Kioto [78], ratificado por nuestro país el 29 de abril de 1998, regula la reducción paulatina del volumen de emisión de gases de efecto invernadero.

En este contexto se hace imprescindible tomar todas las acciones investigadoras que permitan esta reducción de emisiones con el mínimo impacto económico posible.

El modelo que se ha planteado en la presente Tesis persigue objetivos de confort y optimización de la capacidad de las infraestructuras existentes. En el momento actual se están dando los pasos necesarios para incluir como criterios de optimización la minimización del consumo energético y la reducción en la emisión de gases por los usuarios de la red de tráfico.

Para lograr este interesante objetivo se necesita una nueva infraestructura de computación más potente que permita obtener resultados optimizados en tiempos razonablemente cortos.

Ya en el trabajo expuesto en 5.7 se han dado los primeros pasos en esta dirección. En adición al criterio de maximización de la capacidad de carga de la red viaria utilizado hasta ahora, se incluirán como nuevos elementos en la optimización multicriterio los siguientes:

- Ahorro energético;
- Minimización de la Emisión de Gases de Efecto Invernadero;
- Contaminación Acústica;
- Uso de Vehículos Híbridos;
- Y Uso de Combustibles Alternativos.

### **7.2.2.2 Comparación de los motores de combustión convencionales frente a los nuevos motores de ciclo híbrido, de nuevos combustibles no contaminantes, etc.**

Recientemente, nuevos vehículos llamados de ciclo híbrido se están comercializando en serie en nuestro país. Es de esperar que la combinación de un motor de combustión con un motor eléctrico suponga una interesante mejora en lo que a consumo y contaminación se refiere.

Una línea de trabajo futuro sería testear esta hipótesis haciendo uso del modelo propuesto en esta Tesis. Esto es posible debido al modelo microscópico de simulación (Autómata Celular), modelizando este nuevo tipo de vehículos y comparándolos con los vehículos de combustión convencionales.

Otras nuevas alternativas más ecológicas como el uso de combustibles no contaminantes serán también susceptibles de estudio y comparación.

### **7.2.2.3 Extensión del Modelo estático a un Nuevo Modelo Dinámico para la Optimización Adaptativa en Tiempo Real y con Tolerancia a Fallos, Imprevistos, etc.**

También se pretende extender el modelo propuesto en esta otra dirección. Se va a realizar una versión dinámica que efectúe optimizaciones “en caliente” periódicamente. Para ello sería preciso alimentar a este nuevo modelo con una entrada de datos de sensores de tráfico en tiempo real.

El modelo que se ha expuesto en este trabajo toma las estadísticas de tráfico existentes como entrada para el simulador de tráfico. Ahora se va a acometer la extensión del modelo a una nueva versión dinámica y tolerante a fallos, que realice optimizaciones en tiempo real con datos de tráfico obtenidos por sensores. Esta nueva versión del modelo permitiría la adaptación del sistema a cambios repentinos no esperados en la situación del tráfico, como, por ejemplo, accidentes, eventos especiales, incidencias puntuales, etc.

En un estadio más avanzado se integraría en un sistema de tráfico real, previo el correspondiente convenio de colaboración, para obtener en tiempo real datos de sensores de tráfico y realimentar las combinaciones de semáforos

optimizadas. Para ello se ampliarán los convenios existentes con los ayuntamientos de Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria, e incluso contactar con más ayuntamientos de Canarias o de la España peninsular, para validar este sistema en su comportamiento en situaciones reales de ciudades diferentes.

## Capítulo 8

### Bibliografía Utilizada



# Bibliografía

- [1] Javier J. Sánchez, Manuel J. Galán, and Enrique Rubio. Applying a traffic lights evolutionary optimization technique to a real case: “las ramblas” area in santa cruz de tenerife. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008.
- [2] Manuel J. Galán, Javier J. Sánchez, and Enrique Rubio. Numerical simulation and genetic algorithms in optimization of traffic lights under stress conditions: Application to “la almozara” district in saragossa. *CMES*.
- [3] Elmar Brockfeld, Robert Barlovic, Andreas Schadschneider, and Michael Schreckenberg. Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic. *Phys. Rev. E*, 64(5):056132, Oct 2001.
- [4] D.-W. HUANG and W.-N. HUANG. Optimization of traffic lights at crossroads. *International journal of modern physics. C, Physics and computers*, 2003.
- [5] D. Gazis, R. Herman, and A. Maradudin. The problem of the amber signal light in traffic flow. *Operations Research*, 1960.
- [6] R. A. Retting and M. A. Greene. Influence of traffic signal timing on red-light running and potential vehicle conflicts at urban intersections. *Journal Transportation Research Record*, 2007.
- [7] T. Nagatani. Dispersion and scaling of fluctuating vehicles through a sequence of traffic lights. *Physica A*, 2006.

- [8] J. Poli. Improving vehicle flow with traffic lights. *Advances in complex systems*, 2005.
- [9] W. Gropp, E. Lusk, and T. Sterling. . MIT Press, 2 edition, 2003.
- [10] Manuel J. Galán, Fidel García, Luis Álvarez, Antonio Ocón, and Enrique Rubio. 'beowulf cluster' for high-performance computing tasks at the university: A very profitable investment. high performance computing at low price. In *Proceedings of the The 7th International Conference of European University Information Systems on The Changing Universities - The Role of Technology*, pages 328–335. GI, 2002.
- [11] T. Back, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz. . Institute of Physics Publishing, 2000.
- [12] T. Back, D. B. Fogel, and Z. Michalewicz. . Institute of Physics Publishing, 2000.
- [13] Michael R. Garey and David S. Johnson. *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1990.
- [14] D. Corne, M. Dorigo, and F. Glover. . The McGraw-Hill Companies, cop., 1999.
- [15] Erick Cantu-Paz. , volume 1. Springer, 2000.
- [16] J. H. Holland. . MIT Press, 1992.
- [17] J. Sánchez, M. Galán, and E. Rubio. Genetic Algorithms and Cellular Automata: A New Architecture for Traffic Light Cycles Optimization. In *Proceedings of The Congress on Evolutionary Computation 2004 (CEC2004)*, volume 2, pages 1668–1674, 2004.
- [18] P. Michalopoulos and A. Yi, P.and Lyrintzis. Continuum modelling of traffic dynamics for congested freeways. *Transportation Research B*, 4(27):315–332, 1993.

- [19] U. Karaaslan, P. Varaiya, and J. Walrand. Two proposals to improve freeway traffic flow. Technical Report Paper UCB-ITS-PRR-90-6, California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH). University of California, Berkeley, January 1990.
- [20] D. Helbing. An improved fluid dynamical model for vehicular traffic. *Physical Review. E*, (51):3164, 1995.
- [21] B.S. Kerner and P. Konhäuser. Structure and Parameters of Clusters in Traffic Flow. *Physical Review E*, 50(1):54–83, Jul 1994.
- [22] Reinhart D. Kühne and Malte B. Rödiger. Macroscopic simulation model for freeway traffic with jams and stop-start waves. In *WSC '91: Proceedings of the 23rd conference on Winter simulation*, pages 762–770, Washington, DC, USA, 1991. IEEE Computer Society.
- [23] R.D. Kühne. Verkehrsablauf auf Fernstrassen. *Phys. Bl.*, 47(3:201):201–204, 1991.
- [24] H.J. Payne. Freflo: A macroscopic simulation model of freeway traffic. *Transportation Research Record*, (722:68):68–77, 1979.
- [25] G.B. Witham. Linear and Nonlinear Waves. *Wiley, New York*, 1974.
- [26] C.F. Daganzo. Requiem for second order fluid approximations of traffic flow. *Transportation Research B*, pages 277–286, 1995.
- [27] S. Krauss, P. Wagner, and C. Gawron. Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Phys. Rev. E*, 55:5597 – 5605, 1997.
- [28] A. Schadschneider, D. Chowdhury, E. Brockfeld, K. Klauck, L. Santen, and J. Zittartz. A new cellular automata model for city traffic. In *Traffic and Granular Flow '99: Social, Traffic, and Granular Dynamics*. Springer, 1999.
- [29] K. Nagel and M. Schreckenberg. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. *Journal de Physique I France*, 2(33):2221–2229, 1992.

- [30] Ofer Biham, A. Alan Middleton, and Dov Levine. Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models. *Phys. Rev. A*, 46(10):R6124–R6127, Nov 1992.
- [31] E. Brockfeld, R.D. Kühne, A. Skabardonis, and P. Wagner. Towards Benchmarking Microscopic Traffic Flow Models. *Transportation Research Record*, (1852):124–129, 2003.
- [32] *On the Origin of Species by Natural Selection*. John Murray, 1859.
- [33] John H. Holland. *Adaptation in natural and artificial systems*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992.
- [34] D. G. Florian. Simulation-based evaluation of Advanced Traveler Information Services, 2004. Thesis.
- [35] Moshe Ben-akiva, Michel Bierlaire, Haris Koutsopoulos, and Rabi Mishalani. DynaMIT: a simulation-based system for traffic prediction, August 22 1998.
- [36] S. F. Hafstein, R. Chrobok, A. Pottmeier, M. Schreckenberg, and F.C. Mazur. A High-Resolution Cellular Automata Traffic Simulation Model with Application in a Freeway Traffic Information System. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (19):338–350, 2004.
- [37] H. Rakha, M. Van Aerde, L. Bloomberg, and X. Huang. Construction and calibration of a large scale microsimulation model of the salt lake area. Technical Report 1644, 1998.
- [38] Q. Yang. A Simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management Systems, 1997.
- [39] J. Barcelo, Ferrer J.L., D. Garcia, M. Florian, and E. Le Saux. The Parallelization of AIMSUN2 microscopic simulator for ITS applications. In *Proceedings of The 3rd World Congress on Intelligent Transportation Systems*, 1996.

- [40] K. Nagel and A. Schleicher. Microscopic traffic modeling on parallel high performance computers. *Parallel Comput.*, 20(1):125–146, 1994.
- [41] M. F. Aycin and R. F. Benekohal. Linear acceleration car-following model development and validation. *Transportation research record*, (1644):10–19, 1998.
- [42] M. F. Aycin and R. F. Benekohal. Comparison of car-following models for simulation. *Transportation research record*, (1678):116–127, 1999.
- [43] *A Policy Of Geometric Design Of Highways And Streets*. American Association Of State Highway And Transportation Officials, 1984.
- [44] Ghulam H. Bham and Rahim F. Benekohal. A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata and car-following concepts. *Transportation Research Part C*, (12):1–32, 2004.
- [45] O. Tveit. Common cycle time - a strength or barrier in traffic light signaling. *Traffic Engineering and Control (TEC) Magazine*, 1(44):19–21, 2003.
- [46] M.J. Smith. Optimum network control using traffic signals. In *UK Developments in Road Traffic Signalling, IEE Colloquium on*, pages 8/1 – 8/3, 1988.
- [47] F. Logi and S.G. Ritchie. Development and evaluation of a knowledge-based system for traffic congestion management and control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 9(6):433–459, 2001.
- [48] Wann-Ming Wey. Applications of linear systems controller to a cycle-based traffic signal control. In *Intelligent Transportation Systems, 2001*, pages 179 – 184, 2001.
- [49] B. De Schutter and B. De Moor. Optimal Traffic Light Control for a Single Intersection. In *Proceedings of the 1997 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA '97)*, pages 1085–1088, 1997.

- [50] A. Vogel, C. Goerick, and W. von Seelen. Evolutionary Algorithms for Optimizing Traffic Signal Operation. In *ESIT 2000*, pages 83–91, 2000.
- [51] M. Wiering, J. Vreeken, J. van Veenen, and A. Koopman. Simulation and Optimization of Traffic in a City. In *Intelligent Vehicles Symposium, IEEE 2004*, pages 453–458, 2004.
- [52] L. GiYoung, K. JeongJin, and H. YouSik. The optimization of traffic signal light using artificial intelligence. In *Fuzzy Systems, 2001. The 10th IEEE International Conference on*, volume 3, pages 1279–1282, 2001.
- [53] H. You-Sik, J. Hyunsoo, and P. Chong-Kug. New Electrosensitive Traffic Light Using Fuzzy Neural Network. In *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, volume VII, pages 759–767, 1999.
- [54] A. Di Febbraro, D. Giglio, and N. Sacco. On applying Petri nets to determine optimal offsets for coordinated traffic light timings. In *The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 773 – 778, 2002.
- [55] L. Li, N. Tang, X. Mu, and F. Shi. Implementation of Traffic Lights Control Based on Petri Nets. In *Intelligent Transportations Systems, IEEE 2003*, volume 3, pages 1749–1752, 2004.
- [56] J.C. Spall and D.C. Chin. A model-free approach to optimal signal light timing for system-wide traffic control. In *33rd IEEE Conference on Decision and Control, 1994*, pages 1868 – 1875, 1994.
- [57] S. López, P. Hernandez, A. Hernandez, and M. Garcia. Artificial Neural Networks as useful tools for the optimization of the relative offset between two consecutive sets of traffic lights. *LNCS. Foundations and Tools for Neural Modeling. Springer-Verlag*, pages 795–804, 1999.
- [58] K. Nagel, R. Beckman, and C. Barrett. Transims for urban planning, 1999.

- [59] K. Nagel and C. Barrett. Using microsimulation feedback for trip adaptation for realistic traffic in Dallas. Technical Report LA-UR 97-1334, 1997.
- [60] N. Rouphail, B. Park, and J. Sacks. Direct signal timing optimization: Strategy development and results, 2000.
- [61] A. Halati, H. Lieu, and S. Walker. CORSIM - Corridor Traffic Simulation Model. In *The 76th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, pages 570–576, 1997.
- [62] You Sik Hong, JongSoo Kim, Jeong Kwangson, and ChongKug Park. Estimation of optimal green time simulation using fuzzy neural network. In *Fuzzy Systems Conference Proceedings, 1999. FUZZ-IEEE '99*, pages 761 – 766, 1999.
- [63] E. Taniguchi and H. Shimamoto. Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(3-4):235–250, 2004.
- [64] H.R. Varia and S.L. Dhingra. Dynamic Optimal Traffic Assignment and Signal Time Optimization Using Genetic Algorithms. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (19):260–273, 2004.
- [65] T. Sterling, D. Savarese, D. J. Becker, J. E. Dorband, U. A. Ranawake, and C. V. Packer. Beowulf: A parallel workstation for scientific computation. In *Proceedings of the 24th International Conference on Parallel Processing*, pages I:11–14, Oconomowoc, WI, 1995.
- [66] Paul E. Black. “Gray code”, from Dictionary of Algorithms and Data Structures, Paul E. Black, ed., NIST, 2005.
- [67] J. Sánchez, M. Galán, and E. Rubio. Bit Level Versus Gene Level Crossover in a Traffic Modeling Environment. In *Proceedings of the International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation - CIMCA '2005*, volume I, pages 1190 – 1195, 2005.

- [68] Paul E. Black. “Hamming distance”, from Dictionary of Algorithms and Data Structures, Paul E. Black, ed., NIST, 2006.
- [69] R. W. Hamming. Error detecting and error correcting codes. *Bell System Technical Journal*, 1950.
- [70] M. Matsumoto and T. Nishimura. Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 8:3–30, 1998.
- [71] M. Rasche A. Aw. Resurrection of “Second Order” Models of Traffic Flow. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 60(3 (Feb. - Mar., 2000)):916–938, 2000.
- [72] J. von Neumann. *The General and Logical Theory of Automata*, volume 5. A. H. Taub (ed.), Macmillan, New York, 1963.
- [73] J. Sánchez, M. Galán, and E. Rubio. Stochastic Vs Deterministic Traffic Simulator. Comparative Study for its Use within a Traffic Light Cycles Optimization Architecture. In *Proceedings of The International Work-conference on the Interplay between Natural and Artificial Computation (IWINAC)*, volume 2, pages 622–631, 2005.
- [74] J. J. Sánchez, M. J. Galán, and E. Rubio. A visual and statistical study of a real world traffic optimization problem. In B. H. V. Topping, G. Montero, and R. Montenegro, editors, *Proceedings of the Fifth International Conference on Engineering Computational Technology*, Stirlingshire, United Kingdom, 2006. Civil-Comp Press. paper 147.
- [75] A.D. May. . Prentice Hall, 1990.
- [76] Sánchez, M. J. J. J., Galán, and E. Rubio. Study of Correlation Among Several Traffic Parameters Using Evolutionary Algorithms: Traffic Flow, Greenhouse Emissions and Network Occupancy. In *To Appear in the Proceedings of the EUROCAST 2007 conference*, 2007.

- [77] R. A. Kean A. J., Harley and G. R. Kendall. Effects of vehicle speed and engine load on motor vehicle emissions. *Environmental Science and Technology*, 37(17):3739–3746, 2003.
- [78] United Nations. Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change. [http://unfccc.int /resource/docs/convkp/kpeng.pdf](http://unfccc.int/source/docs/convkp/kpeng.pdf), 1998.



## Parte II

## Apéndices



# Apéndice A

## Restricciones para Las Ramblas

### A.1 Calles Incluidas o Descartadas del Modelo

#### A.1.1 Calles Incluidas

En este apartado se enumeran las Calles consideradas en el modelo de “Las Ramblas” realizado:

Rambla General Franco	Avenida General Mola
Rambla Pulido Boulevard	Avenida Asunción
Calle Ramón y Cajal	Calle San Sebastián
Avenida Reyes Católicos	Calle Pablo Picasso
Avenida Benito Pérez Armas	Calle Fragata Danmark
Calle Tomé Cano	Calle Juan Sebastián Elcano

#### A.1.2 Calles Descartadas del Modelo

En este apartado se enumeran las Calles que han sido eliminadas del modelo por simplificación.

Calle Heliodoro Rodríguez González	Calle Ángel Arocha
Avenida Madrid	Calle Cineasta Miguel Brito
Calle Bernardino Seman	Calle Velázquez
Calle Unamuno	Calle Gilberto Cayol López
Calle Pintor Martín González	Calle Azorín
Calle Ramiro de Maeztu	Calle Eric Lionel Fox
Calle El Camello	Calle Legazpi
Avenida del Carmen	Calle C. Sánchez Pinto
Calle General Goded	Calle G. Sanjurjo
Calle Calvo Sotelo	Calle Primo de Rivera
Calle 18 de Julio	Calle Castro
Calle Anselmo	Calle Álvarez de Lugo
Calle General Porlier	Calle General Serrano
Calle La Asunción	Calle Santiago Cuadrado
Calle Salamanca	

## A.2 Aproximaciones Asumidas para el Cálculo de la Matriz de Probabilidad de Origen-Destino

En esta sección se han listado las aproximaciones asumidas para el cálculo de la matriz de probabilidades de origen-destino. El cálculo de las matrices origen-destino requiere de una gran cantidad de datos si se precisa cierta exactitud. Incluso, lo deseable sería realizar una encuesta a pié de Calle. Por lo tanto, con los datos de que se disponían fue imprescindible realizar ciertas aproximaciones y asunciones que se enumeran en esta sección.

- No se tiene en cuenta ninguna variación en el flujo de tráfico causada por las Calles que no son tenidas en cuenta en el mismo (A.1.2).
- Intersección #25 (Plaza de la Paz):
  - El tráfico procedente de la Rambla General Franco se divide en tres partes iguales. Dos de ellas van a la Avenida Asunción y la tercera a la Avenida del General Mola.
  - El tráfico proveniente de la rambla de Pulido se divide en tres partes iguales hacia la rambla del General Franco, la del General Mola y la Avenida Asunción.
- Intersección #22 (Plaza de República Dominicana):
  - Se desprecia la porción de tráfico que procedente de la Avenida Asunción, rodea la rotonda de la plaza de República Dominicana y retorna por la Avenida Asunción.
  - El tráfico procedente de la Avenida Reyes Católicos se divide en dos partes. La primera parte (un 10%) va hacia la Calle San Sebastián y el resto (90%) se dirige a la Avenida Asunción.
  - El tráfico de la Avenida de Bélgica se divide en tres partes iguales hacia la Avenida Asunción, la Calle San Sebastián y la Avenida

Reyes Católicos.

- Intersección #20:
  - Todo el tráfico que circula por la Avenida Reyes Católicos en dirección a la plaza de República Dominicana está formado a partes iguales por el tráfico que procede de la Calle Picasso y de la Avenida Reyes Católicos.
  - El tráfico procedente de la Calle Picasso en dirección a Reyes Católicos se divide en dos partes. La primera parte, un 75%, se dirige a la plaza de la República Dominicana, mientras que el resto (un 25%) al sentido contrario de circulación.
  
- Intersección #17:
  - Todo el tráfico que abandona esta intersección en dirección a la Avenida de los Reyes Católicos, dirigiéndose hacia la plaza de República Dominicana está compuesto de dos mitades. La primera viene del viaducto procedente de la autopista TF-1, y la otra mitad viene de la Avenida Benito Pérez Armas.
  - El tráfico que entra en la Avenida Reyes Católicos desde la Avenida Benito Pérez Armas se divide en dos partes. La primera, un 90%, se dirige hacia la salida de la autopista TF-1; y el resto (10%) sigue adelante por la Avenida Benito Pérez Armas.
  
- Intersección #16:
  - El tráfico que entra a la Avenida Benito Pérez Armas desde la autopista TF-1 se divide en dos partes. La primera (90%) sigue por la Avenida Benito Pérez Armas, mientras que el 10% restante se dirige a la Calle Fragata Danmark.
  - El tráfico que entra a la Avenida Benito Pérez Armas desde la Calle Fragata Danmark se divide en dos partes. La primera parte, un

92.4% se dirige hacia Reyes Católicos, mientras que el 7.6% restante se dirige al sentido contrario de circulación.

- Intersección #13:

- El tráfico que viene por la Calle Juan Sebastián Elcano se divide en tres partes iguales que se distribuyen de la siguiente manera. El primer tercio sigue hacia la Calle Tomé Cano, en dirección hacia la Calle Heliodoro Rodríguez López. El segundo tercio va hacia Fragata Danmark. Y el último tercio toma la Calle Tomé Cano en sentido hacia la Avenida 3 de Mayo.

- El tráfico que va por la Calle Tomé Cano desde la Calle Heliodoro Rodríguez López se divide en dos partes iguales. La primera se dirige hacia Fragata Danmark y la otra hacia la continuación de Tomé Cano.

- El tráfico que vá por la Calle Tomé Cano en dirección hacia la Calle Heliodoro Rodríguez López se divide en dos mitades; una que va por la Calle Tomé Cano y la otra que entra por la Calle Fragata Danmark.

- Intersección #19:

- El tráfico que viene de la Calle Picasso hacia la Intersección con la Avenida Benito Pérez Armas en dirección a la Avenida de Reyes Católicos se divide en tres partes iguales. Dos de ellas se dirigen a los dos sentidos de circulación de Benito Pérez Armas respectivamente. La tercera parte va hacia la Calle Picasso.

- El tráfico que entra a la Calle Picaso, en direccPicassoa Reyes Católicos se compone de tres partes iguales, con origen en los dos sentidos de Benito Pérez Armas y la Calle Picasso, respectivamente.

### A.2.1 Matriz de Probabilidades de Origen-Destino

En este apéndice se muestra la matriz de probabilidades de Origen-Destino que se ha utilizado. Para generar esta matriz se han usado las estadísticas de Intensidad Media Diaria (*Average Daily Traffic*<sup>1</sup>) facilitadas por el Ayuntamiento de Santa Cruz de Tenerife, teniendo en consideración las restricciones especificadas en el apéndice A.2.

Tabla A.1: Matriz de Origen-Destino de Las Ramblas

<b>Outputs/Inputs</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>21</b>	<b>24</b>	<b>26</b>	<b>27</b>	<b>29</b>
<b>1</b>	-	33	18	19	16	19	8	12	9	5	9
<b>3</b>	33	33	18	8	6	8	3	5	3	2	3
<b>4</b>	-	1	2		-	-	-	-	-	-	-
<b>11</b>	11	5	45	6	5	6	2	4	2	2	3
<b>14</b>	10	5	3	33	1	1	1	1	1	1	1
<b>16</b>	-	-	-	-	-	3	4	9	4	2	7
<b>21</b>	-	-	-	-	5	-	-	-	50	33	-
<b>23</b>	41	20	13	29	10	30	5	11	5	4	62
<b>26</b>	-	-	-	-	5	-	50	-	-	33	-
<b>28</b>	5	2	2	4	53	33	27	59	27	18	15

<sup>1</sup>Average Daily Traffic (ADT): El volumen total de tráfico durante un cierto periodo de tiempo medido en días (más de un día y menos de un año)

### A.3 *Stages* por cada Intersección

En este apéndice presentamos los *stages* de cada Intersección. “0” significa “rojo”, “1” significa “ámbar”, “2” significa “amarillo intermitente” y finalmente “3” significa “verde”.

Semáforo #1:	0 0 0 0 0 3 3 1 0 0
Semáforo #2:	3 3 3 1 0 0 0 0 0 3
Semáforo #3:	0 0 0 0 0 3 3 1 0 0

Tabla A.2: *Stages* de la Intersección #16

Semáforo #1:	3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Semáforo #4:	0 0 0 0 3 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0
Semáforo #6:	0 0 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 1 0
Semáforo #7:	0 0 0 0 0 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Tabla A.3: *Stages* de la Intersección #13

Semáforo #1:	3 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Semáforo #2:	0 0 0 0 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Semáforo #3:	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3 3 3 3 1 0
Semáforo #4:	3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3
Semáforo #5:	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3 3 1 0

Tabla A.4: *Stages* de la Intersección #17

Semáforo #1:	3 3 3 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0
Semáforo #2:	3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3
Semáforo #4:	0 0 0 0 3 3 3 3 3 3 3 1 0 0
Semáforo #7:	0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 0 0

Tabla A.5: *Stages* de la Intersección #18

Semáforo #1:	3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0
Semáforo #2:	3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 3
Semáforo #3:	0 0 0 0 0 3 3 3 1 0 0
Semáforo #4:	0 0 0 0 0 0 3 3 1 0 0
Semáforo #5:	2 2 2 2 2 2 3 3 3 1 2
Semáforo #8:	0 0 0 0 0 0 2 2 0 0 0

Tabla A.6: *Stages* de la Intersección #19

Semáforo #1:	3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 3 3
Semáforo #2:	3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0
Semáforo #3:	0 0 0 0 3 3 3 3 1 0 0 0
Semáforo #4:	0 0 0 0 0 3 3 3 3 3 1 0

Tabla A.7: *Stages* de la Intersección #20

Semáforo #1:	3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3
Semáforo #2:	0 0 0 0 0 3 3 3 1 0 0 0 0 0
Semáforo #3:	0 0 0 0 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0
Semáforo #4:	3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3
Semáforo #6:	0 0 0 0 2 2 0 0 0 0 0 0 0 0
Semáforo #9:	0 0 0 0 2 2 0 0 0 0 0 0 0 0
Semáforo #10:	2 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2

Tabla A.8: *Stages* de la Intersección #22

Semáforo #1:	3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3
Semáforo #3:	0 0 0 0 0 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0

Tabla A.9: *Stages* de la Intersección #24

Semáforo #1:	3 3 3 1 0 0 0 0 0
Semáforo #2:	0 0 0 0 0 3 3 1 0

Tabla A.10: *Stages* de la Intersección #118

Semáforo #1:	3 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3
Semáforo #2:	3 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3
Semáforo #3:	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0

Tabla A.11: *Stages* de la Intersección #25

Semáforo #1:	3 3 1 0 0 0 0 3
Semáforo #2:	0 0 0 0 3 3 1 0 0

Tabla A.12: *Stages* de la Intersección #115

## A.4 Valores Máximo y Mínimo de Cada *Stage* en cada Intersección Optimizada

En esta sección presentamos los rangos de cada uno de los *stages* de cada Intersección.

MÁXIMOS:	40 40 40 5 40 40 40 5 40 40
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.13: Rangos de los *Stages* de la Intersección #16

MÁXIMOS:	60 60 60 5 60 60 60 60 60 5 60 60 60 60 60 5 60
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.14: Rangos de los *Stages* de la Intersección #13

MÁXIMOS:	40 40 5 40 40 5 40 40 5 40 40 40 40 40 40 40 40 5 40
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.15: Rangos de los *Stages* de la Intersección #17

MÁXIMOS:	50 50 5 50 50 50 50 5 50 50 50 5 50 50
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.16: Rangos de los *Stages* de la Intersección #18

MÁXIMOS:	70 5 70 70 5 70 70 70 5 5 70
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.17: Rangos de los *Stages* de la Intersección #19

MÁXIMOS:	80 80 80 5 80 80 80 80 5 80 5 80
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.18: Rangos de los *Stages* de la Intersección #20

MÁXIMOS:	50 50 5 50 50 50 50 50 5 50 50 50 50 50
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.19: Rangos de los *Stages* de la Intersección #22

MÁXIMOS:	60 60 60 5 60 60 60 60 60 5 60 60 60 60 60
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.20: Rangos de los *Stages* de la Intersección #24

MÁXIMOS:	80 80 80 5 80 80 80 5 80
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.21: Rangos de los *Stages* de la Intersección #118

MÁXIMOS:	70 70 70 70 70 5 70 70 70 70 70 70 70 70 5 70 70 70 70 70
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.22: Rangos de los *Stages* de la Intersección #25

MÁXIMOS:	70 70 70 70 70 70 70 70 70
MÍNIMOS:	1 1 1 1 1 1 1 1 1

Tabla A.23: Rangos de los *Stages* de la Intersección #115

# Apéndice B

## Restricciones para La Almozara

### B.1 Calles Incluidas o Descartadas del Modelo

#### B.1.1 Calles Incluidas

En este apartado se enumeran las calles consideradas en el modelo del distrito de “La Almozara” elaborado en esta Tesis.

Avda. de Francia	C. de Juan Bautista del Mazo
Avda. de la Almozara	C.del Río Alcanadre
Avda. de Pablo Gargallo	C.de los Diputados
Avda. de la Autonomía	Paseo de María Agustín
Avda. Puerta de Sancho	Paseo de Echegaray y Caballero
C.del Lago	C. de Santa Lucía
C.de Braulio Foz	Puente de la Almozara
C. de Iriarte de Reinoso	

#### B.1.2 Calles Descartadas del Modelo

En este apartado enumeramos las calles, y fragmentos de calles que han sido eliminadas del modelo realizado de “La Almozara”.

C. de Mónaco	C.de Berna
C.Jardines de Lisboa	C.de Viena
C.de Bruselas	C.de París
C.de Berlín	C.de Bohn
C.de Amsterdam	C.Jardines de Atenas
C.de Oslo	C.de la Batalla de Almansa
C.de la Batalla de Arapiles	C.de la Batalla de Bailén
C.Ainzón	C.del Padre Consolación
C.del Padre Landa	C.de las Cortes
C.del Río Guadalupe	C.del Río Aragón
C.de la Sierra de Vicor	C.del Río Esera
C.del Río Guatizalema	C.de Monegros
C.de Dionisio Casañal	C.del Río Guadiana
C.de Santiago Dulong	C.de Ribagorza
C.del Río Cinca	C.de Fraga
C.de Hajar	C.de la Reina Felicia
C.del Río Ebro	C.del Río Duero
C.del Reino	C.del Monasterio de Sta. Lucía

## B.2 Aproximaciones Asumidas para el Cálculo de la Matriz de Probabilidad de Origen-Destino

En este apartado se presentan las aproximaciones asumidas para el cálculo de la matriz de probabilidad de origen-destino. El cálculo de las matrices origen-destino requiere de una gran cantidad de datos si se precisa cierta exactitud. Incluso, lo deseable sería realizar una encuesta a pié de calle. Por lo tanto, con los datos de que se disponían fue imprescindible realizar ciertas aproximaciones y asunciones que se enumeran en esta sección.

- El tráfico que sale del distrito séptimo en dirección al primer distrito se divide en dos partes iguales por el Paseo de Echegaray y Caballero, y la Calle de Santa Lucía.
- El tráfico que abandona el distrito #7 en dirección al distrito #3 se divide en tres partes iguales hacia las calles de Iriarte de Reinoso, Calle de los Diputados y la Avenida de Francia.
- Todos los vehículos que abandonan el distrito #7 por la Avenida de Francia van hacia el distrito #3.
- La probabilidad de cada destino es independiente de la entrada. Es decir, cada destino tiene asignada la misma probabilidad para todas las entradas.

### B.2.1 Matriz de Probabilidades de Origen-Destino

En este apartado mostramos cuál ha sido la matriz de probabilidad origen-destino utilizada. La probabilidad de cada salida es la misma para todas las entradas. Para generar esta matriz hemos utilizados estadísticas Intensidad Media Diaria (IMD o ADT) entre distritos durante un día laborable, y usando las aproximaciones del apartado B.2.

Tabla B.1: Matriz de Probabilidad de Origen-Destino Utilizada para “La Almozara”

Outputs	00	05	07	08	12	34	42	43
	3.83	3.83	33.10	10.68	19.51	10.68	10.68	7.68

### B.3 *Stages* por cada Intersección

En este apéndice presentamos los *stages* de cada Intersección. “0” significa “rojo”, “1” significa “ámbar”, “2” significa “amarillo intermitente” y finalmente “3” significa “verde”.

Semáforo #5:	3	3	1	0	0	0	0	3
Semáforo #6:	3	3	3	1	0	0	0	3
Semáforo #7:	1	0	0	0	3	3	3	3
Semáforo #8:	0	3	3	0	0	0	0	0

Tabla B.2: *Stages* de la Intersección #15

Semáforo #0:	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0
Semáforo #1:	3	3	3	1	0	0	0	0	0	3
Semáforo #2:	0	0	0	0	0	3	3	1	0	0
Semáforo #3:	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0
Semáforo #4:	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Tabla B.3: *Stages* de la Intersección #41

Semáforo #9:	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	0	
Semáforo #12:	3	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3

Tabla B.4: *Stages* de la Intersección #11

Semáforo #10:	3	3	3	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
Semáforo #11:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	0	0

Tabla B.5: *Stages* de la Intersección #3

Semáforo #13:	3 3 3 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3
Semáforo #14:	0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3 3 3 3 1 0 0 0

Tabla B.6: *Stages* de la Intersección #9

Semáforo #15:	0 0 0 0 0 0 0 0 3 3 3 3 3 3 3 3 3 1 0 0
---------------	---

Tabla B.7: *Stages* de la Intersección #4-44

Semáforo #16:	3 3 3 3 3 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3
---------------	---

Tabla B.8: *Stages* de la Intersección #44

## B.4 Valores Máximo y Mínimo de Cada *Stage* en cada Intersección Optimizada

En esta sección presentamos los rangos de cada uno de los *stages* de cada Intersección.

MÁXIMOS:	100 100 100 100 100 100 100 100
MÍNIMOS:	0 0 0 0 0 0 0 0

Tabla B.9: Rangos de los *Stages* de la Intersección #15

MÁXIMOS:	100 100 100 100 100 100 100 100 100 100
MÍNIMOS:	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Tabla B.10: Rangos de los *Stages* de la Intersección #41

MÁXIMOS:	100 100
MÍNIMOS:	0 0

Tabla B.11: Rangos de los *Stages* de la Intersección #11

MÁXIMOS:	100 100
MÍNIMOS:	0 0

Tabla B.12: Rangos de los *Stages* de la Intersección #3

MÁXIMOS:	100 100
MÍNIMOS:	0 0

Tabla B.13: Rangos de los *Stages* de la Intersección #9

MÁXIMOS:	100 100
MÍNIMOS:	0 0

Tabla B.14: Rangos de los *Stages* de la Intersección #4-44

MÁXIMOS:	100 100
MÍNIMOS:	0 0

Tabla B.15: Rangos de los *Stages* de la Intersección #44

# Apéndice C

## Codificación Gray

El propósito de este apéndice es facilitar la comprensión del Código Gray ([66]) utilizado en la codificación que se detalla en 4.3.2. Como se dijo, el código Gray tiene una virtud muy deseable para su uso en la codificación de los cromosomas. Esta codificación binaria está diseñada de manera que un cambio en el valor de un bit – por ejemplo, debido a una mutación – provoca que el valor entero de la duración del *stage* correspondiente sólo aumente o disminuya una unidad. Esta es una característica deseable porque hace que el espacio de búsqueda se ajuste a la métrica de distancia de Hamming.

En la figura C.1 se representa con un circuito lógico el algoritmo de conversión entre un código Binario estándar y el código Gray.

En pocas palabras: Primero se desplaza el código binario un bit hacia la derecha, perdiéndose el bit menos significativo (LSB). Luego se efectúa una

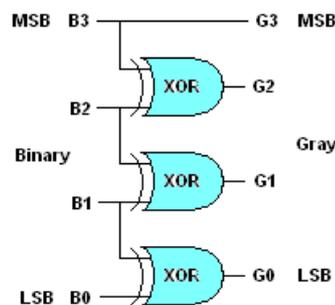


Figura C.1: Conversión de Binario a Código Gray

Tabla C.1: Operador Booleano XOR

Operando A	Operando B	Resultado
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Tabla C.2: Ejemplos de Conversión de Binario a Gray

Entero	Binario	Truncado	Gray
0	000	000	000
1	001	000	001
2	010	001	011
3	011	001	010
4	100	010	110
5	101	010	111
6	110	011	101
7	111	011	100

operación binaria tipo XOR entre el número original y el número truncado.

El operador binario XOR es un operador básico de la aritmética booleana y funciona como se muestra en la tabla C. Cuando los dos bits son iguales el resultado es '0'. Cuando son distintos, '1'.

A continuación tenemos un ejemplo sencillo de paso de binario a Gray. El código binario del 5 es '101'. Si se realiza la XOR entre '101' y '010' (el número truncado correspondiente), el resultado es '111'.

En la tabla C.2 se muestran más ejemplos, incluyendo el número truncado.

Para realizar la operación inversa, es decir, de Gray a Binario, se usa una rutina iterativa. El bit más significativo (MSB) desde el código Gray al Binario. El resto de los bits del código binario se calculan de la siguiente manera. Si el bit del código Gray es '1' en el código binario se pondrá el complementario del último bit escrito. Si el bit correspondiente del código Gray es '0' se repite el último valor de bit escrito.

Por ejemplo, 4 es '110' en código Gray. El bit MSB del código binario

correspondiente será el mismo que el del código Gray ('1').

El segundo bit del código Gray es '1'. Esto significa que hay que poner el complementario del último bit escrito, que fue '1'. Es decir, que el segundo bit del código binario es '0'.

Finalmente, el tercer bit del código Gray es '0', lo cual significa que se vuelve a poner el último valor de bit escrito ('0').

El código binario resultante sería '100'.



# Apéndice D

## Rutina de Cálculo del Orden de Actualización de las Celdas en la Simulación Determinística

Sea el grafo  $\mathbb{G}$  de la figura D.1, en el que la circulación del tráfico es de izquierda a derecha.

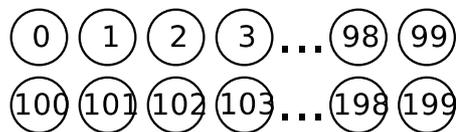


Figura D.1: Ejemplo de Grafo

Teniendo en cuenta que se permite el cambio de carril, se tiene una estructura de datos como la de la tabla D.1.

0	1	101	...	100	1	101	...	98	99	199	...	198	99	199	...
---	---	-----	-----	-----	---	-----	-----	----	----	-----	-----	-----	----	-----	-----

Tabla D.1: Dependencias para el grafo  $\mathbb{G}$  de la figura D.1

La información que se almacena en esta estructura es la siguiente. Para cada celda se especifica cuáles con las siguientes celdas a las que puede dirigirse

un vehículo que se encuentre en ella. Por ejemplo, como puede verse, si un vehículo se encuentra en la celda “0”, las siguientes celdas pueden ser la “1” y la “101” (si el vehículo efectúa un cambio de carril).

Visto desde otro punto de vista, con la información que contiene la estructura de datos de la tabla D.1, se podría afirmar que antes de actualizar la posición “0” sería conveniente actualizar las posiciones “1” y “101”, que son las posiciones posibles para un vehículo en la posición “0”. Por tanto, parece ser conveniente que en un hipotético orden de actualización esté primero la celda “1” que la celda “0”.

En líneas generales, el algoritmo recursivo que genera ese orden de actualización se define de la siguiente manera. Se recorre todo el grafo celda por celda. En cada una de ellas se lanza recursivamente el algoritmo por cada una de las celdas que están conectadas con la anterior. Cuando no hay más celdas dependientes se devuelve el número de la celda actual y se sale del bucle.

Por ejemplo, si se empieza por la celda “0”, el algoritmo se ejecutaría recursivamente para la celda “1”, luego para la “101” y luego devolvería el valor “0”. Dentro de la ejecución para la celda “1”, se ejecutaría para la celda “2”, luego para la celda “102”, y luego devolvería el valor “1”.

Un elemento importante de la función recursiva es que si una celda ya ha sido visitada, no se tiene en cuenta. El motivo es que no aparezcan las mismas celdas dos veces en el orden de actualización.

Con todo lo dicho, para el ejemplo de la figura D.1, el orden de actualización sería:

99 199 98 198 97 197 ... 3 103 2 102 1 101 0 100

# Glosario

## Algoritmos Evolutivos

Algoritmos de optimización metaheurística que utilizan una población de soluciones y mecanismos inspirados en la evolución biológica; como por ejemplo la Selección del mejor adaptado o la Mutación. 4

## Annual Average Daily Traffic (AADT)

El volumen total de tráfico durante un año 148

## Aprendizaje por Refuerzo

(*Reinforcement Learning*) subárea de lo que se denomina *Machine Learning*; y que tiene que ver con la manera en que un agente debería tomar acciones en un entorno de manera que se maximice la recompensa a largo plazo. El aprendizaje por refuerzo trata de encontrar una política que relacione los estados en los que se puede encontrar un agente con las acciones que este debería tomar. 19

## ATIS

(*Advanced Traveler Information Services*) Servicios avanzados de información a los conductores. 13

## ATMS

(*Advanced Traffic Management Systems*) Sistemas avanzados de gestión del tráfico. 13

**ATOS**

(*Advanced Traffic Optimization Systems*) Sistemas avanzados de optimización del tráfico en los cuales el tráfico no sólo es gestionado sino que también se intenta su optimización de manera automática sin la ayuda de la experiencia de expertos humanos. 13

**Average Daily Traffic (ADT o IMD)**

El volumen total de tráfico durante un cierto periodo de tiempo medido en días (más de un día y menos de un año) 148

**Changeable Message Signs**

(Señales de Tráfico Variables) Señales cuyo signo es reconfigurable electrónicamente 132

**Ciclo de Semáforo**

Secuencia de estados – por ejemplo Rojo o Verde – por los que pasa un determinado semáforo y que se repite de manera cíclica. La programación de los semáforos en ciclos es la más común. 3

**Cluster Beowulf**

Dispositivo de computación paralela compuesto de hardware estándar del mercado. Se caracteriza por ser flexible y reutilizable. Además tiene una relación precio/prestaciones muy interesante. 4

**CORSIM**

Corridor Traffic Simulation Model ([61]) – Modelo de Simulación de Tráfico en un Callejón 22

**Deadlock**

Situación de bloqueo mutuo entre dos o más procesos que intentan acceder a variables compartidas. Por ejemplo sean dos procesos paralelos P1 y P2. P1 necesita un mensaje de P2 para proseguir y enviar a P2 un

mensaje para que este continúe su ejecución. Sin embargo P2 antes de enviar un mensaje para que P1 continúe su ejecución necesita a su vez que recibir de P1 un mensaje que le autorice a continuar. Esta situación es irresoluble y ambos procesos detienen su ejecución. 51

### **Dynamic System-Optimal**

Política de asignación de ruta a los conductores en una red. Se caracteriza por que se asume que los conductores cooperarán entre ellos escogiendo entre las opciones que se les brinde aquellas que beneficien a todo el sistema en lugar del beneficio particular de cada uno. Aunque esta política puede ser tachada de irreal puede ser un marco útil para evaluar varias estrategias de gestión de tráfico. 23

### **DynaMIT**

Asignación dinámica de red para la gestión de la información a los conductores 14

### **Feedback**

(Realimentación) Dado un sistema tipo “Caja Negra” con una entrada y una salida el *Feedback* es una parte de la salida que se “conecta” como una entrada más al sistema. De esta manera la “caja negra” dispone de información de su salida y puede corregir o mejorar su funcionamiento. 46

### **Free Software**

*Software* Libre) Software cuyo código está disponible bajo un tipo de licencia que permite a los usuarios usar; cambiar y mejorarlo; y distribuirlo modificado o no. Generalmente es un *Software* desarrollado de manera pública y colaborativa 27

### **Hamming Distance**

El número de bits en que difieren dos cadenas binarias ([68]).

En Teoría de la Información se denomina Distancia de *Hamming* entre

dos cadenas de igual longitud al número de posiciones para las cuales el símbolo correspondiente es diferente. En otras palabras mide el número de sustituciones requeridas en una de las dos cadenas para que sea igual a la otra; o el número de errores en una cadena con respecto a la otra. V.g. la Distancia de *Hamming* entre 11111 y 01101 es 2.

Fue definida en [69] por Richard W. Hamming. 32

## ITS

(*Intelligent Transportation Systems*) Sistemas de Transporte Inteligentes. Son las técnicas avanzadas que se aplican al procesamiento; control; y gestión del tráfico. 16

## Machine Learning

Subcampo dentro de la Inteligencia Artificial cuyo objetivo es el diseño y desarrollo de algoritmos y técnicas que permitan a los ordenadores “aprender”. 19

## MIMD

Flujo de instrucciones múltiple y flujo de datos múltiple – *Multiple Instruction stream Multiple Data stream*. Es un ordenador paralelo o un conjunto de máquinas que funcionan de manera asíncrona e independiente. Tanto los datos como las instrucciones del programa paralelo se ejecutan de manera independiente. 25

## Modelo Car-Following

También conocidos como modelos de tiempo continuo. Todos los modelos Car-following tienen en común que están definidas por ecuaciones diferenciales ordinarias para describir la velocidad ( $v_\alpha$ ) y posición ( $x_\alpha$ ) de los vehículos completamente. Se asume que los estímulos de entrada de los conductores son tres: la propia velocidad; la distancia entre el vehículo y el vehículo líder o precedente; y la velocidad del vehículo líder. 16

**Net Distance**

Distancia entre dos vehículos consecutivos (de parachoques a parachoques)

16

**Offset-time**

(Tiempo de Desfase) El tiempo que transcurre desde que un semáforo cambia su estado a verde hasta que el siguiente semáforo – por ejemplo en una rambla – cambia también a verde 21

**Ondas Stop-And-Go**

Retenciones de Tráfico 16

**Pareto (frontera o hipersuperficie de)**

Dada una función de ajuste multicriterio – el valor de la función de ajuste se obtiene como combinación (generalmente lineal) de varios criterios ortogonales entre sí – puede suceder que sea imposible llegar a un único punto óptimo. En estos casos suele aparecer la llamada Frontera de Pareto. Esta es una hipersuperficie compuesta por los puntos que comparten un mismo valor de la función de ajuste (óptimo).

Esta situación da libertad al diseñador para elegir una solución u otra en función de otros criterios adicionales. 8

**Problemas NP-Complejos**

En Teoría de la Complejidad los problemas NP-Complejos son los problemas de más difícil solución en el conjunto de problemas NP (Problemas No-Determinísticos de solución en un tiempo Polinómico). Estos problemas son la más pequeña subclase de los problemas NP que puede ser concebida fuera del conjunto de problemas P (problemas determinísticos con resolución en tiempo polinómico). Esto es así porque una solución determinística en tiempo polinómico a cualquier problema NP-Completo sería también la solución de cualquier problema NP. 5

**Rama Filogenética**

(Phylogenetic Branch) En la teoría de la evolución cada una de las “ramas” del árbol filogenético. Un árbol filogenético es un diagrama que muestra la evolución de los linajes de los organismos. Análogamente en computación evolutiva se puede entender como rama filogenética a una representación de los individuos con cromosomas similares (con valores de *fitness* próximos) a lo largo de las generaciones. 71

**Redes de Petri**

Representación matemática de un sistema distribuido discreto. Son una generalización de la teoría de autómatas que permite expresar eventos concurrentes. Una red de Petri está formada por lugares; transiciones y arcos dirigidos. Los arcos conectan un lugar a una transición o una transición a un lugar. No pueden haber arcos entre lugares ni entre transiciones. Los lugares contienen un número cualquiera de fichas. Las transiciones se disparan; es decir consumen fichas de una posición de inicio y producen fichas en una posición de llegada. Una transición está habilitada si tiene fichas en todas sus posiciones de entrada. 21

**Responsive Signals**

Señales de tráfico capaces de adaptar su estado a la situación de tráfico actual en sus inmediaciones. 17

**SINTEF**

Fundación para la Investigación Científica e Industrial en el Instituto Noruego de Tecnología. 17

**Stage**

Combinación de estados de los semáforos asociados a una intersección en un instante concreto. 31

**Tiempo de reacción a la frenada (Brake reaction time)**

Es el intervalo de tiempo entre el instante en el cual un conductor reconoce la existencia de un objeto o riesgo en su trayectoria hasta que acciona los frenos. Este intervalo incluye el tiempo requerido para tomar la decisión de que se requiere frenar. 16

**TRANSIMS**

(TRansportation ANalysis and SIMulation System) Es un sistema de simulación basado en agentes que simula segundo a segundo los movimientos de personas y vehículos en una red metropolitana de gran escala. 22

# Índice

- ADT, 105, 122, 156, 163
- Ahorro Energético, 3, 134
- AIMSUN2, 15
- Algoritmos Evolutivos, 4
- Algoritmos Genéticos, 1, 4, 5, 10, 17, 18, 22, 23, 25, 26, 28, 29, 43, 44, 47, 51, 55, 57, 59, 60, 66, 72, 75, 76, 80, 89, 92, 95, 100, 112, 113, 129, 131
- Aprendizaje por Refuerzo, 19
- ATIS, 13
- ATMS, 13, 112
- ATOS, 13
- Autómatas Celulares, 4–6, 14–17, 22, 26, 36–40, 130, 131
- Average Daily Traffic, 105, 122, 156, 163
- Biham-Middleton-Levine, Modelo, 6, 38
- Brake Reaction Time, 16
- Calentamiento Global, 3, 92, 93, 134
- Cambio Climático, 3
- Campana de Gauss, 114
- Car-Following, Modelo, 16
- Changeable Message Signs, 132
- Ciclo de Semáforos, 3, 7, 8, 10, 17, 20–23
- Clúster de Computación Distribuída, 27
- Cluster Beowulf, 1, 4, 25, 90, 129
- CMS, 132
- Codificación binaria Gray, 32, 34, 58, 59, 131, 167
- Common Cycle Time, 17
- Conducción Automática, 8
- Congestión, 17
- Contaminación Acústica, 3
- Control de Sistemas Lineales, 19
- Control de Tráfico, 8
- CORSIM, 22
- Crossover, 58
- Cruce, Operador de, 58
- Deadlock, 51
- Distributed Computing Cluster, 27
- DSO, 23
- Dynamic System-Optimal, 23
- DynaMIT, 14
- Efecto Invernadero, 3
- Escalabilidad, 1, 22, 31, 41, 50, 90, 129, 130

- Espacio de Búsqueda, 10, 26, 64, 76  
 Estado de la Congestión, 85, 94, 98  
 Fases de Ciclo de Semáforo, 8, 17, 21, 31, 32, 58, 59, 83, 116, 130  
 Feedback, 46  
 Fitness, 1, 10, 98, 110, 123, 130, 131  
 Fitness Function, 1, 8, 31, 98, 130, 131  
 Free Software, 27, 130  
 Frenado Suave, 38  
 Función de Ajuste, 8, 31, 110, 123, 131  
 Gases de Efecto Invernadero, 3, 92, 93, 134  
 Gaussiana, Distribución, 114  
 Gestión del Conocimiento, 17  
 Gestión del Tráfico, 3  
 GHG, 3, 92, 93, 134  
 Global Warming, 3, 92, 93, 134  
 Greenhouse Gases, 3, 92, 93, 134  
 Hamming, Distancia de, 32  
 IMD, 105, 122, 156, 163  
 Impacto Medioambiental, 3  
 Integration, 15  
 Inteligencia Artificial, 19  
 Inteligencia Local, 46  
 Intelligent Transportation Systems, 16  
 INTELSIM, 15  
 Intensidad Media Diaria, 105, 122, 156, 163  
 ITS, 16  
 Lógica Difusa, 20  
 LSB, 167  
 Machine Learning, 19  
 Macroscópicos, Modelos, 6, 36  
 Macrosimuladores, 36  
 Matriz de Origen-Destino, 105, 111  
 Mersenne Twister, 33  
 MET, 30  
 Microscópicos, Modelos, 6, 36  
 Microsimuladores, 18, 22, 36  
 MIMD, 25  
 MITSIM, 15  
 MPI, 132  
 MSB, 168  
 Mutación, Operador de, 59  
 Mutation, 59  
 Nagel-Schreckenberg, Modelo, 6, 38  
 Net Distance, 16  
 Normal, Distribución, 114  
 Off-the-Shelf, 4, 27, 130  
 Offset Time, 21, 22  
 Open MPI, 132  
 Open Source Software, 132  
 Optimal Green Time, 23  
 Optimización, 4, 5, 11, 23, 26, 29, 92, 123, 125, 129, 134, 135  
 Optimización Adaptativa, 135  
 Optimización Dinámica, 135  
 Optimización No Determinística, 4, 5, 11, 23, 26, 29, 92, 129, 134,

- 135
- Paralelización, 5
- Pareto, Frontera de , 8
- Petri, Redes de, 21
- Phylogenetic Branch, 71
- PLCs, 21
- Predicción de Rutas Óptimas, 8
- Problemas NP-Complejos, 5
- Programmable Logic Controllers, 21
- Rama Filogenética, 71
- Realimentación, 46
- Redes Neuronales, 22
- Reinforcement Learning, 19
- Responsive Signals, 17
- SchCh, Modelo, 6, 38
- Señales de Tráfico Sensibles, 17
- Search Space, 10, 26, 64, 76
- Sensores de Tráfico, 8, 14, 20, 135, 136
- Simulación de Tráfico, 5
- Simuladores de Tráfico Macroscópicos,  
5
- Simuladores de Tráfico Microscópicos,  
6
- SINTEF, 17
- Sistemas Avanzados de Navegación, 8
- SK, Modelo, 38
- SK, Modelo , 6
- Smooth Braking, 38
- SOC, 16, 85, 94, 98
- Software de Fuente Abierta, 132
- Software Libre, 27, 130
- Space Occupancy, 16
- Stage, 8, 17, 21, 31, 32, 58, 59, 83, 116,  
130
- State of Congestion, 85, 94, 98
- Stop-And-Go, Ondas, 16
- Técnicas Híbridas, 5
- TE, 98
- Teorema de los Esquemas, 10
- Tiempo Óptimo en Verde, 23
- Tiempo de Desfase, 21, 22
- Tiempo de Ocupación, 85, 94, 98
- Tiempo de Reacción a la Frenada, 16
- Time of Occupancy, 85, 94, 98
- TOC, 85, 94, 98
- Total Emissions, 94, 98
- TRANSIMS, 22