



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**USO DEL DIAGRAMA FUNDAMENTAL  
MACROSCÓPICO (MFD) PARA EL  
ANÁLISIS DE INTERSECCIONES  
SEMAFORIZADAS**

**SEBASTIÁN ANDRÉS MUÑOZ VENEGAS**

Tesis para optar al grado de:  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**JUAN CARLOS HERRERA MALDONADO**

Santiago de Chile, Marzo, 2018

© 2018, Sebastián Muñoz Venegas



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**USO DEL DIAGRAMA FUNDAMENTAL  
MACROSCÓPICO (MFD) PARA EL  
ANÁLISIS DE INTERSECCIONES  
SEMAFORIZADAS**

**SEBASTIÁN ANDRÉS MUÑOZ VENEGAS**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**JUAN CARLOS HERRERA MALDONADO**

**JUAN ENRIQUE COEYMANS AVARIA**

**RODRIGO FERNÁNDEZ AGUILERA**

**CÉSAR SÁEZ NAVARRETE**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Marzo, 2018

*A mi abuelo, que donde  
esté me acompaña en  
el camino de la vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a mi abuela, hermanos y en especial a mis papás por darme la oportunidad de alcanzar mis sueños. A Javiera, por su constante paciencia, preocupación, cariño y apoyo durante este largo proceso. Sin lugar a dudas no lo habría conseguido sin su ayuda.

Me gustaría agradecer al Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, el que me abrió las puertas e hizo muy agradable toda mi estadía universitaria. En especial, a mi profesor guía Juan Carlos Herrera, tanto por su rol académico como personal. Este trabajo no sería lo mismo gracias a sus constantes ideas y aportes. Agradezco, su tiempo, paciencia y enseñanzas durante estos dos años de investigación. A los miembros de la comisión, que siempre estuvieron dispuestos a juntarse y mostraron interés para lograr un mejor trabajo.

A todos mis grandes amigos que me han acompañado durante estos años en la universidad. A Francisco Garrido por su alegría y apoyo en estos años, Felipe González por su constante paciencia y buena voluntad ante cualquier pregunta, a Ignacio Tizado y Guillermo Soto (Sala Grande Norte MSc) que me recibieron al comienzo de esta aventura y se transformaron en grandes amigos. A todos mis amigos del qué pasillo, que comenzó como grupo de apoyo para desarrollar parte de esta investigación. En especial a Hernán Catalán, Mariana Valle y Owen Bull que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme y brindarme buenos consejos. También, a todos mis compañeros de postgrado por sus constantes buenos deseos. No puedo dejar de agradecer a mis amigos de siempre Grecco Oyarzún, Andreas Schiefelbein y Luis Zúñiga, por estar presentes incondicionalmente y levantarme el ánimo en los momentos complejos.

Finalmente, agradezco el apoyo otorgado por CONICYT a través del proyecto FONDECYT #1160943 para el desarrollo de esta investigación.

## TABLA DE CONTENIDOS

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | INTRODUCCIÓN .....  | 1  |
| 1.1   | Hipótesis.....  | 2  |
| 1.2   | Objetivos .....   | 2  |
| 1.3   | Alcances de la investigación.....   | 3  |
| 1.4   | Estructura de la tesis.....   | 3  |
| 2     | MARCO TEÓRICO.....  | 4  |
| 2.1   | Diagrama fundamental macroscópico MFD.....                                    | 4  |
| 2.2   | Evidencia empírica de la existencia del MFD.....                              | 8  |
| 2.3   | Condiciones de existencia y forma del MFD.....                                | 10 |
| 2.4   | Aplicaciones del MFD para el control y monitoreo de redes.....                | 14 |
| 2.5   | Aplicaciones para el análisis y control de intersecciones semaforizadas ..... | 17 |
| 3     | METODOLOGÍA .....   | 22 |
| 3.1   | Definición del sistema analizado .....  | 22 |
| 3.2   | Análisis espacio – temporal mediante modelo LWR.....                          | 23 |
| 3.2.1 | Teoría de las ondas cinéticas LWR.....  | 23 |
| 3.2.2 | Consideraciones previas.....  | 24 |
| 3.2.3 | Análisis por casos.....   | 26 |
| 3.3   | Análisis simulación mediante AIMSUN.....                                      | 43 |
| 3.3.1 | Definición de la red.....   | 43 |
| 3.3.2 | Definición de Escenarios.....   | 46 |
| 3.3.3 | Cálculo de Acumulación y <i>Outflow</i> .....                                 | 48 |
| 3.3.4 | Análisis relación acumulación – desfase.....                                  | 49 |
| 3.4   | Análisis empírico en una intersección semaforizada .....                      | 51 |
| 3.4.1 | Descripción de la intersección .....  | 51 |
| 3.4.2 | Toma de datos .....   | 52 |
| 4     | RESULTADOS Y ANÁLISIS.....  | 55 |
| 4.1   | Resultados análisis espacio – temporal.....                                   | 55 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.1.1 | MFD .....   | 55  |
| 4.1.2 | Relación acumulación – proporción verdes efectivos.....             | 58  |
| 4.1.3 | Relación acumulación – desfase .....                                | 60  |
| 4.2   | Resultados análisis simulación.....                                 | 62  |
| 4.2.1 | MFD .....   | 62  |
| 4.2.2 | Relación acumulación – desfase .....                                | 71  |
| 4.3   | Resultados análisis empírico .....                                  | 79  |
| 5     | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....                                 | 83  |
| 5.1   | Conclusiones .....  | 83  |
| 5.2   | Recomendaciones.....  | 85  |
|       | BIBLIOGRAFÍA .....  | 87  |
|       | ANEXOS .....  | 91  |
|       | Anexo A. Resultados Escenarios MFD.....                             | 92  |
|       | Ciclo 45 segundos .....   | 92  |
|       | Ciclo 60 segundos .....   | 96  |
|       | Ciclo 90 segundos .....   | 98  |
|       | Anexo B. Resultados Escenarios relación acumulación – desfase ..... | 103 |
|       | Ciclo 45 segundos .....   | 103 |
|       | Ciclo 60 segundos .....   | 107 |
|       | Ciclo 90 segundos .....   | 109 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2-1. Resumen de la revisión bibliográfica en el uso del MFD para análisis de vías semaforizadas..... | 21 |
| Tabla 3-1. Estados de tráfico provenientes del diagrama fundamental de los arcos de la intersección. ....  | 28 |
| Tabla 3-2. Estados de tráfico A considerados para el análisis de flujo libre. ....                         | 28 |
| Tabla 3-3. Estados de tráfico E considerados para el análisis de congestión. ....                          | 36 |
| Tabla 3-4. Indicadores de operación del semáforo para los largos de ciclo analizados...44                  |    |
| Tabla 3-5. Resumen de las situaciones generadas para cubrir la forma del MFD de la intersección. ....      | 46 |
| Tabla 3-6. Definición de escenarios con viraje para la simulación.....                                     | 47 |
| Tabla 3-7. Escenarios evaluados para la simulación realizada en AIMSUN.....                                | 47 |
| Tabla 3-8. Días y horarios de medición para la intersección Pocuro con Suecia. ....                        | 53 |
| Tabla 4-1. Resumen de resultados de parámetros relevantes de capacidad de la intersección. ....            | 66 |
| Tabla 4-2. Resumen resultados de parámetros relevantes de capacidad de la intersección. ....               | 71 |
| Tabla 4-3. Resumen de resultados de la relación demora – desfase para los diferentes largos de ciclo. .... | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 4-4. Resumen de resultados de la relación demora – desfase para la aleatoriedad en llegadas..... | 76 |
| Tabla 4-5. Resumen resultados de la relación demora – desfase para los escenarios de viraje.....       | 79 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 2-1. Diagrama Fundamental Macroscópico Genérico. ....   | 5  |
| Ilustración 2-2. (a) Diagrama Fundamental Macroscópico de la red de San Francisco obtenido mediante simulación. (b) Relación lineal entre el <i>Outflow</i> de la red y la Producción. .... | 7  |
| Ilustración 2-3. (a) Diagrama Fundamental Macroscópico encontrado en la ciudad de Yokohama. (b) Diagrama Fundamental Macroscópico encontrado en la ciudad de Brisbane.....                  | 10 |
| Ilustración 2-4. Histogramas de la distribución $d_r(t)$ para la ciudad de Yokohama cuando existe una ocupación promedio de 45% en la red. ....   | 13 |
| Ilustración 2-5. Sistema de dos regiones con MFD utilizado para la estrategia de control. ....  | 15 |
| Ilustración 2-6. (a) Regiones consideradas para la modelación del centro de San Francisco. (b) MFD de las 3 regiones consideradas. ....   | 16 |
| Ilustración 2-7. MFD de los escenarios evaluados de cuatro geometrías de la vía y cuatro esquemas de desfases. ....   | 19 |
| Ilustración 2-8. Sistema de anillo unidireccional de ciclo cerrado analizado. ....  | 20 |
| Ilustración 3-1. Intersección semaforizada analizada mediante el modelo LWR y simulación. ....  | 22 |
| Ilustración 3-2. Diagrama Fundamental Triangular para cada arco de la intersección analizada.....   | 25 |

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 3-3. (a) Situación de Flujo Libre. (b) Situación de Capacidad. (c) Situación de Congestión. ....   | 27 |
| Ilustración 3-4. Diagrama Fundamental Triangular con los estados de tráfico que se analizan en las secciones siguientes.....                                       | 27 |
| Ilustración 3-5. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (i) en un solo sentido de la intersección.....                                   | 29 |
| Ilustración 3-6. Estados de tráfico presentes en la intersección durante un ciclo (a) sentido norte- sur y (b) sentido oeste- este.. ....                          | 30 |
| Ilustración 3-7. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (ii) en un solo sentido de la intersección.....                                  | 33 |
| Ilustración 3-8. Estados de tráfico presentes en la intersección durante un ciclo (a) sentido norte- sur y (b) sentido oeste- este .....                           | 34 |
| Ilustración 3-9. Rango de valores en los que se puede mover el desfase de la intersección analizada.....   | 35 |
| Ilustración 3-10. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (iii) en un solo sentido de la intersección.....                                | 37 |
| Ilustración 3-11. Estados de tráfico presentes en la intersección durante un ciclo (a) sentido norte- sur y (b) sentido oeste- este .....                          | 38 |
| Ilustración 3-12. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (iii) en un solo sentido de la intersección cuando $\delta = \frac{L}{w}$ ..... | 40 |
| Ilustración 3-13. Estados de tráfico presentes en la intersección durante un ciclo (a) sentido norte- sur y (b) sentido oeste- este. ....                          | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 3-14. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación en un solo sentido de la intersección.....        | 42 |
| Ilustración 3-15. Red modelada en AIMSUN, la circunferencia demarca la intersección analizada.....                                   | 44 |
| Ilustración 3-16. Perfil de la demanda considerado para la simulación.....   | 45 |
| Ilustración 3-17. Representación gráfica de la acumulación y <i>outflow</i> en el uso de curvas acumuladas.....                      | 49 |
| Ilustración 3-18. Relación lineal existente entre la acumulación de la intersección y la demora de los vehículos .....               | 50 |
| Ilustración 3-19. Esquema de la intersección Pocuro con Suecia y el diseño de las etapas semafóricas.....                            | 52 |
| Ilustración 3-20. Zona analizada de la intersección Pocuro con Suecia y ubicación de voluntarios para la medición. ....              | 53 |
| Ilustración 3-21. Proceso de construcción de curvas acumuladas de la intersección. ....  | 54 |
| Ilustración 4-1. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección analizada mediante modelo LWR. ....                            | 55 |
| Ilustración 4-2. Diagrama fundamental macroscópico promedio de la intersección analizada mediante modelo LWR. ....                   | 57 |
| Ilustración 4-3. Relación acumulación - proporción verdes efectivos para la intersección analizada mediante LWR en flujo libre. .... | 58 |
| Ilustración 4-4. Relación acumulación - proporción verdes efectivos para la intersección analizada mediante LWR en capacidad .....   | 59 |

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 4-5. Relación acumulación - desfase para la intersección analizada mediante LWR.....  | 61 |
| Ilustración 4-6. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección para escenario sin aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 60 segundos. ....  | 62 |
| Ilustración 4-7. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....                             | 65 |
| Ilustración 4-8. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección para escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 60 segundos. ....  | 66 |
| Ilustración 4-9. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 60 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....         | 68 |
| Ilustración 4-10. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 60 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos..... | 69 |
| Ilustración 4-11. Relación demora - desfase para la intersección analizada mediante AIMSUN.....   | 72 |
| Ilustración 4-12. Relación demora - desfase para la intersección, considerando los distintos largos de ciclo.....   | 73 |
| Ilustración 4-13. Relación demora - desfase para la intersección analizada, considerando la dimensión de aleatoriedad en el proceso de llegadas.....  | 75 |

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 4-14. Relación demora - desfase para la intersección, considerando proporciones de virajes baja y media. ....   | 77 |
| Ilustración 4-15. Relación demora - desfase para la intersección, considerando proporciones de virajes altas homogénea y heterogénea. ....  | 78 |
| Ilustración 4-16. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección Pocuro con Suecia. ....  | 80 |
| Ilustración A-1. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....         | 92 |
| Ilustración A-2. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 45 segundos. .... | 93 |
| Ilustración A-3. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....                   | 94 |
| Ilustración A-4. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....         | 95 |
| Ilustración A-5. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ...  | 96 |

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración A-6. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 60 segundos. ....  | 96  |
| Ilustración A-7. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 60 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 60 segundos. ....          | 97  |
| Ilustración A-8. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 60 segundos. ...   | 98  |
| Ilustración A-9. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....  | 98  |
| Ilustración A-10. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....         | 99  |
| Ilustración A-11. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....           | 100 |
| Ilustración A-12. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 90 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....         | 101 |
| Ilustración A-13. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 90 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos. .... | 102 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración B-1. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....        | 103 |
| Ilustración B-2. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 45 segundos .....        | 103 |
| Ilustración B-3. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....        | 104 |
| Ilustración B-4. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 45 segundos..... | 104 |
| Ilustración B-5. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....                  | 105 |
| Ilustración B-6. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....        | 105 |
| Ilustración B-7. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....        | 106 |
| Ilustración B-8. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 45 segundos. ....        | 106 |
| Ilustración B-9. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 45 segundos..... | 107 |
| Ilustración B-10. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 60 segundos.....        | 107 |
| Ilustración B-11. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 60 segundos.....        | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración B-12. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 60 segundos.....           | 108 |
| Ilustración B-13. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 60 segundos. ....  | 109 |
| Ilustración B-14. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....          | 109 |
| Ilustración B-15. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....          | 110 |
| Ilustración B-16. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....          | 110 |
| Ilustración B-17. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos.. .... | 111 |
| Ilustración B-18. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....                    | 111 |
| Ilustración B-19. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....          | 112 |
| Ilustración B-20. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos .....          | 112 |
| Ilustración B-21. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 90 segundos .....          | 113 |
| Ilustración B-22. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos. ....  | 113 |

## RESUMEN

Actualmente existen limitaciones en las herramientas macroscópicas para el estudio de intersecciones semaforizadas. Un ejemplo es el grado de saturación, que requiere información detallada (demanda, oferta y repartos del semáforo) y que no entrega información sobre la propagación de la congestión. El Diagrama Fundamental Macroscópico (MFD por su sigla en inglés) surge como una interesante alternativa para su análisis, ya que capta la dinámica de la congestión. En esta investigación se realizan tres análisis (i) espacio – temporal (LWR) para estudiar la existencia del MFD en una intersección semaforizada, (ii) un análisis de simulación (AIMSUN) para relajar los supuestos más fuertes del modelo LWR y así estudiar esta relación macroscópica en escenarios más realistas y (iii) un experimento empírico en una intersección para estudiar la relación fundamental en la realidad. A su vez, se analiza la existencia de una relación entre la acumulación de la intersección y los desfases (mediante análisis (i) y (ii)), con el fin de explorar la coordinación semafórica. Los resultados muestran que para todos los análisis realizados existe evidencia (teórica, simulación y empírica) que sugiere la existencia del MFD para una intersección semaforizada. El análisis de simulación muestra que aumentos en el largo de ciclo aumentan la capacidad de la intersección, la aleatoriedad en las llegadas no genera un impacto en la forma de esta relación macroscópica y aumentos en las proporciones de viraje tienden a disminuir la capacidad de la intersección. En el caso de la relación acumulación – desfase existe un intervalo de desfases que produce menores acumulaciones en la intersección mejorando su operación. El aumento en el largo de ciclo y aleatoriedad en las llegadas aumentan las diferencias entre un buen y un mal desfase. Esta relación es bien definida para proporciones de viraje bajas y medias. Para proporciones altas de viraje, la relación no presenta un comportamiento identificable.

Palabras clave: MFD, intersección semaforizada, control semafórico, desfases.

## ABSTRACT

Currently, there are limitations in macroscopic models for analyzing signalized intersections. An example is the degree of saturation, which requires detailed information (supply, demand and traffic lights distribution) and that does not provide information about the spread of congestion. The Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) appears as an interesting alternative since it captures the congestion dynamics. In this investigation three analyses are made (i) a spatio-temporal (LWR) to study the existence of the MFD at a signalized intersection, (ii) a simulation analysis (AIMSUN) to overcome the assumptions made by the LWR model and to study the macroscopic relationship in more realistic scenarios and (iii) a real experiment at a given intersection to study the fundamental relationship. At the same time, the existence of a relationship between the accumulation in the intersection and the offsets is analyzed (by means of the analysis (i) and (ii)), to explore its use in signal coordination. The results show that for all the analyses made, evidence (theoretical, simulation, empirical) suggests the existence of the MFD for a signalized intersection. The simulation analysis confirms that the longer the cycle length, the higher the capacity of the intersection. Randomness in the arrival process does not affect the shape of the macroscopic relationship. Increases in turnings proportions tend to decrease the capacity of the intersection. In the case of the accumulation – offset relationship, there exists a range of offsets that yield minor accumulations of the intersection, improving its operation. Increases in the cycle length and randomness of the arrivals, increase the differences between a good and a bad offset. This relationship is well defined for low and medium turnings proportions. For high turning proportions, however, the relationship does not exhibit a consistent behavior.

Keywords: MFD, signalized intersection, offsets, signal coordination, traffic flow.

## 1 INTRODUCCIÓN

El problema de la congestión es inherente a las ciudades. Este ha ido en aumento a lo largo del tiempo y todo indica que esto puede ser peor. La congestión tiene asociadas una serie de externalidades negativas como incrementos en tiempos de viaje, mayores consumos de combustible, aumentos en los costos de operación y en la contaminación atmosférica. Santiago de Chile es una ciudad de 7 millones de habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017) y 2 millones de autos (Instituto Nacional de Estadísticas, 2016). A su vez, el número de autos crece a una tasa del 3,3% (Instituto Nacional de Estadísticas, 2016), llevando a un inevitable congestionamiento. Es común ver altos niveles de congestión durante las horas punta. Por lo tanto, en el corto y mediano plazo es necesario contar con herramientas que nos permitan gestionar de mejor forma el tráfico (Mahendra, 2008). De otro modo, las problemáticas asociadas a la congestión generarán consecuencias incluso peores.

La construcción de nueva infraestructura vial no es una solución sustentable en el largo plazo debido a sus grandes costos de inversión y a la demanda inducida generada (Geroliminis y Daganzo, 2007). Por lo tanto, es fundamental velar por una utilización eficiente de la oferta existente para así disminuir la congestión y mejorar la movilidad urbana (Geroliminis y Sun, 2011). Uno de los factores que influyen en la congestión en Latinoamérica es la deficiente información de las condiciones de tráfico (Bull, 2003). En este contexto surge la necesidad de contar con herramientas que permitan monitorear fácilmente el estado del sistema para así implementar estrategias de control. Sin embargo, actualmente existe una limitación en las herramientas macroscópicas para el análisis de una intersección semaforizada. Un ejemplo es el grado de saturación, que requiere información detallada de la demanda, oferta y diseño de etapas del semáforo. Este indicador permite observar si en un momento existe congestión o no, pero no entrega luces de como volver a la capacidad y recuperar la operación de la intersección.

Para el monitoreo y análisis de una red, el Diagrama Fundamental Macroscópico (MFD por su sigla en inglés) surge como una interesante alternativa. El MFD nace con la

idea de realizar control adaptativo para mejorar la movilidad urbana, en base a la acumulación vehicular en una zona (Daganzo, 2007). Este relaciona dos variables de tráfico conocidas como *outflow* y acumulación. La primera corresponde a la cantidad de vehículos que alcanzan sus destinos en la zona estudiada en cierta unidad de tiempo. Esto incluye los vehículos que terminan sus viajes al interior de la zona y los que salen de ella. La acumulación corresponde a la cantidad de autos presentes en el área estudiada excluyendo a los vehículos estacionados. El MFD presenta ventajas ya que permite captar el fenómeno de la congestión, las variables utilizadas están relacionadas con el *performance* del sistema y no son filtradas por ningún modelo previamente (Geroliminis y Daganzo, 2007).

### **1.1 Hipótesis**

La hipótesis de este trabajo es que existe una relación fundamental de tráfico a nivel de intersección semaforizada (como el MFD) con 3 regímenes que la caracterizan: flujo libre, capacidad y congestión. A su vez, también existe una relación entre la acumulación de la intersección e indicadores de operación del semáforo como los desfases y las relaciones entre los verdes efectivos de diferentes etapas.

### **1.2 Objetivos**

El objetivo general de esta investigación es utilizar una herramienta de modelación macroscópica, conocida como *Macroscopic Fundamental Diagram* (MFD), para entender las dinámicas en una intersección semaforizada y así analizar la operación de estas.

Los objetivos específicos de la investigación son:

- 1) Estudiar cómo se ve afectado el MFD de una intersección al variar los largos de ciclo, incluir maniobras de virajes o al agregar efectos aleatorios.
- 2) Explorar la existencia de una relación entre indicadores de operación de la intersección como los desfases y la cantidad de vehículos en ella.

- 3) Estudiar cómo se ve afectada la relación del objetivo 2 en una intersección al variar los largos de ciclo, incluir maniobras de virajes o al agregar efectos aleatorios.
- 4) Investigar la existencia del MFD en una intersección semaforizada real.

### **1.3 Alcances de la investigación**

Esta investigación se centrará en una única intersección semaforizada para el análisis, y no un eje semaforizado. Esta intersección no tendrá presencia de transporte público, por lo tanto no se estudiará el efecto del tráfico mixto. Las vías de la intersección serán unidireccionales y las intersecciones adyacentes asumirán las mismas programaciones de semáforo.

### **1.4 Estructura de la tesis**

Esta tesis comprende otros cuatro capítulos. El segundo capítulo presenta el marco teórico, el cual contiene una revisión de la literatura asociada al diagrama fundamental macroscópico (MFD) y sus principales aplicaciones. Luego, el tercer capítulo desarrolla la metodología utilizada en la tesis, comenzando con el análisis espacio – temporal, continuando con el análisis de simulación en AIMSUN y finalmente con el análisis empírico. El cuarto capítulo contiene los principales los resultados de los tres análisis descritos anteriormente. Por último, el quinto capítulo presenta las conclusiones y las principales líneas futuras de investigación.

## 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica sobre la modelación macroscópica de ciudades mediante el diagrama fundamental macroscópico (MFD). En primer lugar, se describe el MFD y estudios experimentales probando su existencia. Luego, se analizan las condiciones para su existencia y cómo estas afectan su forma. Seguido a esto, se presentan las principales aplicaciones en el control de la congestión de ciudades mediante el MFD. Por último, se revisan trabajos recientes sobre su uso para el análisis de vías compuestas por intersecciones semaforizadas.

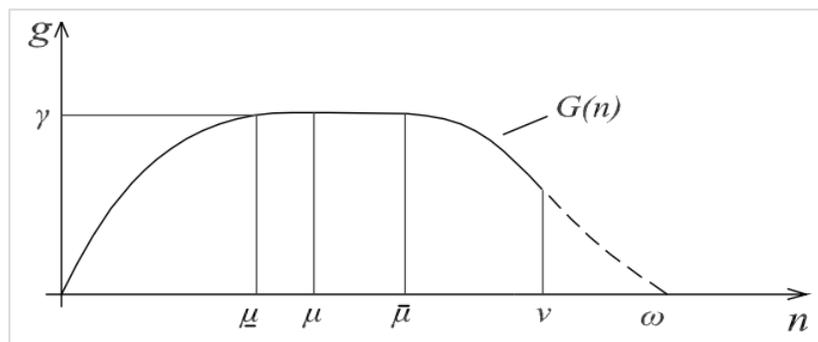
### 2.1 Diagrama fundamental macroscópico MFD

Esta herramienta surge con la motivación de contar con mejores modelos para el desarrollo y evaluación de políticas de transporte, además de mejorar la movilidad urbana y disminuir la congestión.

Daganzo (2007) propone manejar la congestión de una ciudad modelando el tráfico a un nivel agregado que sea independiente de datos de entrada detallados como la matriz de viajes OD. La idea básica es dividir la ciudad en zonas y cambiar el enfoque de realizar predicciones microscópicas a realizar control y monitoreo macroscópico. La ventaja de esto es que no es necesario conocer en detalle los patrones de viaje y los comportamientos particulares de los conductores.

El autor plantea la existencia de una relación entre el flujo que sale o termina su viaje al interior de la zona (*outflow*) y la cantidad de vehículos en circulación en ella (acumulación). En la ilustración 2-1 se observa esta relación teórica, donde  $G(n)$  es el *outflow* que se obtiene al tener una acumulación de  $n$  vehículos en la zona. En esta relación, existe un rango de acumulaciones que maximizan el *outflow* de la zona ( $n \in \{\underline{\mu}; \bar{\mu}\}$ ) y una acumulación máxima o de taco donde *outflow* es 0. La tasa de salida máxima está dada por  $\gamma$  y la acumulación de taco que impide la salida de los vehículos por

*gridlock* (completa congestión) es  $\omega$ . La máxima acumulación sustentable que puede ser alcanzada sin generar restricciones de salida en el sistema, corresponde a un punto arbitrario denominado  $\nu$ .



**Ilustración 2-1. Diagrama Fundamental Macroscópico Genérico. Fuente: Daganzo, 2007.**

Bajo estas condiciones, Daganzo (2007) propone que las dinámicas del sistema se pueden expresar en la siguiente ecuación diferencial de conservación.

$$\frac{dn}{dt} = f(t) - G(n), \quad t \geq 0 \quad (2.1)$$

Donde  $f(t)$  corresponde a la tasa de ingreso de vehículos a la zona (incluyendo viajes originados dentro de ella). Es decir, la tasa de cambio de la acumulación de vehículos es la diferencia entre las tasas de ingreso y egreso de vehículos a la zona. Finalmente, utilizando estas ideas el autor propone una estrategia de control que mantiene la operación del sistema cercana a la acumulación crítica que maximiza el *outflow*. Lo anterior, con el fin de evitar la congestión en casos de múltiples reservorios o zonas conectadas.

Geroliminis y Daganzo (2007) comienzan a validar estas ideas mediante el uso de simulación. Los autores estudian el comportamiento de esta relación macroscópica en la

red de San Francisco, Estados Unidos. Para ello, se plantea que la modelación macroscópica debe relacionar variables que cumplan los siguientes criterios (i) deben describir realísimamente la física de la congestión, (ii) deben estar altamente correlacionadas con el desempeño del sistema y (iii) deben ser medidas directamente en terreno y no deben ser filtradas por modelos (Geroliminis & Daganzo, 2007).

Las variables consideradas son las siguientes:

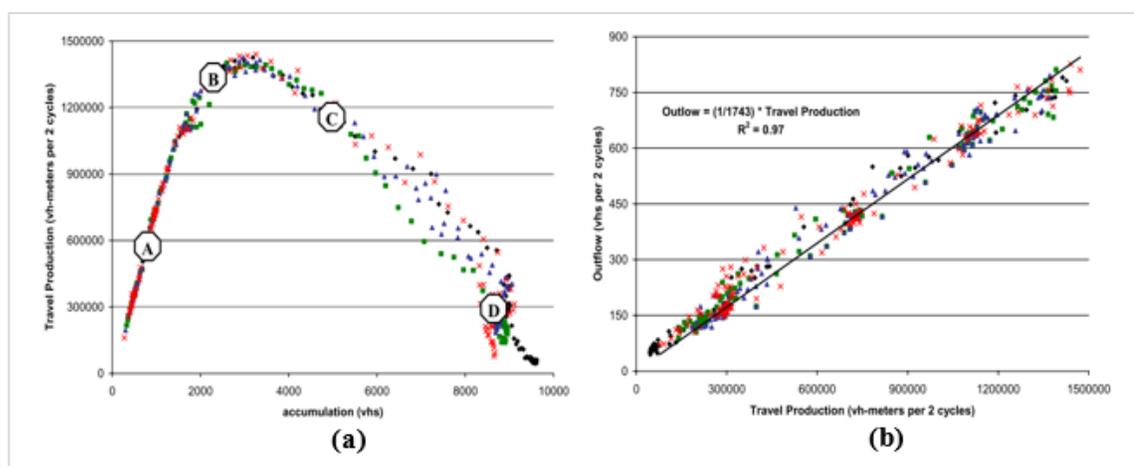
1. Acumulación  $n_i(t)$ : Es la cantidad de vehículos viajando en el arco  $i$  en el tiempo  $t$  (excluyendo los vehículos estacionados) [vehículos].
2. Producción  $P_i(t, t + \Delta t)$ : Es la distancia total recorrida por todos los vehículos que viajan en el arco  $i$  entre el tiempo  $t + \Delta t$  [vehículos – metros].
3. *Outflow*  $e_i(t)$ : Es la tasa a la que los viajes son terminados en el arco  $i$  [vehículos/hora].

Un punto importante es que las tecnologías existentes no permiten conocer con precisión el *outflow* en una red tan extensa. Sin embargo, los autores plantean que mediante la ecuación de Little es posible relacionar la producción total del sistema  $P$  con el *outflow* del sistema  $O$ , a través del largo promedio del viaje en la red  $\bar{L}$ .

$$\frac{O}{P} = \frac{1}{\bar{L}} \quad (2.2)$$

Mediante simulación, Geroliminis y Daganzo (2007) sugieren la existencia del MFD para la red de San Francisco. En la ilustración 2-2 (a) es posible observar el diagrama obtenido a partir de la relación entre la producción y la acumulación en la red. Este se comporta de manera similar a un diagrama fundamental tradicional para un arco. Primero, existe una rama de flujo libre en la cual al aumentar la cantidad de vehículos presentes en la red la producción aumenta hasta llegar a la capacidad del sistema. Luego, existe una rama de congestión la que al aumentar la acumulación de vehículos en la red la producción comienza a disminuir hasta llegar a un punto de *gridlock*. Las series de puntos representan distintas réplicas de la simulación realizada.

En la ilustración 2-2 (b) se comprueba la relación lineal de la ecuación (2.2). Por lo tanto, es posible utilizar la producción como *proxy* del *outflow* para la construcción del MFD. Este resultado, no es menor dada la dificultad de conocer esta segunda variable y la facilidad de conocer la producción con la ayuda de espiras o contadores en el arco. Al igual que la ilustración 2-2 (a) las series de puntos representan las distintas réplicas de simulación.



**Ilustración 2-2. (a) Diagrama Fundamental Macroscópico de la red de San Francisco obtenido mediante simulación. (b) Relación lineal entre el *Outflow* de la red y la Producción.**  
Fuente: Geroliminis y Daganzo, 2007.

Una conclusión importante de la investigación es que la congestión debe estar distribuida homogéneamente en la red analizada para que exista un MFD bien definido. De lo contrario, se observa mucha dispersión en la relación debido a los subcentros congestionados aisladamente. Además, cambios bruscos en la demanda pueden afectar directamente en el desempeño de algunas redes congestionadas (Daganzo, 1998), impactando en la forma del MFD.

Daganzo y Geroliminis (2008) estudian analíticamente el MFD para tráfico urbano. Mediante teoría varacional los autores analizan una calle compuesta por múltiples intersecciones y sin virajes, con el fin de obtener este diagrama de forma analítica y luego

extender los resultados a redes más complejas. Construyendo una serie de cortes (planos de la teoría varacional) encuentran una MFD teórico, el que corresponde a un límite superior al MFD real.

El estudio propone que redes que cumplen con (i) variación lenta en la demanda y distribuida homogéneamente en la red, (ii) una red redundante que asegura que los conductores tengan muchas opciones de ruta y la mayoría de los arcos están en rutas deseables, (iii) red homogénea con arcos similares y (iv) arcos con un diagrama fundamental aproximado que no se ve afectado de manera significativa por los virajes cuando el flujo es estacionario; son condiciones suficientes, pero no necesarias, para que el MFD encontrado mediante teoría varacional sea similar al real (Daganzo & Geroliminis, 2008). Finalmente, la metodología es probada en redes estudiadas previamente como la de San Francisco en Estados Unidos.

## **2.2 Evidencia empírica de la existencia del MFD**

Se han realizado investigaciones relacionadas con el estudio experimental de la existencia del MFD en ciudades del mundo. La motivación de estos trabajos es relajar los supuestos de las simulaciones realizadas y así incluir experimentos en terreno para contar con evidencia empírica de esta relación macroscópica.

Geroliminis y Daganzo (2008) analizan datos obtenidos en terreno para una zona triangular de  $10 \text{ km}^2$ , en la ciudad de Yokohama, Japón. En particular los datos utilizados por los investigadores provienen de espiras, las que entregan conteos y ocupaciones de vehículos cada 5 minutos, y dispositivos GPS de taxis de la ciudad que intentan replicar el comportamiento de un vehículo flotante.

En primer lugar, los autores evidencian la existencia del MFD para una subregión de la zona analizada, compuesta por los arcos que tienen espiras. Además, muestran la relación lineal de la ecuación (2.2) entre la productividad y la cantidad de viajes terminados en la red (solo consideran las espiras que bordean el perímetro de la zona para

obtener este flujo). Sin embargo, este último resultado no es concluyente, ya que un 30% de los viajes terminan al interior de la red.

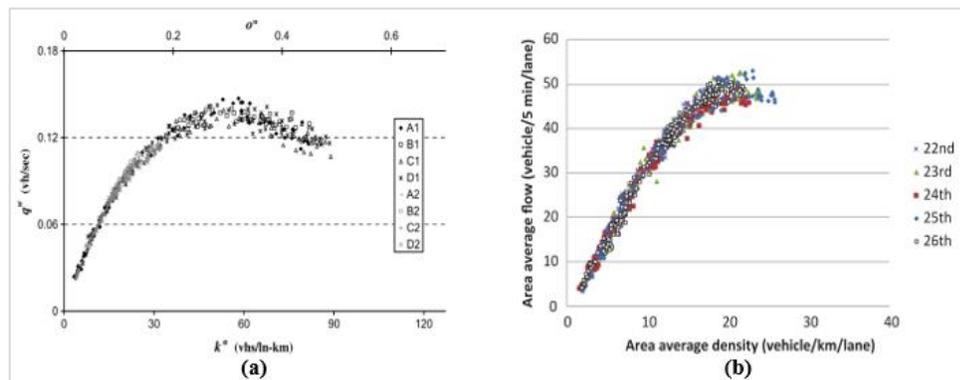
Seguido a esto, se utilizan los datos provenientes de GPS de los taxis para expandir los resultados obtenidos por la subregión cubierta por espiras, y así obtener el comportamiento de toda la zona de  $10 \text{ km}^2$ . La idea detrás, es utilizar un factor de expansión a partir de la cantidad de viajes de taxis. Para ello, consideraron aquellos viajes realizados por taxis ocupados por pasajeros. Estos viajes deben ser representativos de los viajes en auto respecto a las velocidades promedio (paradas de taxis que no se deben a congestión son filtradas) y a las distancias viajadas por viaje terminado. A partir de estos análisis, los investigadores construyen el MFD de la zona como se muestra en la ilustración 2-3 (a).

Tsubota *et al* (2014) realizan una investigación similar en la que utilizan datos provenientes de espiras y tecnología *bluetooth* para construir el MFD de la ciudad de Brisbane, Australia. La ciudad está equipada con detectores *bluetooth* en todas sus intersecciones principales. Mediante un método conocido como CUPRITE utilizan la información proporcionada por los vehículos móviles captados por estos detectores para estimar la densidad en los arcos (definidos por detecciones consecutivas). La principal limitación de este enfoque es que los autos deben estar equipados con dispositivos *bluetooth* para ser captados y además existe una probabilidad de no ser detectado por la antena de la intersección.

Los autores encuentran un MFD bien definido para la ciudad utilizando los datos de las espiras y los vehículos móviles con *bluetooth*. Además, investigan la forma de esta relación macroscópica en distintas regiones que dividen la ciudad, encontrando diferencias en la acumulación que maximiza el *outflow*. Lo anterior sugiere que particionar la red de forma apropiada puede llevar a una mejor representación del desempeño de esta.

En la ilustración 2-3 se puede apreciar los MFD empíricos encontrados para la ciudad de Yokohama y Brisbane. Las series de datos representan los distintos días

analizados, lo que sugiere que la forma de esta relación en la zona de la ciudad es independiente a los patrones de demanda (Geroliminis & Daganzo, 2008).



**Ilustración 2-3. (a) Diagrama Fundamental Macroscópico encontrado en la ciudad de Yokohama.**

**(b) Diagrama Fundamental Macroscópico encontrado en la ciudad de Brisbane.**

**Fuente: (a) Geroliminis y Daganzo, 2008; (b) Tsubota *et al*, 2014.**

### 2.3 Condiciones de existencia y forma del MFD

Para entender el MFD es necesario conocer cómo se ve afectada esta relación bajo distintos escenarios. Las investigaciones se han enfocado en comprender el impacto que tiene por ejemplo la homogeneidad de la red, homogeneidad de las mediciones de tráfico, las dinámicas de tráfico y la demanda, en la forma de esta relación macroscópica.

Buisson y Ladier (2009) y Ji et al (2010) exploran el impacto de la heterogeneidad de la red en la existencia del MFD. La heterogeneidad se explica por las diferencias que existen entre las vías que la componen (diferencias de velocidad, largos, ubicación espiras, etc.) Ambas investigaciones consideran redes compuestas por autopistas, densas zonas centrales y dispersas zonas residenciales. El primer estudio se realiza en Toulouse, Francia y el segundo en Ámsterdam, Holanda.

En la primera investigación construyen el MFD a partir de los datos obtenidos de las espiras, analizando 3 días distintos en la red. A diferencia del estudio realizado en Yokohama por Geroliminis y Daganzo (2008) (espiras ubicadas 100 metros aguas arriba

de las intersecciones), las espiras están ubicadas a distancias variables de las intersecciones semaforizadas. Observan gran dispersión en uno de los días estudiados, confirmando que si no se cumplen los supuestos de homogeneidad planteados por Daganzo y Geroliminis (2008) hay un impacto directo en la forma del MFD (principalmente en la dispersión de los puntos observados). Para comprender el efecto de las distintas homogeneidades se realiza un análisis separado para ver el impacto en la forma de la relación macroscópica.

Los investigadores concluyen que en redes semaforizadas la distancia entre la espira y la intersección semaforizada tienen un fuerte impacto en las pendientes del MFD. Se sugiere construir este diagrama con espiras ubicadas homogéneamente (a distancias similares aguas arriba de las intersecciones) para reducir la dispersión de los puntos. Se confirman importantes diferencias en la forma del MFD en aquellas redes compuestas por autopistas. Por lo tanto, es importante dividir la ciudad en zonas que contengan el mismo tipo de vías para la construcción de la relación macroscópica. Finalmente, se observa el fenómeno de histéresis en el MFD cuando existe una evolución espacial heterogénea de la congestión. La histéresis sucede cuando en congestión se observan dos ramas para la relación entre el flujo y densidad (en este caso acumulación). Una es la de desaceleración cuando comienza la congestión y la otra es la de aceleración, que va por debajo de la anterior, cuando se vuelve a estados de tráfico de capacidad.

En el segundo estudio se investiga los efectos de la heterogeneidades en las condiciones de tráfico, diferentes tipos de redes y el impacto de cambios drásticos en las demandas de tráfico sobre la forma del MFD mediante micro-simulación con el *software* VISSIM. Al igual que en el estudio anterior, en primer lugar se evidencia la existencia de esta relación macroscópica entre *outflow* y acumulación, asumiendo la condición de homogeneidad en los estados de tráfico. Luego, se analiza el efecto de tener estrategias *ramp-metering* en rampas de entrada de las autopistas de la red, heterogeneidad en la distribución espacial de la congestión y aumentos bruscos en la demanda.

Las principales conclusiones del estudio son que los sistemas de control *ramp metering* tienen un impacto directo en la forma del MFD. La heterogeneidad en la

distribución espacial de la congestión genera el fenómeno de histéresis en la rama congestionada de la relación, tal como mostraban Buisson y Ladier (2008). Finalmente, los cambios drásticos y rápidos en la demanda tienen consecuencias notorias en el MFD. Decrecimientos rápidos en la demanda conllevan a usos ineficientes de los arcos; estos tienen mayor capacidad que la demanda, pero el *outflow* se mantiene bajo debido a la congestión del arco (Ji *et al*, 2010).

En la misma línea, Geroliminis y Sun (2011) investigan las propiedades que debe satisfacer una red para que un MFD con baja dispersión exista. En particular, se analiza la heterogeneidad en la distribución espacial de la congestión para la ciudad de Yokohama, lo que no había sido abordado anteriormente por la investigación de Geroliminis y Daganzo (2008).

Los autores desarrollan una medida analítica para observar la distribución espacial de los vehículos en la red. Se plantea la hipótesis de que si la distribución espacial de la ocupación en los arcos es la misma para dos intervalos diferentes de tiempo con la misma ocupación promedio en la red, entonces estos dos intervalos de tiempo deben tener el mismo flujo promedio (Geroliminis & Sun, 2011). En otras palabras, en el plano de un MFD estos puntos son cercanos entre sí. Si lo anterior se expresa matemáticamente se debe cumplir que:

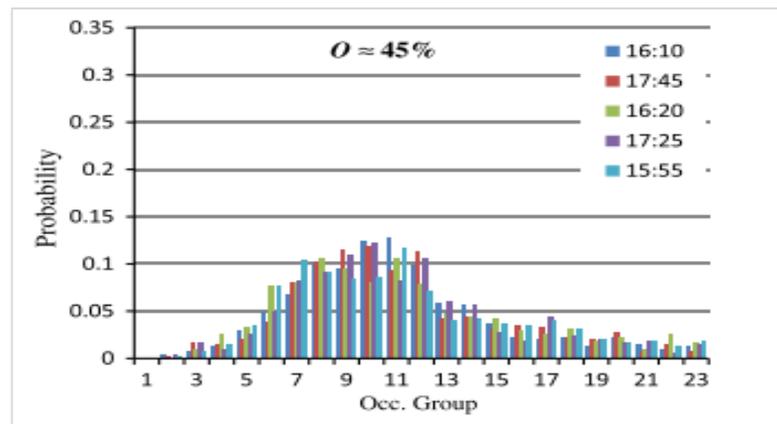
$$\{Q(t_1) = Q(t_2) \text{ y } O(t_1) = O(t_2)\} \leftrightarrow d_r(t_1) \sim d_r(t_2) \quad (2.3)$$

Donde  $Q(t)$  corresponde al flujo promedio de todas las espiras de la red durante el intervalo de tiempo  $t$ ,  $O(t)$  corresponde a la ocupación promedio de todas las espiras de la red durante el intervalo de tiempo  $t$  y  $d_r(t)$  corresponde a la función de densidad de probabilidades de la ocupación de todas las espiras individuales en el intervalo de tiempo  $t$  en la región  $r$ .

Al observar las distribuciones  $d_r(t)$  para la ciudad de Yokohama, se observa que la congestión no está distribuida homogéneamente en la red (ver ilustración 2-4), ya que existen partes más atochadas que otras. Sin embargo, los autores realizan test estadísticos

para comparar las distribuciones  $d_r(t)$  para intervalos de tiempo distintos que tienen la misma ocupación promedio en la red. A partir de estos test concluyen que las distribuciones son estadísticamente iguales. Lo anterior permite inferir que la distribución homogénea de la congestión no es una condición necesaria para un MFD bien definido, relajando el supuesto original planteado por Geroliminis y Daganzo (2007). Adicionalmente, se concluye que la ecuación (2.3) se cumple en un MFD bien definido.

De igual forma, se realiza un análisis similar en la autopista de Twin Cities, Estados Unidos. Los resultados obtenidos en este análisis evidencian lo encontrado en estudios anteriores, observando el fenómeno de histéresis en la forma del MFD. Las distribuciones  $d_r(t)$  para intervalos de tiempo distintos que tienen la misma ocupación promedio en la red no son estadísticamente iguales. Por lo tanto, no es posible observar un MFD bien definido. En la ilustración 2-4 se observa las distribuciones  $d_r(t)$  para distintos intervalos de tiempo cuando la ocupación promedio de la red es de 45%. La ocupación toma valores de 0% a 100% los que se discretizan en 23 grupos.



**Ilustración 2-4. Histogramas de la distribución  $d_r(t)$  para la ciudad de Yokohama cuando existe una ocupación promedio de 45% en la red. Fuente: Geroliminis y Sun, 2011.**

Girault *et al* (2016) analizan el impacto que puede tener la coordinación semafórica de la red en la forma del MFD. Para ello utilizan el software de micro simulación

AIMSUN con el fin de evaluar cómo afectan siete estrategias de coordinación a la relación macroscópica de la red. La red considerada es una red del tipo Manhattan de 10 x 10. Además, se analizan cuatro tipos de demanda (i) demanda uniforme, (ii) demanda de una dimensión y unidireccional, (iii) demanda de una dimensión y bidireccional, y (iv) demanda de dos dimensiones y unidireccional. Se consideran tres largos de ciclo semafórico 60, 90 y 120 segundos.

Las siete estrategias de coordinación evaluadas por los autores son (i) simultánea, es decir, todas las intersecciones tienen desfase cero, (ii) alternada, es decir, las intersecciones adyacentes tienen un desfase igual a la mitad del largo de ciclo, (iii) doble alternada, similar a la anterior pero la alternación se realiza cada par de intersecciones, (iv) banda de verde en una dimensión, corresponde al uso de desfases iguales al tiempo de viaje a flujo libre en una dimensión (por ejemplo norte sur), (v) banda de verde en dos dimensiones, similar a la anterior pero se realiza en las dos dimensiones perpendiculares, (vi) banda máxima, desfase que permite que los vehículos que viajan en direcciones opuestas en la misma dimensión tengan el máximo derecho a paso, y (vii) *random*, por lo tanto se establecen desfases aleatorios entre las intersecciones.

Finalmente, los investigadores concluyen que los impactos en la forma del MFD, son altamente dependientes del largo del ciclo. Estrategias de coordinación pueden tener un efecto diferente si se considera un largo de ciclo distinto. No obstante, se observó que la estrategia *random* siempre tiene el peor desempeño, disminuyendo la capacidad del MFD. Las simulaciones mostraron que las estrategias de prioridad direccional (iv, v y vi) no mejoran el desempeño de la red si se comparan con la estrategia simultánea (desfase cero para todas las intersecciones). Por lo tanto, la forma de la relación macroscópica es similar.

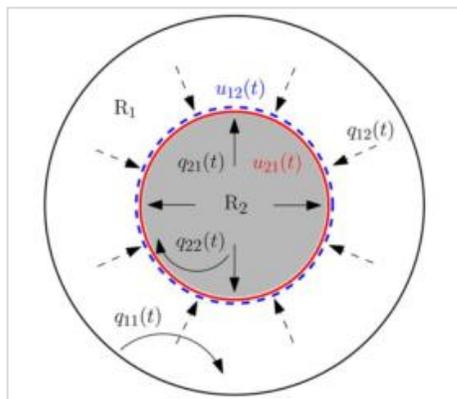
## **2.4 Aplicaciones del MFD para el control y monitoreo de redes**

El propósito inicial del MFD era contar con una herramienta de gestión para el control y monitoreo de redes. Numerosas son las investigaciones realizadas en este campo

con el fin de mantener una operación óptima de las redes de transporte y así mejorar la movilidad y disminuir la congestión.

Geroliminis *et al* (2012) formulan un control perimetral óptimo entre dos zonas de una ciudad mediante el uso del MFD. El objetivo es controlar los flujos de transferencia entre las zonas con el fin de que el *outflow* de ambas zonas sea maximizado. Las dos propiedades de esta relación que permiten formular estas estrategias son (i) que permite observar el estado de operación del sistema a través de la acumulación en la red y (ii) que su forma no es sensible a diferentes patrones de demanda, es decir, no es necesario conocer en detalle las matrices O-D.

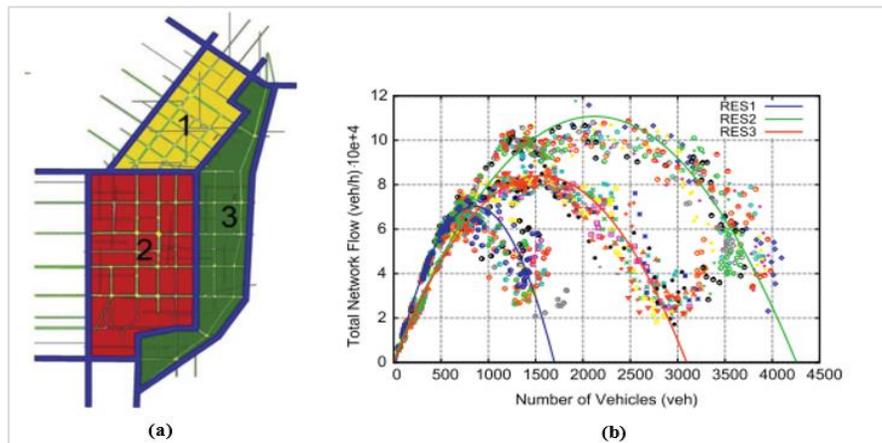
Los autores plantean un modelo de control predictivo (MPC) basado en las dinámicas de estas dos regiones concéntricas y sus respectivos MFD. Para comparar el desempeño de la estrategia MPC utilizan también un control del tipo *greedy*. Este último se basa en cambios discretos en los flujos de transferencia al observar las acumulaciones existentes en las regiones de la red. Finalmente, evalúan las estrategias en numerosos escenarios y obtienen que el control MPC es siempre mejor que el enfoque *greedy*. Concluyen que esta diferencia se incrementa a medida que la red comienza a estar más congestionada observando mayores ahorros en los tiempos de viaje.



**Ilustración 2-5. Sistema de dos regiones con MFD utilizado para la estrategia de control.**  
Fuente: Geroliminis *et al*, 2012.

En la ilustración 2-5 se observa la situación modelada, donde  $R_i$  indica la zona  $i$ ,  $u_{ij}$  representa el flujo de transferencia a controlar desde la zona  $i$  a la zona  $j$  y  $q_{ij}$  la demanda desde la zona  $i$  a la zona  $j$ .

Siguiendo esta línea Aboudalas y Geroliminis (2013) plantean un modelo matemático de control perimetral para redes heterogéneas con múltiples zonas. La motivación consiste en que una red heterogénea puede ser particionada en múltiples regiones con el fin de mantener la homogeneidad en cada una de ellas, en las densidades de sus arcos. El objetivo es controlar el flujo de transferencia entre estas regiones con el fin de que el *outflow* del sistema se maximice. Para probar el modelo matemático planteado se simula el centro de San Francisco mediante AIMSUN. Los autores concluyen que el enfoque utilizado mantiene un alto desempeño de la red y reducen significativamente el efecto de histéresis en el MFD. Además, el control desarrollado no requiere alto esfuerzo computacional y predicciones de demanda si el estado actual de la red puede ser observado.



**Ilustración 2-6. (a) Regiones consideradas para la modelación del centro de San Francisco. (b) MFD de las 3 regiones consideradas. Fuente: Aboudalas y Geroliminis, 2013.**

Estrategias de tarificación vial usando el MFD también han sido estudiadas. Zheng *et al* (2012) investigan la aplicación de un esquema de tarificación vial por cordón

utilizando esta relación macroscópica y un modelo de tráfico basado en agentes. La motivación consiste en evitar estados de congestión del MFD utilizando sistemas de tarificación, es decir, que los usuarios internalicen la externalidad generada. Los autores concluyen que los ahorros en tiempos de viaje superan a los costos de los peajes en el cordón. También, muestran como la congestión al interior del cordón es aliviada y no se genera congestión adicional fuera de él.

## **2.5 Aplicaciones para el análisis y control de intersecciones semaforizadas**

Para el análisis de intersecciones se han desarrollado diversas metodologías con el fin de mejorar la operación en ellas. Akçelik (1981) resume una serie de herramientas para el estudio y diseño de intersecciones semaforizadas tales como: grado de saturación, identificación del movimiento crítico, número de paradas, etc. Años más tarde, Akçelik y Roupail (1993) proponen una metodología para obtener las demoras de los vehículos en una intersección semaforizada para condiciones de demanda variable. La principal desventaja de los indicadores mencionados en ambos estudios es que no captan la dinámica de la propagación de la congestión. Por lo tanto, son descartados para el análisis de intersecciones semaforizadas que se desarrolla en esta investigación.

Tal como se mencionó en la sección 2.3, Girault *et al* (2016) exploran el uso del MFD para la coordinación semafórica en redes. Sin embargo, recientemente se han desarrollado investigaciones centradas en la aplicación del MFD en la coordinación de vías con intersecciones semaforizadas. La motivación es coordinar los desfases entre las intersecciones de la vía con el fin de disminuir las demoras en el eje.

Daganzo y Lehe (2016) investigan la existencia del MFD para un eje unidireccional de intersecciones semaforizadas, con programaciones semafóricas fijas y arbitrarias. El objetivo del estudio es formular una metodología alternativa al método de los cortes de teoría varacional de Daganzo y Geroliminis (2008), basándose en programación lineal. De esta forma se estudia el impacto de distintas geometrías de la calle y programaciones

semafóricas en la forma del MFD, lo que permite optimizar las últimas para obtener el mejor desempeño.

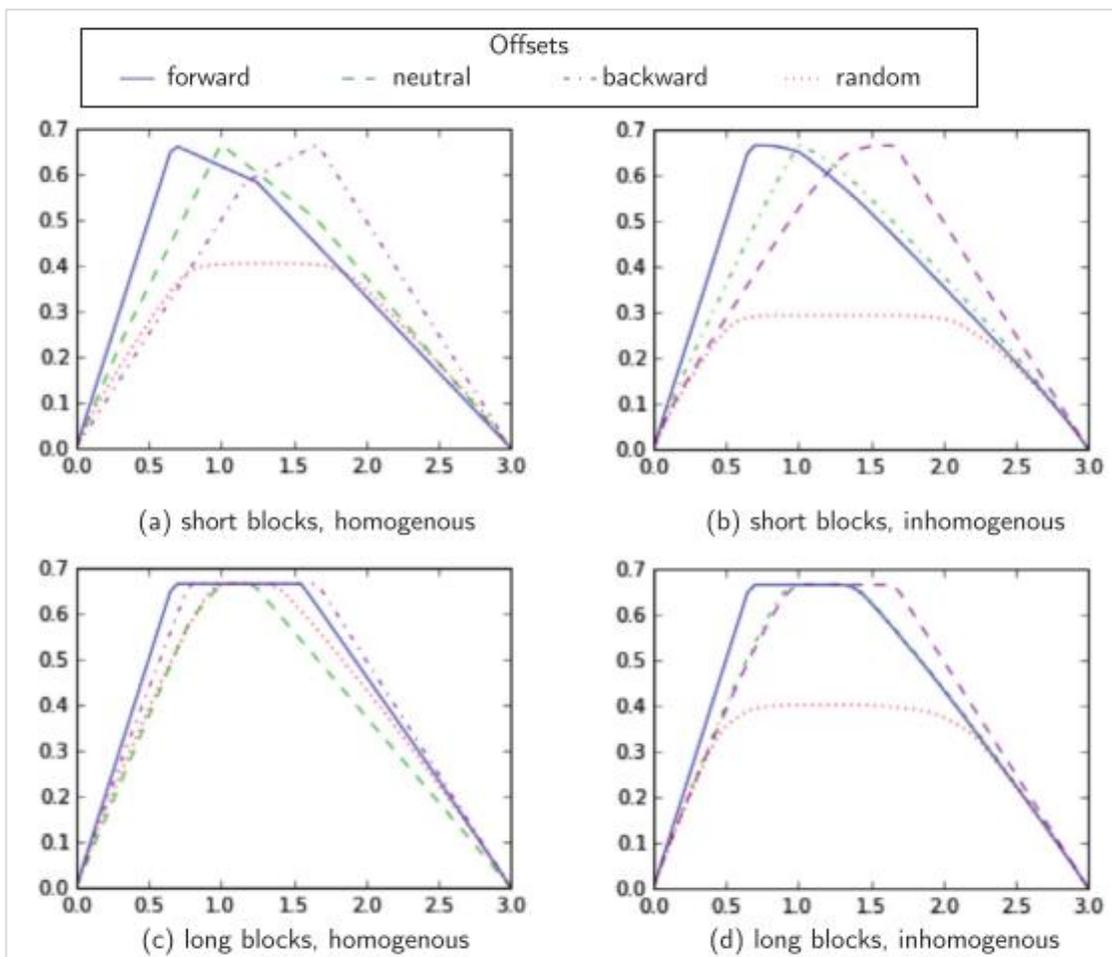
Los autores, asumen que las vías están compuesta por múltiples intersecciones unidireccionales con un único sentido, los autos se comportan de acuerdo a la teoría de las ondas cinéticas o modelo LWR (Lighthill y Whitham, 1955; Richards, 1956) y que el diagrama fundamental que relaciona el flujo y la densidad de los arcos es triangular como propone Newell (1993).

En primer lugar, los investigadores muestran como la aproximación del método de los cortes genera resultados erróneos cuando se tienen problemas heterogéneos. En particular, se investiga como los largos de cuadra variables entre intersecciones y diferentes programaciones del semáforo generan resultados muy distintos al utilizar el método planteado por Daganzo y Geroliminis (2008).

Luego, se formula el problema matemático de programación lineal para obtener el MFD a partir de la geometría de la vía y las programaciones semafóricas. Usando esta formulación se prueban escenarios definidos por variados largos de cuadra entre intersecciones (largos o cortos - homogéneos o heterogéneos) y diferentes desfases entre las intersecciones semaforizadas (definen el control del semáforo).

Los enfoques de desfases considerados fueron *forward* el que establece un desfase basado en la velocidad de un observador a flujo libre, el neutral establece un desfase igual a 0 segundos, *backward* considera un desfase basado en la velocidad de un observador en congestión y *random* considera alternativas aleatorias. En la ilustración 2-7 se resumen los resultados obtenidos en Daganzo y Lehe (2016).

Los autores concluyen que el desempeño de coordinación aleatoria de desfases es la peor observando las menores capacidades del MFD. Sin embargo, para el escenario de arcos largos entre intersecciones y homogéneos (mismo largo) todos los enfoques de desfases presentan un desempeño similar. En general, el enfoque *forward*, *backward* y neutral llegan a las mismas capacidades en el MFD. No obstante la densidad a la que se produce el máximo *outflow* varía para los casos de arcos cortos (homogéneos o heterogéneos).

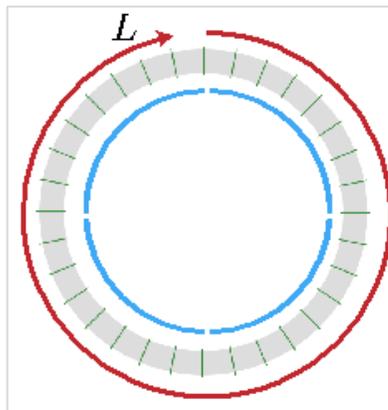


**Ilustración 2-7. MFD de los escenarios evaluados de cuatro geometrías de la vía y cuatro esquemas de desfases. Fuente: Daganzo y Lehe, 2016.**

Daganzo *et al* (2017), inspirados por los resultados obtenidos en la investigación anterior, buscan generar un esquema de coordinación dinámica de intersecciones a partir de los desfases entre ellas. En particular el objetivo es incrementar el *outflow* de la vía analizada durante la hora punta y reducir la probabilidad de embotellamiento o *gridlock*.

El sistema considerado es un anillo unidireccional de ciclo cerrado compuesto por 32 intersecciones cuyos arcos son del mismo largo, poseen la misma programación semafórica y los virajes no son considerados. Al igual que el estudio anterior, se asume que los autos se comportan de acuerdo a la teoría de las ondas cinéticas o modelo LWR

(Lighthill y Whitham, 1955; Richards, 1956) y el diagrama fundamental que relaciona el flujo y la densidad de los arcos es triangular como propone Newell (1993).



**Ilustración 2-8. Sistema de anillo unidireccional de ciclo cerrado analizado.**  
Fuente: Daganzo *et al*, 2017.

Los esquemas de desfases analizados son *backward* y *forward* (fijas en el tiempo) y un enfoque adaptativo basado en la densidad promedio de la sección: si esta excede un valor crítico los desfases de dicha sección se establecen como *backward*; en caso contrario los desfases se establecen como *forward*. Los escenarios planteados por los autores se definen en base a tres parámetros: (i) la cantidad de secciones en que se divide la vía analizada, (ii) la frecuencia con que se revisan las densidades promedio en las secciones (medida en cantidad de ciclos por revisión) y (iii) el largo de la vía analizada.

Los investigadores simulan mediante el modelo CAM (*celular automaton – memory*) formulado por Daganzo (2006). Finalmente, se concluye que la estrategia adaptativa supera a las estrategias estáticas (*forward* y *backward*), en especial cuando se considera una única sección para toda la vía. Por otro lado, la frecuencia con que se revisa y se producen los cambios de programaciones no tiene un impacto significativo en el desempeño. En general, la estrategia adaptativa muestra que hay reducciones en la

probabilidad de formación de *gridlock* y también disminuye los tiempos de espera en la vía analizada.

Las extensiones que se proponen para esta investigación se resumen en la tabla 2-1. Para el estudio de intersecciones semaforizadas, en esta tesis se realizará un análisis espacio – temporal mediante el modelo LWR para obtener el MFD. Para relajar los supuestos más fuertes del modelo LWR se utilizará el *software* de simulación AIMSUN. Se realizará un experimento empírico para observar la existencia de esta relación en la realidad. Se establecerá un marco teórico para la coordinación semafórica mediante el uso del MFD y el monitoreo de la acumulación presente en la intersección. Se añadirá al análisis la presencia de una vía transversal en la intersección, es decir, se estudiarán ambos sentidos (a diferencia de estudios previos para una vía unidireccional con único sentido). Se analizará el efecto de los virajes y del largo de ciclo, en la relación macroscópica y en la coordinación de desfases semafóricos. Esta investigación se centra en una sola intersección y las intersecciones adyacentes a ella, a diferencia de los estudios presentados de ejes semaforizados.

**Tabla 2-1. Resumen de la revisión bibliográfica en el uso del MFD para análisis de vías semaforizadas. Fuente: Elaboración Propia.**

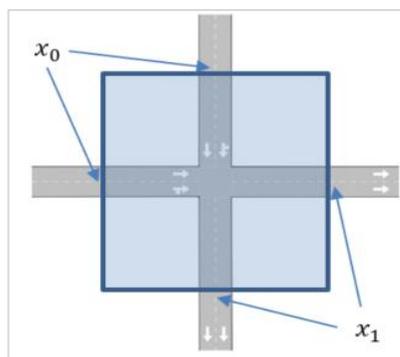
| Investigación                | MFD                                 | Coordinación<br>Desfases / Enfoque            | Vía<br>Transversal | Análisis<br>Virajes | Análisis<br>Ciclos | Intersecciones<br>consideradas |
|------------------------------|-------------------------------------|---|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|
| <b>Daganzo y Lehe (2016)</b> | Analítico                           | Analítico / Estático                          | No                 | No                  | No                 | $M > 1$                        |
| <b>Daganzo et al (2017)</b>  | Analítico                           | Simulación / Estático<br>y Preventivo         | No                 | No                  | No                 | 32                             |
| <b>Esta Investigación</b>    | Analítico<br>Simulación<br>Empírico | Analítico / Reactivo<br>Simulación / Reactivo | Si                 | Si                  | Si                 | 1                              |

### 3 METODOLOGÍA

El objetivo de este capítulo es describir los aspectos metodológicos de los diferentes enfoques utilizados para analizar la operación de una intersección semaforizada. Lo anterior, para estudiar la existencia de un MFD a nivel de intersección y explorar su uso en la coordinación semafórica. En primer lugar, se define la intersección semaforizada analizada. Luego, se indagará en el análisis teórico de la intersección basado en el modelo LWR. Posterior a esto, se describirá la simulación realizada cuyo fin es relajar los principales supuestos del análisis teórico y así estudiar escenarios más complejos. Finalmente, se caracteriza el experimento empírico realizado en una intersección de Santiago de Chile para estudiar el MFD en la realidad.

#### 3.1 Definición del sistema analizado

La intersección a analizar se muestra en la ilustración 3-1. Esta consta de dos accesos unidireccionales con dos pistas cada uno de ellos. Se considera que cada acceso tiene el largo aproximado de una cuadra, es decir, 100 metros. Además, en las vías no circula transporte público con el fin de considerar vehículos con un mismo comportamiento.



**Ilustración 3-1. Intersección semaforizada analizada mediante el modelo LWR y simulación.  
Fuente: Elaboración Propia.**

La zona analizada para determinar la acumulación y *outflow* de la intersección corresponde al cuadrado azul en la ilustración 3-1, el cual pasa por el punto medio de los arcos de acceso (posición  $x_0$ ) y egreso (posición  $x_1$ ).

### 3.2 Análisis espacio – temporal mediante modelo LWR

En esta subsección primero recordaremos brevemente la teoría de las ondas cinéticas o modelo LWR. Luego, se analizará la intersección descrita en la sección 3.1 en las diferentes situaciones de tráfico en las que puede operar (flujo libre, capacidad y congestión).

#### 3.2.1 Teoría de las ondas cinéticas LWR

Esta teoría fue desarrollada por Lighthill y Whitham (1955); Richards (1956) y permite comprender cómo se propagan los cambios en los estados de tráfico en el espacio y tiempo. Los investigadores se basan en el comportamiento de fluidos para modelar los flujos vehiculares. La hipótesis fundamental de esta teoría es que existe una relación entre el flujo de la calle y la densidad existente en esta, lo que se conoce como diagrama fundamental. Esto implica, que cambios en los estados de tráfico se propagan en el tiempo y espacio a través de una onda cinemática, cuya velocidad  $u_{ab}$  está dada por la ecuación (3.1).

$$u_{ab} = \frac{q_a - q_b}{k_a - k_b} \quad (3.1)$$

Donde  $q_a$  y  $k_a$  es el flujo y la densidad, respectivamente, aguas arriba de la perturbación,  $q_b$  y  $k_b$  es el flujo y la densidad, respectivamente, aguas abajo de la perturbación.

El modelo LWR permite entender de mejor forma el fenómeno de propagación de la congestión y considera que las colas ocupan un lugar físico en el espacio. Estas son las principales razones para utilizar este modelo en el análisis espacio – temporal propuesto. No obstante, el uso de este modelo requiere información como el diagrama fundamental que rige en cada arco.

A partir de este modelo se utilizará el diagrama  $x - t$  para identificar los estados de tráfico que se generan en la intersección. Esto permitirá extraer las variables de interés al momento de construir el MFD. Las principales limitaciones del modelo son que: (i) considera que los vehículos tienen aceleración o desaceleración infinita, (ii) todos los vehículos mantienen su velocidad, espaciamiento y *headway* constante para un mismo estado de tráfico, (iii) no considera efectos estocásticos en el sistema, (iv) no considera interacciones entre los vehículos en eventuales cambios de pista y (v) no incorpora comportamientos diferentes por tipos de conductores.

### 3.2.2 Consideraciones previas

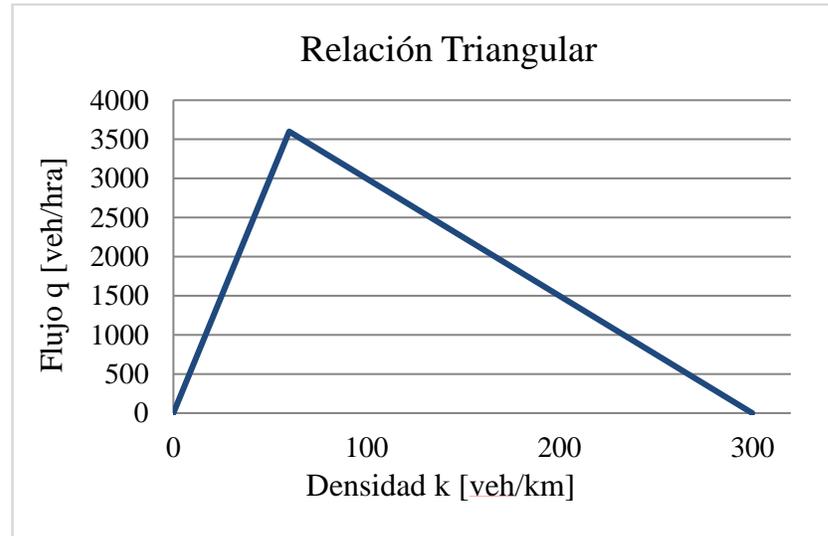
La intersección analizada es la descrita en la sección 3.1. No obstante, esta tiene particularidades adicionales que serán descritas a continuación. En primer lugar, se considera que la intersección no tiene largo físico, porque los vehículos no pueden detenerse en ella. Esto simplifica el análisis, ya que no existirán bloqueos de un arco al otro. Es decir, es posible trabajar cada arco como dos arcos independientes. Además, no se considerarán virajes en la intersección.

Al igual que en Daganzo y Lehe (2016) y en Daganzo *et al* (2017), se asume que los vehículos se comportan de acuerdo a la teoría de ondas cinéticas (descrita en la sección 3.2.1) y que la relación flujo – densidad de los arcos de la intersección es el diagrama fundamental triangular propuesto por Newell (1993).

Se asume la relación triangular que se muestra en la ilustración 3-2, y que matemáticamente es de la siguiente forma:

$$q(k) = \begin{cases} 60 \cdot k & \text{Si } 0 \leq k \leq 60 \\ -15 \cdot (k - 300) & \text{Si } 60 < k \leq 300 \end{cases} \quad (3.2)$$

Así, la velocidad a flujo libre es 60 kilómetros por hora (velocidad máxima permitida en una vía urbana aproximadamente), la capacidad es 3.600 vehículos por hora (por tener dos pistas) y la densidad de taco es 300 vehículos por kilómetro (asumiendo largo promedio de cinco metros y una separación de un metro aproximadamente entre vehículos consecutivos cuando están completamente detenidos).



**Ilustración 3-2. Diagrama Fundamental Triangular para cada arco de la intersección analizada.**  
Fuente: Elaboración Propia.

Las programaciones de semáforo asumen que el entre verde es de cuatro segundos completos de rojo - rojo. En este análisis se considerará un largo de ciclo de 60 segundos. Al tener solamente dos etapas se tiene que la pérdida por ciclo es de ocho segundos. El reparto corresponde a la definición de la duración de los tiempos de verde para cada etapa del semáforo.

Cada sentido de la intersección se analizó de forma separada. Para calcular la acumulación y el *outflow* se utilizaron las definiciones generalizadas de Edie (Edie, 1963),

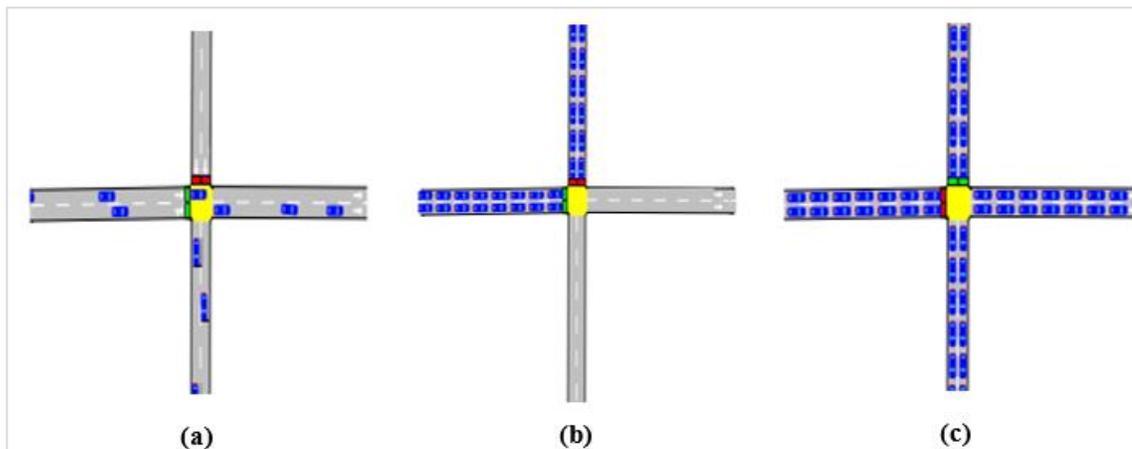
donde la ventana espacio temporal es de un ciclo en la zona estudiada de la intersección (cuadrado azul ilustración 3-1).

### 3.2.3 Análisis por casos

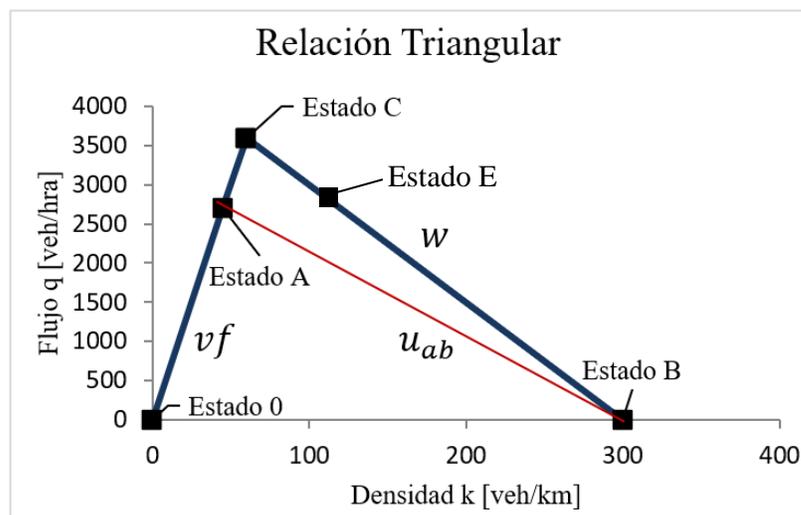
Para comprender las dinámicas que se producen en la intersección se analizan tres situaciones de tráfico en las que esta intersección puede operar: En la ilustración 3-3 se pueden observar la situaciones de tráfico descritas a continuación para la intersección.

- (i) Situación de flujo libre: corresponde a lo que ocurre cuando todos los vehículos que llegan en un ciclo pueden descargar en ese mismo ciclo, y existe tiempo de verde que no es usado. Esta situación es característica de las horas fuera de punta, y está representada por estados de tráfico donde al aumentar la acumulación también aumenta el *outflow* en la intersección.
- (ii) Situación de capacidad: corresponde a lo que ocurre cuando se observa cola aguas arriba de la intersección, pero la vía se encuentra despejada aguas abajo de la misma. Es decir, la intersección es el cuello de botella. En esta situación se observa la acumulación crítica (o un rango de ella) en la intersección que maximiza su *outflow*.
- (iii) Situación de congestión: corresponde a lo que ocurre cuando se observa cola tanto aguas arriba como aguas abajo de la intersección. Es decir, la descarga de la intersección se ve afectada por colas que se forman en intersecciones vecinas. Esta situación está representada por estados de tráfico donde al aumentar la acumulación disminuye el *outflow* de la intersección.

Por lo anterior, definimos los siguientes estados de tráfico de la relación fundamental en la ilustración 3-4. Estos nos permite identificar los estados de tráfico que se observaran en la ventana espacio – temporal analizada. Para analizar todas las situaciones se utilizó un software de cálculo matemático llamado Maple.



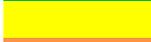
**Ilustración 3-3. (a) Situación de Flujo Libre. (b) Situación de Capacidad. (c) Situación de Congestión. Fuente: Elaboración Propia.**



**Ilustración 3-4. Diagrama Fundamental Triangular con los estados de tráfico que se analizan en las secciones siguientes. Fuente: Elaboración Propia.**

En la tabla 3-1 se establece la nomenclatura de colores que se utilizará para definir cada estado de tráfico en los diagramas espacio temporales de cada caso estudiado.

**Tabla 3-1. Estados de tráfico provenientes del diagrama fundamental de los arcos de la intersección, los cuales se analizarán en las secciones siguientes. Fuente: Elaboración Propia.**

| Estado i     | Color  |
|--------------|--|
| Estado 0     |  |
| Estado A o E |  |
| Estado C     |  |
| Estado B     |  |

### 3.2.3.1 Flujo Libre

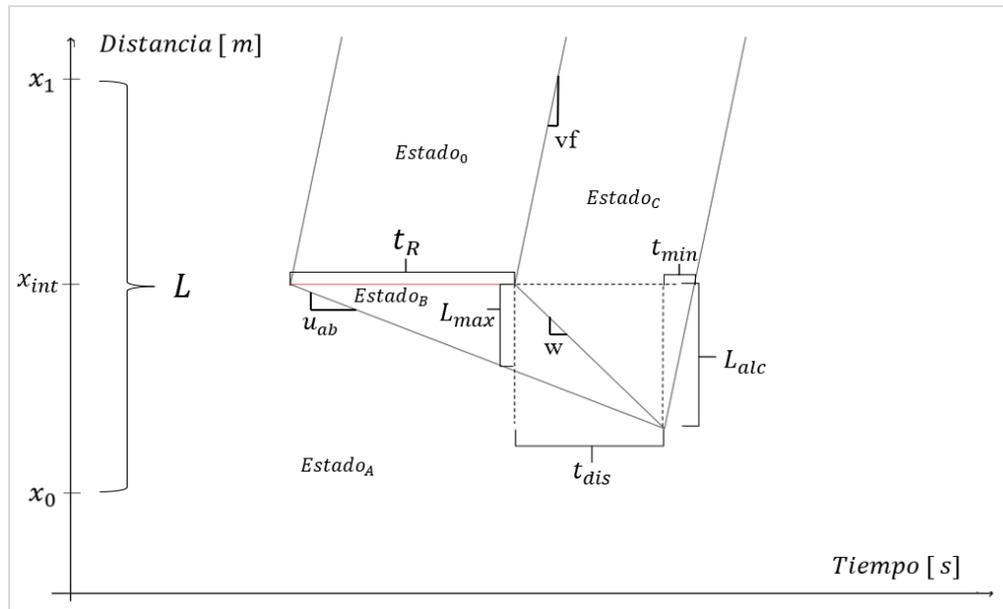
Esta situación está representada por niveles de demanda bajos respecto a la capacidad de la intersección (3.600 vehículos por hora por sentido aproximadamente). Se consideraron nueve niveles de demanda de la intersección, es decir, nueve estados A. Esta situación se caracteriza por la ausencia de colas remanentes entre ciclos semafóricos. En la tabla 3-2 se presentan los nueve estados A considerados en este análisis.

**Tabla 3-2. Estados de tráfico A considerados para el análisis de flujo libre. Fuente: Elaboración Propia.**

| Estado A | Flujo [veh/hra] |
|----------|-----------------|
| 1        | 150             |
| 2        | 350             |
| 3        | 550             |
| 4        | 700             |
| 5        | 850             |
| 6        | 1.000           |
| 7        | 1.100           |
| 8        | 1.250           |
| 9        | 1.400           |

En la ilustración 3-5 se presenta el análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de esta situación. La posición  $x_0$  y  $x_1$  representa el punto de observación a mitad

de cuadra aguas arriba y abajo de la intersección, respectivamente (es decir  $\pm 50$  metros). El punto  $x_{int}$  representa la posición física de la intersección.



**Ilustración 3-5. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (i) en un solo sentido de la intersección. Fuente: Elaboración Propia.**

La onda de choque con velocidad  $u_{ab}$  se produce por el cambio de estado entre el flujo que llega a la intersección (Estado A) y el estado de tráfico por estar la luz roja del semáforo (Estado B). Esta velocidad se puede determinar fácilmente según la ecuación (3.1). La onda  $v_f$  y  $w$  corresponden a la velocidad de flujo libre y congestión respectivamente, asumidas en la relación triangular del arco. El tiempo  $t_R$  corresponde a la duración del rojo del semáforo para dicho sentido. La distancia  $L$  representa el largo de un arco de la intersección.

El largo de cola máximo  $L_{max}$  (en unidades de distancia), tiempo de disipación de la cola  $t_{dis}$ , alcance de la cola  $L_{alc}$  (en unidades de distancia) y tiempo mínimo para que el último vehículo de la cola alcance a pasar la intersección  $t_{min}$  vienen dados por las siguientes expresiones:

$$L_{max} = |u_{ab}| \cdot t_R \quad (3.3)$$

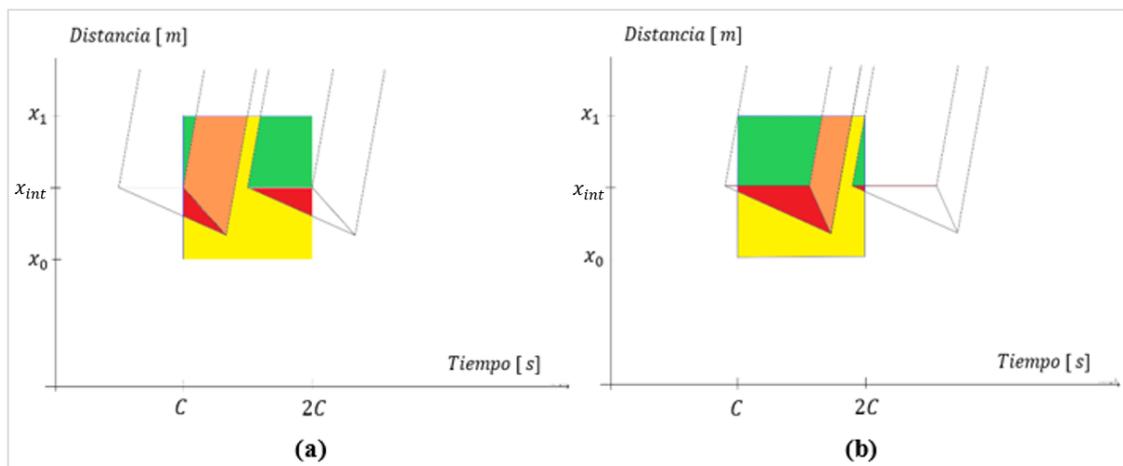
$$t_{dis} = \frac{L_{max}}{|w| - |u_{ab}|} \quad (3.4)$$

$$L_{alc} = t_{dis} \cdot |w| \quad (3.5)$$

$$t_{min} = \frac{L_{alc}}{vf} \quad (3.6)$$

Es importante destacar que esta situación se mantendrá mientras no exista cola remanente entre ciclos del semáforo para ambos sentidos. Para ello se debe cumplir que la cola se tiene que disipar y el último vehículo en llegar a esta debe alcanzar a cruzar la intersección en el verde asignado a ese sentido. En las situaciones analizadas se procuró cumplir esta relación para los verdes efectivos de cada sentido.

$$t_{dis} + t_{min} \leq Vef \quad (3.7)$$



**Ilustración 3-6. Estados de tráfico presentes en la intersección durante un ciclo (a) sentido norte- sur y (b) sentido oeste- este. Fuente: Elaboración Propia.**

En la ilustración 3-6 se muestra el análisis simultáneo de ambos sentidos, donde es posible observar los distintos estados de tráfico presentes en la intersección en la situación a flujo libre durante un ciclo. El área representa la ventana espacio temporal utilizada para el análisis (un ciclo del semáforo en la zona definida en la ilustración 3-1). Es interesante notar que las áreas coinciden con figuras geométricas fáciles de calcular. Para cada acceso, las áreas de cada estado se calculan de la siguiente forma, donde C corresponde al largo del ciclo semafórico y L al largo de la cuadra considerada (en este caso 100 metros).

$$\text{Área}_{\text{estado } 0} = t_R \cdot \frac{L}{2} \quad (3.8)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } B} = \frac{t_R \cdot L_{alc}}{2} \quad (3.9)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } C} = \frac{(t_{dis} + t_{min}) \cdot (L_{alc} + L)}{2} \quad (3.10)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } A} = C \cdot L - (\text{Área}_{\text{estado } 0} + \text{Área}_{\text{estado } B} + \text{Área}_{\text{estado } C}) \quad (3.11)$$

La densidad promedio por sentido en este caso se calcula según la ecuación (3.12). La acumulación por sentido se obtiene multiplicando (3.12) por el largo de la cuadra L. Finalmente, la suma de las acumulaciones por sentido corresponde a la acumulación total de la intersección.

$$\text{Densidad Promedio}_{\text{sentido}} = \frac{\text{Área}_{\text{estado } 0} \cdot k_0 + \text{Área}_{\text{estado } A} \cdot k_A + \text{Área}_{\text{estado } B} \cdot k_b + \text{Área}_{\text{estado } C} \cdot k_c}{C \cdot L} \quad (3.12)$$

En el caso del *outflow* promedio por sentido se calcula según la ecuación (3.13). Este corresponde al flujo promedio de salida de la zona analizada, es decir, el flujo promedio observado 50 metros aguas debajo de la intersección en un ciclo (posición  $x_1$  de

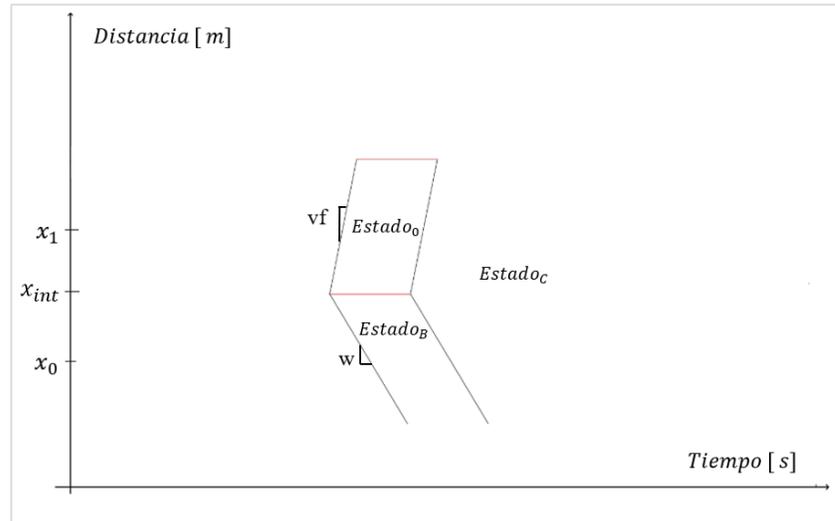
la ilustración 3-1). Finalmente, la suma de los *outflow* por sentido corresponde al *outflow* total de la intersección..

$$Outflow\ Promedio_{sentido} = \frac{(t_{dis} + t_{min}) \cdot q_C + (V_{ef} - t_{dis} - t_{min}) \cdot q_A}{C} \quad (3.13)$$

Una vez definido esto, se probaron ocho distintos repartos de verdes del semáforo (sin variar el ciclo) para determinar su efecto en la acumulación promedio en un ciclo en la intersección. El objetivo era obtener una relación entre la acumulación y la proporción entre los verdes efectivos de las etapas semaforicas.

### 3.2.3.2 Capacidad

Esta situación está representada por niveles de demanda que exceden la capacidad de la intersección y por condiciones de flujo libre aguas abajo de ella. Esta situación se caracteriza porque se observa constantemente una cola aguas arriba de la intersección, pero la vía se encuentra despejada aguas abajo de la misma. Es decir, la intersección es el cuello de botella. Esta situación se produce porque existen colas remanentes entre ciclos semaforicos. Al cabo de algunos ciclos se supera el periodo de transición y aguas arriba de la intersección se observará solo estado B o C y se repetirá dicho patrón tal como se observa en la ilustración 3-7. Las ondas de choque que caracterizan esta situación tienen velocidades  $v_f$  y  $w$ .



**Ilustración 3-7. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (ii) en un solo sentido de la intersección. Fuente: Elaboración Propia.**

En la ilustración 3-8 se muestra el análisis simultáneo de ambos sentidos, donde es posible observar los distintos estados de tráfico presentes en la intersección en la ventana espacio – temporal considerada.

Al igual que en la situación anterior las áreas coinciden con figuras geométricas fáciles de calcular. Para cada acceso, las áreas de cada estado se calculan de la siguiente forma,

$$\text{Área}_{\text{estado } 0} = t_R \cdot \frac{L}{2} \quad (3.14)$$

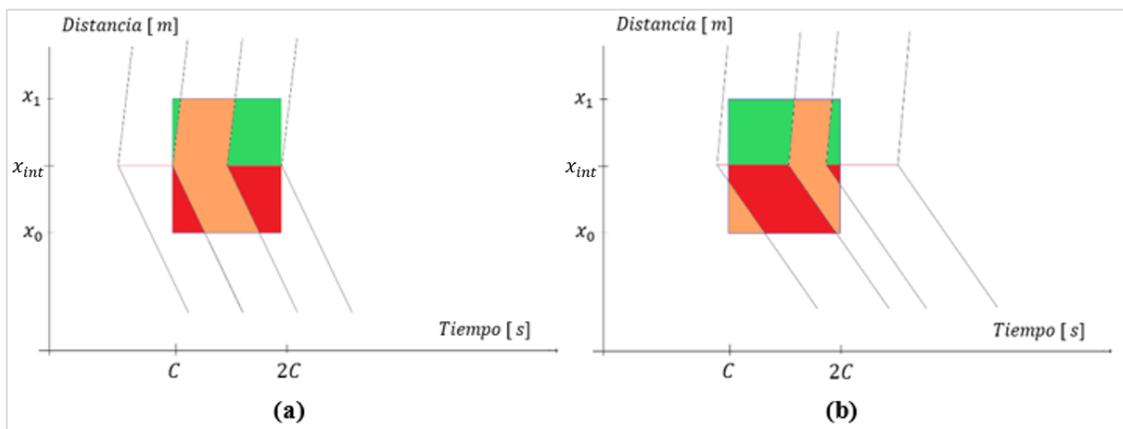
$$\text{Área}_{\text{estado } B} = t_R \cdot \frac{L}{2} \quad (3.15)$$

$$\text{Área}_{\text{estado } C} = C \cdot L - (\text{Área}_{\text{estado } 0} + \text{Área}_{\text{estado } B}) = V_{ef} \cdot L \quad (3.16)$$

La densidad promedio por sentido se calcula según la ecuación (3.17). La acumulación por sentido se obtiene multiplicando (3.17) por el largo de la cuadra L.

Finalmente, la suma de las acumulaciones por sentido corresponde a la acumulación total de la intersección.

$$Densidad\ Promedio_{sentido} = \frac{\text{Área}_{estado\ 0} \cdot k_0 + \text{Área}_{estado\ B} \cdot k_b + \text{Área}_{estado\ C} \cdot k_c}{C \cdot L} \quad (3.17)$$



**Ilustración 3-8. Estados de tráfico presentes en la intersección durante un ciclo (a) sentido norte- sur y (b) sentido oeste- este. Fuente: Elaboración Propia.**

En el caso del *outflow* promedio por sentido se calcula según la ecuación (3.18). Finalmente, la suma de los *outflow* por sentido corresponde al *outflow* total de la intersección.

$$Outflow\ Promedio_{sentido} = \frac{V_{ef} \cdot q_c}{C} \quad (3.18)$$

Una vez definido esto, se probaron ocho distintos repartos de verdes del semáforo (sin variar el ciclo) para determinar su efecto en la acumulación promedio en un ciclo en la intersección. El objetivo era obtener una relación entre la acumulación y la proporción entre los verdes efectivos de las etapas semaforicas.

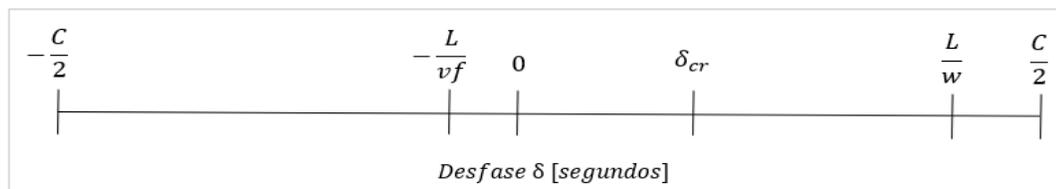
### 3.2.3.3 Congestión

En esta situación la condición aguas abajo de la intersección no es de flujo libre sino que de congestión. Así, la intersección bajo análisis no se encuentra operando a capacidad, sino que su operación está determinada por la capacidad de intersecciones vecinas.

Esta situación se caracteriza porque existen colas remanentes entre ciclos semafóricos. Estas colas se observan aguas arriba y aguas abajo de la intersección, ya que la operación se ve afectada por las colas remanentes de semáforos aguas abajo de ella. Por eso toma una importancia fundamental el desfase con las intersecciones adyacentes de la estudiada. Al igual que el caso anterior se asume que ya pasó el periodo de transición, por lo tanto el comportamiento se replicará cada ciclo.

En este escenario se analizó cómo influyen los desfases de las intersecciones vecinas a la acumulación de la intersección analizada. A diferencia de la definición tradicional el desfase se define como el tiempo que transcurre desde que se enciende la luz verde en la intersección aguas abajo hasta que se enciende la luz verde (para el mismo movimiento) en la intersección analizada. Para el análisis se consideró el mismo desfase para ambas intersecciones vecinas. Para todos los desarrollos presentados a continuación se asume que las programaciones de los semáforos de las intersecciones adyacentes son iguales a aquellas de la intersección estudiada, al igual que en estudios analíticos del MFD (Daganzo & Geroliminis, 2008).

El desfase  $\delta$  entre las intersecciones se puede mover en el rango de valores que se muestra en la ilustración 3-9.



**Ilustración 3-9. Rango de valores en los que se puede mover el desfase de la intersección analizada.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

El desfase  $-\frac{L}{v_f}$  es el tiempo que se demora en propagar los cambios de estados de tráfico a flujo libre en el arco que une intersecciones vecinas. El desfase  $\frac{L}{w}$  es el tiempo que se demora en propagar los cambios de estados de tráfico en congestión en el arco que une las intersecciones vecinas. Los desfases  $-\frac{c}{2}$  y  $\frac{c}{2}$  corresponden a un desfase igual a la mitad del largo de ciclo. Finalmente, el desfase  $\delta_{cr}$  se define como el desfase crítico que separa el comportamiento entre los intervalos de desfase anteriores y posteriores a él. Este será explicado en mayor detalle en la sección siguiente.

$$a) \text{ Desfase } \delta \in \left(-\frac{L}{v_f}; \frac{L}{w}\right)$$

En la ilustración 3-10 se presenta el análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de esta situación. Las ondas de choque que caracterizan esta situación tienen velocidades  $v_f$ ,  $w$  y  $\mu_{0E}$ . Esta última, está relacionada con el cambio de estado entre E y 0 por la activación del rojo. El estado E corresponde al estado de tráfico de la cola aguas abajo de la intersección, por lo que determina la capacidad de la intersección al momento de dar el verde. Para estudiar distintos niveles de capacidad, suponiendo que se ven afectados por los largos de cola de la intersección aguas abajo, se utilizaron nueve estados E distintos. En la tabla 3-3 se presentan los nueve estados E considerados en este análisis.

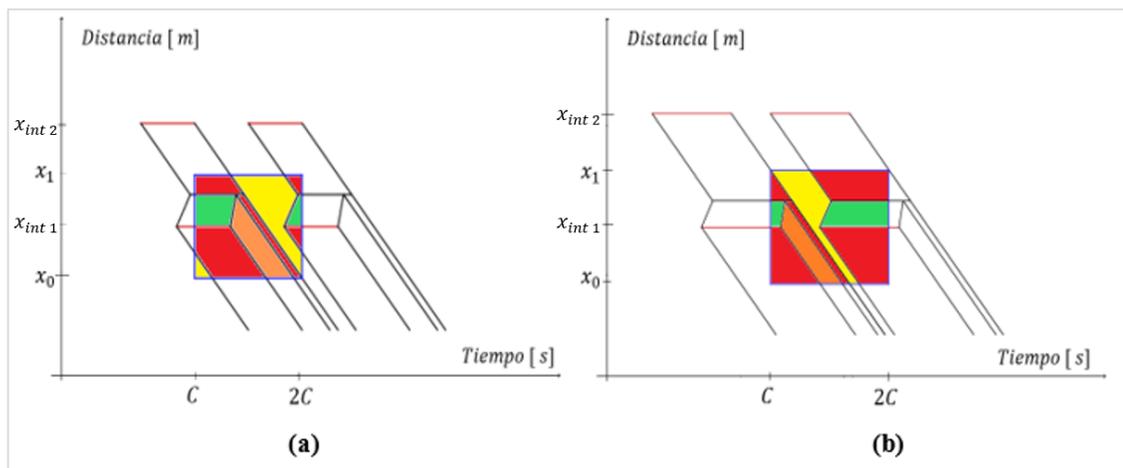
**Tabla 3-3. Estados de tráfico E considerados para el análisis de congestión. Fuente: Elaboración Propia.**

| Estado E | Flujo [veh/hra] |
|----------|-----------------|
| 1        | 746             |
| 2        | 1.246           |
| 3        | 1.632           |
| 4        | 2.016           |
| 5        | 2.401           |
| 6        | 2.785           |
| 7        | 3.171           |
| 8        | 3.557           |
| 9        | 3.600           |



$$\delta_{cr} = \frac{L \cdot (vf - w)}{2 \cdot vf \cdot w} \quad (3.20)$$

En la ilustración 3-11 se muestra el análisis simultáneo de ambos accesos, donde es posible observar los distintos estados de tráfico presentes en la intersección. El área representa la ventana espacio temporal (un ciclo del semáforo en la zona definida en la ilustración 3-1).



**Ilustración 3-11. Estados de tráfico presentes en la intersección durante un ciclo (a) sentido norte-sur y (b) sentido oeste-este. Fuente: Elaboración Propia.**

Al igual que en la situación anterior, las áreas coinciden con figuras geométricas fáciles de calcular. Las áreas de cada estado se calculan de la siguiente forma dependiendo del largo de  $x$ ,

$$\left\{ \begin{array}{ll} \left( t_R + \frac{x}{2v_f} - \frac{x}{2\mu_{0E}} \right) \cdot x & \text{Si } x < \frac{L}{2} \\ t_R \cdot \frac{L}{2} & \text{Si } \frac{L}{2} \leq x \end{array} \right. \quad \text{Área}_{estado 0} = \quad (3.21)$$

$$\begin{cases} \text{Área}_{\text{estado } B} = \\ (50 - x) \cdot t_R + 50 \cdot t_R + \left( \frac{x}{\mu_{0E}} - \frac{x}{v_f} \right) \cdot (x + 50) & \text{Si } x < \frac{L}{2} \\ t_R \cdot \frac{L}{2} & \text{Si } \frac{L}{2} \leq x \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} \text{Área}_{\text{estado } C} = \\ \left( \frac{x}{v_f} + \frac{x}{w} \right) \cdot \left( \frac{x}{2} + 50 \right) & \text{Si } x < \frac{L}{2} \\ C \cdot L - (\text{Área}_{\text{estado } B} + \text{Área}_{\text{estado } 0}) & \text{Si } \frac{L}{2} \leq x \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\begin{cases} \text{Área}_{\text{estado } E} = \\ C \cdot L - (\text{Área}_{\text{estado } B} + \text{Área}_{\text{estado } 0} + \text{Área}_{\text{estado } C}) & \text{Si } x < \frac{L}{2} \\ 0 & \text{Si } \frac{L}{2} \leq x \end{cases} \quad (3.24)$$

La densidad promedio por sentido se calcula según la ecuación (3.25). La acumulación por sentido se obtiene multiplicando (3.25) por el largo de la cuadra L. Finalmente, la suma de las acumulaciones por sentido corresponde a la acumulación total de la intersección.

$$\frac{\text{Densidad Promedio}_{\text{sentido}} = \text{Área}_{\text{estado } 0} \cdot k_0 + \text{Área}_{\text{estado } B} \cdot k_b + \text{Área}_{\text{estado } C} \cdot k_c + \text{Área}_{\text{estado } E} \cdot k_E}{C \cdot L} \quad (3.25)$$

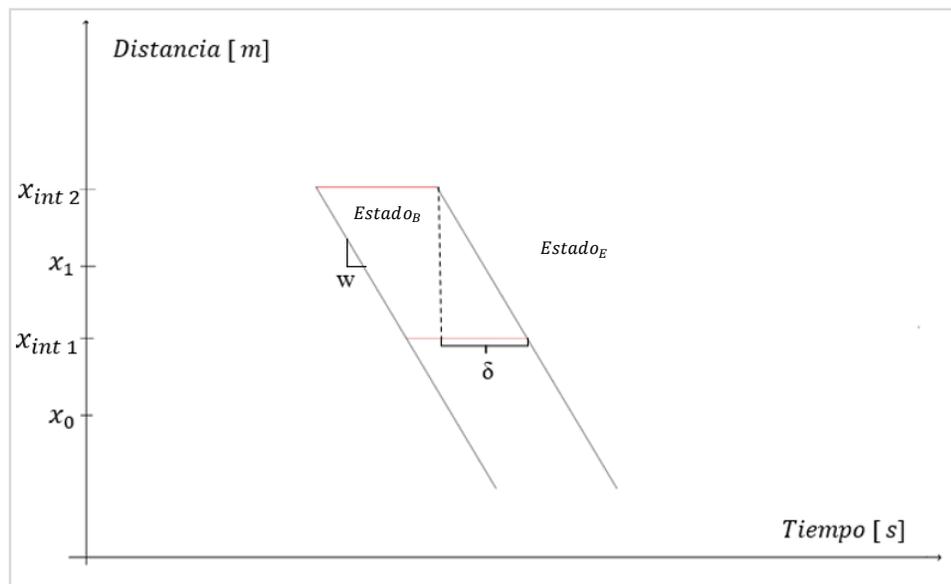
En el caso del *outflow* promedio por sentido se calcula según la ecuación (3.26). Finalmente, la suma de los *outflow* por sentido corresponde al *outflow* total de la intersección.

$$\text{Outflow Promedio}_{\text{sentido}} = \begin{cases} \frac{V_{ef} \cdot q_E}{C} & \text{Si } x < \frac{L}{2} \\ \frac{V_{ef} \cdot q_C}{C} & \text{Si } \frac{L}{2} \leq x \end{cases} \quad (3.26)$$

Una vez definido esto, se probaron ocho distintos repartos de verdes del semáforo (sin variar el ciclo) para determinar su efecto en la acumulación promedio en un ciclo en la intersección. El objetivo era obtener una relación entre la acumulación y la proporción entre los verdes efectivos de las etapas semaforicas.

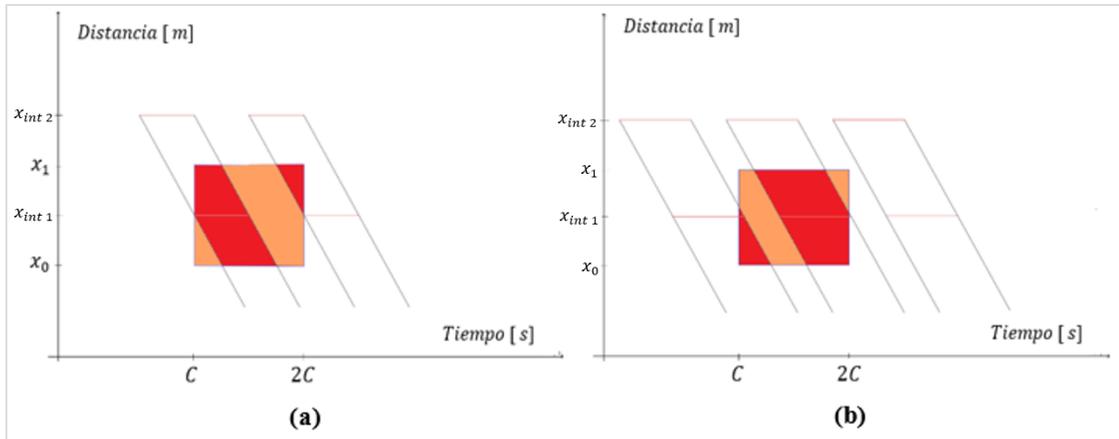
b) Desfase  $\delta = \frac{L}{w}$

Un caso particular ocurre cuando el desfase es igual a  $\delta = \frac{L}{w}$ . En ilustración 3-12 se presenta el análisis espacio temporal mediante LWR de esta situación. La onda de choque que caracteriza esta situación es  $w$ .



**Ilustración 3-12. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación (iii) en un solo sentido de la intersección cuando  $\delta = \frac{L}{w}$ . Fuente: Elaboración Propia.**

En la ilustración 3-13 se muestra el análisis simultáneo de ambos sentidos, donde es posible observar los distintos estados de tráfico presentes en la intersección en la situación de congestión durante un ciclo.



**Ilustración 3-13. Estados de tráfico presentes en la intersección durante un ciclo (a) sentido norte-sur y (b) sentido oeste-este. Fuente: Elaboración Propia.**

Las áreas de cada estado se calculan de la siguiente forma,

$$\text{Área}_{estado B} = t_R \cdot L \quad (3.27)$$

$$\text{Área}_{estado E} = C * L - \text{Área}_{estado B} = V_{ef} \cdot L \quad (3.28)$$

La densidad promedio por sentido se calcula según la ecuación (3.29). La acumulación por sentido se obtiene multiplicando (3.29) por el largo de la cuadra  $L$ . Finalmente, la suma de las acumulaciones por sentido corresponde a la acumulación total de la intersección.

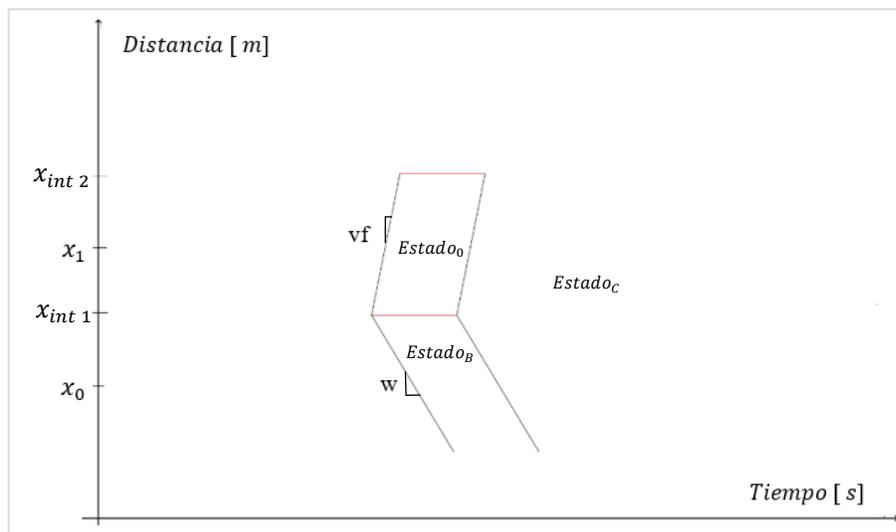
$$\text{Densidad Promedio}_{sentido} = \frac{\text{Área}_{estado B} \cdot k_b + \text{Área}_{estado E} \cdot k_E}{C \cdot L} \quad (3.29)$$

En el caso del *outflow* promedio por sentido se calcula según la ecuación (3.30). Finalmente, la suma de los *outflow* por sentido corresponde al *outflow* total de la intersección.

$$Outflow\ Promedio_{sentido} = \frac{V_{ef} \cdot q_E}{C} \quad (3.30)$$

c) Desfase  $\delta = -\frac{L}{v_f}$

Otro caso particular ocurre cuando el desfase es igual a  $\delta = -\frac{L}{v_f}$ , lo que implica que el último vehículo que cruza la intersección 1 también alcanzaría a cruzar la intersección 2 si no existe cola en ella. En la ilustración 3-14 se presenta el análisis espacio temporal mediante LWR de esta situación. Si no se producen cambios en la demanda o en los desfases, el patrón mostrado a continuación se repetirá en el tiempo.



**Ilustración 3-14. Análisis espacio temporal mediante el modelo LWR de la situación en un solo sentido de la intersección. Fuente: Elaboración Propia.**

Es posible notar que esta situación no pertenece al caso de congestión, ya que coincide con la modelada en la sección 3.2.3.2. De esta forma es posible ver que la situación de congestión converge a la situación de capacidad si el desfase se mueve entre  $\delta \in \left[-\frac{L}{v_f}; \delta_{cr}\right]$ . Por lo tanto, las áreas y acumulación promedio en la intersección se calculan de la misma forma.

$$d) \text{ Desfase } \delta \in \left(-\frac{c}{2}; -\frac{L}{v_f}\right) \cup \left(\frac{L}{w}; \frac{c}{2}\right)$$

En estas situaciones el comportamiento es inestable entre ciclos y depende mucho de las velocidades de las ondas de choque  $v_f$  y  $w$ . Es por esto que no es posible llegar a un estado de régimen que se repita constantemente entre ciclos y que pueda ser generalizado para el análisis mediante la teoría de ondas cinéticas.

### 3.3 Análisis simulación mediante AIMSUN

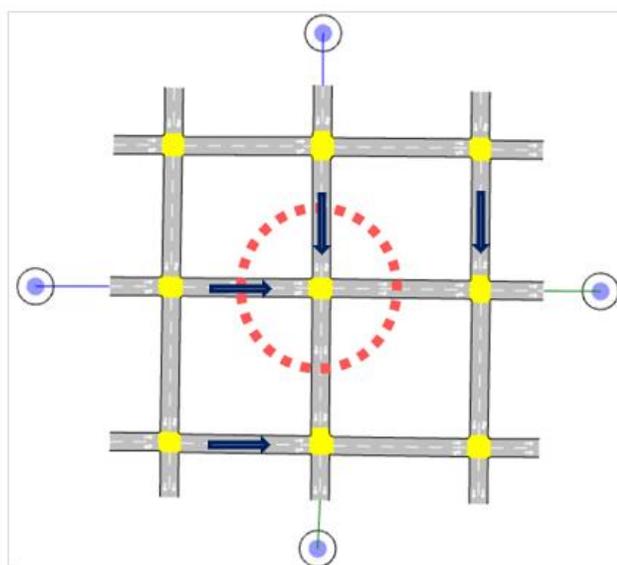
#### 3.3.1 Definición de la red

Se realizó un análisis mediante simulación para relajar algunos de los supuestos del modelo LWR, descritos en la sección 3.2.1. Para ello se construyó una red del tipo Manhattan compuesta por nueve intersecciones en el *software* de micro-simulación AIMSUN. Las características de las intersecciones son las mismas mencionadas en el apartado 3.1. En la ilustración 3-15 se puede observar la red modelada y la intersección considerada para el análisis.

Las programaciones de semáforo asumen que el entre verde es de cuatro segundos, compuesto por tres segundos de amarillo y uno de rojo – rojo. Por lo tanto el tiempo perdido  $t_{perdido}$  es de ocho segundos (la suma de los entre verdes). Para ambas etapas se consideró un tiempo de verde igual en segundos. Los largo de ciclos analizados fueron de

45, 60, 90 segundos. A diferencia del análisis anterior, en este caso no es necesario asumir una relación fundamental para los arcos de las intersecciones. En la tabla 3-4 se resumen los indicadores de operación recién mencionados para cada largo de ciclo considerado. El valor  $\lambda_i$  se calcula según la ecuación (3.31)

$$\lambda_i = \frac{Vef_i}{C} \quad (3.31)$$

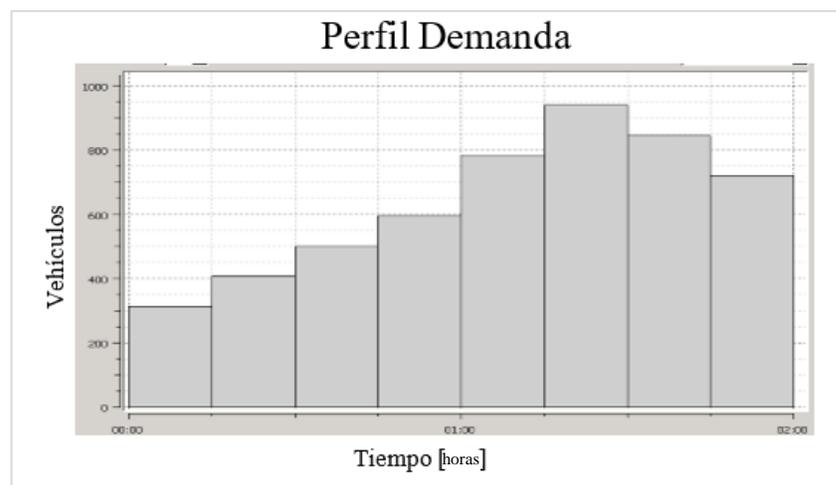


**Ilustración 3-15.** Red modelada en AIMSUN, la circunferencia demarca la intersección analizada.  
Fuente: Elaboración Propia.

**Tabla 3-4.** Indicadores de operación del semáforo para los largos de ciclo analizados.  
Fuente: Elaboración Propia.

| Ciclo [seg] | $Vef_1$ [seg] | $Vef_2$ [seg] | $t_{perdido}$ [seg] | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ |
|-------------|---------------|---------------|---------------------|-------------|-------------|
| <b>45</b>   | 19            | 18            | 8                   | 0,42        | 0,40        |
| <b>60</b>   | 26            | 26            | 8                   | 0,43        | 0,43        |
| <b>90</b>   | 41            | 41            | 8                   | 0,46        | 0,46        |

La intersección se analizó en las tres situaciones de tráfico que puede operar, definidas en la sección 3.1. Para ello, se simuló durante un horizonte de dos horas y se consideró el perfil de demanda que se muestra en la ilustración 3-16. La demanda crecía en periodos de 15 minutos hasta la hora y media de simulación, donde finalmente decrece. Los centroides que se observan en la ilustración 3-15 son los generadores y atractores de la demanda.



**Ilustración 3-16. Perfil de la demanda considerado para la simulación. Fuente: Elaboración Propia**

Para la congestión, se simuló un incidente al término de la primera hora en AIMSUN el cual bloquea las dos pistas de las intersecciones aguas abajo de la analizada (ambos sentidos). Este incidente es removido parcialmente a los 10 minutos recuperando una de las dos pistas de las intersecciones aguas abajo de la analizada (ambos sentidos). Finalmente, luego de 15 minutos la capacidad se recupera completamente con el fin de abarcar los puntos de máximo *outflow* del MFD. Durante la primera hora se consideró que la intersección operaba en la situación de flujo libre. En la tabla 3-5 se resume los cambios de estado de la simulación para construir el MFD de la intersección analizada.

**Tabla 3-5. Resumen de las situaciones generadas para cubrir la forma del MFD de la intersección.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

| <b>Situación</b>   | <b>Bloqueo</b>          | <b>Periodo</b> |
|--------------------|-------------------------|----------------|
| <b>Flujo Libre</b> | Ninguno                 | 0:00 – 1:00    |
| <b>Congestión</b>  | 2 Pistas ambos sentidos | 1:00 – 1:10    |
| <b>Congestión</b>  | 1 Pista ambos sentidos  | 1:10 – 1:25    |
| <b>Capacidad</b>   | Ninguno                 | 1:25 – 2:00    |

### 3.3.2 Definición de Escenarios

Se consideraron tres dimensiones en la definición de escenarios: (i) aleatoriedad en las llegadas, (ii) proporciones de viraje y (iii) largos de ciclo, con el fin de estudiar su efecto en la forma del MFD de la intersección y en la relación entre acumulación – desfase. Además, en cada escenario se investigó el comportamiento de la relación acumulación – desfase en los intervalos desconocidos teóricamente  $\delta \in \left(-\frac{c}{2}; -\frac{L}{vf}\right) \cup \left(\frac{L}{w}; \frac{c}{2}\right)$ .

La dimensión de aleatoriedad en las llegadas evalúa si la demanda de vehículos que ingresa a la red tiene un tiempo entre evento fijo o que distribuye exponencial. Es decir, se considera que existe aleatoriedad si las llegadas siguen un proceso de Poisson.

Para la dimensión de proporciones de viraje se definieron cuatro tipos de virajes, un nivel bajo de viraje (homogéneo 10%), nivel medio de viraje (homogéneo 25%), nivel alto de viraje (homogéneo 60%), y nivel medio de viraje para un sentido y alto para el otro (heterogéneo 25% - 75%). Virajes tipo homogéneo representan la misma proporción de viraje en ambos sentidos de la intersección. Virajes tipo heterogéneo se evalúan proporciones distintas de viraje en los sentidos de la intersección. En la tabla 3-6 se resumen los tipos de viraje y sus respectivas proporciones considerados para la definición de escenarios.

**Tabla 3-6. Definición de escenarios con viraje para la simulación.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

| <b>Tipo Viraje</b> | <b>Proporción Viraje</b>                           |
|--------------------|--|
| <b>Homogéneo 1</b> | 10% ambos sentidos                                 |
| <b>Homogéneo 2</b> | 25% ambos sentidos                                 |
| <b>Homogéneo 3</b> | 60% ambos sentidos                                 |
| <b>Heterogéneo</b> | 25% sentido Norte – Sur y 75% sentido Oeste – Este |

Finalmente, para el análisis de largos de ciclos se consideraron tres largos semafóricos uno de 45 segundos (ciclo pequeño), otro de 60 segundos (ciclo medio) y uno de 90 segundos (ciclo largo).

**Tabla 3-7. Escenarios evaluados para la simulación realizada en AIMSUN.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

| <b>Escenarios</b>       | <b>Sin viraje</b> | <b>Con viraje</b>  |                    |                    |                    |
|-------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                         |                   | <b>Homogéneo 1</b> | <b>Homogéneo 2</b> | <b>Homogéneo 3</b> | <b>Heterogéneo</b> |
| <b>Sin Aleatoriedad</b> | C 45              | C 45               | C 45               | C 45               | C 45               |
|                         | C 60              | C 60               | C 60               | C 60               | C 60               |
|                         | C 90              | C 90               | C 90               | C 90               | C 90               |
| <b>Con Aleatoriedad</b> | C 45              | C 45               | C 45               | C 45               | C 45               |
|                         | C 60              | C 60               | C 60               | C 60               | C 60               |
|                         | C 90              | C 90               | C 90               | C 90               | C 90               |

En la tabla 3-7 se resume la definición de los distintos escenarios evaluados en simulación. El escenario base para la comparación con el análisis teórico corresponde al sin aleatoriedad, sin viraje y un ciclo de 60 segundos. Por cada escenario se corre un total de 10 réplicas.

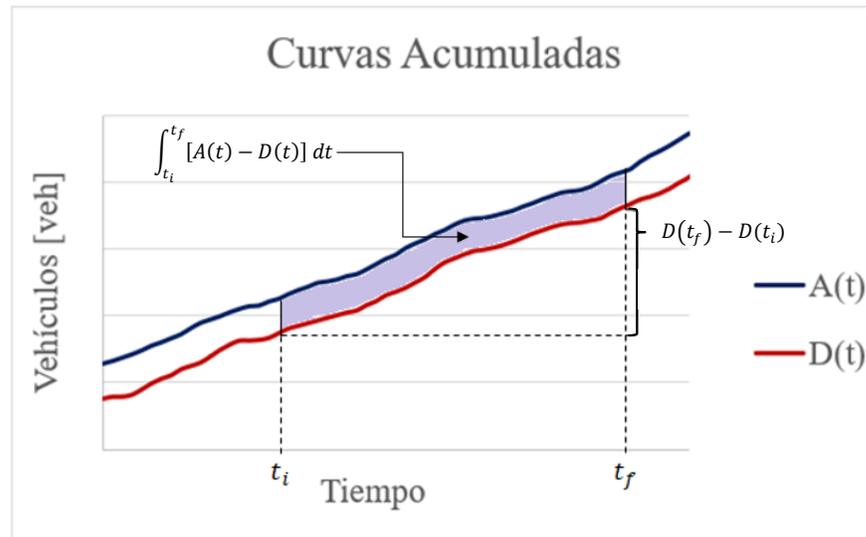
### 3.3.3 Cálculo de Acumulación y *Outflow*

Para calcular la acumulación y el *outflow* se programó un complemento API para AIMSUN que guarda en archivos de texto los instantes de llegada de los vehículos que entran a la zona analizada de la intersección y los instantes de salida de los vehículos que salen de la zona analizada de la intersección. Cada vez que se produce el evento de ingreso o egreso de un vehículo a la zona de análisis (ilustración 3-1) se guarda su etiqueta y su instante respectivo.

Con los archivos generados se procedió a construir las curvas acumuladas de ingreso y salida ( $A(t)$  y  $D(t)$  respectivamente) de la zona analizada. Las curvas acumuladas mostradas en la ilustración 3-17 permiten comprender el cálculo de estas variables que conforman el MFD. La acumulación promedio en un intervalo de tiempo está dada por el área promedio entre las curvas de ingreso y salida de la zona dividida por el intervalo de tiempo. El *outflow* en un intervalo de tiempo, corresponde a la cantidad de vehículos que salen de la zona en dicho lapso. Las ecuaciones (3.32) y (3.33) se emplearon para el cálculo de estas variables. El intervalo de tiempo utilizado para calcularlas es el largo de un ciclo, al igual que en el análisis mediante LWR. Por lo tanto,  $t_i$  y  $t_f$  corresponden a los tiempos de inicio y término de un ciclo, respectivamente.

$$Outflow = \frac{D(t_f) - D(t_i)}{(t_f - t_i)} \quad (3.32)$$

$$Acumulación = \frac{\int_{t_i}^{t_f} [A(t) - D(t)] dt}{(t_f - t_i)} \quad (3.33)$$



**Ilustración 3-17. Representación gráfica de la acumulación y *outflow* en el uso de curvas acumuladas. Fuente: Elaboración Propia.**

### 3.3.4 Análisis relación acumulación – desfase

Para analizar el efecto en la relación acumulación – desfase, se simuló durante un horizonte de una hora y se consideró un perfil de demanda constante en este periodo ( $2.100 \frac{veh}{hra}$  para cada acceso). La simulación comienza con un estado de congestión en la intersección analizada con el fin de comparar con el análisis espacio – temporal explicado en la sección 3.2. Dependiendo del largo del ciclo del escenario simulado se analizan distintas cantidades de desfases con el fin de cubrir toda la relación acumulación – desfase. Estos desfases se mueven en el intervalo  $\delta \in \left[-\frac{c}{2}; \frac{c}{2}\right]$ .

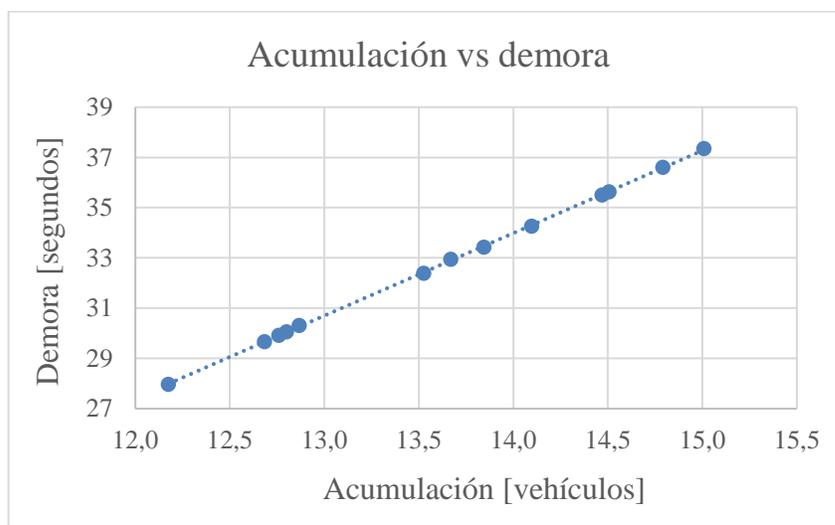
Para simular los desfases positivos se establece el desfase respectivo en la intersección analizada. En caso de los desfases negativos, se establece el desfase respectivo en las dos intersecciones aguas abajo de la analizada.

Dado que la acumulación no es un indicador tan claro de cómo impactan los desfases en la operación de la intersección, se decidió utilizar la demora promedio de los vehículos en ella. Lo anterior, ya que es difícil medir el efecto que tiene el observar un auto más o

un auto menos en la intersección. Sin embargo, la demora promedio observada en la zona analizada permite comprender si la operación de la intersección es buena o mala fácilmente. La demora de un vehículo se calcula según la ecuación (3.34) donde  $t_{viaje}$  corresponde al tiempo de viaje real del vehículo para salir de la zona y  $t_{flujo libre}$  es el tiempo de viaje a flujo libre para salir de la zona. Luego, para obtener la demora promedio de la zona analizada se promedian las demoras de todos los vehículos que ingresaron y salieron de la intersección (N vehículos). Este indicador es un dato de salida directo de AIMSUN y se calcula según la ecuación (3.35)

$$Demora\ veh\acute{u}culo_i = t_{viaje} - t_{flujo\ libre} \quad (3.34)$$

$$Demora\ Promedio = \frac{\sum_{i=1}^N Demora\ veh\acute{u}culo_i}{N} \quad (3.35)$$



**Ilustración 3-18. Relación lineal existente entre la acumulación de la intersección y la demora de los vehículos. Fuente: Elaboración Propia.**

En la ilustración 3-18 se presenta el gráfico entre acumulación y demora, el que tiene un  $R^2$  de 0,99. Los puntos de acumulación se obtuvieron mediante la API

mencionada en la sección 3.3.3 y luego se calculó el valor promedio de la acumulación para el horizonte simulado. Se obtuvo un punto de acumulación y otro de demora promedio para cada desfase del intervalo  $\delta \in \left[-\frac{c}{2}; \frac{c}{2}\right]$ . A partir de esto, se construyó el gráfico entre la demora promedio de la ecuación (3.35) y la acumulación promedio recién explicada observando que la relación que existe entre ambas es lineal. Por lo tanto, para comprender mejor el impacto de los desfases se utilizó la relación demora – desfase en reemplazo de la relación acumulación – desfase.

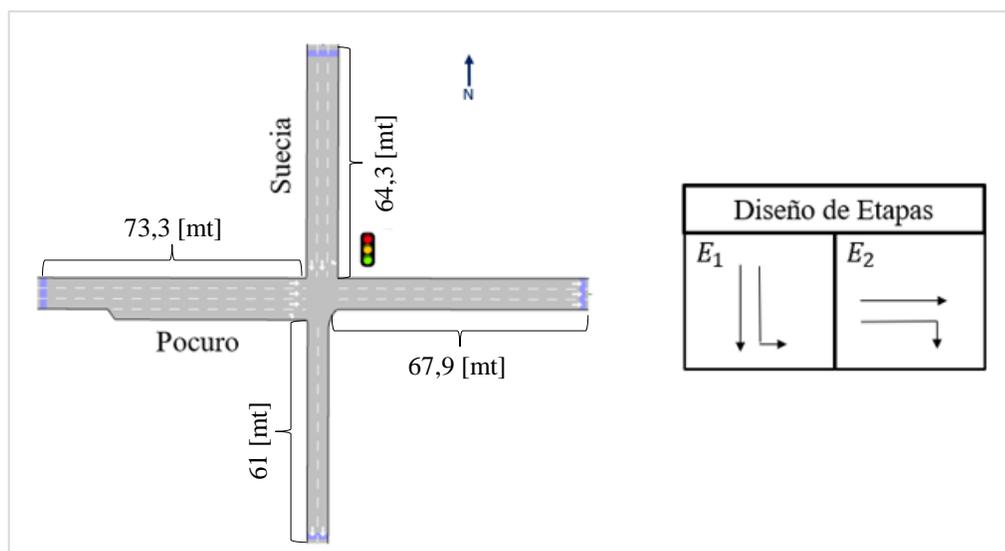
### **3.4 Análisis empírico en una intersección semaforizada**

#### **3.4.1 Descripción de la intersección**

Se realizó un experimento empírico en la intersección de Pocuro con Suecia, para estudiar el MFD en la realidad. Esta intersección tiene largos de cuadra distintos por cada acceso y además distintas cantidades de pistas. Consta de dos accesos unidireccionales, en el caso de Suecia compuesto por dos pistas directas más una de viraje exclusivo y en el caso de Pocuro compuesto por tres pistas directas más una bahía exclusiva de viraje. Los arcos de egreso de la intersección por Suecia y Pocuro están compuestos por dos y tres pistas, respectivamente. Además, en las vías no circula transporte público con el fin de considerar un análisis similar al teórico y de simulación. En la ilustración 3-19 se puede observar un dibujo de la intersección y la zona analizada, además del diseño de etapas del semáforo. La zona analizada está delimitada por los puntos medios de los arcos de acceso y egreso de la intersección.

En los periodos analizados, las programaciones de semáforo medidas en terreno están compuestas por un entre verde de cuatro segundos (tres segundos de amarillo y uno de rojo – rojo). El largo del ciclo es de 120 segundos, con un tiempo de verde de 50 segundos para la etapa uno y de 62 segundos para la etapa dos. Al tener solamente dos etapas se tiene que la pérdida por ciclo es de ocho segundos.

Para calcular la acumulación y *outflow* se construyen las curvas acumuladas de ingreso y salida ( $A(t)$  y  $D(t)$  respectivamente) de la zona analizada. Al igual que la sección 3.3.3 se utilizan las ecuaciones (3.32) y (3.33) para el *outflow* y acumulación respectivamente.



**Ilustración 3-19. Esquema de la intersección Pocuro con Suecia y el diseño de las etapas semafóricas. Fuente: Elaboración Propia.**

### 3.4.2 Toma de datos

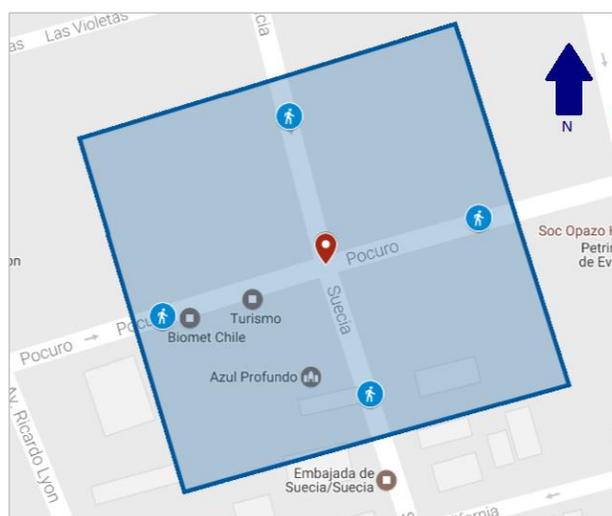
Los datos para construir el MFD de la intersección fueron tomados en dos días distintos durante una hora. El objetivo es encontrar puntos de *outflow* y acumulación en diferentes regímenes del MFD. Para caracterizar la situación de flujo libre se tomaron datos el día 22 de septiembre de 2016 en el periodo fuera punta en la mañana (11:00 am). Para caracterizar la situación de capacidad y congestión se tomaron datos el día 13 de septiembre de 2016 en el periodo punta tarde (18:00 pm). Esto se resume en la tabla 3-8. Ambos días de medición fueron días considerados representativos del comportamiento de la intersección (Martes y Jueves).

**Tabla 3-8. Días y horarios de medición para la intersección Pocuro con Suecia.**

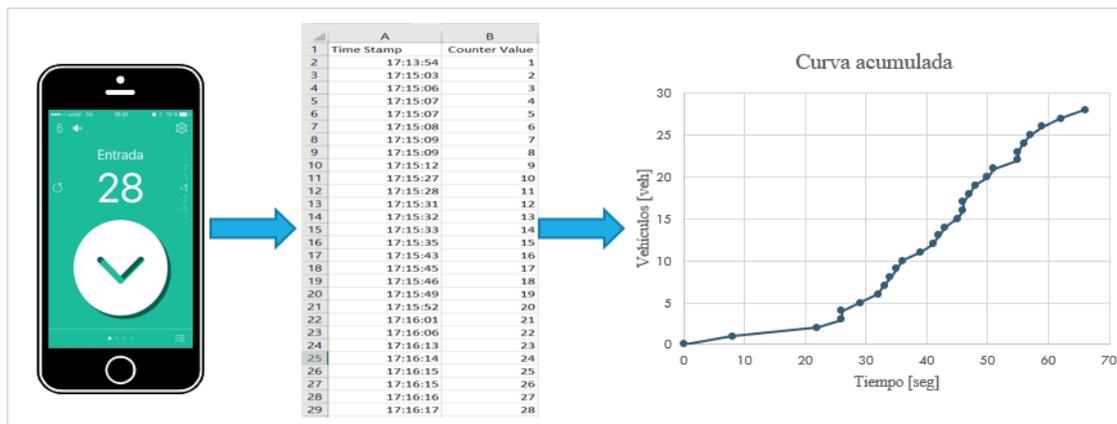
**Fuente: Elaboración Propia.**

| <b>Situación</b>   | <b>Día</b> | <b>Horario</b> |
|--------------------|------------|----------------|
| <b>Flujo Libre</b> | 22/09/2016 | 11:00 – 12:00  |
| <b>Capacidad</b>   | 13/09/2016 | 17:15 – 18:45  |
| <b>Congestión</b>  | 13/09/2016 | 17:15 – 18:45  |

En la recopilación de datos se utilizaron cámaras de video y la ayuda de voluntarios. Cada uno de ellos estaba ubicado en la mitad de los arcos de acceso y egreso de la intersección analizada, tal como muestra la ilustración 3-20. Las cámaras fueron utilizadas para grabar en la misma posición de los voluntarios, con el fin de tener un respaldo por posibles errores en la medición.



**Ilustración 3-20. Zona analizada de la intersección Pocuro con Suecia y ubicación de voluntarios para la medición. Fuente: Google Maps.**



**Ilustración 3-21. Proceso de construcción de curvas acumuladas de la intersección.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

Cada voluntario debía registrar mediante una aplicación para *smartphones* las pasadas de los vehículos por sus puntos de medición. Lo anterior, con el objetivo de construir posteriormente las curvas acumuladas  $A(t)$  y  $D(t)$ . Esta aplicación es un contador que registra la etiqueta del vehículo y su tiempo de pasada cada vez que el voluntario apretaba un botón. Posteriormente, estos datos se exportaban como un archivo de Excel que permitió construir las curvas acumuladas en cada punto de medición y para los periodos analizados. En la ilustración 3-21 se muestra el proceso de construcción de las curvas de entrada y salida de la intersección.

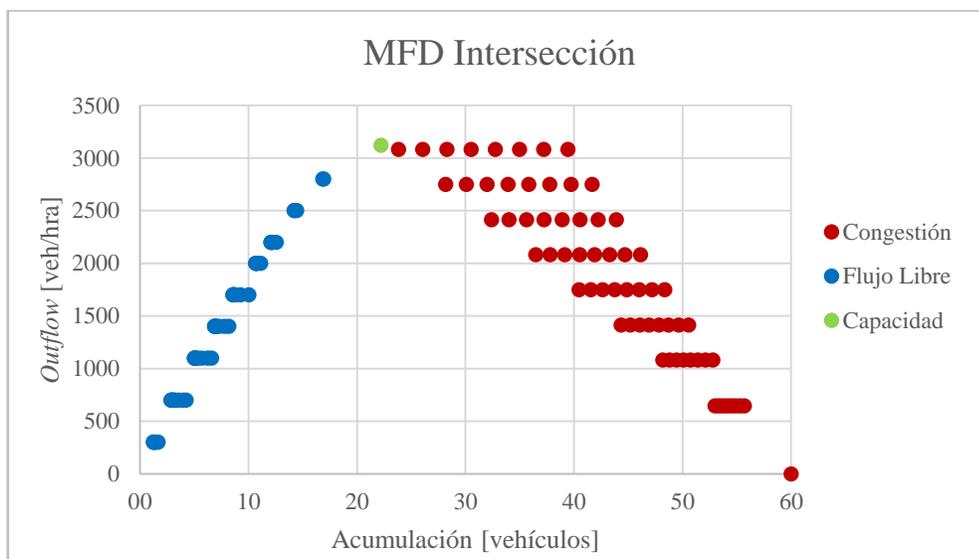
## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se expondrán los principales resultados obtenidos en esta investigación junto con sus respectivos análisis. En primer lugar, se analizarán los resultados del enfoque teórico espacio – temporal (los puntos de acumulación y *outflow* se obtuvieron mediante un software de cálculo matemático llamado Maple). Luego, se presentan los resultados de la simulación realizada en AIMSUN. Finalmente, se describen los resultados del experimento empírico realizado en la intersección de Pocuro con Suecia.

### 4.1 Resultados análisis espacio – temporal

#### 4.1.1 MFD

El MFD para la intersección analizada y considerando las tres situaciones descritas en la sección 3.2.3, se puede observar en la ilustración 4-1.



**Ilustración 4-1. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección analizada mediante modelo LWR. Fuente: Elaboración Propia.**

En el diagrama se observan los 3 regímenes analizados (i) flujo libre, (ii) capacidad y (iii) congestión. En la situación de flujo libre se observan los nueve niveles de demanda analizados. Cada nivel se analizó con ocho distintos repartos de verdes, que están representados por los distintos puntos de cada nivel. Sin embargo, solo se consideraron aquellos puntos que cumplieran con la ecuación (3.7), es decir, que no generen colas remanentes entre ciclos. Como es de esperar, al aumentar la acumulación de vehículos en la intersección, el *outflow* también aumenta para esta situación.

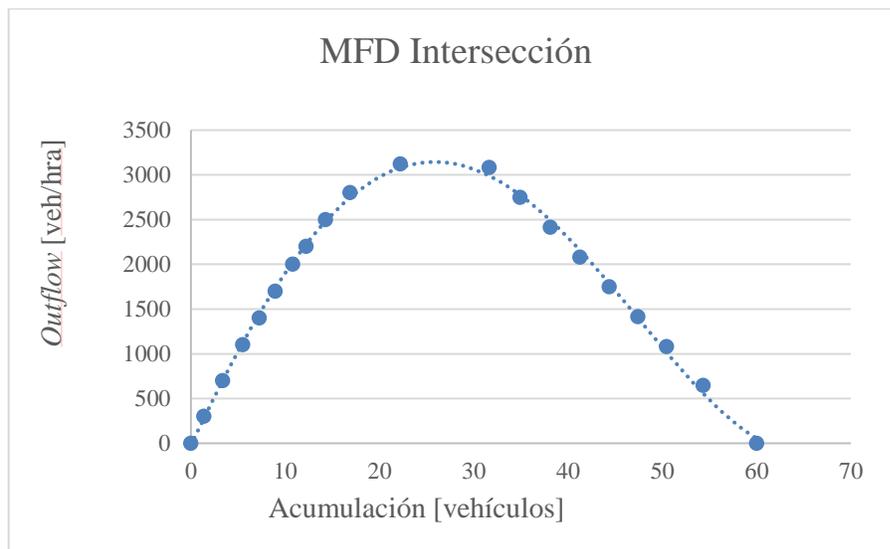
En la situación de capacidad se analizaron ocho repartos de verdes para un mismo ciclo. Todas estas programaciones no producen cambios en la acumulación promedio de la intersección. Esto se explica porque al realizar modificaciones en el verde de un sentido este se ve compensando con el otro sentido, dado que en este ejercicio se mantiene el ciclo constante. Por lo tanto, las acumulaciones por sentido varían, pero el efecto se balancea produciendo la misma acumulación promedio en la intersección. La acumulación crítica (la que maximiza el *outflow*) es cercana a los 22 vehículos para la intersección estudiada. La capacidad de la intersección o máximo *outflow* en un ciclo está determinado por la ecuación (4.1), donde  $Vef_{Ei}$  representa el verde efectivo de la etapa  $i$  con  $i \in \{1,2\}$ ,  $C$  representa el largo del ciclo y  $t_{perdido}$  la pérdida del ciclo. La ecuación anterior tiene sentido ya que indica que la intersección está descargando a 3.600 en la proporción del tiempo que uno de los dos arcos de salida de ella tienen verde. Para el caso analizado el  $outflow_{max} = 3.120 \frac{veh}{hra}$

$$Outflow_{max} = 3.600 * \frac{Vef_{E1}}{C} + 3.600 * \frac{Vef_{E2}}{C} = 3.600 * \frac{C - t_{perdido}}{C} \quad (4.1)$$

En la situación de congestión se utilizaron ocho estados de tráfico, para analizar cómo se ve afectada la capacidad de la intersección por los largos de cola de la intersección aguas abajo. Estos están representados por los distintos puntos de cada nivel en la rama de congestión de la ilustración 4-1. En cada nivel se analizaron ocho desfases semafóricos entre las intersecciones adyacentes que están representados por los puntos en cada nivel

(estos aumentan de izquierda a derecha). Tal como se mencionó en la sección 3.2 la acumulación máxima se alcanza con el desfase  $\delta = \frac{L}{w}$ . Si se considera que la densidad de taco  $k_j$  asumida en la relación triangular de este análisis es 300 vehículos por kilómetro, entonces la acumulación de taco está dada por la ecuación (4.2), donde L representa el largo de los arcos analizados. De esta forma, el análisis mediante LWR es consistente con la acumulación de taco esperada teóricamente. Además, también cumple la hipótesis de que al aumentar la acumulación de vehículos en la intersección, el *outflow* va disminuyendo para esta situación.

$$Acumulación_{taco} = k_j * 2L = 300 \left[ \frac{veh}{km} \right] * 2 * \frac{100}{1000} [km] = 60 \text{ veh\u00edculos} \quad (4.2)$$



**Ilustración 4-2. Diagrama fundamental macroscópico promedio de la intersección analizada mediante modelo LWR. Fuente: Elaboración Propia.**

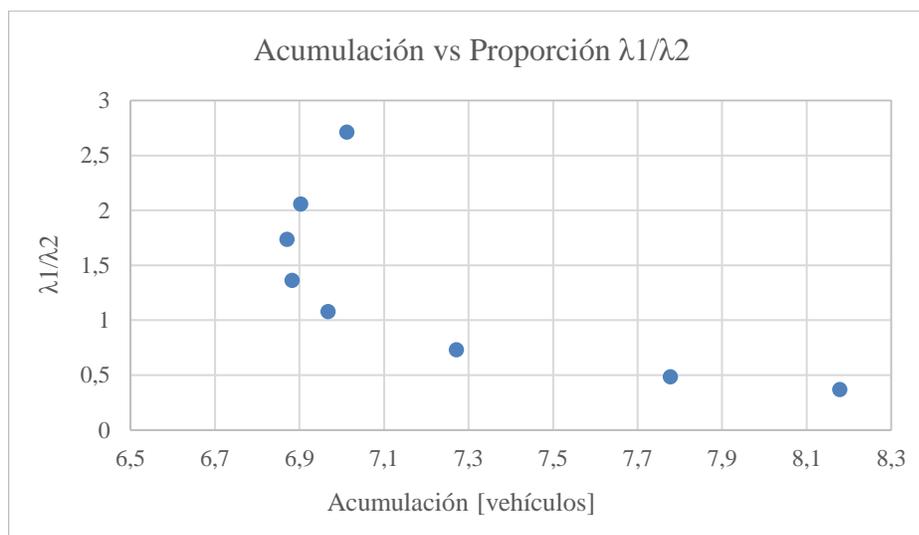
Si se considera un comportamiento promedio para cada nivel tanto en flujo libre como congestión, es posible construir un MFD para la intersección que tiene una forma

similar al diagrama fundamental que se conoce para un arco. Este indica aproximadamente el *outflow* que se esperaría en la intersección para una acumulación dada. En la ilustración 4-2 se observa esta relación macroscópica para la intersección analizada.

La evidencia analítica sugiere la existencia de esta relación macroscópica a nivel de una intersección semaforizada que cumpla con las características descritas en la sección 3.1.

#### 4.1.2 Relación acumulación – proporción verdes efectivos

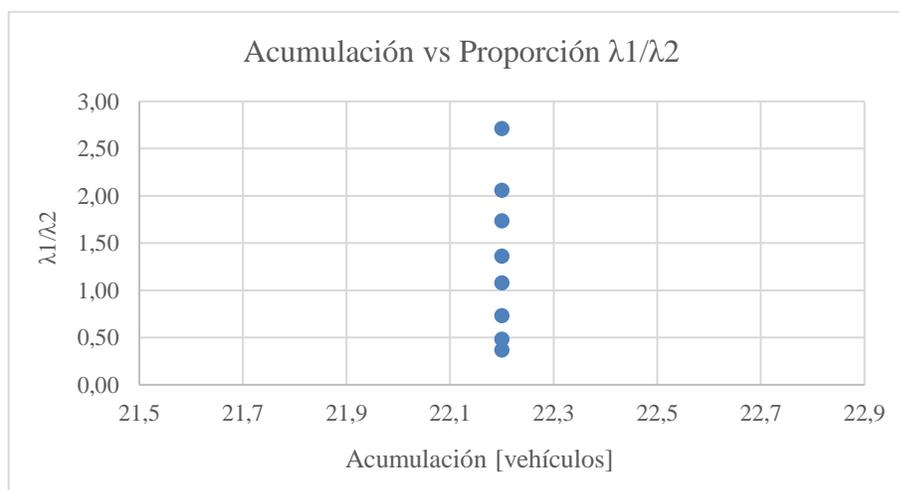
En la ilustración 4-3 se muestra la relación acumulación – proporción verdes efectivos para flujo libre con un nivel de demanda de  $700 \frac{veh}{hra}$  por cada sentido de la intersección. Por lo tanto, todos los puntos logran el mismo *outflow* con pequeñas variaciones en la acumulación.



**Ilustración 4-3. Relación acumulación - proporción verdes efectivos para la intersección analizada mediante LWR en flujo libre. Fuente: Elaboración Propia.**

De la ilustración es posible observar que para las programaciones estudiadas la acumulación de la intersección no tiene variaciones significativas. Estas se mueven entre los 6,8 y 8,2 vehículos, es decir, al variar la programación se alcanzan diferencias de 1 vehículo aproximadamente. En la proporción 1,7 se alcanza la menor acumulación de la intersección y para la 0,4 la mayor. Dado que esta situación es a flujo libre, el impacto en los cambios de programaciones no tiene mayor incidencia en la operación de la intersección.

En la ilustración 4-4 se muestra la relación acumulación – proporción verdes efectivos para capacidad.



**Ilustración 4-4. Relación acumulación - proporción verdes efectivos para la intersección analizada mediante LWR en capacidad. Fuente: Elaboración Propia.**

En capacidad y congestión, se construyó la curva con las acumulaciones producidas, para un mismo nivel de demanda, al variar los verdes de las etapas de la intersección analizada. Para estos casos dado que la intersección analizada siempre tiene cola aguas arriba, cambios en las programaciones de los semáforos no producen modificaciones en la acumulación promedio de la intersección. Esto se explica porque al producir cambios en el verde de un sentido se ve compensando con el otro sentido, dado que en este ejercicio

se mantiene el ciclo constante. Por lo tanto, las acumulaciones por sentido varían, pero el efecto se balancea produciendo la misma acumulación promedio en la zona de análisis.

De la ilustración es posible observar que para las programaciones estudiadas la acumulación de la intersección no tiene variaciones. En capacidad esta se mantiene constante en 22,2 vehículos. Para congestión la relación es similar lo único que varía es el nivel de la acumulación dependiendo del desfase utilizado.

La evidencia sugiere que, para el caso analizado, en capacidad y congestión los repartos de verdes (considerando un ciclo fijo) no tiene influencia directa sobre la acumulación de la intersección. Además, en flujo libre el diseño de etapas no genera variaciones significativas sobre la acumulación promedio de la intersección.

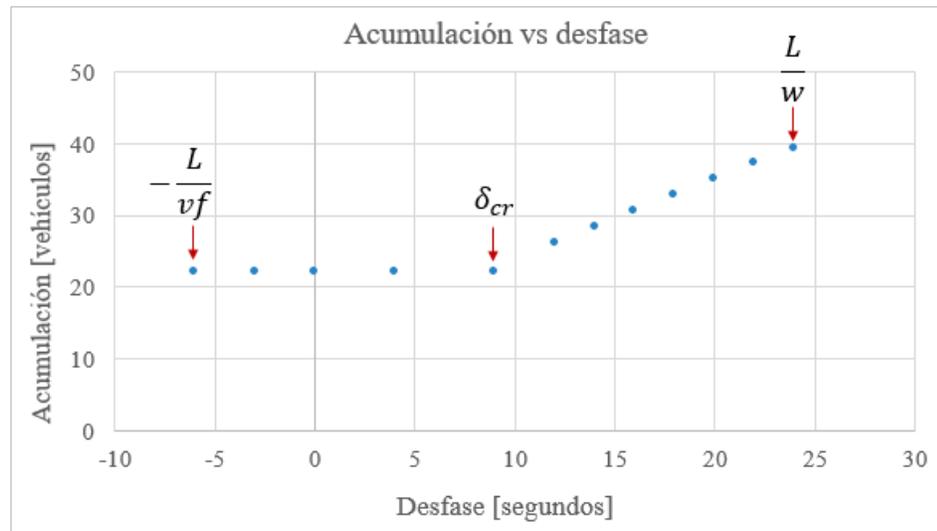
#### 4.1.3 Relación acumulación – desfase

Para la situación de congestión se construyó la curva con las acumulaciones producidas, para un mismo nivel de *outflow*, al variar los desfases entre la intersección analizada y las adyacentes. Tal como se explicó en la ilustración 4-1, los desfases aumentan de izquierda a derecha para todos los niveles de capacidad. En la ilustración 4-5 se muestra la relación acumulación – desfase obtenida analíticamente.

De la ilustración 4-5 es posible observar dos claros comportamientos. En primer lugar, existe un intervalo de desfases  $\delta \in \left[-\frac{L}{v_f}; \delta_{cr}\right]$  en el que la acumulación de la intersección es mínima. Además, esta se mantiene invariable en la acumulación que maximiza el *outflow* según la ilustración 4-1, es decir, 22 vehículos en promedio por ciclo semafórico. El desfase crítico  $\delta_{cr}$  está determinado por la ecuación (3.20) y es el que produce que la condición de flujo libre aguas abajo de la intersección analizada se cumpla (pasando a la situación de capacidad).

En segundo lugar, existe un intervalo de desfases  $\delta \in \left(\delta_{cr}; \frac{L}{w}\right]$  en el que la acumulación comienza a crecer progresivamente a medida que aumenta el desfase. Es esperable que mayores acumulaciones de vehículos tengan un impacto negativo en la

operación de la intersección en congestión (respecto a las demoras generadas). El desfase con mayor acumulación está determinado por el tiempo que se demora en viajar la onda de choque en congestión desde las intersecciones aguas abajo hasta la analizada.



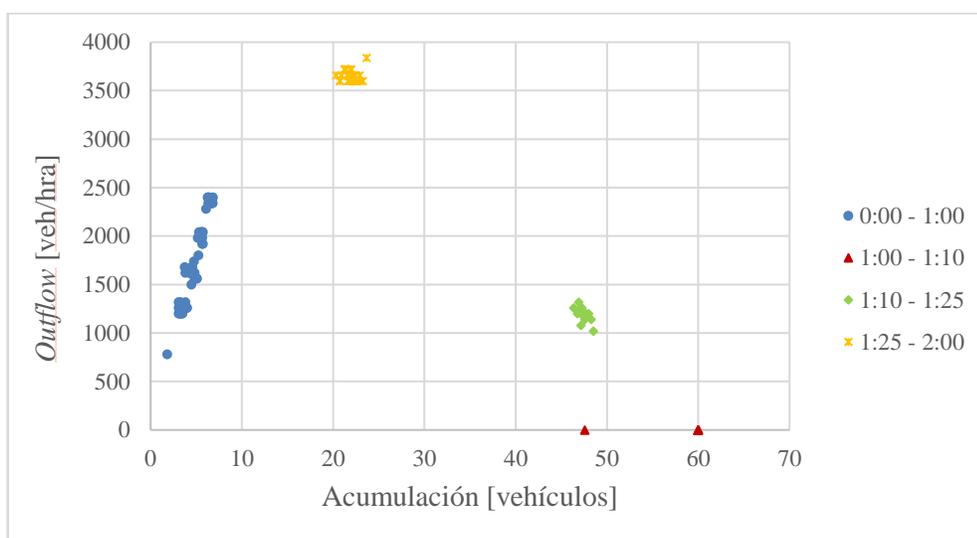
**Ilustración 4-5. Relación acumulación - desfase para la intersección analizada mediante LWR.**  
Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, analíticamente es complejo analizar los intervalos  $\delta \in \left(-\frac{c}{2}; -\frac{L}{vf}\right) \cup \left(\frac{L}{w}; \frac{c}{2}\right)$ , tal como se explicó en la sección 3.2. La evidencia sugiere que los desfases toman un rol importante cuando existe congestión en la intersección. Además, esta relación entre la acumulación y el desfase podría ser utilizada para controlar la operación de la intersección, con el fin de mantener acumulaciones menores cuando existe congestión.

## 4.2 Resultados análisis simulación

### 4.2.1 MFD

A continuación, en la ilustración 4-6 se presenta el MFD para la intersección analizada en el escenario del caso base, es decir, con un ciclo de 60 segundos (repartos de verde iguales para las etapas del semáforo), sin aleatoriedad en las llegadas y sin virajes.



**Ilustración 4-6. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección para escenario sin aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 60 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

Se puede observar en el diagrama cuatro series de puntos que identifican las situaciones descritas en la tabla 3-5. En primer lugar, los puntos azules simbolizan la situación de flujo libre, donde la intersección se va llenando y por tanto al aumentar la acumulación el *outflow* también aumenta. Luego, los puntos rojos simbolizan la situación de máxima congestión la que ocurre cuando se bloquean las dos pistas de cada intersección aguas abajo bloqueando la salida de la intersección analizada. Los puntos verdes representan la situación que ocurre al recuperar una de las pistas de cada intersección

aguas abajo permitiendo la salida del flujo de la intersección, pero aún con mucha congestión. Finalmente, los puntos naranjos representan la capacidad de la intersección que se alcanza una vez desbloqueadas las dos pistas de ambas intersecciones aguas abajo. El punto (47,5 ; 0) se escapa de la nube representativa de puntos debido a la transición de estados en un ciclo semafórico.

Es importante señalar que si se compara este diagrama con el de la ilustración 4-1 (modelo LWR) se observa que la acumulación de taco es la misma de 60 vehículos. La acumulación crítica que maximiza el *outflow* en este análisis presenta mayor dispersión y es en promedio 21,9 vehículos. No obstante, es muy similar a la obtenida teóricamente 22,2 vehículos con una diferencia porcentual del 1,4%. El *outflow* máximo para este caso es en promedio 3.654 vehículos por hora, a diferencia de los 3.120 vehículos por hora del análisis teórico. Esta diferencia se puede explicar porque para la simulación los tiempos de entre verde compuestos por tres segundos de amarillo más un segundo rojo – rojo no son una pérdida total, ya que igual existe descarga de vehículos en la intersección. Además, el diagrama fundamental de los arcos de la intersección no son iguales a los asumidos en la ecuación (3.2). También es posible observar que la rama de flujo libre del MFD obtenido mediante simulación presenta una pendiente levemente mayor que en el obtenido analíticamente.

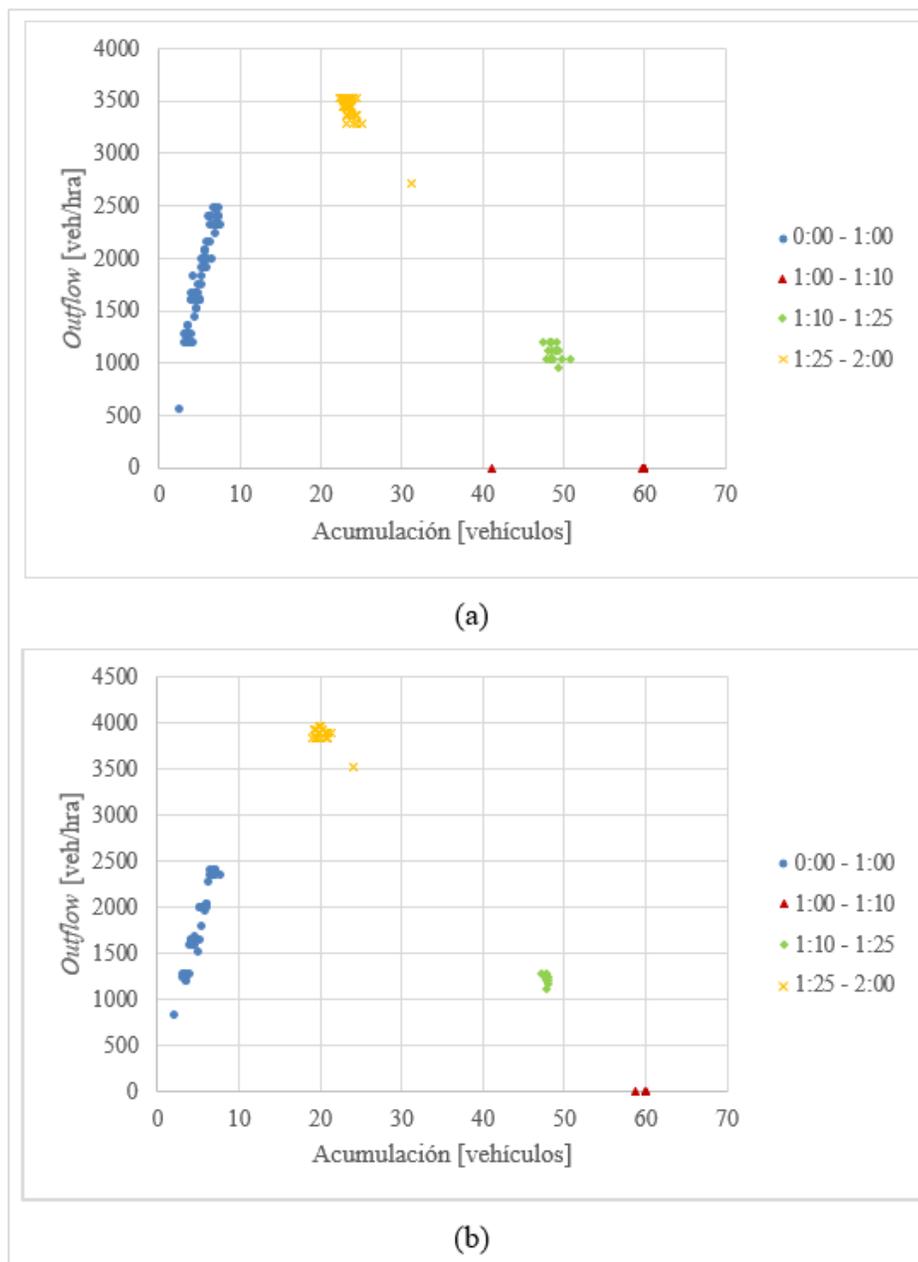
Por lo tanto, a pesar de esta pequeña diferencia en el *outflow* máximo respecto al análisis espacio – temporal, la evidencia de la simulación para el caso base sugiere que existe la relación macroscópica para la intersección analizada. La ventaja de esta simulación es que permite relajar los supuestos (explicados en la sección 3.2.1) del análisis teórico realizado. A continuación se presentan los resultados de los escenarios analizados que permiten agregarle más complejidad a la intersección analizada. Todas las comparaciones se realizaron con el escenario base descrito recientemente. Cada dimensión se analizó de manera separada, con el fin de observar el efecto único que tienen. Sin embargo, el resto de los resultados se pueden consultar en el Anexo A. Estos siguen la misma tónica de los presentados a continuación por lo tanto, las conclusiones son las mismas.

#### 4.2.1.1 Dimensión largo del ciclo

Una de las dimensiones analizadas para ver cómo afecta la relación fundamental de una intersección fue el largo de ciclo. Para ello se analizaron tres largos semafóricos 45 segundos (ciclo pequeño), 60 segundos (ciclo medio) y 90 segundos (ciclo largo). A continuación se presentan los resultados obtenidos para el ciclo pequeño y ciclo largo, en los casos sin viraje y sin aleatoriedad de llegada. El resto de los escenarios pueden ser revisados en el Anexo A. En la ilustración 4-7 se observa el diagrama fundamental de la intersección (a) para un ciclo de 45 segundos y (b) para un ciclo de 90 segundos.

Al comparar los diagramas de la ilustración 4-7 con el de la ilustración 4-6 (caso base) se observa que la acumulación de taco es la misma de 60 vehículos. La acumulación crítica que maximiza el *outflow* tiende a disminuir al aumentar el largo de ciclo. El *outflow* máximo tiende a incrementarse al aumentar el largo de ciclo. Esta diferencia se puede explicar porque al tener ciclos más largos la capacidad de descarga es mayor si observamos la ecuación (4.1). El punto rojo (41,1 ; 0) que se escapa de la nube representativa de puntos para el caso del ciclo de 45 segundos, se debe a la transición de estados en un ciclo semafórico. Es posible notar que la dispersión de los puntos de cada nube de datos tiende a disminuir al aumentar el largo de ciclo. Esto se debe a que el periodo de agregación de los mismos es mayor. Por lo tanto, el efecto de transición de estados en un ciclo disminuye. En cuanto a la pendiente de la rama de flujo libre no es posible apreciar cambios notorios en ella. El nivel de *outflow* promedio de los puntos verdes tiende a aumentar levemente a medida que el largo de ciclo aumenta.

Es posible concluir de estos análisis que al aumentar el ciclo semafórico la acumulación crítica de la intersección tiende a disminuir y que el *outflow* máximo tiende a aumentar. La evidencia nuevamente sugiere, para el caso analizado, la existencia de esta relación macroscópica independiente del largo del ciclo, el cual tiene un impacto directo en la capacidad de la intersección.



**Ilustración 4-7. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

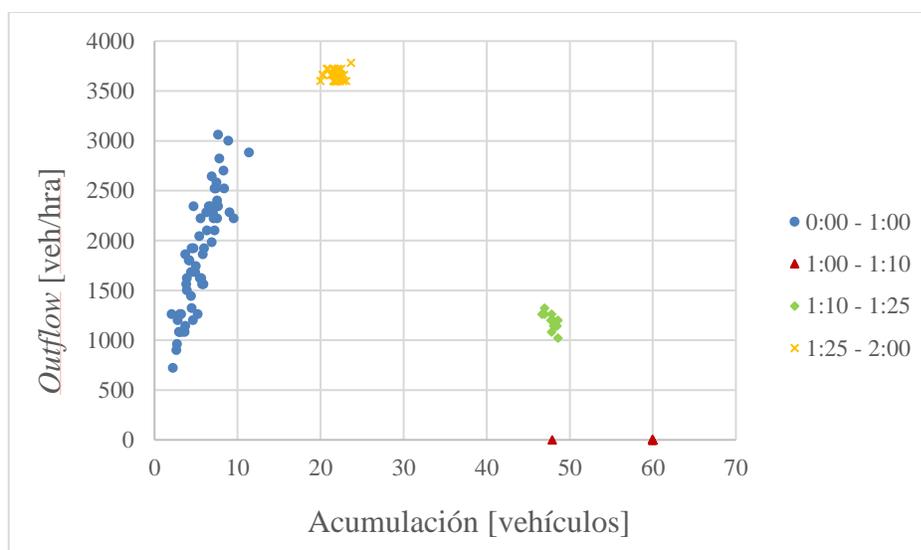
En la tabla 4-1 se resumen los resultados para el análisis del largo de ciclo.

**Tabla 4-1. Resumen de resultados de parámetros relevantes de capacidad de la intersección.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

| <b>Ciclo</b><br>[segundos] | <b>Acumulación</b><br><b>Crítica</b><br>[vehículos] | <b>Outflow</b> <b>Máximo</b><br>[veh/hra] | <b>Pendiente</b><br><b>Flujo Libre</b><br>[1/hra] | <b>Outflow</b><br><b>Puntos Verdes</b><br>[veh/hra] |
|----------------------------|---|---|---|---|
| 45                         | 23,5  | 3.426                                     | 351,2   | 1.103   |
| 60                         | 21,9  | 3.654                                     | 361,7   | 1.191   |
| 90                         | 20,3  | 3.873                                     | 354,4   | 1.218   |

#### 4.2.1.2 Dimensión aleatoriedad en llegadas

A continuación se presentan los resultados obtenidos para este análisis en el caso de un ciclo de 60 segundo con aleatoriedad en llegadas y sin virajes. En la ilustración 4-8 se presenta el diagrama fundamental de la intersección.



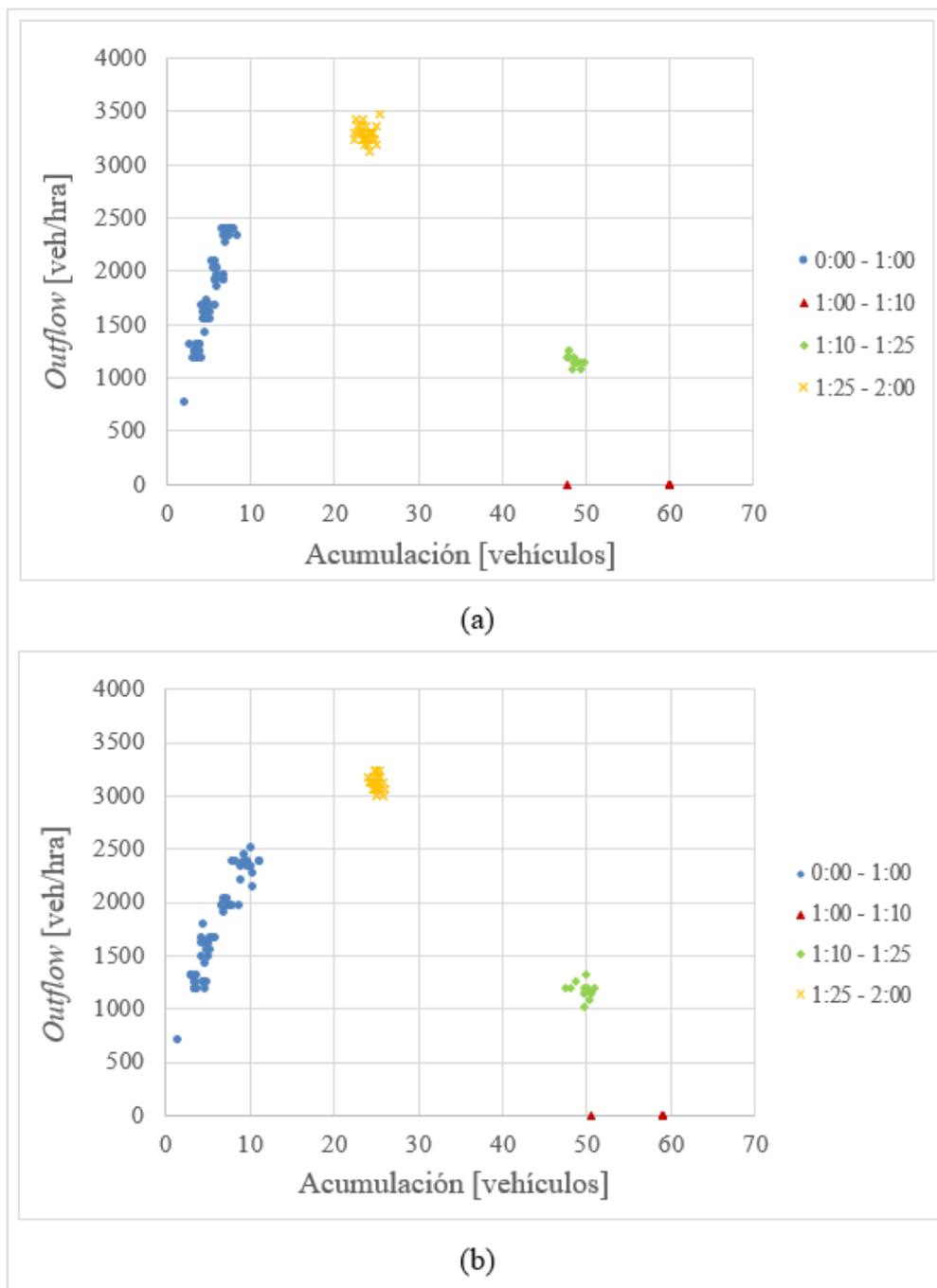
**Ilustración 4-8. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección para escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 60 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

Al comparar este diagrama con el de la ilustración 4-6 (caso base) se observa que la acumulación de taco es la misma de 60 vehículos. La acumulación crítica que maximiza el *outflow* es en promedio 21,9 vehículos. Por lo tanto, es igual a la del caso base analizado. El *outflow* máximo para este caso es en promedio 3.654 vehículos por hora igual que en el caso base. La única diferencia observable es que en la rama de flujo libre los puntos presentan mayor dispersión y una pendiente levemente menor ( $324,5 \left[\frac{1}{hra}\right]$ ) al caso base. Esto es razonable si se considera que la demanda que llega a la intersección ahora tiene un factor estocástico. Además, los puntos de capacidad y congestión son muy similares y no se observa mayor dispersión. Esto se explica porque cuando el sistema alcanza la capacidad o congestión, el *outflow* de la intersección está determinado únicamente por la infraestructura y la operación del semáforo. Por lo tanto, se eliminan estos factores de estocasticidad que son visibles en la rama de flujo libre. Finalmente, la nube de puntos verdes tiene un *outflow* promedio de 1.179 [veh/hra], lo que es ligeramente inferior al caso base.

Es posible concluir de estos análisis que al agregar aleatoriedad en las llegadas no tiene un impacto relevante en la forma del diagrama fundamental macroscópico de la intersección. En la rama de flujo libre se observa mayor dispersión en los puntos y una pendiente similar (diferencia del 0,1%). Por lo tanto, la evidencia sugiera la existencia de esta relación independiente de la aleatoriedad para el caso analizado.

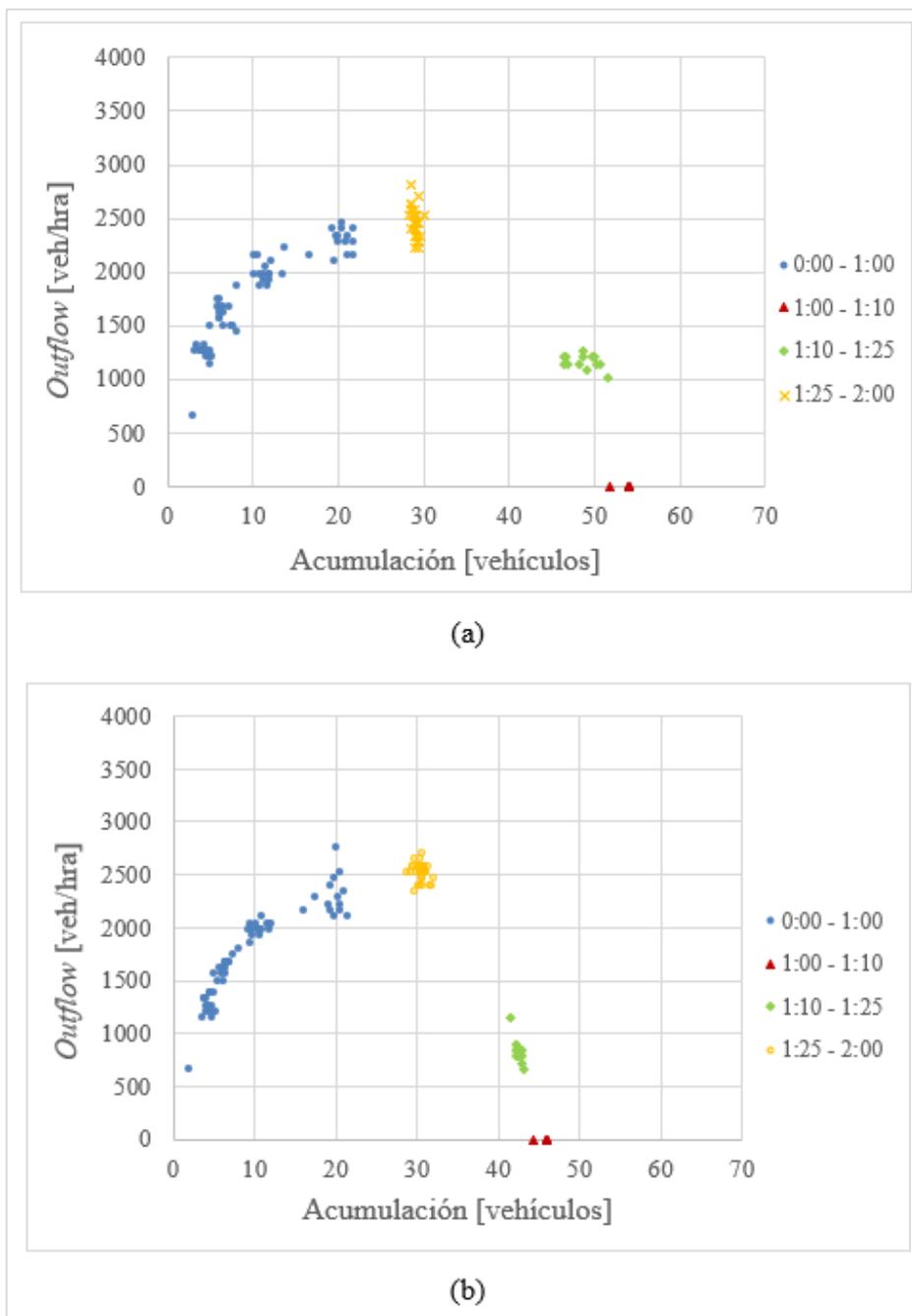
#### 4.2.1.3 Dimensión virajes

A continuación se presentan los resultados obtenidos para estos casos sin aleatoriedad en las llegadas y para el ciclo base de 60 segundos. En la ilustración 4-9 se presentan los diagramas fundamentales para la intersección (a) con virajes homogéneos 10% (nivel de viraje bajo) y (b) con virajes homogéneos 25% (nivel de viraje medio). En la ilustración 4-10 se presentan los diagramas fundamentales para la intersección (a) con virajes homogéneos 60% (nivel de viraje alto) y (b) con virajes heterogéneos 25% - 75%.



**Ilustración 4-9. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 60 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos.**

**Fuente: Elaboración Propia.**



**Ilustración 4-10. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 60 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

Al comparar los diagramas de la ilustración 4-9 con el de la ilustración 4-6 (caso base) se observa que la acumulación de taco es la misma de 60 vehículos. La acumulación crítica que maximiza el *outflow* tiende a aumentar a medida que la proporción de virajes aumenta. El *outflow* máximo tiende a disminuir al incrementar las proporciones de virajes en estos casos. Esta diferencia se debe a la existencia de virajes lo que disminuye la capacidad de la intersección por bloqueos a los vehículos que seguían recto en el caso base. Al existir, vehículos que doblan generan una mayor cola en la descarga por lo tanto también es esperable que la acumulación promedio por ciclo aumente. Además, se observa que la pendiente de la rama a flujo libre también comienza a disminuir, lo que se debe a los bloqueos generados por los vehículos que viran en la intersección. El nivel de *outflow* promedio de los puntos verdes tiende a disminuir levemente a medida que la proporción de virajes aumenta.

Al comparar los diagramas de la ilustración 4-10 con el de la ilustración 4-6 (caso base) se observa que la acumulación de taco disminuye. Esto se debe a que los bloqueos generados por el alto nivel de viraje impide el paso de los vehículos que siguen recto. Por lo tanto, parte de los arcos aguas abajo de la intersección no son utilizados al 100% y la acumulación de taco disminuye. La acumulación crítica que maximiza el *outflow* es un rango de acumulaciones a diferencia de los casos anteriores. El *outflow* máximo tiende a disminuir al incrementar las proporciones de virajes en estos casos. Esta diferencia nuevamente se puede explicar por tener una gran cantidad de virajes, lo que impacta directamente en la capacidad del MFD. Además, se observa que la rama de flujo libre ya no es una recta, sino que una curva. Esto se traduce en que a niveles de demanda menores se alcanzan estados de capacidad a diferencia de los casos anteriormente analizados. El nivel de *outflow* promedio de los puntos verdes tiende a disminuir a medida que la proporción de virajes aumenta.

Es posible concluir de estos análisis que al aumentar la proporción de virajes la acumulación crítica de la intersección tiende a aumentar (llegando a transformarse en un rango) y que el *outflow* máximo tiende a disminuir. La acumulación de taco disminuye en niveles altos de viraje (homogéneos y heterogéneos). Para niveles bajos y medios de viraje

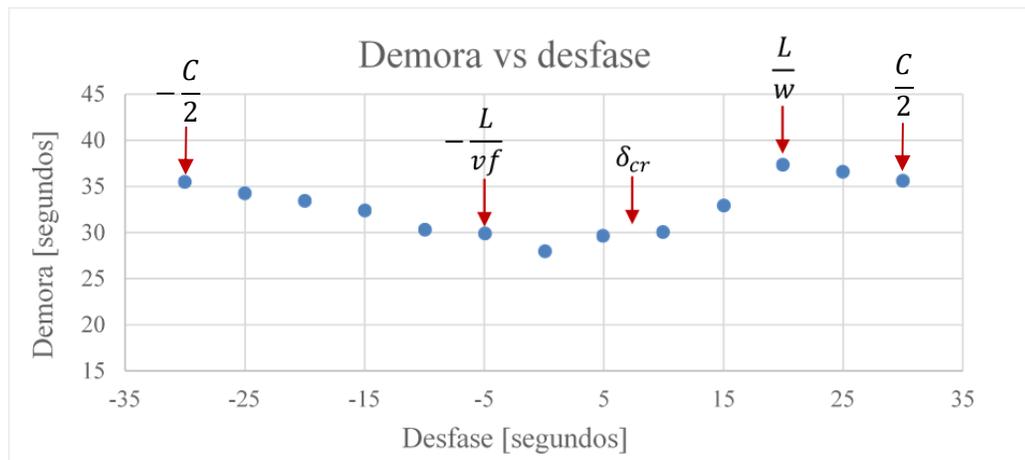
homogéneo se tiene que el impacto en la forma del MFD no es tan notorio. Sin embargo, tanto para niveles de viraje alto homogéneo como para el caso heterogéneo se observa una relación distinta a partir de la rama de flujo libre y con capacidades de descarga menores. La evidencia sugiere la existencia de esta relación macroscópica independiente del nivel de virajes existente incluso si los virajes en los sentidos no están balanceados (heterogéneos). La proporción de virajes tienen un impacto directo en la capacidad de la intersección y en la forma del MFD. En la tabla 4-2 se resumen los resultados.

**Tabla 4-2. Resumen resultados de parámetros relevantes de capacidad de la intersección.**  
Fuente: Elaboración Propia.

| <b>Escenario de Viraje</b> | <b>Acumulación Crítica [vehículos]</b> | <b>Outflow Máximo [veh/hra]</b> | <b>Acumulación de Taco [vehículos]</b> | <b>Pendiente Flujo Libre [1/hra]</b> | <b>Outflow Puntos Verdes [veh/hra]</b> |
|----------------------------|--|---------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| Sin Viraje (base)          | 21,9                                   | 3.654                           | 60                                     | 361,7                                | 1.191                                  |
| Homogéneo 10%              | 23,8                                   | 3.286                           | 60                                     | 335,7                                | 1.176                                  |
| Homogéneo 25%              | 25,1                                   | 3.111                           | 60                                     | 269,0                                | 1.170                                  |
| Homogéneo 60%              | 26 – 32                                | 2.462                           | 54                                     | 141,6                                | 1.161                                  |
| Heterogéneo 25% - 75%      | 26 – 34                                | 2.521                           | 46                                     | 147,7                                | 823                                    |

#### **4.2.2 Relación acumulación – desfase**

Tal como se explicó 3.3.4 se utilizará la relación demora – desfase que tiene un comportamiento igual a la relación acumulación – desfase (cambio de escala). En la ilustración 4-11 se presenta la relación demora – desfase.



**Ilustración 4-11. Relación demora - desfase para la intersección analizada mediante AIMSUN.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

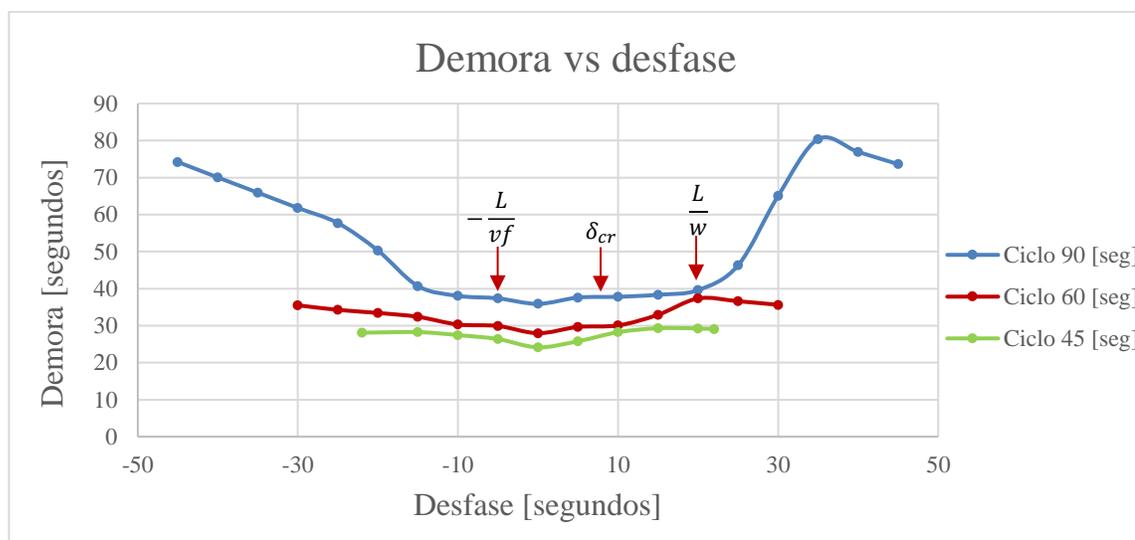
Se puede observar que para el intervalo  $\delta \in \left[-\frac{L}{vf}; \delta_{cr}\right]$  la demora se mantiene prácticamente constante al igual que en la ilustración 4-5 del análisis espacio – temporal. Solo se escapa el desfase cero que tiene menor demora promedio que el resto. El intervalo  $\delta \in \left(\delta_{cr}; \frac{L}{w}\right]$  tiene el mismo comportamiento ascendente que en el análisis mediante LWR. Además, se puede observar el comportamiento de la relación cuando  $\delta \in \left(-\frac{C}{2}; -\frac{L}{vf}\right) \cup \left(\frac{L}{w}; \frac{C}{2}\right)$ . Es posible notar que para los desfases 30 y -30 la demora promedio es muy similar. Esto hace sentido si consideramos que estos dos desfases representan la misma operación para la intersección.

Por lo tanto, a pesar de esta pequeña diferencia en el desfase cero respecto al análisis espacio – temporal, la evidencia de la simulación para el caso base sugiere que la relación demora – desfase tiene un comportamiento similar al que se observó teóricamente. A continuación se presentan los resultados de los escenarios simulados que permiten agregarle más complejidad a la intersección analizada. Todas las comparaciones se realizarán con el escenario base descrito recientemente. Cada dimensión se analizará de manera separada, con el fin de observar el efecto único que tienen. Sin embargo, el resto

de los resultados se pueden consultar en el Anexo B. Estos siguen la misma tónica de los presentados a continuación por lo tanto, las conclusiones son las mismas.

#### 4.2.2.1 Dimensión largo del ciclo

Al igual que para el MFD se analizó el largo del ciclo para ver cómo afecta la relación acumulación – desfase. Para ello se analizaron 3 largos semafóricos 45 segundos (ciclo pequeño), 60 segundos (ciclo medio) y 90 segundos (ciclo largo). A continuación se presentan los resultados obtenidos para el ciclo pequeño y ciclo largo, en los casos sin viraje y sin aleatoriedad de llegada. El resto de los escenarios pueden ser revisados en el Anexo B. En la ilustración 4-12 se presenta la relación demora – desfase para los largos de ciclo analizados.



**Ilustración 4-12. Relación demora - desfase para la intersección, considerando los distintos largos de ciclo. Fuente: Elaboración Propia.**

Al comparar la curva del ciclo de 45 segundos con la del ciclo de 60 segundos (caso base), se observa que la relación es muy similar, pero tiende a comprimirse. Esto se debe

a que en este análisis el ciclo es más corto y por tanto se analizan menos desfases  $\delta \in [-22; 22]$  comparado al caso base. Además, el intervalo del comportamiento conocido  $\delta \in \left[-\frac{L}{vf}; \frac{L}{w}\right]$  abarca más desfases del total analizado. La diferencia entre la mínima demora alcanzada y la máxima para este caso es 5,2 segundos. Por lo tanto, es menor que en el caso base donde esta diferencia era igual a 9,4 segundos. Los resultados son consistentes con lo esperado, ya que al tener ciclos más cortos las demoras promedios de la intersección disminuyen. A pesar de que estas diferencias pueden ser pequeñas, al considerar congestión y demandas altas los ahorros de tiempo totales entre un buen o un mal desfase son significativas.

A su vez, al comparar la curva del ciclo de 90 segundos con la del ciclo de 60 segundos (caso base), se observa que la relación es muy similar, pero tiende a expandirse. Esto se debe a que en este análisis el ciclo es más largo y por tanto se analizan más desfases  $\delta \in [-45; 45]$  comparado al caso base. Además, el intervalo del comportamiento conocido  $\delta \in \left[-\frac{L}{vf}; \frac{L}{w}\right]$  abarca menos desfases del total analizado. La diferencia entre la mínima demora alcanzada y la máxima para este caso es 44,5 segundos. Por lo tanto, es bastante mayor que en el caso base donde esta diferencia era igual a 9,4 segundos. Los resultados son consistentes con lo esperado, ya que al tener ciclos más largos las demoras promedios de la intersección aumentan.

**Tabla 4-3. Resumen de resultados de la relación demora – desfase para los diferentes largos de ciclo.**

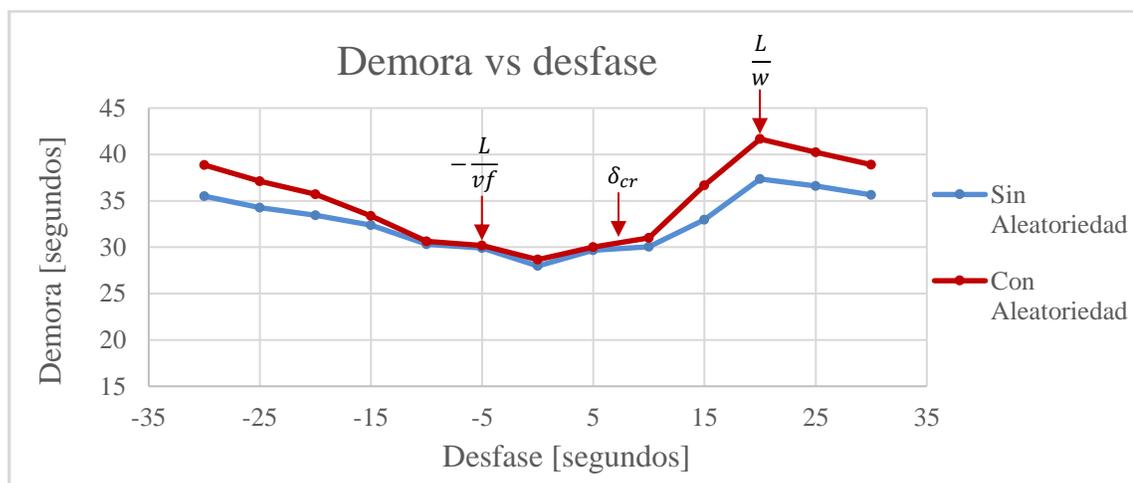
**Fuente: Elaboración Propia.**

| <b>Ciclo<br/>[segundos]</b> | <b>Demora mínima<br/>[segundos]</b> | <b>Demora máxima<br/>[segundos]</b> | <b>Diferencias<br/>[segundos]</b> | <b>Mejor<br/>Desfase<br/>[segundos]</b> |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---|
| 45                          | 24,2                                | 29,3                                | 5,2                               | 0                                       |
| 60                          | 28,0                                | 37,4                                | 9,4                               | 0                                       |
| 90                          | 35,9                                | 80,4                                | 44,5                              | 0                                       |

En la tabla 4-3 se resumen los resultados. Es posible concluir de estos análisis que al aumentar el ciclo semafórico la relación acumulación – desfase o demora – desfase tiende a expandirse. Además, las diferencias entre un buen y un mal desfase se hacen mayores. Para todos los ciclos analizados, el mejor desfase (el que presenta menor demora) es el de 0 segundos. La evidencia sugiere la existencia de esta relación independiente del largo del ciclo.

#### 4.2.2.2 Dimensión aleatoriedad en llegadas

A continuación se presentan los resultados obtenidos para este análisis en el caso de un ciclo de 60 segundos con aleatoriedad en llegadas y sin virajes. El resto de los escenarios pueden ser revisados en el Anexo B. En la ilustración 4-13 se observa la relación demora – desfase de la intersección para un ciclo de 60 segundos con y sin aleatoriedad en el proceso de llegada.



**Ilustración 4-13. Relación demora - desfase para la intersección analizada, considerando la dimensión de aleatoriedad en el proceso de llegadas. Fuente: Elaboración Propia.**

Al comparar ambas curvas se observa que el comportamiento de la relación es prácticamente similar. La diferencia es que al agregar aleatoriedad en las llegadas la relación se estira en dirección vertical. Esto implica que la diferencia entre un buen y un mal desfase se acrecienta. La resta entre la mínima demora alcanzada y la máxima para este caso es de 13 segundos. Lo anterior es esperable ya que al añadir estocasticidad al sistema las demoras tienden a aumentar. Por lo tanto, la diferencia entre ambas relaciones se ve explicada por este factor.

Para ambos casos, el mejor desfase (el que presenta menor demora) es el de 0 segundos. La evidencia sugiere la existencia de esta relación independiente de la aleatoriedad en las llegadas de la demanda. En la tabla 4-4 se resumen los resultados.

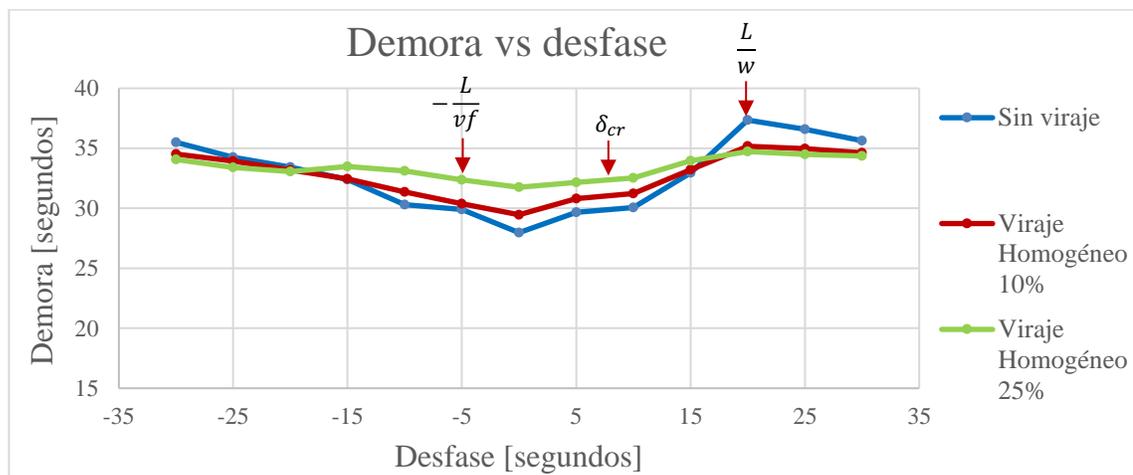
**Tabla 4-4. Resumen de resultados de la relación demora – desfase para la aleatoriedad en llegadas.**  
Fuente: Elaboración Propia.

| <b>Aleatoriedad en llegadas</b> | <b>Demora mínima [segundos]</b> | <b>Demora máxima [segundos]</b> | <b>Diferencia [segundos]</b> | <b>Mejor Desfase [segundos]</b> |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| No (base)                       | 28,0                            | 37,4                            | 9,4                          | 0                               |
| Si                              | 28,7                            | 41,7                            | 13                           | 0                               |

#### 4.2.2.3 Dimensión virajes

Una dimensión analizada para ver cómo afecta a la relación demora – desfase de una intersección fue la proporción de virajes en la intersección. Para ello se analizaron 4 tipos de virajes, un nivel bajo de viraje (homogéneo 10%), nivel medio de viraje (homogéneo 25%), nivel alto de viraje (homogéneo 60%), y nivel medio de viraje para un sentido y alto para otros (heterogéneo 25% - 75%). A continuación se presentan los resultados obtenidos para estos casos sin aleatoriedad en las llegadas y para el ciclo base de 60 segundos. El resto de los escenarios pueden ser revisados en el Anexo B.

En la ilustración 4-14 se presenta la relación demora – desfase para las proporciones de viraje bajo (homogéneo 10%) y medio (homogéneo 25%) analizadas.



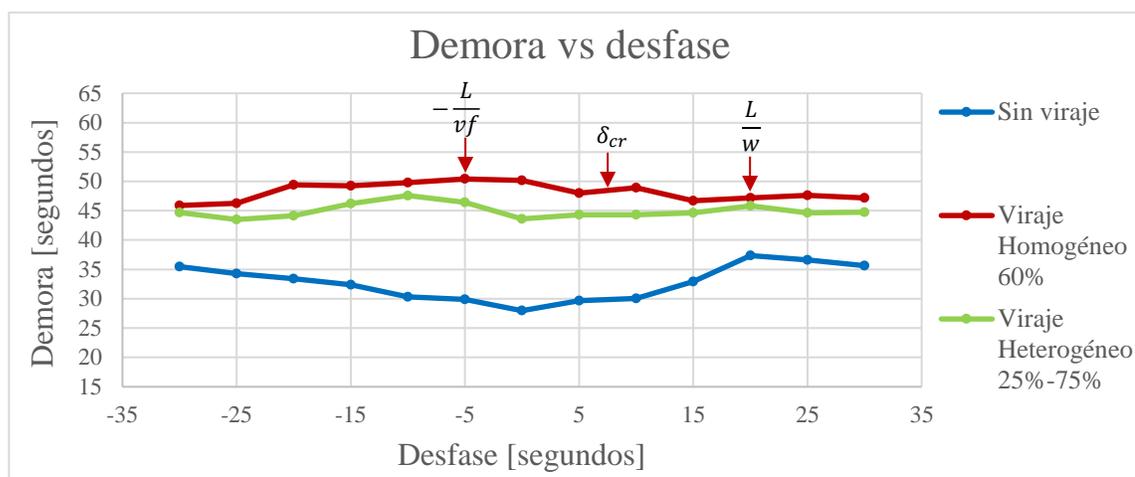
**Ilustración 4-14. Relación demora - desfase para la intersección, considerando proporciones de virajes baja y media. Fuente: Elaboración Propia.**

Al comparar la curva de viraje homogéneo 10% con la sin viraje (caso base), se observa que el comportamiento de la relación es prácticamente similar. La diferencia es que al tener un nivel bajo y medio de viraje la relación se comprime en dirección vertical. La demora mínima es mayor y la demora máxima es menor al caso base, respectivamente. Lo anterior es esperable ya que al existir virajes en la intersección estos comienzan a bloquear a los vehículos que siguen recto. Por lo tanto, las demoras de los vehículos tienden a aumentar. La diferencia entre la mínima demora alcanzada y la máxima para este caso es de 5,7 segundos. Por lo tanto, esta compresión vertical en la relación genera que esta diferencia sea menor que en el caso base 9,4 segundos.

A su vez, al comparar la curva de viraje homogéneo 25% con la sin viraje (caso base), se observa que la diferencia entre las curvas es que al tener un nivel medio de viraje la relación se comprime aún más en dirección vertical. La diferencia entre la mínima demora alcanzada y la máxima para este caso es de 3 segundos. Por lo tanto, esta

compresión vertical en la relación genera que esta diferencia sea menor que en el caso base 9,4 segundos. Las diferencias entre un mal y un buen desfase disminuyen.

En la ilustración 4-15 se observa la relación demora – desfase de la intersección para los casos de nivel de viraje alto y viraje heterogéneo.



**Ilustración 4-15. Relación demora - desfase para la intersección, considerando proporciones de virajes altas homogénea y heterogénea. Fuente: Elaboración Propia.**

Al comparar la curva de viraje homogéneo 60% y la de viraje heterogéneo 25% - 75% se observa que el comportamiento de la relación es similar. Sin embargo, al comparar ambas curvas con la sin viraje (caso base) se observa que las proporciones de viraje altas tanto homogénea como heterogénea afectan claramente la relación acumulación – desfase. No es posible identificar un comportamiento claro para la relación en este análisis. La diferencia entre la mínima demora alcanzada y la máxima para el caso de viraje alto homogéneo es de 4,5 segundos. Para el caso de viraje heterogéneo es de 4,1 segundos.

Es posible concluir de estos análisis que para niveles de virajes bajos y medios la relación demora – desfase, la demora mínima tiende a aumentar y la demora máxima a disminuir respecto al caso base. Adicionalmente, al aumentar la proporción de virajes (para niveles bajos y medios) tiende a comprimir la relación verticalmente. Para niveles

altos de viraje homogéneos y heterogéneos la forma de la relación demora – desfase se ve afectada claramente. No es posible identificar un comportamiento claro para los desfases. La evidencia sugiere la existencia de esta relación demora – desfase para niveles bajos y medios de viraje. En la tabla 4-5 se resumen los resultados.

**Tabla 4-5. Resumen resultados de la relación demora – desfase para los escenarios de viraje.**  
Fuente: Elaboración Propia.

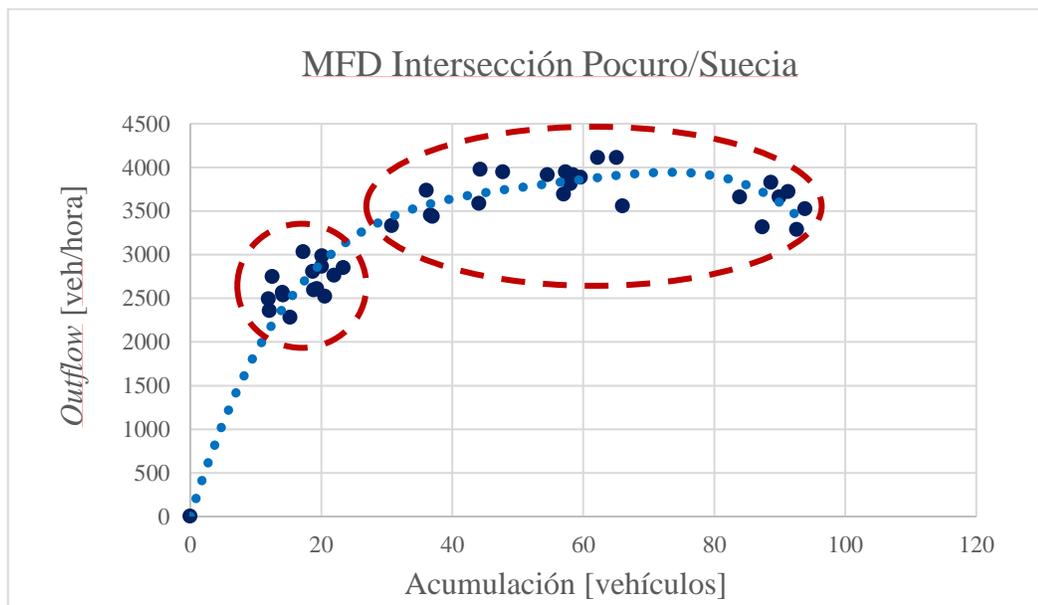
| <b>Escenario de Viraje</b> | <b>Demora mínima [segundos]</b> | <b>Demora máxima [segundos]</b> | <b>Diferencia [segundos]</b> | <b>Mejor Desfase [segundos]</b> |
|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Sin Viraje (base)          | 28,0                            | 37,4                            | 9,4                          | 0                               |
| Homogéneo 10%              | 29,5                            | 35,2                            | 5,7                          | 0                               |
| Homogéneo 25%              | 31,8                            | 34,7                            | 3,0                          | 0                               |
| Homogéneo 60%              | 45,9                            | 50,4                            | 4,5                          | -30                             |
| Heterogéneo 25% - 75%      | 43,5                            | 47,6                            | 4,1                          | 0                               |

### 4.3 Resultados análisis empírico

A continuación, en la ilustración 4-16 se presenta el MFD para la intersección analizada con los datos obtenidos en ambos días de medición. Los puntos se obtuvieron mediante las curvas acumuladas y la metodología descrita en la sección 3.4. Cada punto representa una ventana de un ciclo semafórico para la zona analizada.

Se puede observar en el diagrama dos nubes de puntos encerradas por figuras rojas, cada nube corresponde a los datos provenientes de los días descritos en la tabla 3-8. En primer lugar, los puntos encerrados por la circunferencia representan la situación de flujo

libre, donde al aumentar la acumulación el *outflow* también aumenta. Luego, los puntos encerrados por el óvalo simbolizan la situación de capacidad la que ocurre cuando la intersección analizada es el cuello de botella. Además, se puede observar que en los puntos de mayor acumulación comienza a decaer el *outflow*, es decir, la intersección está entrando a la congestión. Es interesante notar que los puntos de flujo libre provienen del periodo fuera punta, los de capacidad y comienzo de la congestión provienen del periodo punta tarde. La línea punteada azul de la ilustración 4-16 corresponde a un ajuste polinomial de grado 4 realizado a los datos. Este presenta un alto nivel de explicación con un  $R^2$  de 0,92. De este MFD es posible concluir que la intersección está bien coordinada con sus intersecciones vecinas, ya que para un periodo con alta demanda (punta tarde) se mantiene operando a capacidad.



**Ilustración 4-16. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección Pocuro con Suecia.**  
Fuente: Elaboración Propia.

En la realidad es complejo observar situaciones de completa congestión o *gridlock*. Para que esto ocurra los vehículos deben estar completamente detenidos en ambos

sentidos de la intersección durante un ciclo semafórico. Esta situación es difícil de observar a menos que ocurra algún incidente aguas abajo de ambos accesos que lo provoque, tal como se realizó en la simulación para obtener puntos de la rama congestionada del MFD. De igual forma, observar puntos donde la intersección analizada tenga acumulaciones realmente bajas en flujo libre es complejo. Estos puntos podrían obtenerse en periodos donde la demanda sea realmente baja, como en la madrugada de un día.

La acumulación crítica que maximiza el *outflow* en este caso es un rango de acumulaciones que se mueve entre los 54,6 y los 65,1 vehículos. El *outflow* máximo para este caso es en promedio 3.955 vehículos por hora. Este resultado es consistente si consideramos que la capacidad teórica según la ecuación (4.3) es de 4.290 vehículos por hora. Los puntos de mayor *outflow* corresponden a 4.110 vehículos por hora. Sin embargo, es esperable que en la realidad se observen capacidades menores a este valor teórico debido a las distintas interacciones entre vehículos, la aleatoriedad del sistema y la presencia de virajes.

$$Outflow_{max} = 5.400 * \frac{62}{120} + 3.600 * \frac{50}{120} = 4.290 \left[ \frac{veh}{hra} \right] \quad (4.3)$$

La ecuación (4.3) asume un flujo de saturación aproximado de 1.800 vehículos por hora por cada pista y los verdes efectivos de cada etapa. El sentido norte – sur tiene dos pistas (arco egreso) y un verde efectivo de 50 segundos. El sentido oeste – este tiene tres pistas (arco egreso) y un verde efectivo de 62 segundos. Esto se puede observar en la ilustración 3-19.

Es posible observar que la forma de este diagrama es similar a los MFD de la ilustración 4-10. Esta intersección tiene pistas exclusivas de viraje en ambos arcos de acceso, dado que existe una cantidad de virajes importantes. Es esperable que la forma del MFD para la intersección tenga similitudes con las descritas en los escenarios con virajes altos. Sin embargo, estas proporciones de viraje no pueden ser conocidas a partir de los

datos medidos. Lo anterior se debe a que solo se observan los vehículos en las entradas y salidas de la zona analizada, pero no se cuentan las maniobras que realizan en la intersección misma.

Un factor importante de este experimento son los errores humanos en la medición. Para construir las curvas acumuladas se debe tener una precisión importante. Por ejemplo, si en algún momento la curva de salida es mayor que la de entrada hay un error evidente. Esto no puede pasar en la realidad, ya que se estarían generando autos dentro de la zona analizada. Para corregir este tipo de errores se utilizó como respaldo las grabaciones realizadas. Una conclusión del experimento es la dificultad que existe en la medición de los datos para la construcción de las curvas acumuladas. Un pequeño error puede provocar distorsiones que hacen incalculables el *outflow* y acumulación de la intersección.

La evidencia de este experimento empírico sugiere que existe la relación macroscópica MFD para la intersección Pocuro con Suecia. La ventaja de este experimento es que aborda características de la realidad que son obviadas por los análisis de simulación y espacio – temporal. Además, es posible concluir que la capacidad teórica descrita por la ecuación (4.3) es una cota superior para el *outflow* máximo en la realidad. El impacto de los virajes se observa en la relación, generando un rango de acumulaciones críticas que maximizan el *outflow*. Es difícil obtener puntos de este diagrama para bajas acumulaciones (intersección casi vacía) y para altas acumulaciones (intersección casi llena). Finalmente, existe una dificultad importante en la toma de datos para la construcción de este diagrama. Por lo tanto, es necesario contar con mejores herramientas para ello.

## 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

En esta investigación se desarrolló una metodología analítica, de simulación y empírica para encontrar la relación fundamental de una intersección semaforizada. La relación propuesta se basa en el MFD propuesto por Geroliminis y Daganzo (2007). La evidencia de todos los enfoques desarrollados sugieren la existencia de un diagrama fundamental de tráfico para una intersección semaforizada compuesta por vías unidireccionales y con ausencia de transporte público. Esta relación cumple con la hipótesis planteada, ya que es posible identificar los tres regímenes (i) flujo libre, (ii) capacidad y (iii) congestión.

Las principales contribuciones para el análisis de intersecciones semaforizadas respecto a las investigaciones recientes de Daganzo y Lehe (2016) y Daganzo *et al* (2017) son los siguientes: (i) se abordan vías transversales a la intersección y no para un solo eje unidimensional, (ii) se incluye en el análisis los virajes en la intersección y (iii) se analiza el impacto del largo del ciclo en la forma del MFD. A su vez, se observan las siguientes diferencias: (i) se aborda el MFD para una intersección semaforizada y no para un eje compuesta por múltiples intersecciones y (ii) se desarrollan tres metodologías para encontrar la relación a diferencia de los estudios anteriores donde solo se aborda de forma analítica usando teoría variacional o programación lineal.

De los análisis realizados se concluyó que al aumentar el largo de ciclo la acumulación crítica de la relación tiende a disminuir y el *outflow* máximo a aumentar. El impacto que tiene un aumento del 50% en el largo del ciclo base (60 segundo) es del 6% en la capacidad de la intersección. La disminución del 25% en el largo del ciclo base tiene un impacto del -6,2% en la capacidad de la intersección.

El impacto de considerar aleatoriedad en las llegadas no es relevante en la forma del diagrama fundamental macroscópico de la intersección. En la rama de flujo libre se

observa mayor dispersión en los puntos. Sin embargo, en situaciones de capacidad o congestión de la intersección, el MFD permanece invariable a este factor.

La proporción de virajes afecta la forma del MFD de la intersección. Para niveles bajos y medios de viraje homogéneo se tiene que el impacto en la forma del MFD no es tan notorio. Al aumentar los niveles de viraje, la acumulación crítica de la intersección tiende a aumentar (llegando a transformarse en un rango) y el *outflow* máximo tiende a disminuir. La acumulación de taco disminuye en niveles altos de viraje (homogéneos y heterogéneos). Tanto para niveles de viraje alto homogéneo como para el caso heterogéneo se observa una relación distinta a partir de la rama de flujo libre y con capacidades de descarga menores.

También, en esta investigación se desarrolló una metodología analítica y otra de simulación para encontrar una relación entre los desfases semafóricos y la acumulación de vehículos en la intersección. La relación propuesta tiene como objetivo explorar la coordinación semafórica cuando existe congestión en la intersección. En la tesis no se propone una metodología de coordinación, pero se presentan herramientas que podrían ser útiles para dicho propósito.

Las principales contribuciones para la coordinación semafórica es que (i) aborda la coordinación desde un punto de vista reactivo, es decir, cuando la congestión ya se generó se busca retomar la operación de la intersección a su capacidad y (ii) se explora la relación acumulación – desfase en distintos escenarios mediante simulación.

La evidencia encontrada es que para los enfoques analíticos y de simulación desarrollados existe una relación acumulación – desfase, cuando las proporciones de viraje son de niveles bajos o medios (bajo el 25%). En esta relación existe un intervalo de desfases que producen menores acumulaciones y por tanto mejoran la operación de la misma.

De los análisis realizados se concluyó que la relación acumulación – desfase existe independiente del largo de ciclo. Al aumentar el ciclo semafórico la relación acumulación – desfase tiende a expandirse. Además, las diferencias entre un buen y un mal desfase se

hacen mayores. Es decir, el tener ciclos más largos genera aumentos en las demoras de los vehículos en la intersección.

El impacto de la aleatoriedad en las llegadas sobre la relación acumulación – desfase es que esta tiende a estirarse verticalmente. Esto implica que las demoras de la intersección aumentan debido a la estocasticidad del sistema. Sin embargo, independiente de este factor la relación existe y es bien definida.

La proporción de virajes afecta la forma de la relación acumulación – desfase. Para niveles de virajes bajos y medios la relación acumulación – desfase tiende a disminuir la demora máxima y a incrementar la demora mínima experimentada. Adicionalmente, al aumentar la proporción de virajes (para niveles bajos y medios) tiende a comprimir la relación verticalmente. Esto último implica que las diferencias en las demoras generadas por un buen y un mal desfase disminuyan. Para niveles altos de viraje homogéneos y heterogéneos, la forma de la relación acumulación – desfase se ve afectada claramente. No es posible identificar un comportamiento claro para los desfases.

La evidencia empírica sugiere la existencia de la relación macroscópica MFD para la intersección Pocuro con Suecia. El impacto de los virajes se observa en la relación generando un rango de acumulaciones críticas que maximizan el *outflow*. Es difícil obtener puntos de este diagrama para bajas acumulaciones (intersección casi vacía) y para altas acumulaciones (intersección casi llena). También, existe una dificultad importante en la toma de datos para la construcción de este diagrama. Por lo tanto, es necesario contar con mejores herramientas para ello.

## **5.2 Recomendaciones**

Para complementar la primera aproximación desarrollada para la existencia del MFD y su posible uso en la coordinación semafórica de la intersección se proponen las siguientes futuras líneas de investigación.

1. En la realidad son pocas las intersecciones donde no existe el tráfico mixto. La inclusión de transporte público es un importante avance para entender cómo se ve afectada esta relación macroscópica de la intersección.
2. En la investigación realizada se consideran vías unidireccionales. Un aporte para el estudio sería la evaluación de la bidireccionalidad de las calles en ambos sentidos. Al añadir la otra dirección se tendría una mayor cantidad de virajes que podría impactar en la relación propuesta.
3. Si bien la evidencia empírica sugiere la existencia del MFD en la intersección Pocuro con Suecia, es necesario realizar más experimentos en intersecciones más complejas.
4. Investigar formas adecuadas para la toma de los datos con el fin de construir el MFD de una intersección. Las tecnologías *bluetooth* se han utilizado en diversas investigaciones y podrían ser una buena aproximación para construir este diagrama.
5. En la tesis se asumen largos de ciclo y diseños de etapas iguales entre las intersecciones adyacentes y la analizada. Por lo tanto, se propone estudiar el impacto de diferentes ciclos y repartos de verdes para las intersecciones.
6. En la misma línea del punto anterior, en la metodología propuesta solo se analizan desfases iguales entre las intersecciones adyacentes. Por lo tanto, estudiar el efecto de distintos desfases para la coordinación puede entregar nuevas respuestas.
7. Un paso natural de la investigación es analizar la relación acumulación – desfase empíricamente. Sin embargo, es necesario tener en cuenta la dificultad de poder cambiar las programaciones de semáforo con el fin de estudiar dicha relación en la realidad.
8. Desarrollar una metodología de control y gestión de tráfico para intersecciones semaforizadas. Para ello se propone utilizar las relaciones encontradas, tanto del MFD de la intersección como la relación acumulación – desfase planteada.

## BIBLIOGRAFÍA

Akcelik, R. (1981). Traffic signals: capacity and timing analysis. *Australian Road Research board Ltd. Research Report 123*.

Akçelik, R., & Roupail, N. M. (1993). Estimation of delays at traffic signals for variable demand conditions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(2), 109-131.

Aboudolas, K., & Geroliminis, N. (2013). Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 55, 265–281. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.07.003>

Buisson, C., & Ladier, C. (2009). Exploring the Impact of Homogeneity of Traffic Measurements on the Existence of Macroscopic Fundamental Diagrams. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2124, 127–136. <https://doi.org/10.3141/2124-12>

Bull, A. (2003). Congestión de Tránsito El Problema y Cómo Enfrentarlo. Santiago de Chile: CEPAL.

Daganzo, C. F. (1998). Queue Spillovers in Transportation Networks with a Route Choice. *Transportation Science*, 32 (1), 3-11. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.32.1.3>

Daganzo, C. F. (2007). Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(1), 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.03.001>

Daganzo, C. F., & Geroliminis, N. (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9), 771–781. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.06.008>

Daganzo, C. F., & Lehe, L. J. (2016). Traffic flow on signalized streets. *Transportation Research Part B: Methodological*, *90*, 56–69. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.03.010>

Daganzo, C. F., Lehe, L. J., & Argote-Cabanero, J. (2017). Adaptive offsets for signalized streets. *Transportation Research Procedia*, *23*, 612–623. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.034>

De Jong, D., Knoop, V. L., & Hoogendoorn, S. P. (2013). The effect of signal settings on the macroscopic fundamental diagram and its applicability in traffic signal driven perimeter control strategies. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, (Itsc), 1010–1015. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728364>

Fernández, R. (2011). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*, Lima, Perú. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Gayah, V., & Dixit, V. (2013). Using Mobile Probe Data and the Macroscopic Fundamental Diagram to Estimate Network Densities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2390*, 76–86. <https://doi.org/10.3141/2390-09>

Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2007). Macroscopic modeling of traffic in cities. *TRB 86th Annual Meeting*, (January), 7–413. Retrieved from [http://www.ce.berkeley.edu/~nikolas/RESUME\\_files/07-0413.pdf](http://www.ce.berkeley.edu/~nikolas/RESUME_files/07-0413.pdf)

Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, *42*(9), 759–770. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.02.002>

Geroliminis, N., Haddad, J., & Ramezani, M. (2012). Optimal Perimeter Control for Two Urban Regions With Macroscopic Fundamental Diagrams: A Model Predictive Approach, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *14*(1), 1–12.

Geroliminis, N., & Sun, J. (2011). Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(3), 605–617. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2010.11.004>

Girault, J.-T., Gayah, V. V., Guler, S. I., & Menendez, M. (2016). An Exploratory Analysis of Signal Coordination Impacts on the Macroscopic Fundamental Diagram, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2560, 36-46. <https://doi.org/10.1111/j.1745-3984.1984.tb00222.x>

Haddad, J., & Geroliminis, N. (2012). On the stability of traffic perimeter control in two-region urban cities. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(9), 1159–1176. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.04.004>

Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). Resultados Preliminares Censo 2017.

Instituto Nacional de Estadísticas. (2016). Estadísticas Económicas - Transporte, Comunicaciones y Turismo.

Ji, Y., Daamen, W., Hoogendoorn, S., Hoogendoorn-Lanser, S., & Qian, X. (2010). Investigating the Shape of the Macroscopic Fundamental Diagram Using Simulation Data. *Transportation Research Record*, (2161), 40–48. <https://doi.org/10.3141/2161-05>

Knoop, V., Hoogendoorn, S., & Van Lint, J. (2012). Routing Strategies Based on Macroscopic Fundamental Diagram. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2315(2315), 1–10. <https://doi.org/10.3141/2315-01>

Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955, May). On kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 229 (1178), 317-345. The Royal Society.

Mahendra, A. (2008). Vehicle Restrictions in Four Latin American Cities: Is Congestion Pricing Possible?, *Massachusetts: Transport Reviews*.

Newell, G.F., (1993). A simplified theory of kinematic waves: (i) general theory; (ii) queuing at freeway bottlenecks; (iii) multi-destination flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37, 281-313.

Ramezani, M., Haddad, J., & Geroliminis, N. (2015). Dynamics of heterogeneity in urban networks: Aggregated traffic modeling and hierarchical control. *Transportation Research Part B: Methodological*, 74, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.12.010>

Richards, P. I. (1956). Shock waves on the highway. *Operations research*, 4(1), 42-51.

Robertson, D.I. (1969). Transyt: a traffic network study tool. *RRL Report LR 253*. Crowthorne: Road Research Laboratory

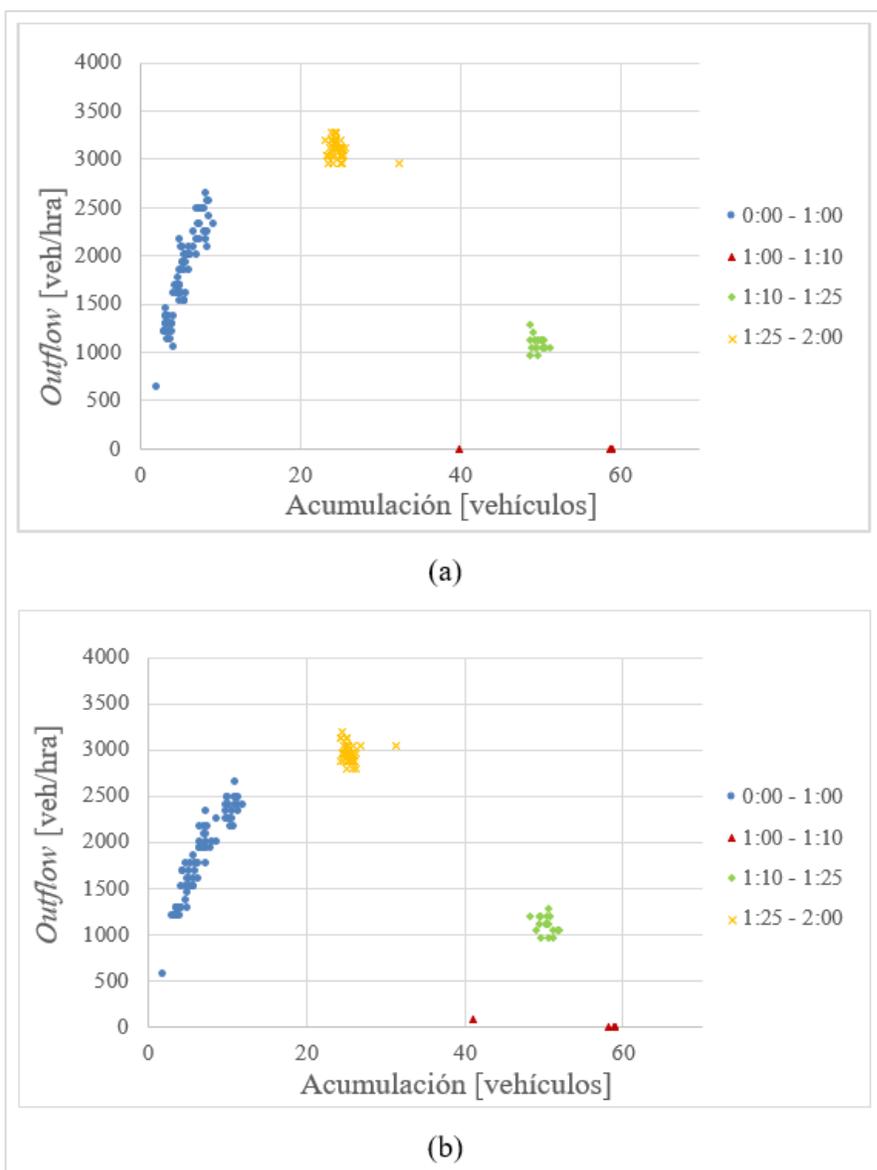
Tsubota, T., Bhaskar, A., & Chung, E. (2014). Macroscopic Fundamental Diagram for Brisbane, Australia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2421, 12–21. <https://doi.org/10.3141/2421-02>

Zheng, N., Waraich, R. A., Axhausen, K. W., & Geroliminis, N. (2012). A dynamic cordon pricing scheme combining the Macroscopic Fundamental Diagram and an agent-based traffic model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(8), 1291–1303. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.05.006>

**ANEXOS**

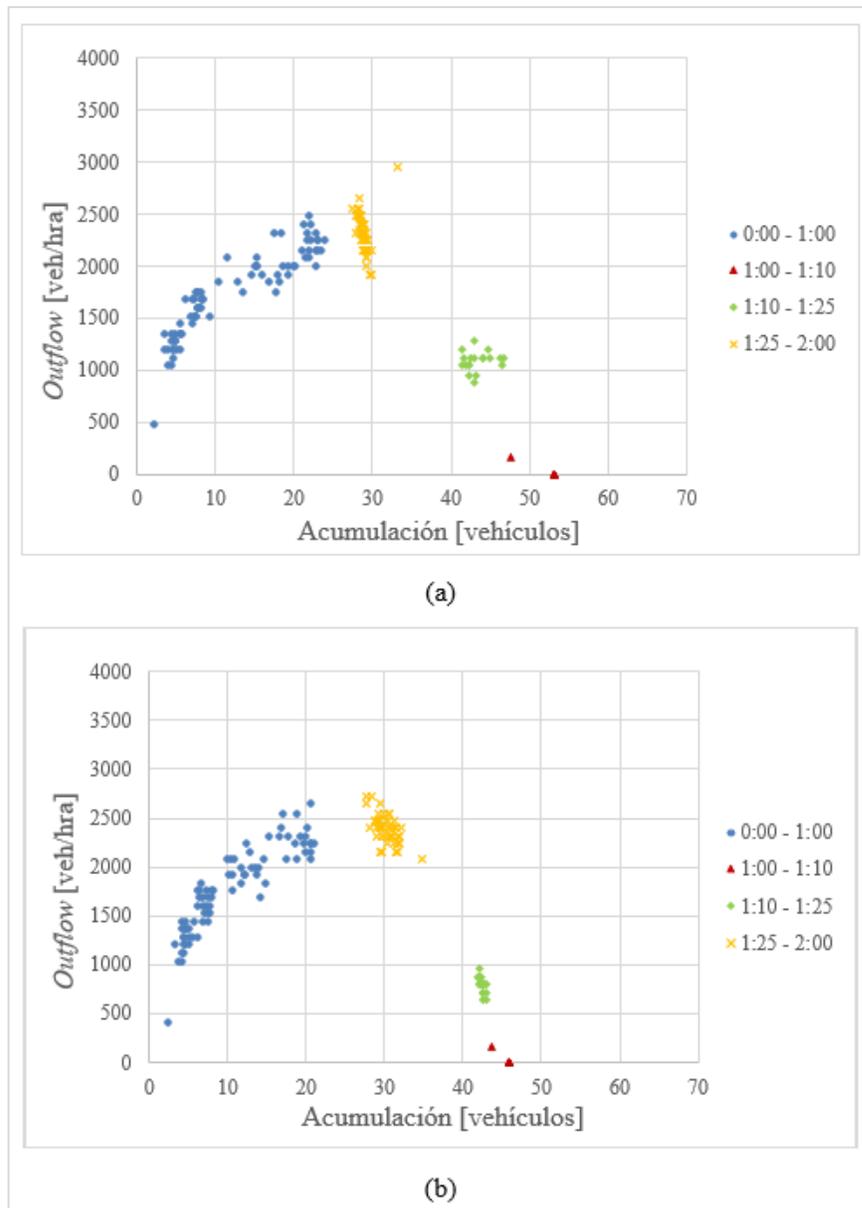
## Anexo A. Resultados Escenarios MFD

### Ciclo 45 segundos



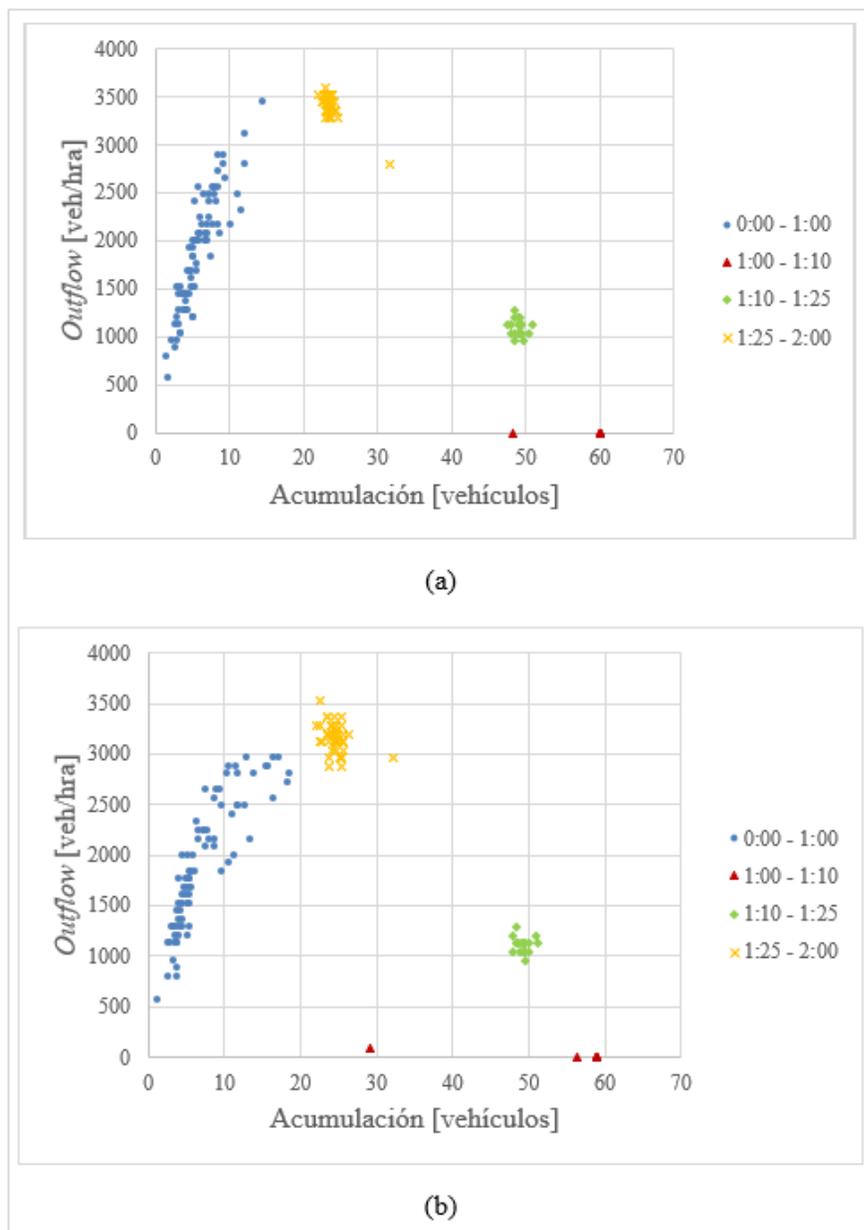
**Ilustración A-1. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 45 segundos.**

**Fuente: Elaboración Propia.**



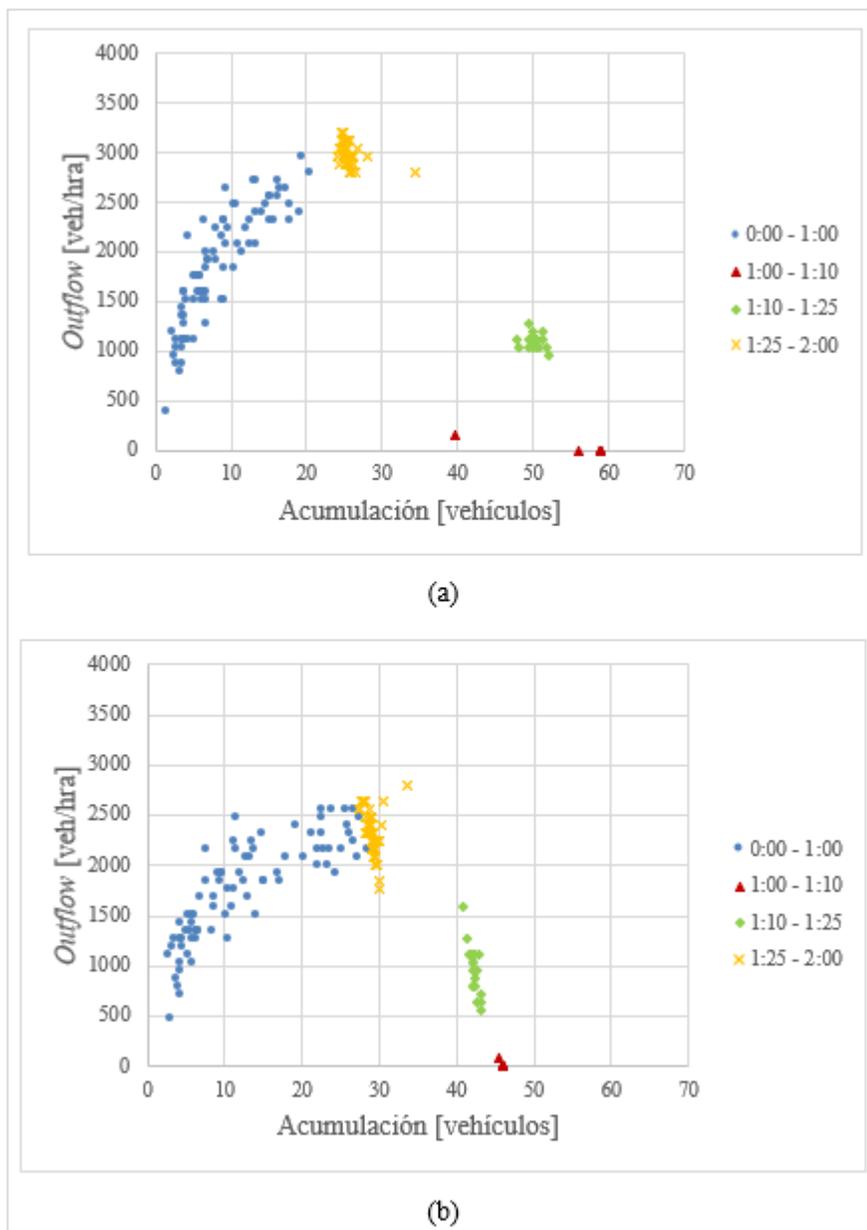
**Ilustración A-2. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 45 segundos.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

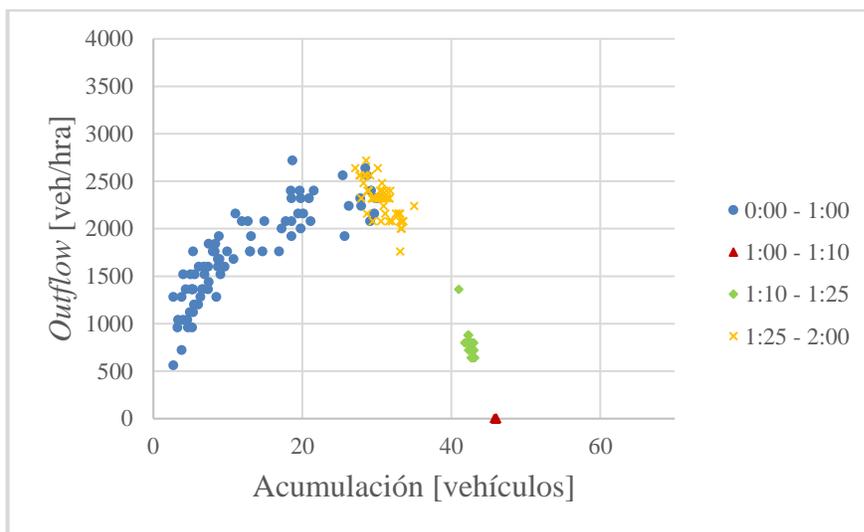


**Ilustración A-3. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 45 segundos.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

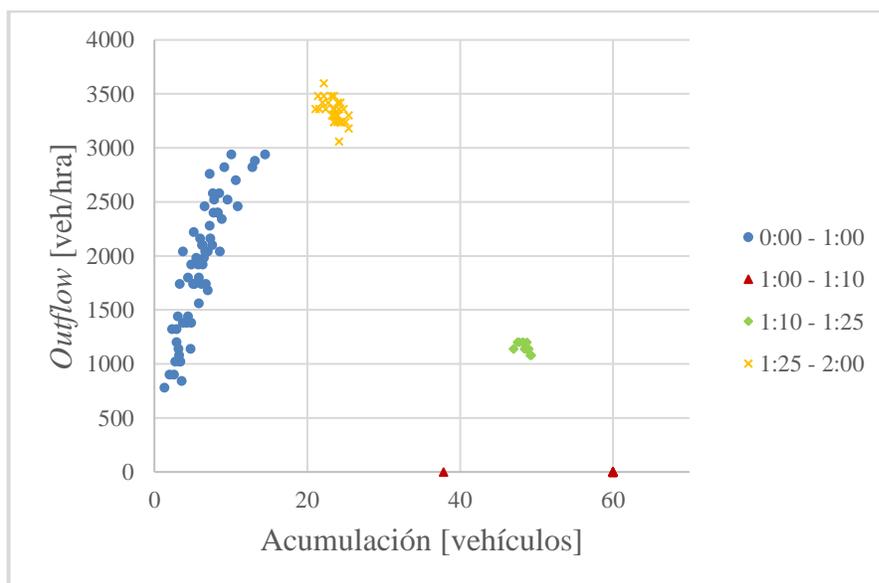


**Ilustración A-4. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 45 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 45 segundos.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

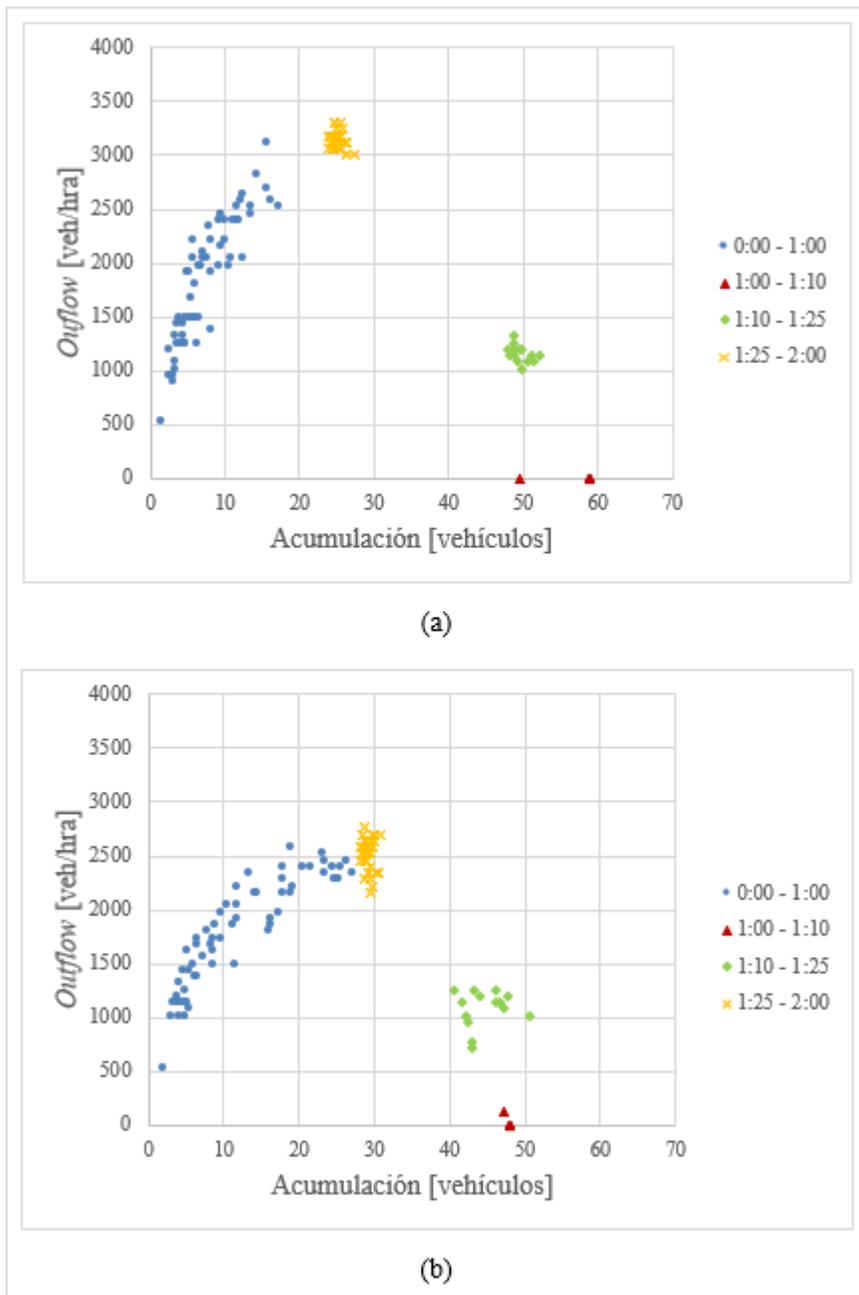


**Ilustración A-5. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

### Ciclo 60 segundos

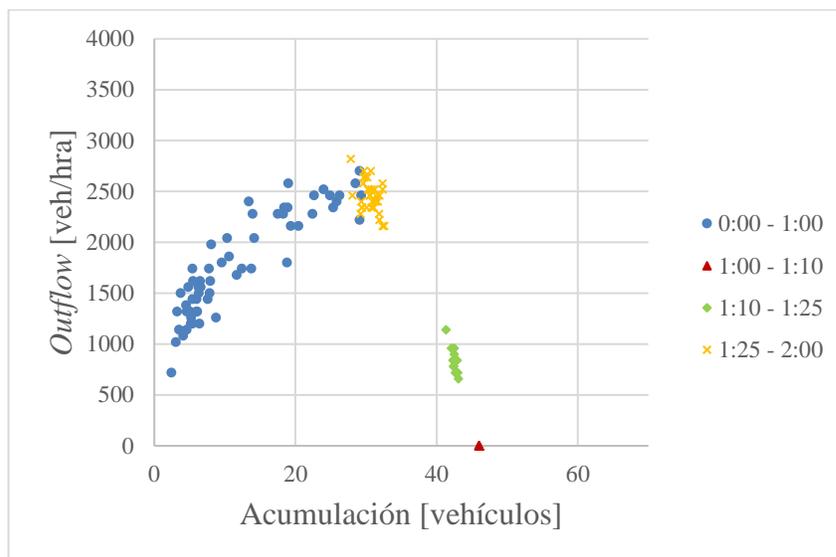


**Ilustración A-6. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 60 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



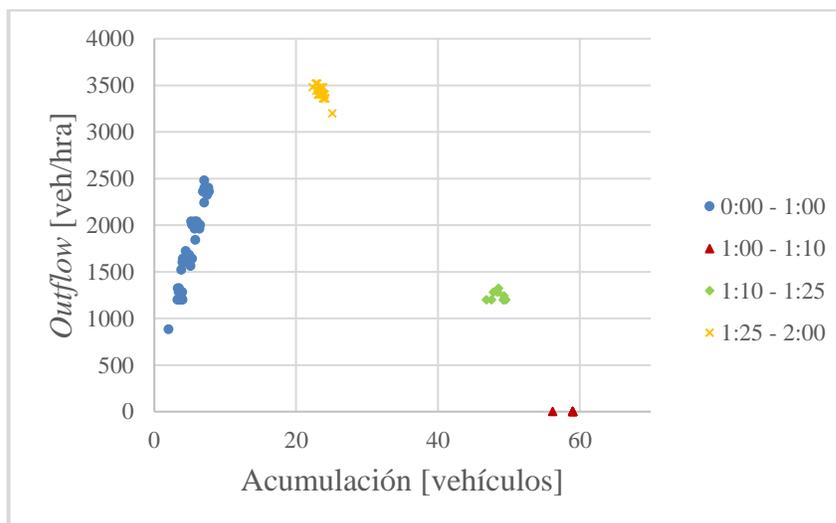
**Ilustración A-7. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 60 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 60 segundos.**

**Fuente: Elaboración Propia.**

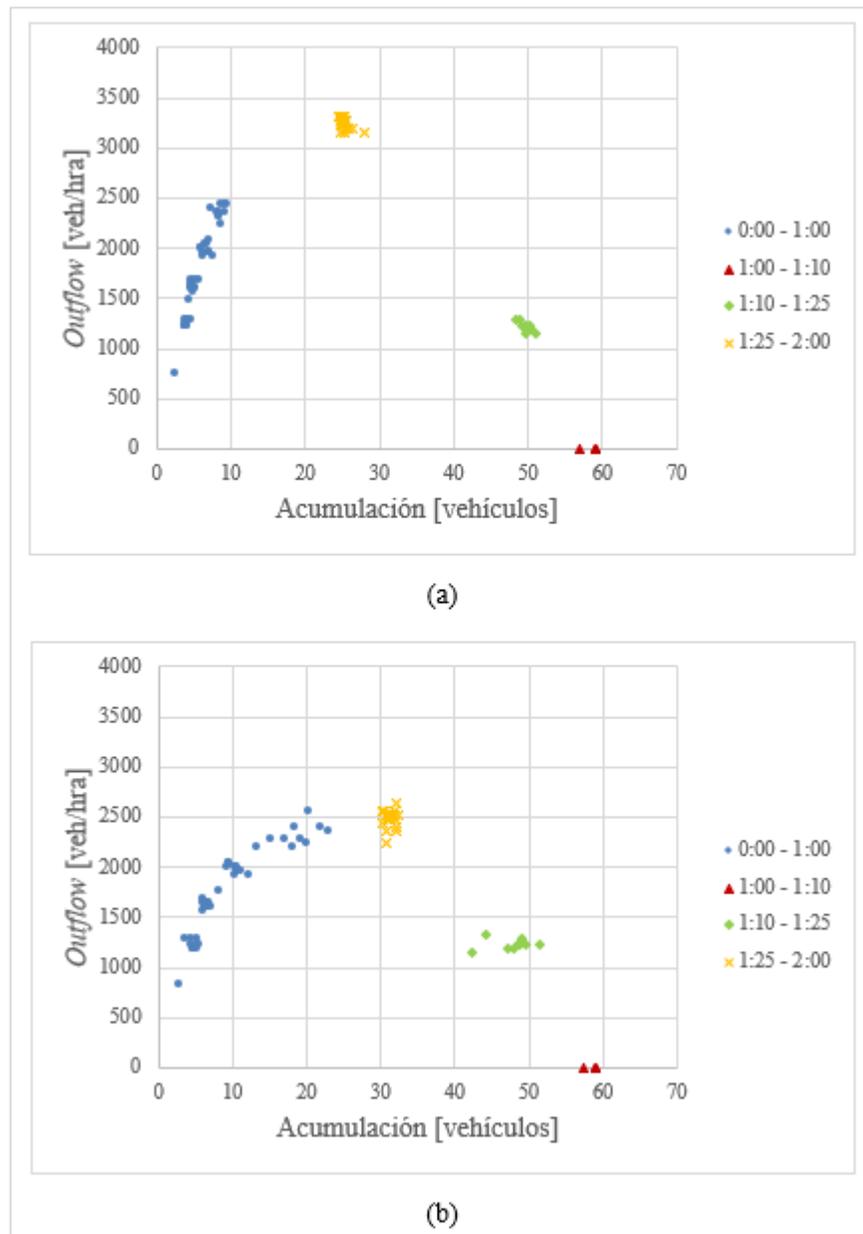


**Ilustración A-8. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 60 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

### Ciclo 90 segundos

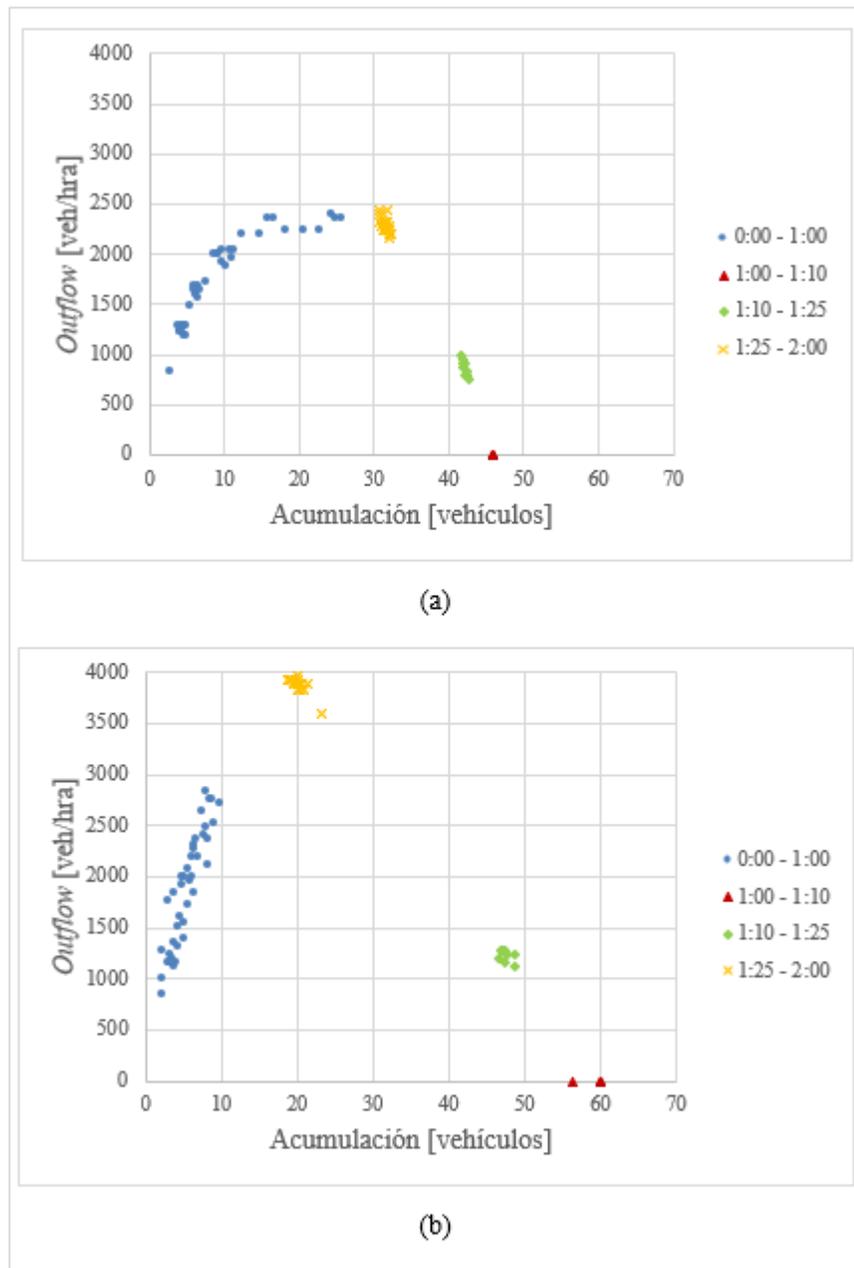


**Ilustración A-9. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



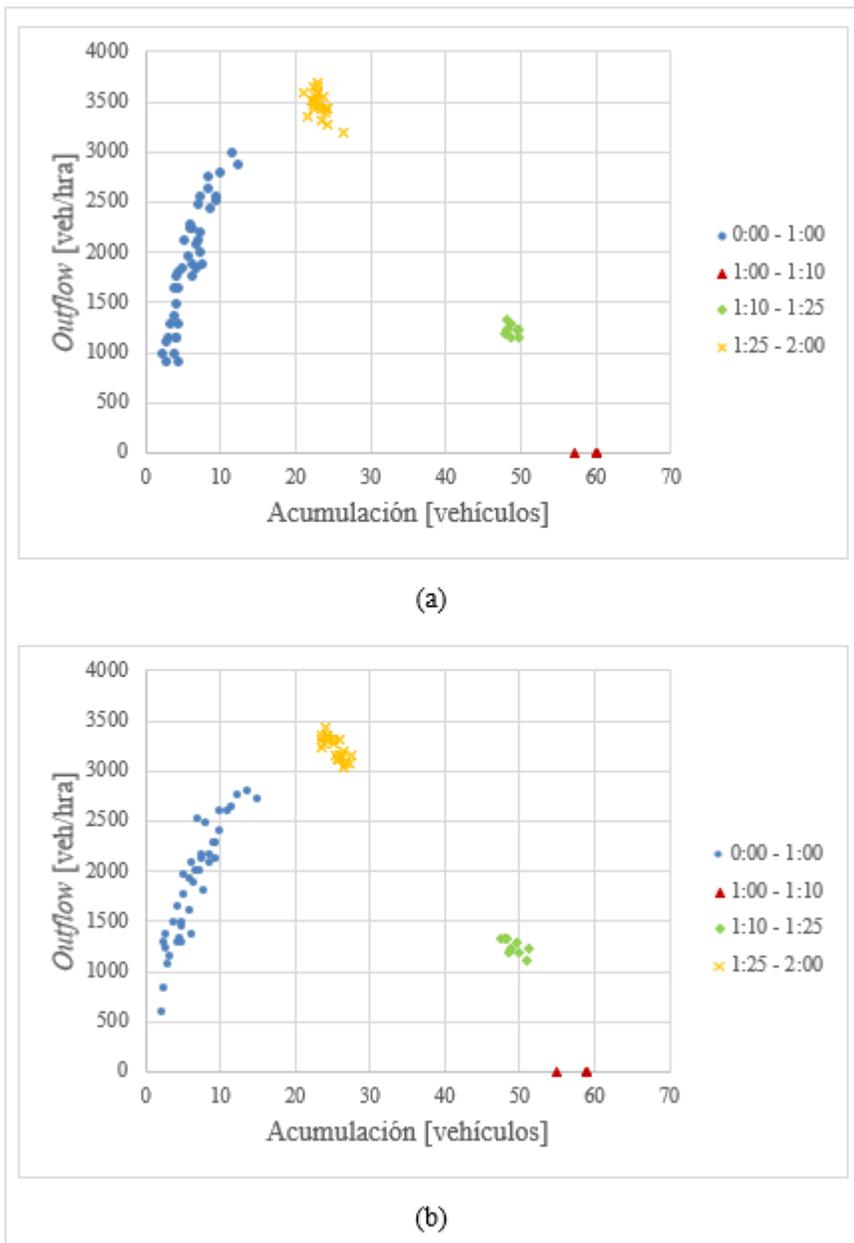
**Ilustración A-10. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos y (b) escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 90 segundos.**

**Fuente: Elaboración Propia.**



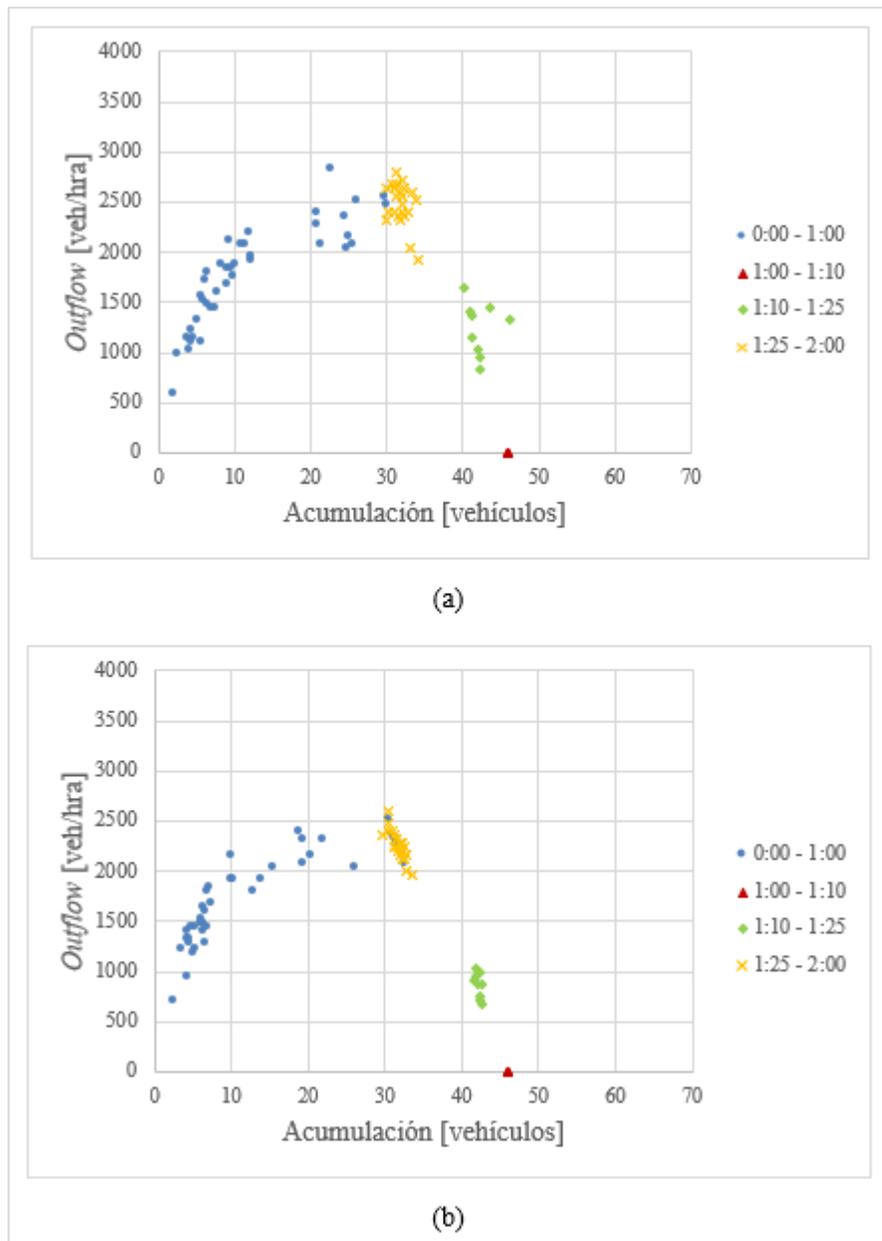
**Ilustración A-11. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 90 segundos.**

**Fuente: Elaboración Propia.**



**Ilustración A-12. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 90 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos.**

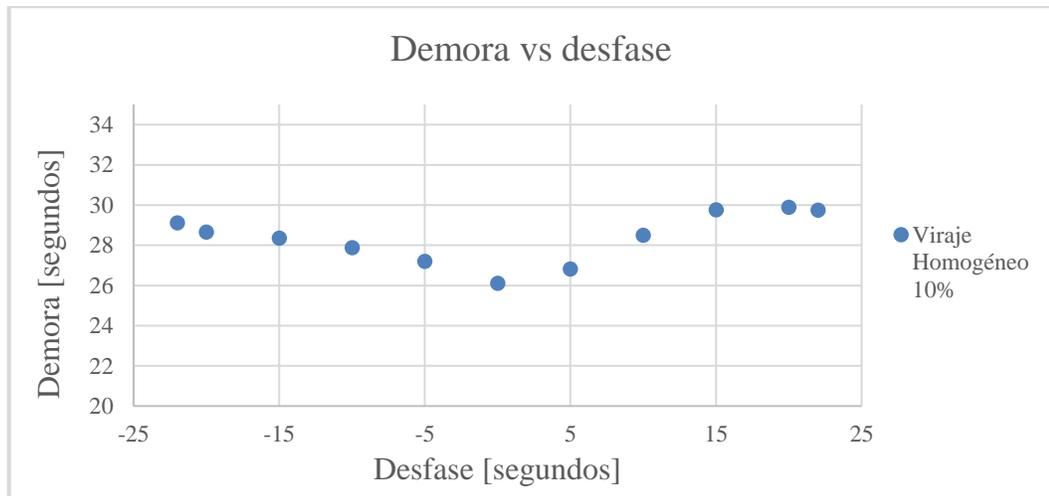
**Fuente: Elaboración Propia.**



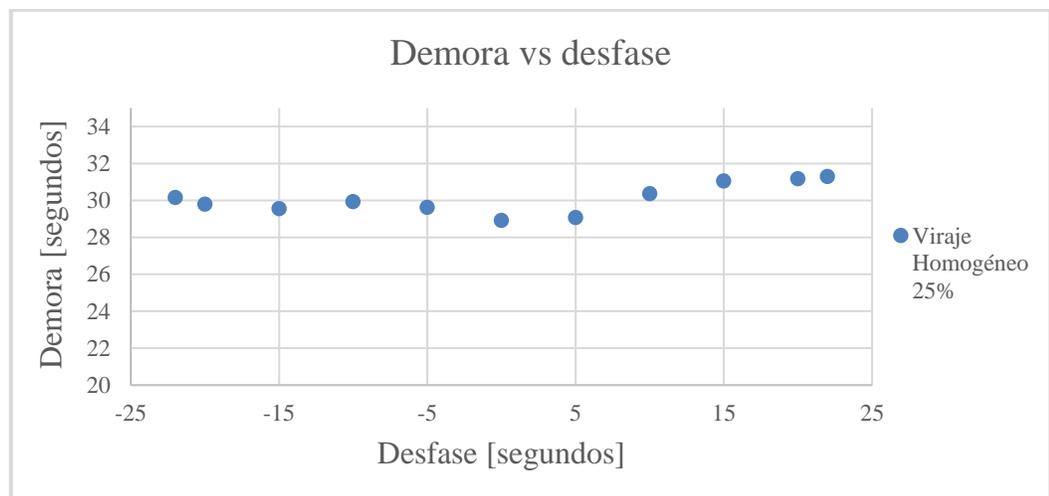
**Ilustración A-13. Diagrama fundamental macroscópico de la intersección (a) escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 90 segundos y (b) escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos.**  
**Fuente: Elaboración Propia.**

**Anexo B. Resultados Escenarios relación acumulación – desfase**

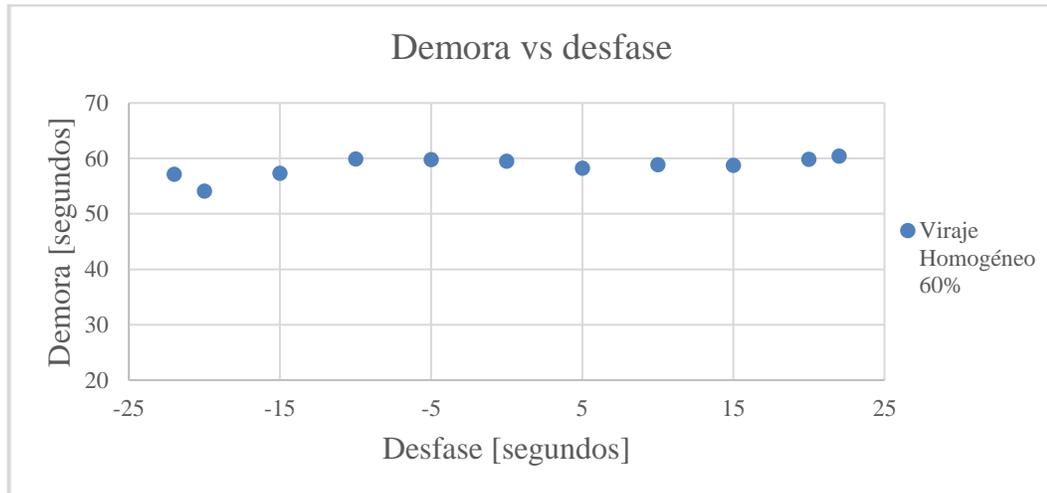
**Ciclo 45 segundos**



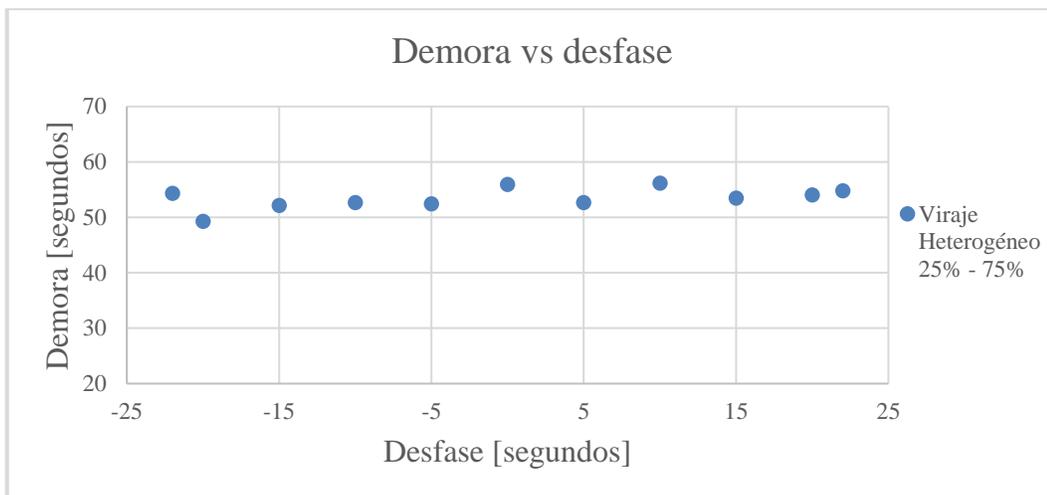
**Ilustración B-14. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



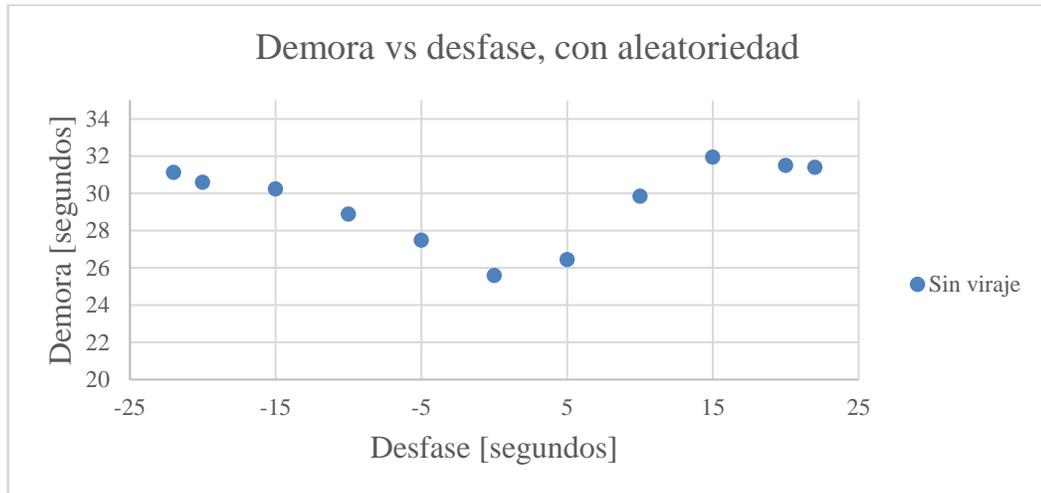
**Ilustración B-2. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



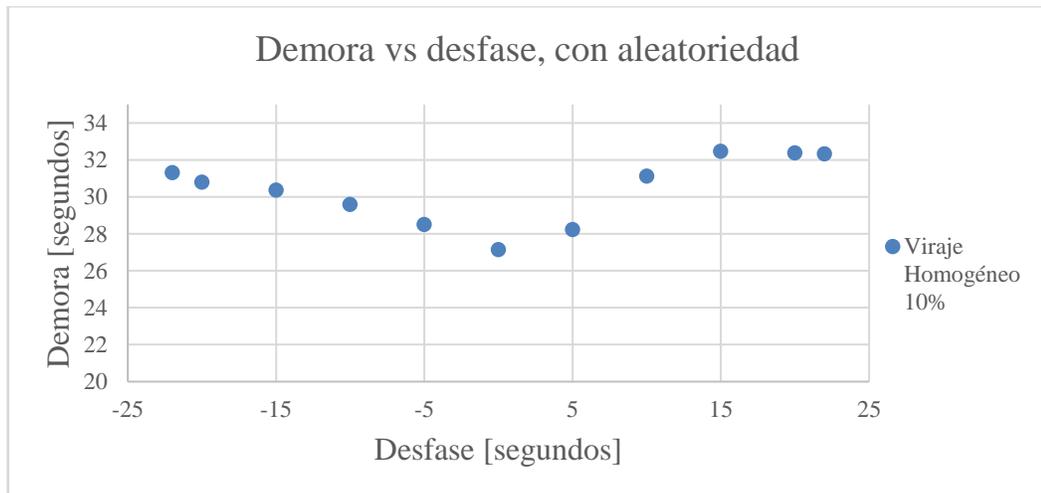
**Ilustración B-3. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



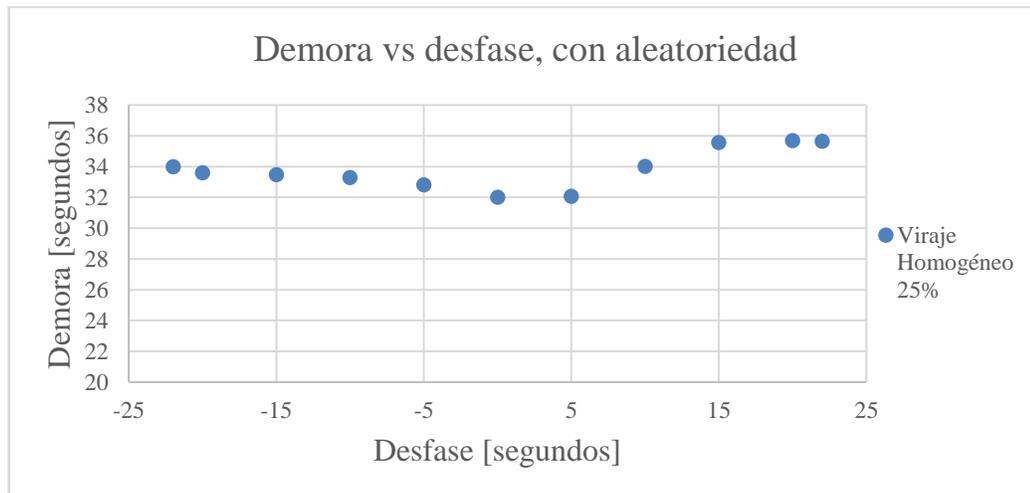
**Ilustración B-4. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



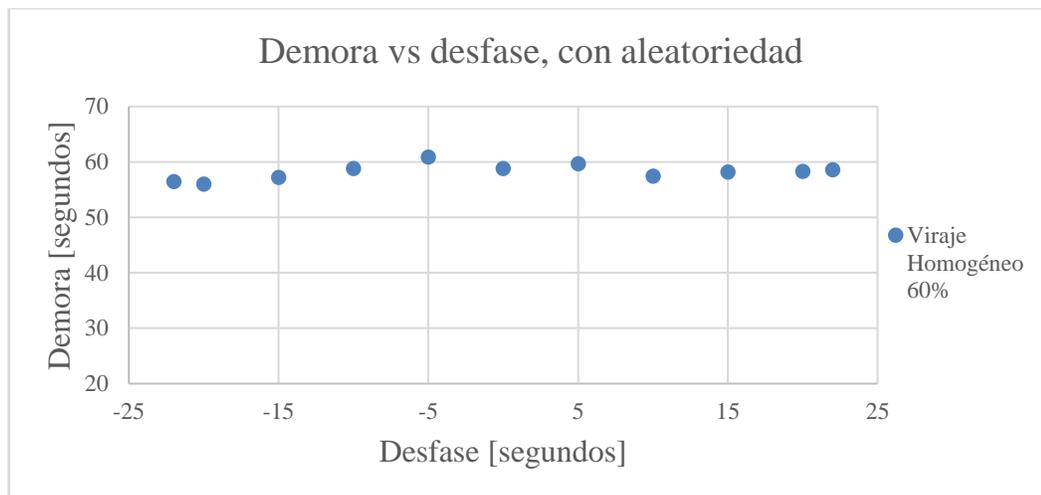
**Ilustración B-5. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



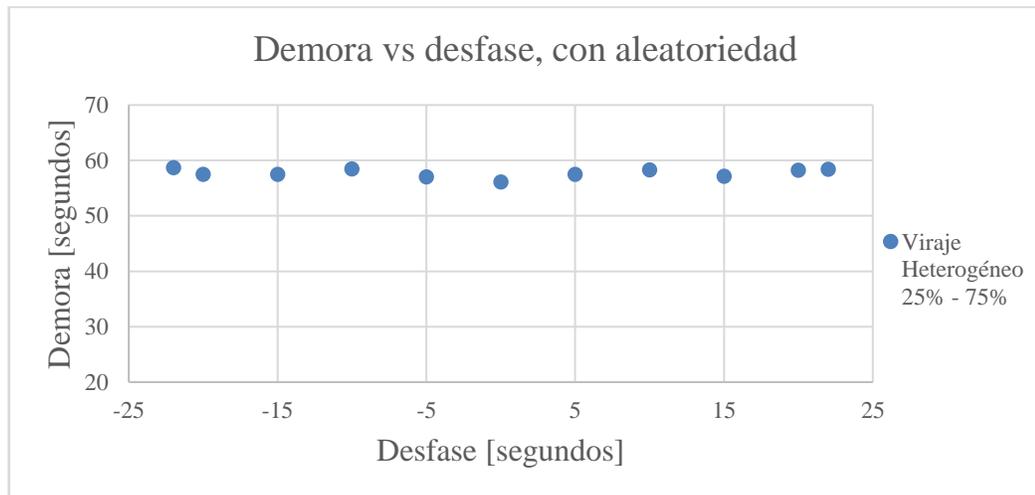
**Ilustración B-6. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



**Ilustración B-715.** Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.

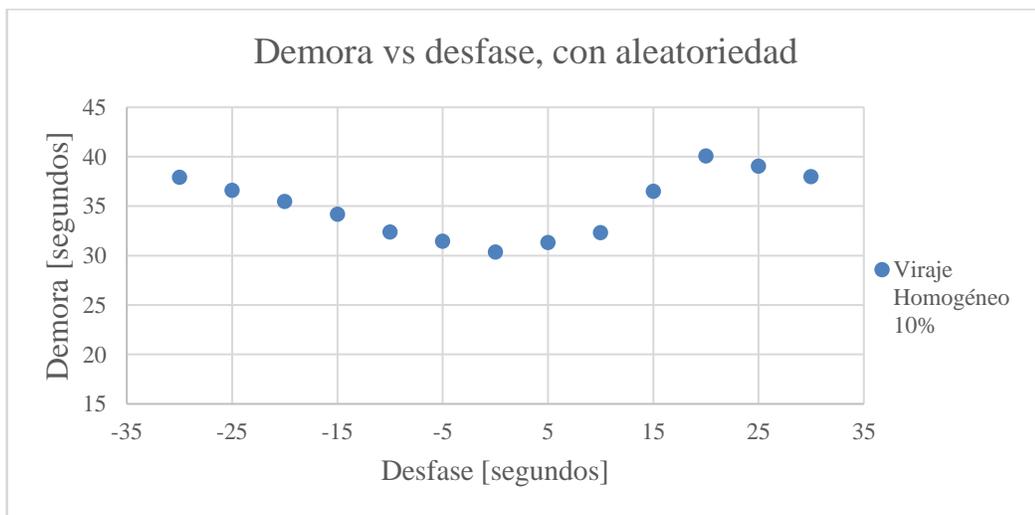


**Ilustración B-8.** Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.

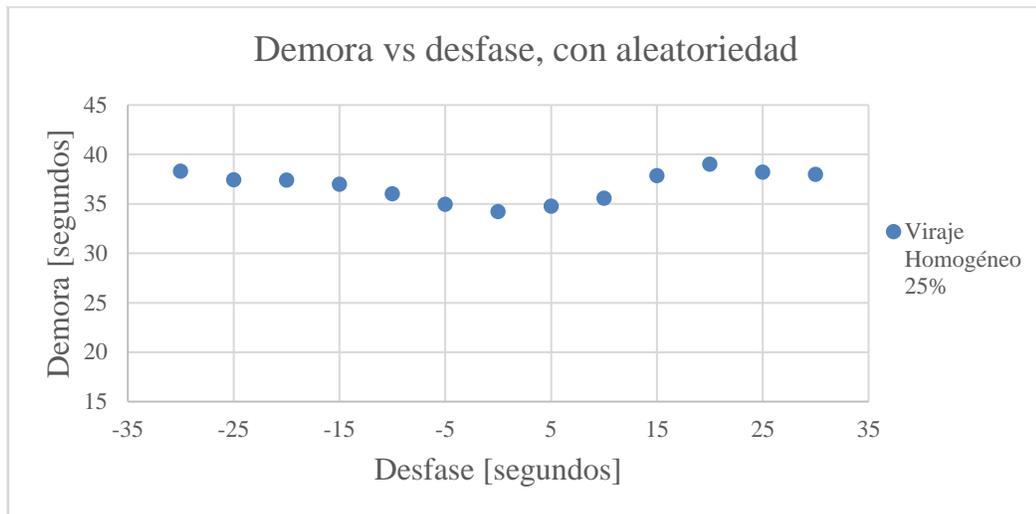


**Ilustración B-9. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 45 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

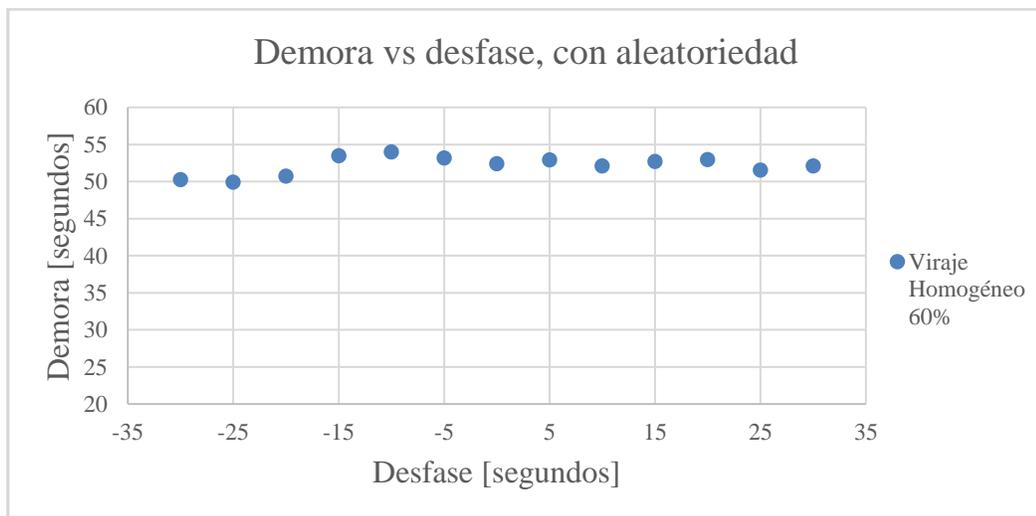
### Ciclo 60 segundos



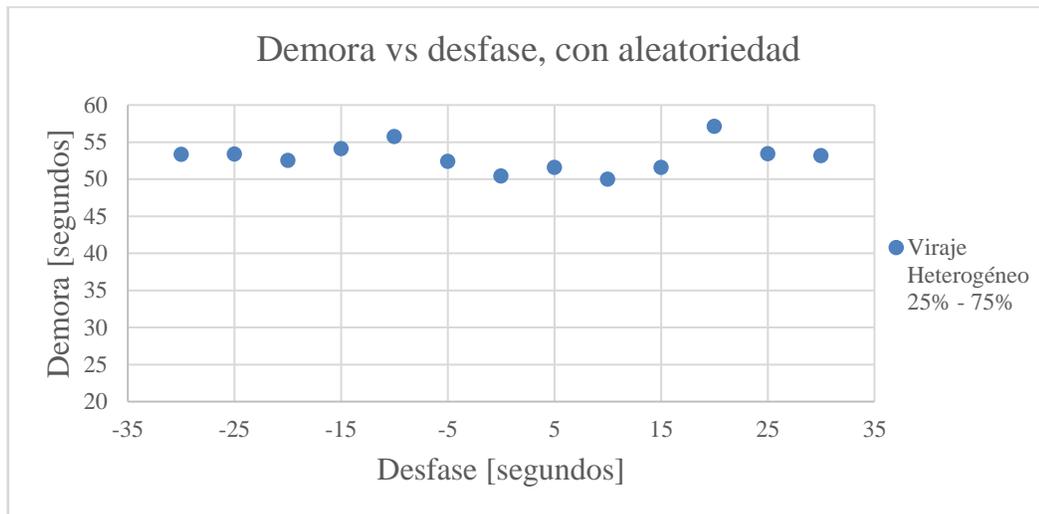
**Ilustración B-10. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 60 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



**Ilustración B-11. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 60 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

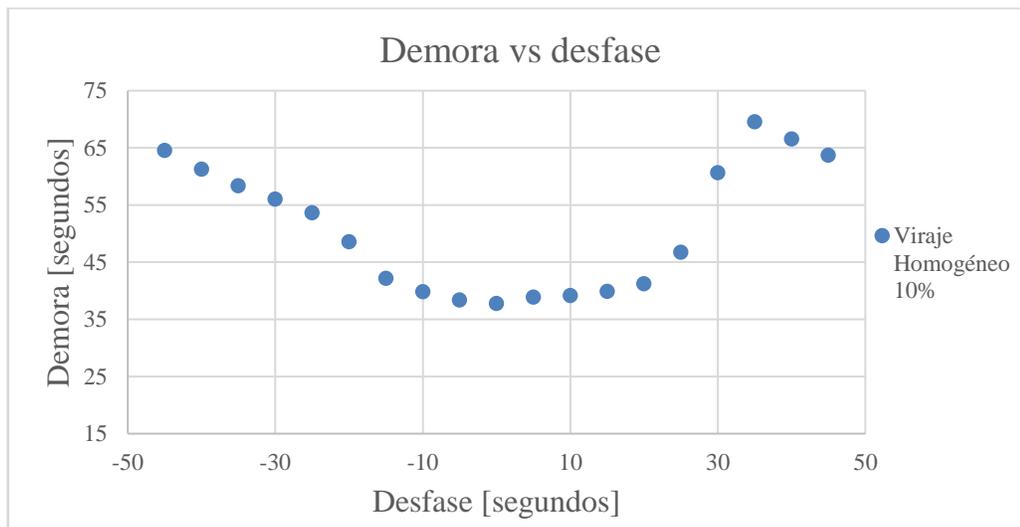


**Ilustración B-12. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 60 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

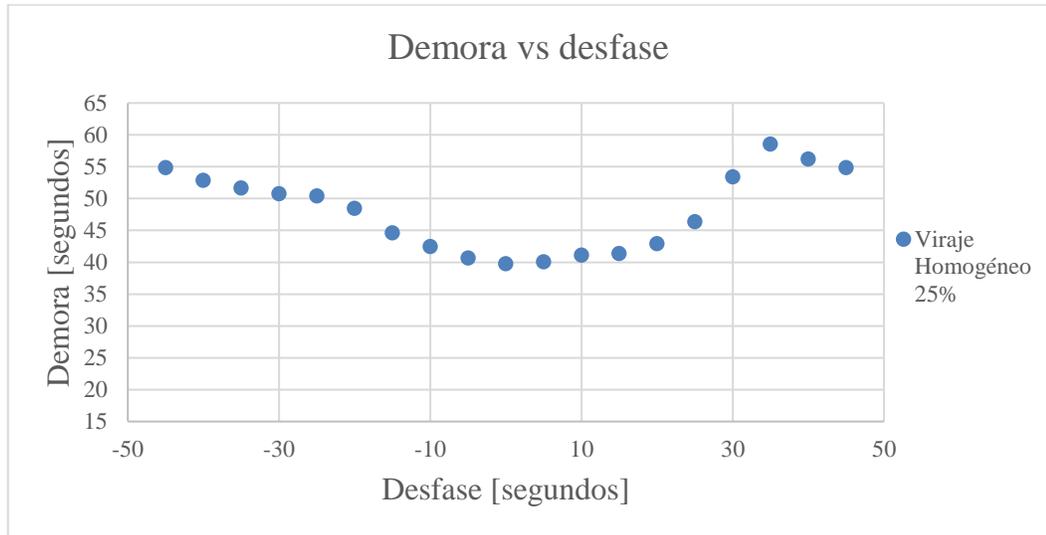


**Ilustración B-13. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 60 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**

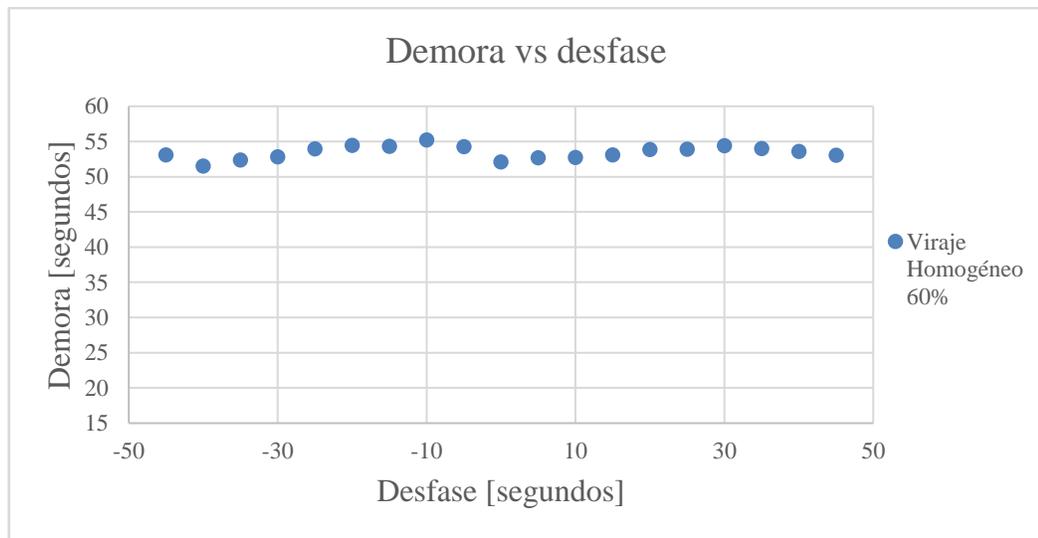
### Ciclo 90 segundos



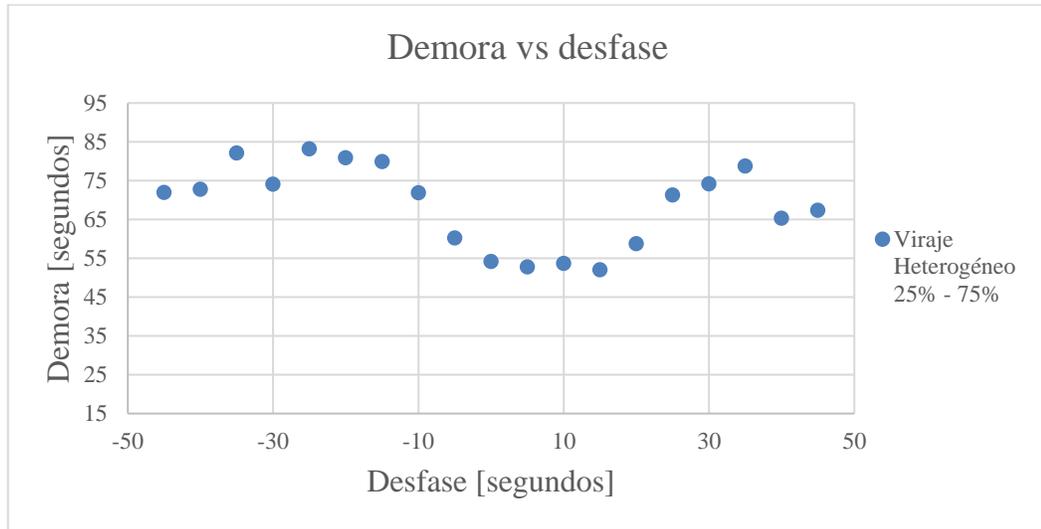
**Ilustración B-14. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



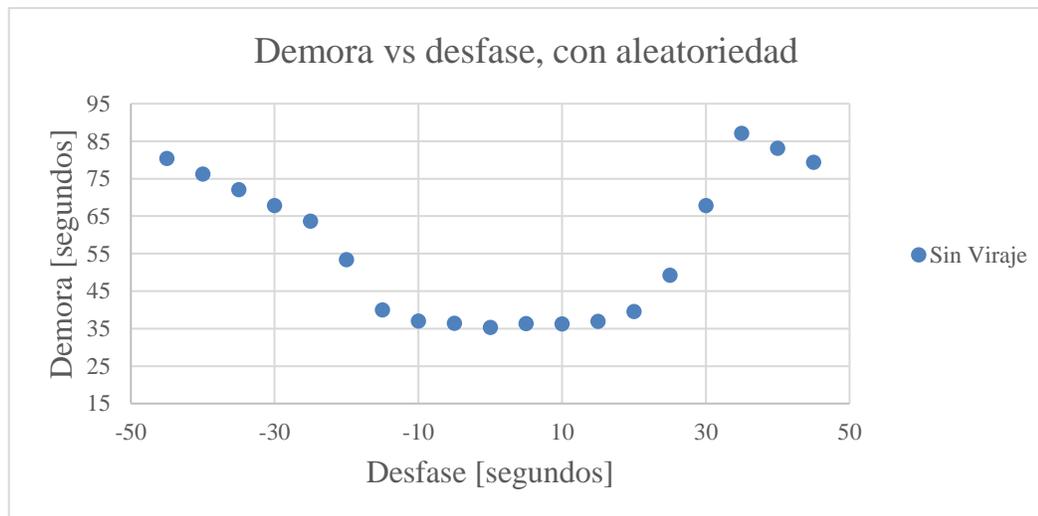
**Ilustración B-15. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



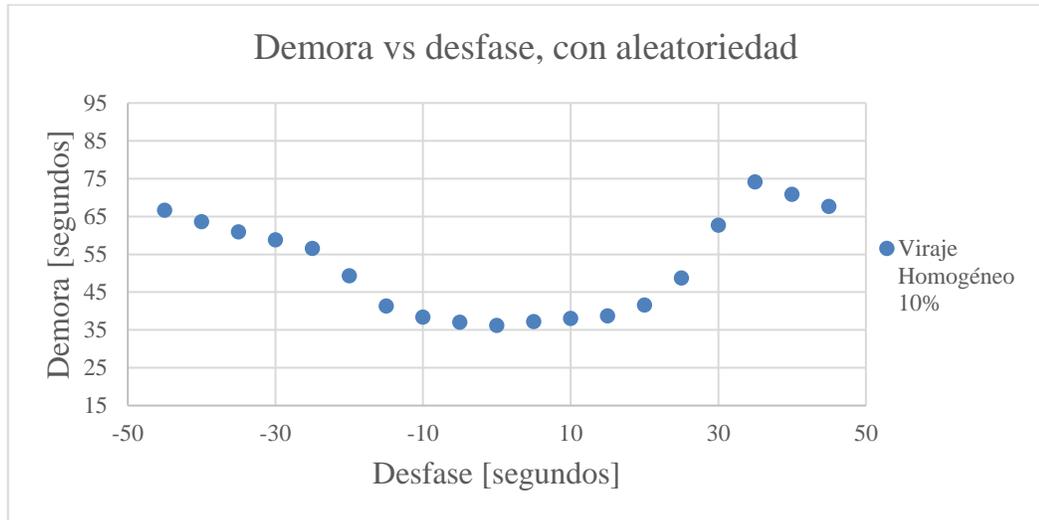
**Ilustración B-16. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



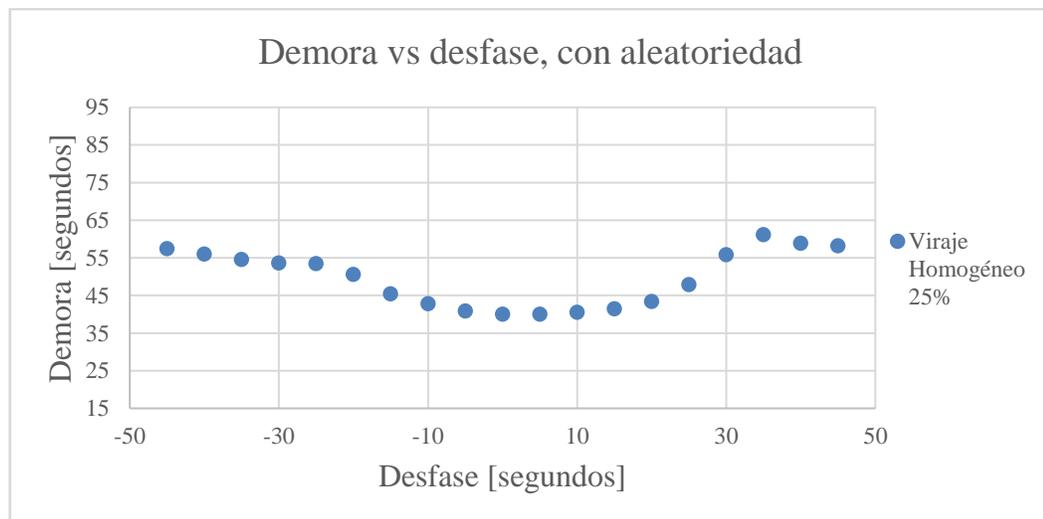
**Ilustración B-17. Relación demora - desfase escenario sin aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



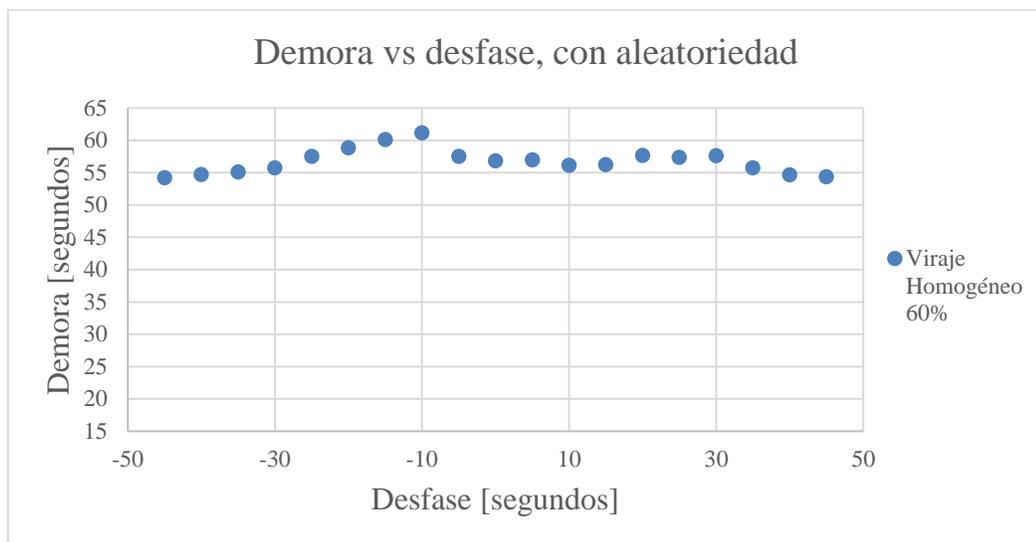
**Ilustración B-18. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, sin viraje y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



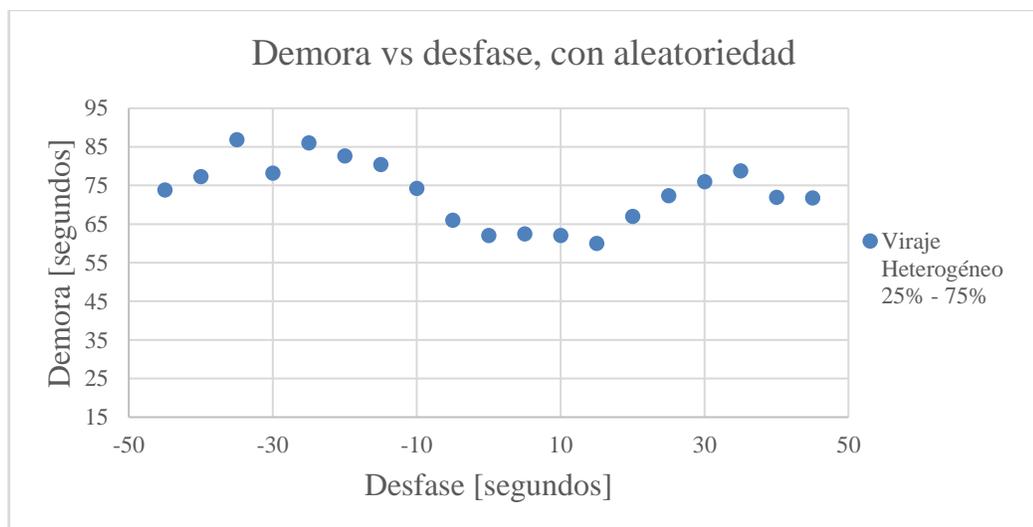
**Ilustración B-19. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 10% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



**Ilustración B-20. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 25% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



**Ilustración B-21. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje homogéneo 60% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**



**Ilustración B-22. Relación demora - desfase escenario con aleatoriedad, viraje heterogéneo 25% - 75% y con un largo de ciclo de 90 segundos. Fuente: Elaboración Propia.**