

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura de la tesis	4
2. Revisión Bibliográfica	5
2.1. El modelo de cuatro etapas	7
2.1.1. Generación	8
2.1.2. Distribución	9
2.1.3. Partición Modal	10
2.1.4. Oferta y asignación	11
2.1.5. Integración de las etapas y aplicaciones	12
2.1.6. Principales Críticas	15
2.2. Modelos basados en actividades	16
2.3. Asignación dinámica de tráfico	19
2.3.1. Calibración de modelos basados en simulación	20
2.4. Modelos basados en agentes	21
2.4.1. Calibración de modelos basados en agentes	22
3. Multi-Agent Transport Simulation - MATSim	24
3.1. Introducción	24
3.1.1. Inputs y Outputs	25
3.2. El algoritmo	26
3.2.1. Selección de planes	27
3.2.2. Ejecución de planes: QSim	28
3.2.3. Evaluación	29
3.2.4. Actualización de memoria	32
3.2.5. Re-planificación	33
4. El Escenario de Santiago	35
4.1. Planes diarios: Encuesta Origen-Destino 2012	35
4.1.1. Descripción y principales resultados	35
4.1.2. Implementación Original	39
4.2. Red Vial: OpenStreetMap	43
4.3. Oferta de transporte público: Archivos GTFS	45
4.4. Parámetros de simulación	46

4.5. Conteos de flujo	48
5. Mejoramientos sobre el escenario original	50
5.1. Población sintética	50
5.1.1. Corrección y expansión	50
5.1.2. Aleatorización de horas de inicio de viajes	53
5.1.3. Aleatorización de localización de actividades	58
5.2. Autopistas concesionadas	65
5.3. Conclusiones Generales	67
6. Calibración	68
6.1. Generalidades	68
6.2. Partición Modal	69
6.3. Volumen de flujo	70
6.4. Integración y otras configuraciones de simulación	71
6.5. Estabilidad	72
6.6. Otras consideraciones	74
6.7. Caso 1 %	75
6.8. Caso 10 %	93
6.9. Comparación de casos	109
6.10. Conclusiones Generales	111
7. Ilustración	114
7.1. Descripción de los esquemas de tarificación	114
7.2. Generalidades	115
7.3. Resultados	117
7.4. Conclusiones Generales	126
8. Discusión y conclusiones finales	129
8.1. Población Sintética	130
8.2. Escalamiento del escenario	132
8.3. Calibración y estabilidad de los resultados	134
8.4. Otras consideraciones prácticas	136
8.5. Líneas futuras de investigación	137
8.6. Resumen final y contribuciones del trabajo	138
Bibliografía	141
Anexos	147
A. Largest Remainder Method	148
B. Autopistas concesionadas	149
C. Estaciones de conteo	150
D. Resultados simulaciones relevantes	152
D.1. Caso 1 %	153
D.2. Escenario 10 %	154

Índice de Tablas

4.1.	Resultados generales después de la expansión. Fuente: SECTRA (2014)	37
4.2.	Partición modal durante día laboral en periodo normal. Fuente: SECTRA (2014)	38
4.3.	Correspondencia propósitos - Tipos de actividad de población sintética. Fuente: Elaboración propia	41
4.4.	Correspondencia modos reportados - Modos de MATSim. Fuente: Elaboración propia	41
4.5.	Velocidades y capacidades según tipo de calle OSM. Fuente: Elaboración Propia	44
4.6.	Tarifas Transantiago. Fuente: Kickhöfer <i>et al.</i> (2016)	48
5.1.	Estadísticos descriptivos asociados a los factores de clonación. Fuente: Elaboración Propia	52
5.2.	Características poblaciones sintéticas. Fuente: Elaboración Propia.	52
5.3.	Resultados minimizando MAPE. Fuente: Elaboración Propia.	55
5.4.	Resultados minimizando distancia χ^2 . Fuente: Elaboración Propia.	56
5.5.	Total de registros con valores faltantes para los atributos relevantes. Fuente: Elaboración Propia.	59
5.6.	Total de registros por cada destino registrado. Fuente: Elaboración Propia. .	60
5.7.	Características base de datos de manzanas. Fuente: Elaboración Propia. . . .	62
5.8.	Asociación clasificación de actividad MATSim - Destinos SII. Fuente: Elaboración Propia.	63
6.1.	Constantes modales y particiones iniciales para el Escenario Mejorado, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	75
6.2.	Constantes, particiones modales finales y diferencia entre partición modal simulada y observada, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	77
6.3.	Error absoluto porcentual por hora del día para la iteración inicial y final del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 1%.	79
6.4.	Indicador GEH promedio por hora del día para la iteración inicial y final del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 1%. Fuente: Elaboración propia	81
6.5.	Partición del modo <i>car</i> para todos los escenarios, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	86
6.6.	Partición del modo <i>public transport</i> para todos los escenarios, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	87
6.7.	Partición del modo <i>walk</i> para todos los escenarios, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	89

6.8.	Constantes modales y particiones iniciales para el Escenario Mejorado, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	93
6.9.	Constantes, particiones modales finales y diferencia entre partición modal simulada y observada, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	94
6.10.	Error absoluto porcentual por hora del día para las iteraciones inicial y finales del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	97
6.11.	Indicador GEH promedio por hora del día para las iteraciones inicial y finales del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	98
6.12.	Partición del modo <i>car</i> para todos los escenarios, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	105
6.13.	Partición del modo <i>public transport</i> para todos los escenarios, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	105
6.14.	Partición del modo <i>walk</i> para todos los escenarios, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	106
6.15.	Estadísticos descriptivos distancias recorridas durante el día completo en el modo <i>car</i> para los casos 1 % y 10 % con el escenario Calibrado. Fuente: Elaboración Propia.	110
6.16.	Estadísticos descriptivos tiempos de viaje por kilómetro recorrido durante el día completo en el modo <i>car</i> para los casos 1 % y 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	111
7.1.	Tarifas utilizadas en escenario Cordón Exterior y Cordón Triangular. Fuente: SteerDaviesGleave (2009)	117
7.2.	Variaciones porcentuales tiempos consumidos entre 07:30 a 08:30 por modo y para cada caso. Fuente: Elaboración Propia.	124
7.3.	Variaciones porcentuales totales tiempos consumidos entre 07:30 a 08:30 para cada caso. Fuente: Elaboración Propia.	125
7.4.	Variaciones porcentuales de consumos de distancia en modo auto-chofer entre las 07:30 a 08:30. Fuente: Elaboración Propia.	126
8.1.	Tiempos de ejecución de las diferentes simulaciones asociadas al Caso del 1 %. Fuente: Elaboración Propia	136
8.2.	Tiempos de ejecución de las diferentes simulaciones asociadas al Caso del 10 %. Fuente: Elaboración Propia	136
B.1.	Lista de sociedades concesionarias abarcadas en la red del escenario. Fuente: Elaboración Propia	149
C.1.	Ubicación estaciones de conteo. Fuente: SECTRA (2013)	151
D.1.	Flujos simulados y observados entre $t = 7$ y $t = 23$ para la iteración inicial (100) y final (600) de la simulación asociada al Escenario Calibrado. Fuente: Elaboración Propia	153
D.2.	Flujos simulados y observados entre $t = 7$ y $t = 23$ para la iteración inicial (100) y finales (400 y 600) de los Escenarios Pre-Calibrado y Calibrado. Fuente: Elaboración Propia	154

E.1. Especificaciones técnicas Cluster 1. Fuente: Elaboración Propia	155
E.2. Especificaciones técnicas Cluster 2. Fuente: Elaboración Propia	155

Índice de Ilustraciones

2.1. Áreas del modelamiento del sistema de transporte. Fuente: Elaboración propia basado en Flügel <i>et al.</i> (2014)	6
2.2. Clasificación de los modelos de demanda. Fuente: Elaboración propia basado en Flügel <i>et al.</i> (2014)	6
2.3. Clasificación de los modelos de elección de ruta. Fuente: Elaboración propia basado en Flügel <i>et al.</i> (2014)	7
2.4. Clasificación de los modelos de red. Fuente: Elaboración propia basado en Flügel <i>et al.</i> (2014)	7
3.1. Algoritmo implementado en MATSim. Fuente: Meister (2011)	27
4.1. Zonas encuestadas dentro de la Región Metropolitana. Fuentes: Biblioteca Nacional del Congreso y CEDEUS	36
4.2. Distribución horaria de viajes según propósito agregado. Fuente: Elaboración propia	39
4.3. Distribución horaria de viajes según modo motorizado vs. no motorizado. Fuente: SECTRA (2014)	39
4.4. Área metropolitana de Santiago junto con Melipilla y Colina. Fuente: OpenStreetMap	43
4.5. Área denominada “Gran Santiago” . Fuente: OpenStreetMap	43
4.6. Red vial de Santiago. Fuente: Elaboración propia	45
4.7. Ubicación estaciones de conteo. Fuente: SECTRA (2013)	49
5.1. Horas de inicio de viajes reportadas en la EOD agrupadas en intervalos de cinco minutos. Fuente: Elaboración propia	53
5.2. Validaciones de tarjetas Bip! agrupadas en intervalos de cinco minutos. Fuente: Elaboración propia	54
5.3. Error porcentual absoluto medio para cada desviación estándar para cada tamaño de intervalo. Fuente: Elaboración propia	56
5.4. Distancia χ^2 para cada desviación estándar para cada tamaño de intervalo. Fuente: Elaboración propia	56
5.5. Distancia χ^2 para cada desviación estándar para cada tamaño de intervalo. Fuente: Elaboración propia	57
5.6. Comparación horarios aleatorizados con $\sigma_{MAPE}^* = 14$ y validaciones Bip! (sólo viajes en transporte público). Fuente: Elaboración propia	58
5.7. Comparación horarios aleatorizados con $\sigma_{\chi^2}^* = 33$ y validaciones Bip! (sólo viajes en transporte público). Fuente: Elaboración propia	58

5.8. Cobertura de la información espacial de las manzanas. Izquierda: Vista general dentro de la región metropolitana. Derecha: Acercamiento al centro de Santiago. Fuente: Elaboración Propia	61
5.9. <i>Shapes</i> de la ciudad de Santiago. Izquierda: <i>Shape</i> original. Derecha: <i>Shape</i> modificado. Fuente: Elaboración Propia	62
5.10. Distribución de la actividad <i>home</i> a las 10:00 de la mañana. Izquierda: Localización Original. Derecha: Localización aleatorizada. Fuente: Elaboración Propia	64
5.11. Distribución de la actividad <i>work</i> a las 10:00 de la mañana. Izquierda: Localización Original. Derecha: Localización aleatorizada. Fuente: Elaboración Propia	64
5.12. Autopistas Concesionadas dentro del escenario. Fuente: Elaboración Propia .	65
6.1. Proceso de calibración. Fuente: Elaboración Propia	73
6.2. Prueba de estabilidad para partición modal. Fuente: Elaboración Propia . . .	73
6.3. Prueba de estabilidad para calibración completa. Fuente: Elaboración Propia	74
6.4. Evolución de las constantes modales y partición modal para el modo <i>Car</i> , caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	76
6.5. Evolución de las constantes modales y partición modal para el modo <i>Public Transport</i> , caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	76
6.6. Evolución de las constantes modales y partición modal para el modo <i>Walk</i> , caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	76
6.7. Comparación entre conteos de flujos observados y simulados, caso 1%. Izquierda: Iteración 100. Derecha: Iteración 600. Fuente: Elaboración Propia	78
6.8. Evolución de los parámetros que describen la recta que mejor ajusta a los conteos de flujo observados vs. simulados, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	78
6.9. MAPE para cada hora del día para la iteración inicial y final del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	80
6.10. Indicador GEH promedio por hora para la iteración inicial y final del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia . .	80
6.11. Coeficiente R^2 por hora del día para la iteración inicial y final del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	81
6.12. Estaciones de conteo en conjunto con su error absoluto porcentual para la iteración inicial del proceso de calibración del volumen de tráfico, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	83
6.13. Estaciones de conteo en conjunto con su error absoluto porcentual para la iteración final del proceso de calibración del volumen de tráfico, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	84
6.14. Proceso para el análisis de estabilidad, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	86
6.15. Evolución de la partición del modo <i>car</i> cada 50 iteraciones, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	86
6.16. Evolución de la partición del modo <i>public transport</i> cada 50 iteraciones, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	88
6.17. Evolución de la partición del modo <i>walk</i> cada 50 iteraciones, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	89
6.18. Evolución de los parámetros que describen a la recta que mejor ajusta a los conteos, caso 1%. Fuente: Elaboración Propia	90

6.19. Evolución del puntaje promedio para todas las iteraciones, caso 1 %. Fuente: Elaboración Propia	91
6.20. Evolución de \bar{S}_n para las simulaciones asociadas a los escenarios relevantes, caso 1 %. Fuente: Elaboración Propia	92
6.21. Evolución de las constantes modales y partición modal para el modo <i>Car</i> . Fuente: Elaboración Propia	94
6.22. Evolución de las constantes modales y partición modal para el modo <i>Public Transport</i> . Fuente: Elaboración Propia	94
6.23. Evolución de las constantes modales y partición modal para el modo <i>Walk</i> . Fuente: Elaboración Propia	94
6.24. Metodología proceso de calibración de volumen de flujo, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	95
6.25. Comparación entre conteos de flujo observados vs. simulados, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	96
6.26. Evolución de los parámetros que describen la recta que mejor ajusta a los conteos de flujo observados vs. simulados, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	96
6.27. MAPE para cada hora del día para las iteraciones inicial y finales del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	98
6.28. Indicador GEH promedio por hora para las iteraciones inicial y finales del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	99
6.29. Coeficiente R^2 por hora del día para las iteraciones inicial y finales del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	100
6.30. Estaciones de conteo en conjunto con su error absoluto porcentual para la iteración inicial del proceso de calibración del volumen de flujo, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	101
6.31. Estaciones de conteo en conjunto con su error absoluto porcentual para la iteración 400 del proceso de calibración del volumen de tráfico, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	102
6.32. Estaciones de conteo en conjunto con su error absoluto porcentual para la iteración 600 del proceso de calibración del volumen de tráfico, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	103
6.33. Proceso para el análisis de estabilidad, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	104
6.34. Evolución de la partición del modo <i>car</i> cada 50 iteraciones, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	105
6.35. Evolución de la partición del modo <i>public transport</i> cada 50 iteraciones, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	106
6.36. Evolución de la partición del modo <i>walk</i> cada 50 iteraciones, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	106
6.37. Evolución de los parámetros que describen a la recta que mejor ajusta a los datos, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	107
6.38. Evolución del puntaje promedio para todas las iteraciones, caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia	108
6.39. Evolución de \bar{S}_n para las simulaciones asociadas a los escenarios P.M. (izquierda) y Test de Estabilidad con Innovación (derecha), caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	109

6.40. Distribución distancias recorridas en casos de 1 % y 10 % con el escenario Calibrado. Fuente: Elaboración Propia.	110
6.41. Distribución distancias recorridas en casos de 1 % y 10 % con el escenario Test de Estabilidad con Innovación. Fuente: Elaboración Propia.	111
6.42. Distribución tiempos de viaje por kilómetro en casos de 1 % y 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	112
7.1. Esquemas de tarificación estudiados. Izquierda: Cordón Exterior. Derecha: Cordón Triangular. Fuente: Elaboración Propia.	115
7.2. Metodología simulación escenarios con política de transporte incluida. Fuente: Elaboración Propia.	116
7.3. Partición del modo auto-chofer obtenida en los diferentes escenarios para el día completo. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	117
7.4. Partición del modo transporte público obtenida en los diferentes escenarios para el día completo. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	118
7.5. Partición del modo caminata obtenida en los diferentes escenarios para el día completo. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	119
7.6. Número de etapas en modo auto-chofer en cada uno de los escenarios entre las 07:30 y 08:30. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	120
7.7. Flujo de agentes entre 07:30 y 08:30 en el escenario Test Estabilidad con Innovación. Izquierda: caso 1 %. Derecha: caso 10 % .Fuente: Elaboración Propia.	121
7.8. Flujo de agentes entre 07:30 y 08:30 en el escenario Cordón Exterior. Izquierda: caso 1 %. Derecha: caso 10 % .Fuente: Elaboración Propia.	121
7.9. Flujo de agentes entre 07:30 y 08:30 en el escenario Cordón Triangular. Izquierda: caso 1 %. Derecha: caso 10 % .Fuente: Elaboración Propia.	122
7.10. Flujo en los arcos tarificados correspondientes al cordón exterior durante las 07:30 a 08:30. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	122
7.11. Flujo en los arcos tarificados correspondientes al cordón triangular durante las 07:30 a 08:30. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	123
7.12. Tiempo total de viaje en modo auto-chofer entre las 07:30 a 08:30. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	124
7.13. Tiempo total de viaje en modo transporte público entre las 07:30 a 08:30. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	125
7.14. Tiempo total de viaje en modo caminata entre las 07:30 a 08:30. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	126
7.15. Consumos de distancia en modo auto-chofer entre las 07:30 a 08:30. Arriba: caso 1 %. Abajo: caso 10 %. Fuente: Elaboración Propia.	127