



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico Superior de Xalapa

Subdirección de Posgrado e Investigación

Método guía para localizar estacionamiento,
implementando un algoritmo heurístico

Tesis

Que presenta

Luis Raúl González Martínez

Para la obtención del grado de

Maestro en Sistemas Computacionales

Director

M.C. María Angélica Cerdán

Codirector

Dr. Ángel Juan Sánchez García

Xalapa-Enríquez, Veracruz, a 17 de febrero del 2021.

RESUMEN

En grandes ciudades, como Moscú, Estambul, Bogotá o Ciudad de México, que se encontraron en 2018 entre las metrópolis más congestionadas del mundo (INRIX, 2019), el estacionamiento vehicular fue un problema frecuente para los automovilistas, dadas las condiciones de infraestructura, tránsito y congestión en horas pico. La sobre-circulación derivada de la búsqueda de un espacio de estacionamiento disponible, contribuyó a incrementar la cantidad de tránsito, a un exceso en gastos por consumo de combustible y al aumento en las emisiones de CO, CO₂, HC, NO_x y PM_x (monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos, óxido de nitrógeno y material particulado, respectivamente), además, del impacto negativo en la calidad de vida de los habitantes.

El presente proyecto propone generar un método para ofrecer una mejor ruta a los automovilistas en búsqueda de estacionamiento, localizando las tres opciones más cercanas a su destino, utilizando la ruta más corta por el algoritmo Dijkstra. Una vez identificadas las tres alternativas, se selecciona la mejor aplicándose un proceso de evaluación cuantitativa por factores ponderados, donde se incluyen: la distancia de ruta obtenida basándose en un algoritmo de búsqueda en profundidad (algoritmo heurístico); la cantidad de intersecciones y semáforos (vehiculares y peatonales) dentro de la ruta y que representan demoras por detención, y; el tráfico.

El método propuesto se valida a través de una simulación donde se utilizan datos estadísticos del tránsito simulados para el caso de estudio, consistente en el primer cuadro ampliado de la ciudad de Xalapa, Veracruz, considerando la configuración real de este espacio en términos de distancias, ubicación de semáforos, pasos peatonales, ubicación de estacionamientos y sus capacidades, localización de entradas de los estacionamientos e intersecciones. Esto genera un grafo con 95 nodos y 136 arcos, que incluye 34 estacionamientos con un total de 1,029 cajones disponibles.

Se evalúa el desempeño del método con relación a la tasa de éxito al encontrar estacionamiento, los tiempos de trayecto y la distancia de recorrido, por medio de un experimento de simulación en el paquete de código libre SUMO (*Simulation of Urban MObility*). El experimento consiste en seis tratamientos donde se aplica el método propuesto a una diferente proporción de vehículos, 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100%, de un total de 200 vehículos que ocupan un algoritmo Dijkstra simple para la búsqueda de estacionamiento. Adicionalmente se incorporan 800 vehículos en circulación de tráfico.

Según los resultados del experimento, se observa un incremento del 30% en la tasa de éxito al encontrar estacionamiento, con una reducción del 22.3% en tiempo promedio de recorrido que toman los vehículos para estacionarse y un 10.8% en la distancia. De igual manera, las emisiones de CO promedio por vehículo estacionado disminuyen un 25.8% y un 18.9% el CO₂.

El ahorro en combustible promedio por vehículo estacionado es de 18.8%, además se observan disminuciones en los promedios de emisiones por vehículo estacionado de: NO_x (36.9%), HC (19.7%) y PM_x (22.8%).

Los beneficios observados se vuelven marginales a partir del 60% de cobertura en el uso del método propuesto.

Se puede concluir que el método propuesto contribuye al éxito de encontrar un lugar de estacionamiento en menor tiempo y recorriendo una menor distancia en promedio, validándose los impactos ambientales que esto genera. Como trabajos futuros se identifica la implementación del método propuesto en un primer prototipo de aplicación móvil, que permita evaluar aspectos de escalamiento en una primera integración.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	3
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 ANTECEDENTES.....	7
1.1.1 <i>El automóvil en el ambiente urbano y sus impactos</i>	7
1.1.2 <i>Estacionamiento, marco legal y definiciones</i>	10
1.1.3 <i>Movilidad Urbana y ciudades inteligentes</i>	14
1.2 ESTACIONAMIENTO INTELIGENTE.....	15
1.2.1 <i>Análisis de la problemática</i>	16
1.2.2 <i>Enunciado del problema</i>	18
1.2.3 <i>Variables del problema</i>	18
1.3 OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN.....	21
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	21
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	21
1.3.3 <i>Justificación</i>	21
1.4 HIPÓTESIS Y ALCANCES	23
1.4.1 <i>Hipótesis</i>	23
1.4.2 <i>Alcances, límites y supuestos</i>	23
1.5 METODOLOGÍA.....	24
1.5.1 <i>Revisión sistemática de la literatura</i>	27
1.5.2 <i>Comparación de técnicas y selección de métodos de guía a aplicar</i>	28
1.5.3 <i>Diseño algorítmico e implementación</i>	29
1.5.4 <i>Interacción y configuración en el entorno de simulación</i>	30
1.5.5 <i>Diseño del experimento de validación por simulación</i>	32
1.5.6 <i>Análisis estadístico de los datos</i>	34
1.5.7 <i>Evaluación y contraste de la hipótesis</i>	35
1.5.8 <i>Herramientas</i>	35
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	37
2.1 ANTECEDENTES.....	37
2.2 RUTEO Y TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN.....	41
2.2.1 <i>Enfoque heurístico</i>	42
2.2.2 <i>Enfoque metaheurístico</i>	43
2.2.3 <i>Comparativo de enfoques encontrados de búsqueda</i>	46
2.3 POTENCIAL PROPUESTA	48
CAPÍTULO 3. MÉTODO PROPUESTO	50
3.1 MODELADO DE ENTORNO URBANO.....	50
3.1.1 <i>Representación de la ciudad</i>	50

3.1.2 Configuración de espacios disponibles	52
3.1.3 Consideraciones de tráfico vehicular	53
3.1.4 Elementos de control de tráfico (semáforos)	54
3.2 MÉTODO PROPUESTO	55
3.2.1 Procesos principales.....	55
3.2.2 Selección de tres estacionamientos próximos al destino por Dijkstra.....	56
3.2.3 Trayectos por búsqueda en profundidad.....	57
3.2.4 Selección de la mejor ruta por factores ponderados.....	57
3.2.4.1 Variables y ponderaciones.....	58
3.2.4.2 Método propuesto.....	61
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN POR SIMULACIÓN.....	62
4.1 CONDICIONES DE LA SIMULACIÓN	62
4.2 RESULTADOS	63
4.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	64
4.4 PRINCIPALES CONCLUSIONES	73
4.5 TRABAJOS FUTUROS.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXO A. REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA.....	83
ANEXO B. DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN	90

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLA 1. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES, DEPENDIENTES Y DE CONTROL.....	19
TABLA 1. DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES, DEPENDIENTES Y DE CONTROL (CONTINUACIÓN).....	20
TABLA 2. CONTRIBUCIONES ESPERADAS DEL TRABAJO.....	22
TABLA 3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN EL TRABAJO.....	35
TABLA 4. REVISIONES ANTECEDENTES.....	37
TABLA 5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE MÉTODOS HEURÍSTICOS Y METAHEURÍSTICOS.....	47
TABLA 6. VELOCIDAD PROMEDIO OBTENIDA POR SIMULACIÓN PARA DETERMINAR NIVELES DE TRÁFICO POR TRAMO (ARCO).....	54
TABLA 7. VARIABLES DISCRETIZADAS.....	57
TABLA 8. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN.....	64

TABLA B1. TRATAMIENTO 1- 0% DE VEHÍCULOS EN BÚSQUEDA DE ESTACIONAMIENTO CON EL MÉTODO PROPUESTO (GRUPO CONTROL) (EXTRACTO).....	91
TABLA B2. TRATAMIENTO 2- 20% DE VEHÍCULOS EN BÚSQUEDA DE ESTACIONAMIENTO CON EL MÉTODO PROPUESTO (EXTRACTO).....	92
TABLA B3. TRATAMIENTO 3- 40% DE VEHÍCULOS EN BÚSQUEDA DE ESTACIONAMIENTO CON EL MÉTODO PROPUESTO (EXTRACTO).....	93
TABLA B4. TRATAMIENTO 4- 60% DE VEHÍCULOS EN BÚSQUEDA DE ESTACIONAMIENTO CON EL MÉTODO PROPUESTO (EXTRACTO).....	94
TABLA B5. TRATAMIENTO 5- 80% DE VEHÍCULOS EN BÚSQUEDA DE ESTACIONAMIENTO CON EL MÉTODO PROPUESTO (EXTRACTO).....	95
TABLA B6. TRATAMIENTO 6- 100% DE VEHÍCULOS EN BÚSQUEDA DE ESTACIONAMIENTO CON EL MÉTODO PROPUESTO (EXTRACTO).....	96
FIGURA 1. ORGANIGRAMA DE LA DSCTM, XALAPA VER. (H. AYUNTAMIENTO DE XALAPA, 2020).	11
FIGURA 2. ÁRBOL DE PROBLEMAS.	17
FIGURA 3. PRIMER CUADRO EXTENDIDO DE LA CIUDAD DE XALAPA, VERACRUZ, MÉXICO.	24
FIGURA 4. PROCESO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.	25
FIGURA 5. MATRIZ FODA.....	29
FIGURA 6. CLASIFICACIÓN DE TÉCNICAS EMPLEADAS CON MAYOR FRECUENCIA.	42
FIGURA 7. REPRESENTACIÓN SUMO DE CALLES, CARRILES, SENTIDOS, INTERSECCIONES Y ESCALA PARA LONGITUD.	51
FIGURA 8. MATRIZ DE ADYACENCIA PONDERADA (EXTRACTO).	52
FIGURA 9. CONFIGURACIÓN EN SUMO DE ESTACIONAMIENTOS Y SUS CAPACIDADES.	52
FIGURA 10. PARAMETRIZACIÓN DE CADA ESTACIONAMIENTO DE LA MUESTRA.....	53
FIGURA 11. CALLES DE MAYOR CARGA DE VEHICULAR IDENTIFICADAS CON SUMO.	54
FIGURA 12. CONFIGURACIÓN SUMO DE SEMÁFOROS.....	55
FIGURA 13. FLUJO GENERAL DEL ALGORITMO PROPUESTO.....	55
FIGURA 14. REPAKING CODIFICADO EN PHYTON CON DIJKSTRA.	56
FIGURA 15. CÓDIGO EN PHYTON DE BÚSQUEDA EN PROFUNDIDAD RUTASITSX (EXTRACTO).	57
FIGURA 16. RESULTADOS DE ENCUESTA A AUTOMOVILISTAS (ESTUDIO DE CAMPO).	59
FIGURA 17. REPRESENTACIÓN PORCENTUAL (ESTUDIO DE CAMPO).	59

FIGURA 18. PSEUDOCÓDIGO DE SUGERENCIAITSX.....	61
FIGURA 19. INFORMACIÓN OBTENIDA EN <i>TRIPINFO</i>	63
FIGURA 20. PROPORCIÓN DE VEHÍCULOS ESTACIONADOS EXITOSAMENTE CON DIFERENTES PORCENTAJES DE VEHÍCULOS UTILIZANDO EL MÉTODO PROPUESTO.	65
FIGURA 21. PROMEDIO DE DISTANCIA DE RUTA CON DIFERENTES PORCENTAJES DE VEHÍCULOS UTILIZANDO EL MÉTODO PROPUESTO.	66
FIGURA 22. PROMEDIO DE TIEMPO DE RUTA CON DIFERENTES PORCENTAJES DE VEHÍCULOS UTILIZANDO EL MÉTODO PROPUESTO.....	67
FIGURA 23. (A) EMISIONES ACUMULADAS DE CO ₂ Y (B) EMISIONES PROMEDIO DE CO ₂ , EN VEHÍCULOS ESTACIONADOS EXITOSAMENTE.....	68
FIGURA 24. (A) EMISIONES ACUMULADAS DE CO Y (B) EMISIONES PROMEDIO DE CO, EN VEHÍCULOS ESTACIONADOS EXITOSAMENTE.....	69
FIGURA 25. (A) CONSUMO TOTAL DE COMBUSTIBLE Y (B) CONSUMO PROMEDIO DE COMBUSTIBLE, EN VEHÍCULOS ESTACIONADOS EXITOSAMENTE.....	70
FIGURA 26. EMISIONES TOTALES DE CO EN DIFERENTES PORCENTAJES DE VEHÍCULOS UTILIZANDO EL MÉTODO PROPUESTO.....	71
FIGURA 27. EMISIONES TOTALES DE CO ₂ EN DIFERENTES PORCENTAJES DE VEHÍCULOS UTILIZANDO EL MÉTODO PROPUESTO.....	72
FIGURA 28. EMISIONES PROMEDIO POR VEHÍCULO ESTACIONADO DE NOX, HC Y PMX, EN DIFERENTES PORCENTAJES DE VEHÍCULOS UTILIZANDO EL MÉTODO PROPUESTO.	72

CAPÍTULO 1. Introducción

1.1 Antecedentes

La necesidad de transportarse es un factor importante de la vida cotidiana moderna. El transporte evolucionó a finales del siglo XIX, con los vehículos motorizados, popularizándose el uso del automóvil después de 1913 (Economipedia, 2012), año en el que su producción creció por la implementación de líneas de producción, abaratándose su adquisición e incrementado su consumo.

El uso de vehículos ha revolucionado el estilo de vida, acortando las distancias y facilitando la movilidad. Sin embargo, esto ha venido acompañado de diferentes problemas colaterales, como lo son los impactos medio ambientales y afectaciones a la calidad de vida, principalmente en las grandes ciudades (Stolfi, Alba y Yao, 2017).

En esta sección se presentan los antecedentes relacionados al impacto del uso del automóvil en el ambiente urbano, la necesidad de espacios de estacionamiento y cómo estos fenómenos son vistos y abordados en los modelos de movilidad urbana inteligente, como preámbulo a la propuesta del presente proyecto.

1.1.1 El automóvil en el ambiente urbano y sus impactos

La movilidad integral en las ciudades es uno de los elementos principales en el logro de un desarrollo que promueva la calidad de vida de los habitantes; por ello, el Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México (2012), realizó un diagnóstico de las tendencias del uso del automóvil en el país y sus áreas metropolitanas, resultando los siguientes factores como causas de la tendencia al crecimiento del parque vehicular:

- Los bajos costos de operación y mantenimiento de los automóviles, derivados de las subvenciones al combustible y el uso gratuito del espacio público.
- La oferta de infraestructura, derivado de la inversión pública para mejora en vialidades y la inversión privada para estacionamientos de tipo particular.

- El crecimiento del espacio urbano en un patrón de baja densidad, que obliga al uso del vehículo para tener acceso a centros laborales, comerciales y/o de servicios.
- Las deficiencias en el transporte público y la priorización en el desarrollo urbano del automóvil.

Debido a la oferta de infraestructura, el uso del automóvil se convierte en algunos casos en una necesidad para los habitantes de zonas urbanas o metropolitanas. Esto se conoce como tránsito inducido, que es el aquél que se motiva derivado del propio crecimiento de las vialidades y el incremento del parque vehicular en millones de vehículos.

El parque vehicular más importante se presenta generalmente en áreas de mayor carga poblacional, como el Estado de México, Cd. de México (CDMX), Jalisco, Michoacán, Nuevo León y Veracruz, con un parque vehicular de 7.3, 5.8, 3.7, 2.6, 2.3 y 2.0 millones de vehículos, respectivamente. Estas entidades registran la mayor intensidad de uso en el país y presentan una tasa de crecimiento de 5.8% anual promedio de los últimos cinco años en parque vehicular (INEGI, 2019).

De acuerdo con la estadística de Vehículos en México Registrados en Circulación (VMRC), al cierre del año 2017, se registró un total de 30,089,169 vehículos en México. Según datos del INEGI, para marzo de 2020, el total de vehículos de motor registrados en circulación del país fue de 47,790,950 (INEGI, 2020).

El Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), revela un desfase entre la tasa de crecimiento poblacional y la vehicular de 1990 a 2017, donde el número de vehículos crece más rápido que la población (5.3% y 1.5% respectivamente) (IMCO, 2019).

Con relación a la intensidad del uso del automóvil en México, no existen estadísticas oficiales como en otros países. Sin embargo, se ha logrado integrar información suficiente para obtener una aproximación; utilizando datos del Instituto Nacional de Ecología (2010), se aproximó un recorrido promedio de 15,000 km

anuales para los vehículos de tipo privado durante su vida útil. Estos números no hacen distinción entre vehículos que trasladan mercancía o personas.

El uso de los vehículos en los centros urbanos, genera el tránsito vehicular, también conocido como tráfico, que se define como “el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista” (RAE, 2020).

El flujo de vehículos saturado se conoce como embotellamiento vial o congestión vehicular, esto es, la congestión vehicular “es el fenómeno especia-temporal en el que la demanda (el flujo de vehículos) supera a la oferta, esto es, a la capacidad vial” (Islas-Rivera, 2000). Las causas pueden ser variadas, desde un volumen de tránsito elevado en las horas pico, hasta percances en el camino. Las consecuencias principales de la congestión vehicular son el consumo excesivo de combustible, contaminación ambiental, accidentes y hasta violencia vial, así como la lentitud del tránsito y el incremento de tiempo invertido en los trayectos.

Un estudio del IMCO (2019), dimensionó el impacto económico y en oportunidades de ingreso de los embotellamientos en las principales ciudades del país, indicando que en términos económicos, el costo total de este problema es de 94,000 millones de pesos anuales, esto es tres veces la inversión presupuestada en la Ciudad de México para el transporte público en el periodo comprendido del 2018 a 2024.

La congestión vehicular representa costos para los ciudadanos tanto en tiempo como económicos, se ha estimado que un habitante urbano pasa 18 días en los embotellamientos y pierde 69,000 millones de pesos anuales, dado que estas demoras ocasionan la pérdida de oportunidades de ingreso. Aquéllos que utilizan un vehículo, sólo pierden 25,000 millones, esta diferencia devela la profundización de una brecha de oportunidades que generan inequidad (IMCO, 2019).

El incremento de la utilización del automóvil en México y la congestión vehicular, genera efectos colaterales relacionados con el ambiente, la economía y la salud, además de otros efectos en la calidad de vida de quienes habitan las ciudades. (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México, 2012).

1.1.2 Estacionamiento, marco legal y definiciones

El creciente uso del automóvil en las ciudades genera necesidades de infraestructura, tanto para su tránsito como espacios para estacionamiento. Se conoce como estacionamiento al espacio donde se coloca un vehículo por un tiempo indeterminado (Administración Pública de la Ciudad de México, 2016).

El estacionamiento se ubica tanto en la vía pública como en espacios confinados, que pueden o no, ser establecimientos de paga. El estacionamiento en la vía pública en México, está reglamentado por las autoridades estatales de tránsito, por ejemplo en el caso del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, donde se ubica el caso de estudio, el responsable de normar es la Dirección General de Tránsito y Seguridad Vial del Estado de Veracruz (DGTSV).

En cambio, los espacios confinados en establecimientos de estacionamiento con acceso al público, están regulados por los normativos de comercio. Y en caso de los espacios ubicados en lugares de comercio y abasto (p.e. las plazas comerciales), están regulados por la Secretaría de Economía del gobierno federal, como lo ha dispuesto el Senado de la República; quienes han dispuesto que los espacios públicos para estacionarse deben ser libres y gratuitos para los clientes de las plazas comerciales, mientras que los usuarios que no hagan uso de esos servicios, deben pagar la tarifa aprobada por el H. Ayuntamiento que corresponda (de haber una) (Gaceta de la Comisión Permanente, 2016).

La DGTSV en el estado de Veracruz, se encarga de aplicar y vigilar el cumplimiento de las normativas en el municipio de Xalapa, como lo dispone la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la Constitución Política del Estado y la Ley de Tránsito y Transporte (Reglamento de Tránsito y Vialidad de Xalapa), en el ejemplo ya mencionado relacionado al caso de estudio.

El H. Ayuntamiento de la ciudad de Xalapa Enríquez, incluye una Dirección de Seguridad Ciudadana y Tránsito Municipal (DSCTM), con una Subdirección de Tránsito Municipal y dos departamentos, uno de Seguridad Vial y Movilidad

Sustentable, y otro de Jurídico de Tránsito Municipal, Sanciones Administrativas y Responsabilidad, el organigrama de esta área se muestra en la Figura 1.

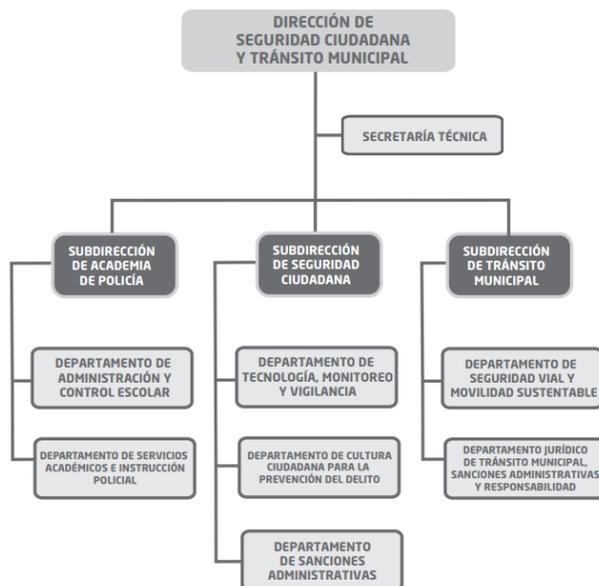


Figura 1. Organigrama de la DSCTM, Xalapa Ver. (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2020).

El Departamento de Seguridad Vial y Movilidad Sustentable se encarga de promover y ejecutar acciones en materia de Movilidad Urbana Sustentable, impulsando una nueva Cultura de la Movilidad, optimizando la red vial existente, establece la política de estacionamientos públicos y en la vía pública, además de promover un sistema de transporte público integrado.

La principal función del Departamento de Asuntos Jurídicos de Tránsito Municipal, Sanciones Administrativas y Responsabilidad, es asesorar a los actores del gobierno municipal y a la población en general, en todos los aspectos legales relativos al tránsito municipal (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2018).

Los normativos varían en función de los gobiernos, a nivel nacional, municipal y estatal, y cada país a nivel internacional establece sus propias políticas en función de la gestión del espacio urbano y a su vez trabajan en conjunto para mejorar la dimensión urbana entre sus miembros (Banco Interamericano de Desarrollo, 2016).

Los estacionamientos en una ciudad se pueden clasificar según su finalidad y operación, en los siguientes tipos:

- **Estacionamiento en la vía pública:** aquellos espacios a pie de las aceras en las calles y avenidas de la ciudad donde se puede estacionar un vehículo, ya sea que se implemente el uso de parquímetros con horarios de atención o se tenga un acceso libre de pago.
- **Estacionamiento en los edificios (públicos o privados):** los espacios que forman parte del inmueble y de los cuales hacen uso las personas que lo visitan, habitan o trabajan en él.
- **Establecimientos de renta de espacios de estacionamiento:** dedicado específicamente a alojar y resguardar vehículos por una cuota de pago, que trabajan como un negocio independiente.
- **Estacionamientos exclusivos de locales comerciales:** espacios con cajones señalizados que pueden utilizar los vehículos de personas que asisten a un local comercial específico, generalmente ubicado en una zona aledaña a dicho local, aunque algunos locales al carecer de espacio rentan espacios exclusivos en establecimientos de estacionamiento cercanos. Generalmente los vehículos sólo pueden ocupar el espacio durante un cierto período de tiempo.
- **Estacionamiento en plazas comerciales:** espacios que obligatoriamente todo proyecto de plaza comercial debe incluir en su distribución de planta, garantizando cierto número de espacios para el servicio a sus clientes. Como ya se mencionó, en México, el servicio deberá ser gratuito y de libre acceso a los usuarios que adquieran bienes o servicios en la plaza, y, aquéllos que únicamente hagan uso del servicio de estacionamiento público, deberán pagar una tarifa (H. Ayuntamiento de Xalapa, 2018).

La nueva norma vigente en México (Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 2017), prioriza el uso del transporte público, promueve espacios para bicicletas y se enfoca en tener mayor movilidad con menos autos, lo que cambia el mínimo de cajones de

estacionamiento, a un máximo que se deben construir, esto depende de la mezcla de usos de suelo y tipologías de vivienda; por ejemplo: una vivienda plurifamiliar de 20 apartamentos requería 2 cajones por vivienda (40 mínimo) y el máximo ahora será de 3 cajones por vivienda (60 en total). De igual manera se aplica en centros comerciales, de un cajón por cada 40 m² mínimo (usando una base de 5,000 m² lo que equivale a 125 cajones) a un cajón por cada 25 m² máximo (200 cajones en total).

Los estacionamientos manejan diferentes coberturas horarias de servicio, pudiendo ser diurno (abierto en horarios de oficina) o de 24 horas (trabajando los 365 días del año). Las modalidades de pago pueden ser por hora de uso (cobro de una cuota por hora o fracción) o mensual (donde se contrata como pensión de vehículos al hacer la función de garaje). Los estacionamientos en las plazas comerciales cobran una cuota por hora, bajo sello del ticket pueden hacer un descuento o no cobrar por un máximo de tiempo, así como aplicar una cuota especial si el automóvil pernocta en la plaza comercial (De Leon, 2017).

Los estacionamientos presentan diferentes características en su infraestructura física y operativa, por ejemplo, un cliente puede dejar las llaves para que un empleado del local estacione el vehículo en lugar de hacerlo el automovilista, o puede contar con un sistema automatizado donde se guarda el vehículo sin asistencia humana (esquemas de alta tecnología con amplitud en los países en vías de desarrollo, como México). Así mismo, muchos cuentan con bardeado y cercado eléctrico, cámaras de seguridad, baños y algunos son techados. Incluso para aprovechar mejor el espacio que suele ser reducido, principalmente en los estacionamientos exclusivos de locales comerciales, cuentan con equipos de elevación, lo que duplica el número de vehículos que pueden ser resguardados.

En los estacionamientos confinados (cerrados), se lleva un control de los vehículos, registrando el ingreso y salida de los automóviles, para ofrecer seguridad a sus clientes. Además, los establecimientos de renta de estacionamiento, suelen adicionar otros servicios, como lavado y encerado.

1.1.3 Movilidad Urbana y ciudades inteligentes

Aunque las normas buscan definir los mínimos espacios requeridos para estacionamiento (ahora máximos requeridos), el creciente número de vehículos en las ciudades, suele superar de manera continua la capacidad de creación de dicha infraestructura, esto se trata de balancear con la mejora en el transporte público, lo cual también ha sido insuficiente. Lo que deja la búsqueda de estacionamiento, como un problema a resolver que genera congestión e inconvenientes a los automovilistas, impactando a la movilidad urbana y el medio ambiente.

La movilidad urbana es el conjunto de desplazamientos dentro de una ciudad, estos desplazamientos se pueden dar a través de diferentes medios y pueden ser tanto de mercancías como de personas, lo cual consume recursos. En las nuevas tendencias de conceptualización de las ciudades, se pretende gestionar el consumo de recursos en estos entornos, buscando lograr lo que se conoce como ciudades inteligentes. Una ciudad inteligente es aquella que hace uso eficiente de los recursos para satisfacer las necesidades de la gente en un ambiente urbano. Estas ciudades, también conocidas como *smart cities* o ciudades eficientes, utilizan sensores, actuadores y tecnología que conecta componentes a lo largo de la ciudad, para enfocarse en mejorar los aspectos económicos, operativos, sociales y ambientales de los ciudadanos y visitantes (Maddox, 2018).

En cuanto a la movilidad urbana, la ciudad inteligente incluye el concepto de movilidad inteligente, que representa un nuevo enfoque de cómo se mueven las personas, procurando formas más limpias, seguras y eficientes (Mazhar, Anand, Awais y Suengmin 2016). Por ejemplo, en la movilidad inteligente se incluye el uso de bicicletas compartidas dentro de la ciudad, el control automático de luces o cámaras de seguridad en las vialidades, así como la búsqueda de estacionamiento inteligente y la reducción del tránsito vehicular.

Para la búsqueda de lugar para estacionarse, sistemas complejos llegan a sugerirle al automovilista una ruta a seguir (conociendo el destino), basándose en información del estado del tránsito para reducir la probabilidad de

congestionamientos e incluso balancear la distribución del tránsito en las vialidades (Liu, Naoun-Sawaya, Gu, Lecue y Shorten 2018). También se han implementado diferentes algoritmos para aumentar la eficiencia de ubicar un espacio libre, calculando la distancia y la oferta disponible para reducir el número de usuarios que no logran encontrar un lugar de estacionamiento (Pham, Tsai, Nguyen, Dow y Deng 2015), o, que consumen muchos recursos en su búsqueda.

La búsqueda de estacionamiento, requiere la información del tránsito y los lugares donde potencialmente se puede aparcar un vehículo, para ello, en las ciudades inteligentes, es posible generar aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés, *Internet of Things*). Uno de los componentes importantes y críticos de estas aplicaciones, es tener los datos actualizados y disponibles para el usuario, si los datos toman mucho tiempo en ser analizados la información pierde exactitud, dado lo cambiante del entorno (Kang, Lv y Chen, 2017).

En la búsqueda de optimizar el trayecto a los automovilistas, se han propuesto diferentes métodos para encontrar la distancia mínima desde la posición inicial de partida, hasta un espacio disponible en el menor tiempo, con diferentes grados de certidumbre, para lo que se han utilizado diferentes algoritmos, como por ejemplo, la colonia de hormigas optimizada, Dijkstra, métodos heurísticos basados en probabilidades o Cadenas de Markov (Pei, Wu y Huang, 2017).

Sin embargo, el problema sigue abierto, en el sentido de que cualquier sistema inteligente de búsqueda de estacionamiento en tiempo real, requiere una alta inversión en infraestructura para ser implementado, no siempre disponible en todas las ciudades.

1.2 Estacionamiento inteligente

Como ya se mencionó, en las ciudades inteligentes a través de aplicaciones de IoT, se ha buscado la solución de la búsqueda de lugar para estacionarse, por parte de los automovilistas. Esto ha derivado en las propuestas de sistemas de

estacionamiento inteligente, que combinan esquemas de monitoreo y aplicaciones avanzadas de software.

El desarrollo de esta forma de gestión de estacionamientos, se inició desde el año 2010 y actualmente tiene el potencial de proveer información de la disponibilidad de espacios de estacionamiento en áreas específicas, a través de diferentes medios. Estos sistemas han demostrado que contribuyen a reducir el tránsito y el congestionamiento, dado que permiten reducir el tiempo en que los automovilistas encuentran espacios para estacionarse (Kotb, Shen y Huang, 2017).

A continuación se analiza esta problemática, desde el punto de vista del automovilista y su necesidad de encontrar una mejor ruta a un lugar para estacionarse.

1.2.1 Análisis de la problemática

Para identificar y analizar los factores que inciden en la problemática, se ha construido un árbol de problemas (Figura 2).

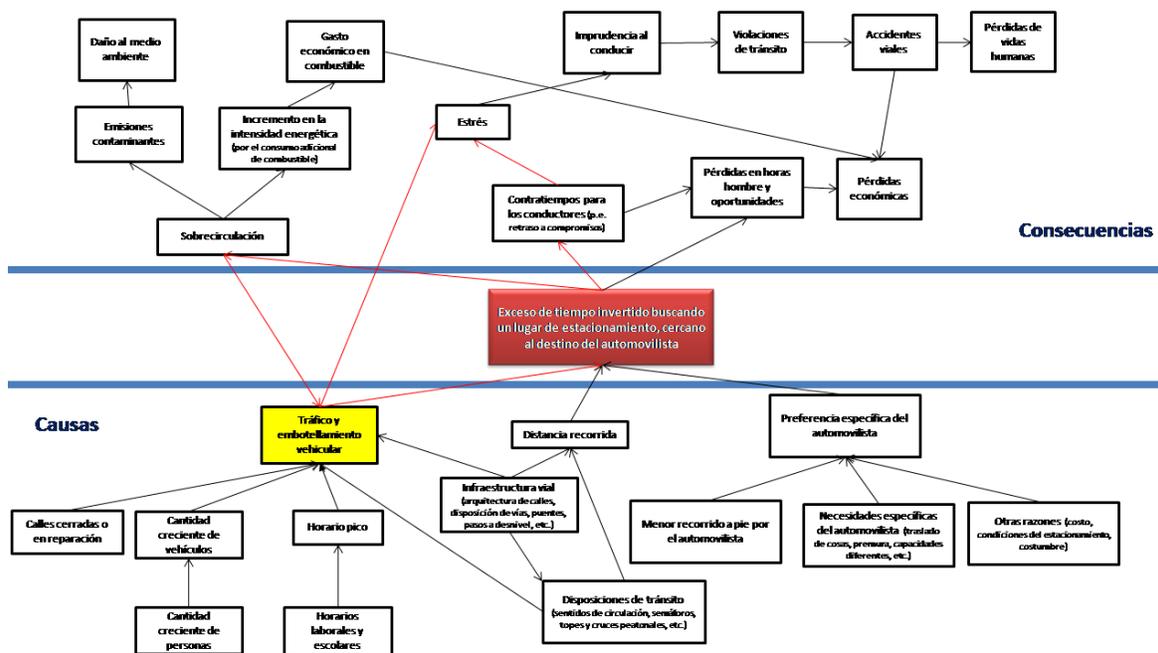


Figura 2. Árbol de problemas.

Para los automovilistas el principal problema es la pérdida de tiempo, derivado del camino escogido y el recorrido para encontrar un espacio de estacionamiento en función de la distancia que están dispuestos a caminar hacia su destino final, considerando que durante la búsqueda se desconocen las condiciones que guardará el trayecto, críticas durante las horas pico.

Un automovilista puede intentar rutas alternas en función de las disposiciones de tránsito y las condiciones del camino, más sus preferencias con respecto a las características deseables en los establecimientos. Esta búsqueda contribuye a acrecentar el problema del exceso de tránsito, que, aunado a la creciente cantidad de vehículos, ocasiona retrasos para los automovilistas y, en consecuencia, estos contratiempos, generan estrés y pérdidas de oportunidades.

A mayor tránsito, se consume una mayor cantidad de combustible, que el automovilista tendrá que solventar, incrementándose al mismo tiempo las emisiones contaminantes a la atmósfera, ocasionando pérdidas económicas y daño al medio ambiente.

Otra consecuencia del estrés en los automovilistas, es el estado de ánimo y la salud mental, que pueden desembocar en violaciones al reglamento de tránsito, por conducir sin prudencia, ocasionando incluso accidentes viales y en un caso extremo, pérdida de vidas humanas.

1.2.2 Enunciado del problema

Como resultado del análisis de la problemática, se enuncia el problema a resolver:

Exceso de tiempo invertido por los automovilistas en la búsqueda de estacionamiento cercano a un destino en lugares de alta afluencia y horas pico.

1.2.3 Variables del problema

A continuación, en la Tabla 1 se presenta la relación de variables involucradas en el problema, clasificadas según su tipo en (Pardo de V., 1997):

- Independientes: representan las condiciones que se consideran en el experimento propuesto, por lo que serán manipuladas para la validación.
- Dependientes: representan los conceptos que variarán en función de los resultados del método propuesto, por lo que serán medidas y observadas.
- Control: representan los conceptos que habrán de ser controlados en la configuración de la simulación, para neutralizar sus efectos en las variables independientes, esto es, eliminar el ruido.

Tabla 1. Definición de las variables independientes, dependientes y de control.

Tpo de variables	CONCEPTOS	1 - Variable	2 - Tipo	3 - Operacionalización	4 - Categorías o Dimensiones	5 - Definición	6 - Indicador	7 - Nivel de Medición	8 - Unidad de Medida	9 - Índice	10 - Rangos de valores permitidos
Independientes	ITINERARIO	Punto de partida del automovilista en un recorrido	Cuantitativa	Origen de un trayecto de un automovilista hacia un destino	Latitud y longitudud	Posición georeferenciada del automovilista cuando inicia un trayecto a un destino.	No aplica	de razón	Grados, minutos y segundos (para ambas coordenadas)	No aplica	Los valores de grados, minutos y segundos se cuantifican desde -180° hasta 180°
		Punto de destino del automovilista en un recorrido	Cuantitativa	Destino de un automovilista en un recorrido desde su origen	Latitud y longitudud	Posición georeferenciada del lugar a donde se dirige automovilista.	No aplica	de razón	Grados, minutos y segundos (para ambas coordenadas)	No aplica	Los valores de grados, minutos y segundos se cuantifican desde -180° hasta 180°
	COBERTURA DEL MÉTODO PROPUESTO	Vehículos en búsqueda de estacionamiento con el método propuesto	Cuantitativa	Vehículos que en determinado período de tiempo, ciculan por las vialidades buscando estacionamiento e implementan el método propuesto.	Cantidad de vehículos	Cantidad de vehículos, que buscan estacionamiento, con el método propuesto.	Número de vehículos	de razón	Unidades	Porcentaje de vehículos que buscan estacionamiento con el método propuesto, del total de vehículos en búsqueda de estacionamiento.	El valor varía de 0% a 100% máximo.
Dependientes	EFICACIA DE BÚSQUEDA	Vehículos estacionados exitosamente	Cuantitativa	Vehículos aparcados exitosamente en el área de búsqueda.	Cantidad de vehículos	Cantidad de vehículos totales estacionados en un tiempo determinado.	Número de vehículos	de razón	Unidades	Porcentaje de éxito al estacionarse con relación al total de vehículos que buscan estacionamiento, al implementar el método propuesto en determinada cobertura.	El valor varía de 0% a 100% máximo.
	EFICIENCIA DE LA BÚSQUEDA	Tiempo de trayecto	Cuantitativa	Tiempo de trayecto de un vehículo, desde el punto de origen hasta encontrar un lugar para estacionarse.	Tiempo	Cantidad de tiempo que toma al automovilista recorrer el trayecto entre su origen al estacionamiento destino, considerando tráfico y semáforos.	Tiempo de recorrido	de razón	Segundos	Promedio de tiempo de recorrido en los vehículos estacionados exitosamente.	Arriba de 0 segundos.
		Distancia del trayecto	Cuantitativa	Distancia de trayecto de un vehículo, desde el punto de origen hasta encontrar un lugar para estacionarse.	Distancia	Distancia total recorrida de trayecto por el automovilista entre su origen y el estacionamiento destino, considerando tráfico y semáforos.	Distancia de recorrido	de razón	Metros	Promedio de distancia de recorrido en los vehículos estacionados exitosamente.	Arriba de 0 metros.
	IMPACTOS AMBIENTALES	Emisiones	Cuantitativa	Niveles de emisión generados por los vehículos en circulación en búsqueda de estacionamiento*.	Niveles de CO, CO ₂ , NOx, HC, PMx	Fluidos gaseosos puros o con sustancias en suspensión, que emanan como residuos provenientes de los motores de combustión interna de cada vehículo.	Total en peso de cada contaminante, emitidos a la atmósfera por cada vehículo en su ruta	de razón	Kilogramos	Promedio de emisión por vehículo estacionado exitosamente.	Arriba de 0 kilogramos.
Combustible		Cuantitativa	Consumo de combustible de los vehículos en circulación en búsqueda de estacionamiento.	Combustible	Total de combustible consumido por los motores de combustión interna de cada vehículo.	Total de combustible consumido por cada vehículo en su ruta	de razón	Litros	Promedio de combustible consumido por vehículo estacionado exitosamente.	Arriba de 0 litros.	

* NORMA Oficial Mexicana NOM-041-SEMARNAT-2015

Tabla 1. Definición de las variables independientes, dependientes y de control (continuación).

Tpo de variables	CONCEPTOS	1 - Variable	2 - Tipo	3 - Operacionalización	4 - Categorías o Dimensiones	5 - Definición	6 - Indicador	7 - Nivel de Medición	8 - Unidad de Medida	9 - Índice	10 - Rangos de valores permitidos
De Control	ÁREA GEOGRÁFICA DE BÚSQUEDA	Intersecciones	Cuantitativa	Representa el cruce de dos o más calles, que confluyen en un punto.	Latitud y longitud	Posición georeferenciada de un cruce en un mapa geográfico.	No aplica	de razón	Grados, minutos y segundos (para ambas coordenadas)	No aplica	Los valores de grados, minutos y segundos se cuantifican desde -180° hasta 180°
		Calles	Cuantitativa	Representa una cuadra acotada por dos intersecciones.	Nodo inicio, nodo fin y longitud	Representación de un arco que une dos intersecciones georeferenciadas de cruce, en un mapa geográfico, al que se relaciona una longitud como peso.	No aplica	de razón	Grados, minutos y segundos, de dos nodos para cada coordenada, y metros para la longitud.	No aplica	Los valores de grados, minutos y segundos se cuantifican desde -180° hasta 180°. La longitud arriba de 0 metros.
	CARGA VEHICULAR ADICIONAL	Número de vehículos en circulación que NO buscan estacionamiento	Cuantitativa	Vehículos que en determinado período de tiempo, circulan por las vialidades.	Cantidad de vehículos errantes	Cantidad de vehículos que circulan por las vialidades, sin buscar estacionamiento, incluyendo solamente automóviles.	Número de vehículos	de razón	Unidades	No aplica	Arriba de 0.
	TRÁFICO	Velocidad promedio de circulación	Cuantitativa	Medición indirecta del tráfico que influye en la velocidad de circulación que se alcanza en determinada cuadra.	Velocidad	Velocidad promedio esperada a la que un vehículo puede circular en determinada cuadra.	Velocidad promedio estimada de circulación	de razón	Metros por segundo	Promedio de velocidad de circulación en una cuadra	Arriba de 0.
	CONDICIONES VIALES	Semáforos	Cuantitativa	Ubicaciones de semáforos vehiculares y peatonales.	Latitud y longitud	Ubicación de semáforos temporizados para control de tráfico.	No aplica	de razón	Grados, minutos y segundos (para ambas coordenadas)	No aplica	Los valores de grados, minutos y segundos se cuantifican desde -180° hasta 180°
			Cuantitativa		Latitud y longitud	Ubicación de semáforos peatonales que permiten el flujo de personas a pie.	No aplica	de razón	Grados, minutos y segundos (para ambas coordenadas)	No aplica	Los valores de grados, minutos y segundos se cuantifican desde -180° hasta 180°
	VELOCIDAD MÁXIMA	Velocidad de desplazamiento máxima de un vehículo	Cuantitativa	Límite de velocidad de desplazamiento de un vehículo en función del tipo de vialidad.	Velocidad	Velocidad máxima a la que puede circular un vehículo dado el tipo de vialidad, en este caso, urbana.	Promedio de velocidad sin tráfico	de razón	Metros por segundo	No aplica	Arriba de 0 km/h
	INFRAESTRUCTURA INSTALADA	Infraestructura de estacionamiento público	Cuantitativa	Estacionamientos públicos establecidos.	Latitud y longitud	Posición georeferenciada de los locales de estacionamiento público (de paga)	No aplica	de razón	Grados, minutos y segundos (para ambas coordenadas)	Total estacionamientos de públicos	Los valores de grados, minutos y segundos se cuantifican desde -180° hasta 180°
Cuantitativa			Cantidad de cajones disponibles en locales de estacionamiento público (de paga).	Cajones disponibles por estacionamiento público	Cantidad de lugares disponibles dentro de un local de estacionamiento público.	Cajones por local	de razón	Cajones/local	Total de cajones disponibles en estacionamientos públicos	Un valor entero superior a 0	

1.3 Objetivos y justificación

1.3.1 Objetivo general

Diseñar y validar un método guía para proporcionar la ruta a un automovilista en búsqueda de lugar en estacionamiento público, de forma tal que, considerando las condiciones del tránsito, minimice el tiempo de recorrido, determinando su rendimiento como el tiempo total, distancia recorrida y el impacto ambiental, a través de escenarios de simulación acotados al primer cuadro extendido de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar y comparar los métodos y técnicas de optimización en ruteo aplicados en algoritmos guía, para establecer el estado del arte.
- Diseñar un método guía para búsqueda de estacionamiento público mejorando la ruta sugerida.
- Implementar y validar el método guía propuesto, a través de simulación computacional.
- Evaluar el rendimiento del método guía propuesto, analizando indicadores de eficacia y eficiencia con base a los resultados de la simulación.

1.3.3 Justificación

Un método guía que aplique técnicas y métodos de inteligencia artificial, permitiría ofrecer una ruta viable a los automovilistas para reducir en promedio el tiempo y distancia de recorrido hacia un estacionamiento próximo a su destino.

Aunque no es el objetivo primordial del método a diseñar, este proceso de mejora de ruta, contribuiría de manera parcial a la reducción de la sobrecirculación originada por la búsqueda aleatoria de lugar para estacionarse.

De manera indirecta, se esperaría un efecto de alivio a los posibles contratiempos que afectan a los automovilistas, economizando combustible y reduciendo la pérdida de horas hombre y oportunidades en el ámbito laboral; esto representa un ahorro económico para los automovilistas a largo plazo y una mejora en la calidad de vida de los

ciudadanos, al reducir la emisión de contaminantes y ruido dentro del primer cuadro de la ciudad o cuadros relevantes por su afluencia.

En síntesis, el abordaje de los problemas a través de la presente propuesta, se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Contribuciones esperadas del trabajo.

Problema	Contribución de la propuesta	* Tipo de contribución
Distancia recorrida	Ésta es reducida al evitar circular dos veces por la misma vía, ofreciendo la mejor ruta posible hacia el estacionamiento más cercano al destino del automovilista.	Resuelve
Tráfico y embotellamiento vehicular	Un método que permita a los automovilistas evitar las zonas de tráfico, sin afectar el objetivo de optimizar el tiempo y distancia, permitirá no contribuir al congestionamiento vehicular.	Contribuye parcialmente
Sobrecirculación	Al ofrecer la opción de un mejor trayecto a los automovilistas se reduce la distancia que éstos recorren, al no necesitar buscar alternativas en varios lugares	Contribuye parcialmente
Contratiempos	Se minimizan los probables contratiempos al evitar la sobrecirculación y por ende la distancia recorrida, reduciendo el tiempo total del trayecto	Contribuye indirectamente
Pérdidas de horas hombre y oportunidades	Éstas son a raíz de los contratiempos en el tráfico vehicular y disminuyen cuando se evitan los contratiempos.	Contribuye indirectamente
Preferencias del automovilista	No ha sido considerada para el diseño del algoritmo propuesto	No contribuye

* Tipos de contribuciones: Resuelve, contribuye parcialmente, contribuye indirectamente y no contribuye.

1.4 Hipótesis y alcances

1.4.1 Hipótesis

El uso de un nuevo método para la guía de automovilistas en búsqueda de lugar de aparcamiento en estacionamientos públicos, permite generar una mejora de distancia y tiempo del trayecto hacia un estacionamiento próximo a su destino.

1.4.2 Alcances, límites y supuestos

El alcance del trabajo incluye:

- La aplicación de un método guía mejorado aplicando una estrategia de búsqueda basada en técnicas heurísticas y un método de factores ponderados.
- La validación del método guía por simulación, en un experimento con seis tratamientos diseñado para el primer cuadro extendido de la ciudad de Xalapa, Veracruz (Figura 3).
- La estimación de las condiciones de circulación y tráfico vehicular por simulación.
- Los resultados incluirán el análisis de tendencias basado en los reportes estadísticos de los vehículos en tránsito durante la simulación, así como la valoración de impactos en emisiones contaminantes y consumo de combustible.

El trabajo excluye lo siguiente:

- No se considerarán los cambios estacionales, anuales o semanales de tránsito.
- No se tiene considerado el desarrollo de un prototipo con refinamiento orientado a usuario final.
- No se tienen consideradas pruebas de campo con un automovilista piloto.

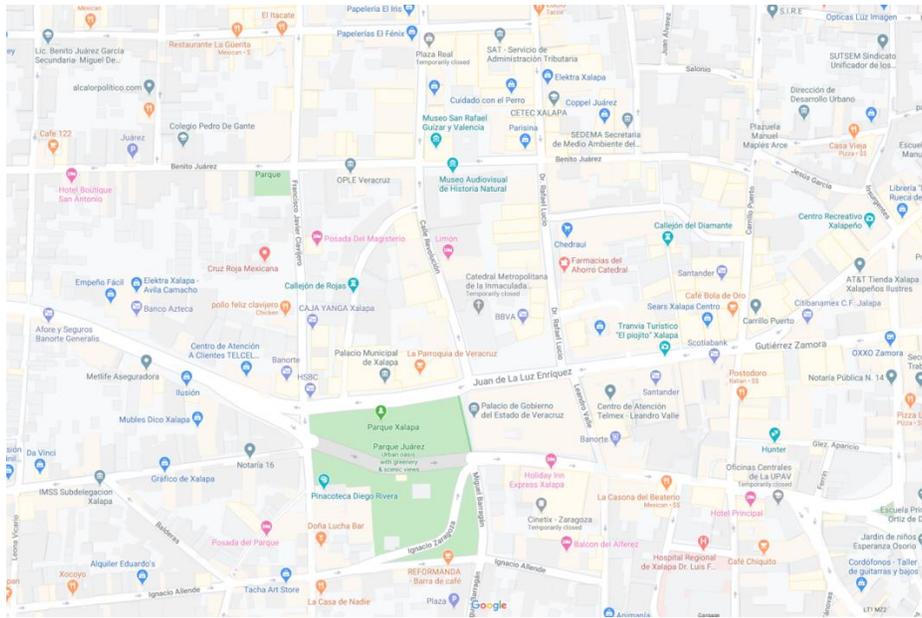


Figura 3. Primer cuadro extendido de la ciudad de Xalapa, Veracruz, México.

1.5 Metodología

El tipo de investigación que se plantea es aplicada, dado que se centra en encontrar una solución concreta a un problema identificado en la realidad cotidiana, buscando una utilidad y mejora de la calidad de vida de los habitantes en las ciudades. También es una investigación de tipo correlacional, al analizar los factores independientes y sus efectos sobre los dependientes, que afectan el tránsito en el ambiente urbano, siendo también cuantitativa, al aplicar procedimientos basados en la medición.

El procedimiento metodológico, combina la investigación documental para determinar los métodos aplicados al momento, en la construcción de soluciones algorítmicas de guía para automovilistas en búsqueda de estacionamiento; con trabajo de campo, para recabar datos base para la configuración de la simulación en el caso de estudio, y de laboratorio, dado que se plantea el desarrollo de un experimento por simulación computacional, para validar la propuesta del método diseñado.

El método de inferencia será inductivo, dado que se generarán conclusiones a partir de tratamientos aplicados en un entorno simulado de un caso particular, en función de datos

estadísticos que dan cuenta del comportamiento cuantitativo esperado en las variables, con base a la simulación.

El estudio es relativamente longitudinal, dado que la simulación permitirá dar seguimiento al fenómeno de búsqueda a los largo de un período de tiempo definido como alcance, equiparado a un proceso de congestión vehicular en horas pico. Con relación al tiempo, se considera relativamente sincrónico, dado que los tiempos de comparación se acotan para mantener la factibilidad de la simulación (Sampieri, Collado y Lucio, 2004).

El proceso metodológico consta de ocho pasos, mismos que se presentan en la Figura 4.

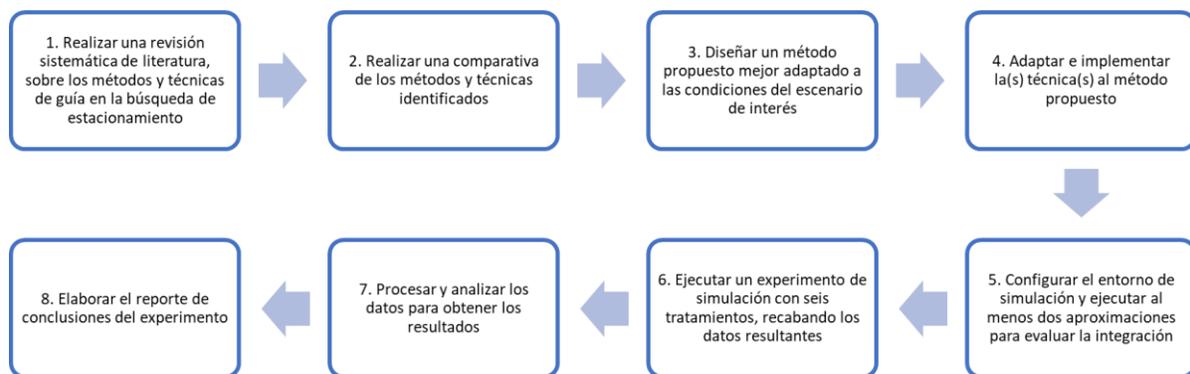


Figura 4. Proceso metodológico de la investigación.

Los pasos son los siguientes:

1. **Realizar una revisión sistemática de literatura, sobre los métodos y técnicas de guía en la búsqueda de estacionamiento:** permite tomar en cuenta el estado de la cuestión, para identificar temas abiertos y proponer una mejor solución al problema de búsqueda de estacionamiento.
2. **Realizar una comparativa de los métodos y técnicas identificados:** se analizan y comparan las características y ventajas de cada método, en función de los ámbitos donde fueron aplicados y las formas en que han sido validados.

3. **Diseñar un método propuesto mejor adaptado a las condiciones del escenario de interés:** para decidir cuál(es) permitiría(n) proponer una mejora, en el grupo de casos de los cuales es representativo el caso de estudio.
4. **Adaptar e implementar la(s) técnica(s) al método propuesto:** se desarrollará el software que incluya el método propuesto, realizando pruebas de integración hacia el paquete de simulación.
5. **Configurar el entorno de simulación y ejecutar al menos dos aproximaciones para evaluar la integración:** terminadas las pruebas de unidad y realizados los ajustes necesarios, se procederá a configurar el entorno de simulación, en preparación para la validación por este medio. Se proponen al menos dos iteraciones, para verificar la correcta integración y ajustar lo necesario.
6. **Ejecutar un experimento de simulación con seis tratamientos, recabando los datos resultantes:** una vez integrado el entorno de simulación se ejecutarán las corridas por los tratamientos previstos para el experimento, lo que corresponde a una técnica de *scenario testing*. El entorno de simulación elegido, permite la producción y recabo de datos en bruto, que serán la base para el procesamiento estadístico.
7. **Procesar y analizar los datos para obtener los resultados:** al finalizar las corridas y recabar los datos resultantes, se analiza y organiza esta información para obtener estadísticas e indicadores del impacto del método propuesto en el caso de estudio.
8. **Elaborar el reporte de conclusiones del experimento:** con base a lo anterior se sintetiza la información y se discuten los resultados, evaluándose el método aplicado para la investigación y el potencial de la propuesta realizada, para la generación de trabajos futuros, generándose las conclusiones del trabajo.

En los siguientes apartados, se presentan los métodos y técnicas específicos, que serán aplicados en cada paso del proceso metodológico.

1.5.1 Revisión sistemática de la literatura

Se realiza una revisión sistemática de literatura sobre las aplicaciones de búsqueda de estacionamiento, para resumir la información preexistente y confirmar la necesidad de un nuevo algoritmo. A continuación, se presenta el procedimiento para la ejecución de la revisión sistemática de literatura aplicado (Kitchenham y Stuart, 2004).

Se definen las preguntas de investigación, parte más importante de la revisión sistemática de literatura, identificando los artículos y estudios que se enfocan en el tema a desarrollar, en este caso, los algoritmos guía para vehículos y sistemas de estacionamiento inteligente.

El proceso de búsqueda se realiza en fuentes confiables de información: ACM, Springer, Science Direct e IEEE, (agregar dirección de cada una) entre diferentes publicaciones académicas. Para mantener una base actualizada de información, se deben limitar las publicaciones al estado del arte, a sólo 5 años o más recientes (en nuestro caso 2016-2020). Además de estas especificaciones, las herramientas de búsqueda nos permiten utilizar operadores lógicos para conseguir los resultados con una sola cadena de búsqueda. Para gestionar las referencias se utiliza Mendeley, herramienta que posibilita su instalación en escritorio, desde: <https://www.mendeley.com/>.

Para seleccionar los estudios, una vez recabada la información potencialmente relevante, ésta debe pasar por los criterios de inclusión y exclusión para analizar paulatinamente el contenido y reducir el número de estudios a abordar.

Para la evaluación de calidad, se provee un criterio (de inclusión o exclusión) más detallado, que ayuda a medir la importancia de estudios individuales cuando se sintetizan los resultados y ofrecen recomendaciones para otras búsquedas.

En el proceso de extracción de datos, se utilizan instrumentos para reducir la parcialidad, éstos se diseñan cuando se define el proceso de búsqueda. En este caso se utiliza una matriz de extracción, donde en cada fila se presentan las diversas publicaciones estudiadas y en las columnas los constructos extraídos de las lecturas.

Cada celda donde se cruza una fila con una columna, contiene una síntesis de la información extraída.

El proceso de síntesis de la información, se lleva a cabo por un meta-análisis que, con base a las características utilizadas en la matriz de extracción, genera una agregación, que permite sintetizar aspectos relacionados con coherencia. (Pearson, Robertson y Rittenmeyer, 2011).

1.5.2 Comparación de técnicas y selección de métodos de guía a aplicar

Al finalizar el proceso de síntesis y extracción en el paso anterior, se analiza la parte de los algoritmos y estrategias empleados por otros autores, enfocándonos solamente en la parte del software, sus aportaciones y el escenario en donde encontraron mayor éxito al determinar una ruta para llegar al estacionamiento.

Se abordará a través de la aplicación de un análisis FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas). Este análisis es una base de diagnóstico utilizada para definir objetivos y estrategias competitivas para un plan de negocio; se divide en análisis interno (fortalezas y debilidades) y externo (oportunidades y amenazas).

Del análisis interno, podemos conocer las capacidades y recursos necesarios para cumplir su objetivo, así como el tiempo y su efectividad. El análisis externo nos muestra las ventajas y desventajas de cada uno, al compararlo con las otras alternativas.

De este proceso se obtiene una matriz FODA, con el formato que se aprecia en Figura 5. El primer paso es realizar un análisis de los factores internos, para identificar y listar todas las fortalezas y debilidades, para seguido en un segundo paso, analizar los factores externos identificando las oportunidades y amenazas.

Una vez realizado lo anterior, se deben determinar estrategias deseables, para establecer una combinación en los cuatro cuadrantes que resultan de analizar fortalezas-oportunidades, debilidades-oportunidad, fortalezas-amenazas y debilidades-amenazas. A partir de esta información se puede desarrollar una estrategia que permita lograr una mejor optimización para nuestras necesidades.

MATRIZ FODA		Análisis de factores internos	
		Fortalezas	Debilidades
Análisis de factores externos	Oportunidades	¿Cómo utilizar una fortaleza para aprovechar una oportunidad?	¿Cómo aprovechar una oportunidad para aliviar una debilidad?
	Amenazas	¿Cómo utilizar una fortaleza para lidiar con una amenaza?	¿Cómo aliviar una debilidad para lidiar con una amenaza?

Figura 5. Matriz FODA.

Este análisis se realizará por tipo de algoritmo, de tal forma que se valoren sus atributos intrínsecos.

1.5.3 Diseño algorítmico e implementación

Se utiliza el estándar ISO/IEC/IEEE 12207:2017 Ingeniería de sistemas y software: procesos del ciclo de vida del software; que provee un marco de trabajo con actividades específicas para el desarrollo de software, mismo que se ha adaptado para el desarrollo del algoritmo de ruteo a proponer, incorporando los procesos técnicos siguientes:

6.4.3 Proceso de definición de requisitos de sistemas/software

6.4.4. Proceso de definición de arquitectura

6.4.5 Proceso de definición del diseño

6.4.7 Proceso de implementación (construcción)

6.4.8 Proceso de integración

6.4.9 Proceso de verificación (dinámica)

Con base a lo anterior se definieron las siguientes actividades:

1. Requisitos del algoritmo

- Estudio del algoritmo seleccionado
- Identificación de entradas requeridas y fuentes de adquisición de datos
- Establecimiento de parámetros de control
- Interfaces para la simulación

2. Arquitectura del sistema

- Identificación de componentes
- Elaboración de diagrama

3. Diseño del algoritmo

- Diseño detallado del algoritmo
- Generación de pseudocódigo

4. Implementación y prueba del algoritmo

- Codificación del método guía propuesto
- Pruebas de unidad y depuración

5. Integración / Verificación

- Instalación y configuración de software
- Estrategia de integración
- Primera integración
- Verificación
- Identificación de ajustes y corrección
- Segunda integración
- Verificación
- Identificación de ajustes y corrección

1.5.4 Interacción y configuración en el entorno de simulación

Se utiliza el estándar ISO/IEC/IEEE 12207:2017 Ingeniería de sistemas y software: procesos del ciclo de vida del software; que provee un marco de trabajo con actividades específicas para el desarrollo de software, mismo que se ha adaptado para la integración del algoritmo de ruteo diseñado y probado, al entorno de simulación, incorporando los procesos técnicos siguientes:

6.4.8 Proceso de integración

6.4.9 Proceso de verificación (dinámica)

Con base al estándar ISO/IEC/IEEE 29119-4: 2015 Ingeniería de software y sistemas. Pruebas de software. Parte 4: Técnicas de prueba; para seguir los procesos de prueba en la verificación de la integración, donde se aplicarán las siguientes técnicas:

5.2.9 Scenario Testing (5.2.9.1 Derive test conditions TD2)

Para la integración se consideran dos iteraciones, definidas de la siguiente manera:

1ª. Integración, que incluye: incorporar el grafo del cuadro de la ciudad, incluir el método propuesto para un solo automóvil, con un destino y los estacionamientos disponibles.

Escenario 1 - Sin tráfico y 100% desocupados los estacionamientos, con el fin de probar el algoritmo de ruteo empleado por SUMO para estacionamientos.

Escenario 2 - Con tráfico y con niveles diferenciados de ocupación de hasta 100%, en este escenario se evalúa el re-ruteo que envía los vehículos que no alcanzaron cupo a otro estacionamiento cercano.

2ª Integración, que incluye: adicionar semáforos, pasos peatonales y tráfico vehicular con 800 vehículos:

Escenario 1. Diversificación de tráfico (rutas generadas aleatoriamente y tasa de llegada por vehículo de uno a dos segundos).

Escenario 2 al 6. Adicionar automóviles en busca de estacionamiento sobre 200 vehículos ocupando el método propuesto a: 20%, 40%, 60%, 80% y 100%.

Tamaño de corrida: hasta que todo automóvil se estacione o salga del área.

Con base a lo anterior se definieron las siguientes actividades:

5. Integración / Verificación

- Instalación y configuración de software
- Estrategia de integración
- Primera integración
- Verificación
- Identificación de ajustes y corrección
- Segunda integración
- Verificación
- Identificación de ajustes y corrección

1.5.5 Diseño del experimento de validación por simulación

Se ejecuta una simulación para comprobar que el método propuesto mejora el tiempo de búsqueda de estacionamiento. Se continúa utilizando el estándar ISO/IEC/IEEE 12207:2017 Ingeniería de sistemas y software: procesos del ciclo de vida del software; incorporando el proceso técnico: 6.4.11 Proceso de validación.

El análisis de los resultados se lleva a cabo bajo el enfoque experimental de tratamientos, facilitando la presentación e interpretación de los resultados a medida que los automovilistas utilizan el nuevo método. Se declaran 5 factores, que son:

1. Configuración del escenario (primer cuadro extendido de Xalapa)

Número nodos = 95

Estacionamientos Públicos = 34

Cajones = 1029

Semáforos = 6 (4 vehiculares y 2 peatonales)

Pasos peatonales = 2

2. Condiciones de flujo de automóviles

Total de vehículos en circulación = 1000

Tasa de llegada = 2 vehículos de tráfico y 2 vehículos en búsqueda de estacionamiento por segundo.

3. Distancia de tolerancia para búsqueda de estacionamiento = 1000 m para el algoritmo Dijkstra

4. Tamaño de muestra:

Porcentaje de vehículos en búsqueda de estacionamiento = 20% del total

5. Tratamientos = 6

Porcentaje de vehículos en búsqueda de estacionamiento con el método propuesto= 0% (control)- 20% - 40% - 60% - 80% - 100%

Las variables respuesta, son las siguientes, mismas que ya fueron indicadas en la operacionalización de la investigación:

- Tiempo de recorrido
- Distancia recorrida
- Otros (Impactos ambiental –emisiones contaminantes y consumo de combustible)
- Eficacia de búsqueda

El efecto del uso del método propuesto sobre las variables respuesta se evaluaría con un análisis estadístico por promedios para los beneficios conforme se adopta el método propuesto por los vehículos.

En la ejecución por cada tratamiento, se llevan a cabo las siguientes actividades:

- Preparan las bases de datos
- Configurar tratamiento
- Ejecutan la corrida de simulación para el tratamiento
- Recuperar datos del tratamiento
- Repetir para siguiente tratamiento

Y para el procesamiento de los datos:

- Seleccionar datos útiles
- Procesar estadísticamente
- Consolidar y graficar los datos

1.5.6 Análisis estadístico de los datos

Una vez obtenidos los datos, se ordenan y presentan en tablas que permitan ver su tendencia, esto también facilita su representación gráfica. Después de su agrupación se pueden evaluar las variables dependientes y conocer su impacto en la simulación

Según Sánchez, J. (Conceptos Claros de Estadística), para cualquier proceso de análisis se requiere de cuatro pasos:

1. Enfocar el estudio, definiendo un solo objetivo.
 - a. Entender la tabla de datos y el significado de las variables.
 - b. Definir el objetivo de análisis (¿qué problema se quiere solucionar?).
2. Explorar la base de datos.
 - a. Crear e interpretar los gráficos obtenidos de los datos.
 - b. Extraer las primeras respuestas (pre-conclusiones).
3. Analizar los datos.
 - a. Responder a las preguntas de investigación utilizando técnicas apropiadas para corroborar las pre-conclusiones.
 - b. Interpretar y resumir los resultados.
4. Interpretar y comunicar las conclusiones en un informe final.
 - a. Responder a los objetivos. Citar la problemática y contextualizar el estudio, definiendo el objetivo alineado al problema a resolver.
 - b. Un esquema efectivo de comunicación. Se debe mostrar en los resultados, un resumen de conclusiones y mencionar los problemas encontrados durante el estudio.

Se comprueba la hipótesis a partir de la tendencia central promedio observada en las variables dependientes a partir de los resultados recabados al finalizar el experimento.

1.5.7 Evaluación y contraste de la hipótesis

Con esta información del procedimiento anterior se interpretan los resultados para obtener conclusiones útiles dentro del objeto de estudio, avaladas por las cifras que demuestran las tendencias del modelo y el resultado del experimento por medio de simulación. Éstas se recopilan para presentarse de manera cristalina y contrastarlas contra las muestras obtenidas en las simulaciones de control.

Si podemos comprobar la hipótesis consistente en que, se puede reducir el promedio de tiempo invertido durante la búsqueda de estacionamiento público entre los automovilistas al mismo tiempo que se aprovecha la información de la infraestructura vial urbana, identificándose en qué medida, con base a los escenarios, incluyendo la distancia recorrida, así como otros impactos colaterales.

Con la información obtenida y las conclusiones se puede observar la contribución del proyecto, su impacto y alcance para solucionar los diferentes problemas en el caso de estudio.

Al momento de procesar la información, se tendrá en orden y con una estructura en función de los capítulos y apartados registrados para facilitar la elaboración del informe final (Gómez, 2012).

1.5.8 Herramientas

En el proceso de implementación para la validación del método propuesto, se utilizan las herramientas indicadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Herramientas utilizadas en el trabajo.

Nombre	Versión	Descripción	Uso
SUMO	V. 1.5	(<i>Simulation of Urban MObility</i>) es un paquete de código abierto, diseñado para manejar y simular grandes	Además de sus atributos distintivos, SUMO provee una gran variedad de herramientas para su configuración. Permite la creación de mapas, diferentes tipos de vehículos, manejo de semáforos,

		redes de tráfico microscópico y multi-modal.	simulación de peatones y control de la velocidad y distancias que siguen estos elementos.
PYTHON	V3.7	Lenguaje de programación interpretado de fácil sintaxis e implementación de funciones que soporta la orientación a objetos	Se ha utilizado para todo tipo de aplicaciones relacionadas a los negocios, base de datos, procesamiento de datos generándose soluciones escalables a nivel web.

CAPÍTULO 2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes

Al realizar la investigación sobre el estado del arte de los métodos y técnicas implementados en los sistemas de guía para estacionamiento, se identificaron 7 Revisiones Sistemáticas de Literatura, que analizar este dominio desde diferentes puntos de vista, a continuación se presentan sus principales hallazgos.

La gestión de los espacios de estacionamiento, se incluye en el concepto de ciudades inteligentes, donde se han buscado soluciones que incorporan las TIC's, presentándose en años recientes una emergencia sobre el tema. En este contexto identificaron 8 revisiones sobre el estado del arte, principalmente tratando aspectos sobre sensores, tecnologías y aplicaciones (Tabla 4), ningún trabajo aborda de manera específica la comparación entre métodos y técnicas aplicadas en los sistemas de guía.

Tabla 4. Revisiones antecedentes.

Trabajo y alcance	Tecnologías de automatización y telecomunicaciones	Sistemas de Smart Parking	Métodos y técnicas de guía
(Sarangi, Das y Babu, 2019) 2016-2018	✓	✓	✗
(Al-Turjman y Malekloo, 2019) 2009-2018	✓	✓	✗
(Barriga et al, 2019) 2014-2018	✓	✓	✗
(Fraiefr y Fernström, 2016) 2000-2016	✓	✓	✗
(Paidi, Fleyeh, Håkansson y Nyberg, 2018) 2000-2017	✓	✓	✗
(Hassoune, Dachry, Moutaouakkil y Medromi, 2016) 2008-2016	✓	✓	✗
(Kayal y Perros, 2017) 2012-2016	✓	✗	✗
(Lin, Rivano y Le Mouel, 2017) 2000-2016	✗	✓	✗

En (Sarangi et al, 2019), se estudian las tecnologías y aplicaciones categorizando los sistemas en manuales, semi-automáticos y automáticos, y en cuanto a la gestión, se analizan en sistemas por búsqueda ciega, guía de estacionamiento, basados en tránsito, pago inteligente, pago electrónico y sistemas robotizados. Este trabajo clasifica los tipos de sensores que se utilizan, y los algoritmos utilizados para reconocer las placas (basados en algoritmos genéricos, RBFNN y SVM), de igual forma se analizan 7 aplicaciones disponibles.

(Al-Turjman y Malekloo, 2019), toman como referencia siete revisiones, del 2009 al 2018, analizando sensores, protocolos de comunicación, software de interfaz, seguridad y privacidad, nuevas aplicaciones y temas abiertos. Estos autores clasifican los sistemas de estacionamiento inteligente (SPS) en cuatro capas: sensores, red, middleware y aplicaciones. Estos sistemas entran en tres diferentes categorías: centralizado-asistido SPS, distribuido-asistido SPS y No-asistido SPS (NAPS). También nos ofrece un resumen y comparación de los principales tipos de sensores, así como factores de diseño en software, hardware e interoperabilidad. Al final realizan una distinción de las soluciones puestas en práctica como: implementaciones de Smart Parking Systems, nuevas aplicaciones en Smart Parking Systems y sistemas híbridos. La orientación de este trabajo es principalmente al esquema de sensores en estacionamientos y sus conexiones a otros sistemas.

Otros trabajos también comparan los esquemas de sensores utilizados en diferentes SPS (Smart Parking Systems) (Barriga et al, 2019), identificando esquemas relacionados con manejo de cámaras, ultrasonido, sensor celular, infrarrojos, radar y magnetómetros, entre otros. También hacen una división del software y los clasifican según: administración de información, predicción o E-Parking; siendo la administración de información utilizada con mayor frecuencia. En la capa de red identifican 5 categorías: protocolo IoT inalámbrico, WiFi, 3G/4G, Bluetooth, o alámbrico. Propone una tabla guía para los investigadores que buscan utilizar sensores en su sistema. En esta revisión no se tocaron los algoritmos guía, se enfocan en la interfaz de los sensores y el aprovechamiento de esta tecnología.

En (Fraiefr y Fernström, 2016) se enfocan principalmente en clarificar los métodos utilizados en 60 publicaciones, agrupándoles según en qué algoritmos utilizaron o red de sensores: Smart Parking Systems basados en agentes, SPS basados en lógica difusa, Sistemas basados en red inalámbrica de sensores, SPS basados en comunicación V2I (vehículo-infraestructura), SPS basados en GPS, SPS basados en visión por computadora, SPS basados en tecnología de radiofrecuencia y otros sistemas híbridos como IoT. Estos últimos comparados entre sí y su confiabilidad, método de comunicación, complejidad de circuitos y precisión de detección.

(Paidi et al, 2018) toman siete revisiones de literatura, del año 2000 al 2017, como referencia para analizar y comparar los tipos de sensores utilizados en lotes de estacionamiento, encontrando 13 diferentes tecnologías empleadas en esos escritos. Los sensores los describe como: sensor infrarrojo activo o pasivo, sensor ultrasónico, detectores de un ciclo inductivo, sistemas de estacionamiento guiado, identificación de radio frecuencia, magnetómetro y radar de microondas. Estos sensores son utilizados como herramientas en las tecnologías de estacionamientos inteligentes que catalogan como: GPS, *machine vision*, Vanet, sistema multiagentes, redes neuronales y lógica difusa; pero solo hacen una descripción de esta tecnología y cuales sensores se pueden combinar con ellas. Para finalizar describe el uso de las aplicaciones de Smart Parking disponibles en línea según el país y que tipo de sensores o tecnología utilizan.

En (Hassoune et al, 2016) los autores toman como referencia 14 sistemas de estacionamiento inteligente del 2008 al 2016, comparando en primera instancia sus ventajas y desventajas de manera individual y, posteriormente, dividiéndolos en 6 partes: recolección, despliegue, servicios urbanos, conexión, procesamiento e IHM (interface entre humano y sistema); no se mencionan métodos de guía utilizados junto a estos sensores.

Los autores de (Kayal y Perros, 2020) consideran protocolos utilizados para estacionamientos inteligentes pero que no se ha cuantificado su desempeño en trabajos anteriores. En su estudio presentan cuatro protocolos: CoAP (Constrained Application Protocol), MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), XMPP (eXtensible Messaging

and Presence Protocol) y MQTT over WebSocket. Poniendo cada uno a prueba en un experimento de simulación para recabar los datos de promedios en tiempo de respuesta con el servidor vs. utilización del servidor. Sólo se enfoca en la transferencia de datos sin tocar algún algoritmo específico.

En (Lin et al, 2017) se toman publicaciones del 2000-2016 enfocándose en el desarrollo y evolución de los estacionamientos inteligentes. Clasificaron la literatura referenciada por su funcionalidad y en tres principales macro-temas: recolección de información, despliegue del sistema y diseminación del servicio. Cada uno con diferentes subtemas propios. Ejecutan una recolección de información de todos los métodos propuestos, tomando en cuenta: fuente de datos, tipo de despliegue, almacenamiento, tipo de servicio, como determinan estacionamiento y capa de red. Continúan con los diferentes tipos de sensores y si presenta ciertas características: intrusivo, flexible, impacto ambiental, tamaño pequeño, privacidad, instalación, contacto, precisión, costo y detección múltiple. Posteriormente catalogan los trabajos reseñados según la forma en que diseminan la información así como su infraestructura y la interacción que tiene el vehículo con los sensores, la infraestructura del sistema y otros vehículos.

(Sarangi et al, 2019) toma los sistemas de estacionamiento y se clasifican en sistemas de información, sistemas basados en tránsito y sistemas automatizados. En (Al-Turjman), los sistemas información y guía de estacionamiento incluyen sistemas basados en tránsito, centralizados asistidos, oportunísticamente asistidos, no asistidos, sistemas de ocupación de estacionamiento, guías basados en agentes y estacionamientos automatizados.

En (Barriga et al, 2019), se encontraron sistemas de administración de información, de predicción de ocupación y de e-parking. Para (Fraiefr y Fernström, 2016), los sistemas e-parking se implementan basados en agentes, lógica difusa y, basados en redes inalámbricas de sensores, en la comunicación del vehículo a la infraestructura, en GPS; en visión por computadora; en RFID, y otros esquemas híbridos de IoT y M2M (máquina a máquina). Para (Paidi et al, 2018), la tecnología de smart parking, incluye: GPS, visión por computadora VANET, multi-agentes, redes neuronales y lógica difusa. (Hassoune et

al, 2016) distingue la tecnología IoT, el cloud computing, y el uso de aplicaciones web, smartphone o las incluidas en el vehículo.

Con (Kayal y Perros, 2017) sólo se compara la tecnología de protocolos relativos a 7 tipos sensores y dónde pueden ser utilizados.

Y (Lin et al, 2017) tipifican los trabajos de *smart parking* en categorías disciplinares, por esquemas de colección de información, despliegue del sistema y diseminación de servicios. En éste último se incluyen: competencia por el estacionamiento (por dinámica de precios y estrategias específicas), información de diseminación (basado en infraestructura y sin infraestructura), y comportamiento de estacionamiento (actividad vehicular y elección de estacionamiento).

Basados en los trabajos anteriores se puede observar que los estudios enfocados hacia los algoritmos de guía son reducidos y su atención insuficiente; la gran mayoría se enfoca en la parte del hardware (principalmente sensores), sus ventajas y limitaciones. Por ese motivo se realizó una revisión sistemática enfocada principalmente en la aplicación de sistemas para guía, sus métodos y técnicas utilizadas desde el 2016 al 2020.

Dado que ninguna de las RSL's que se encontraron abordan específicamente el estado de la cuestión de los métodos y técnicas implementados en los algoritmos de guía, se ejecutó una RSL (Anexo A), cuyos resultados se integran en las siguientes secciones.

2.2 Ruteo y técnicas de optimización

Al considerarse las preguntas de investigación ¿qué algoritmos utilizan para encontrar estacionamiento? Y ¿cómo definen la ruta para llegar a un espacio disponible? Se pueden catalogar las soluciones propuestas en: optimización heurística y metaheurística; en esta última se pueden encontrar técnicas basadas en población y basadas en trayectorias. El detalle de esta clasificación se describe en la Figura 6.

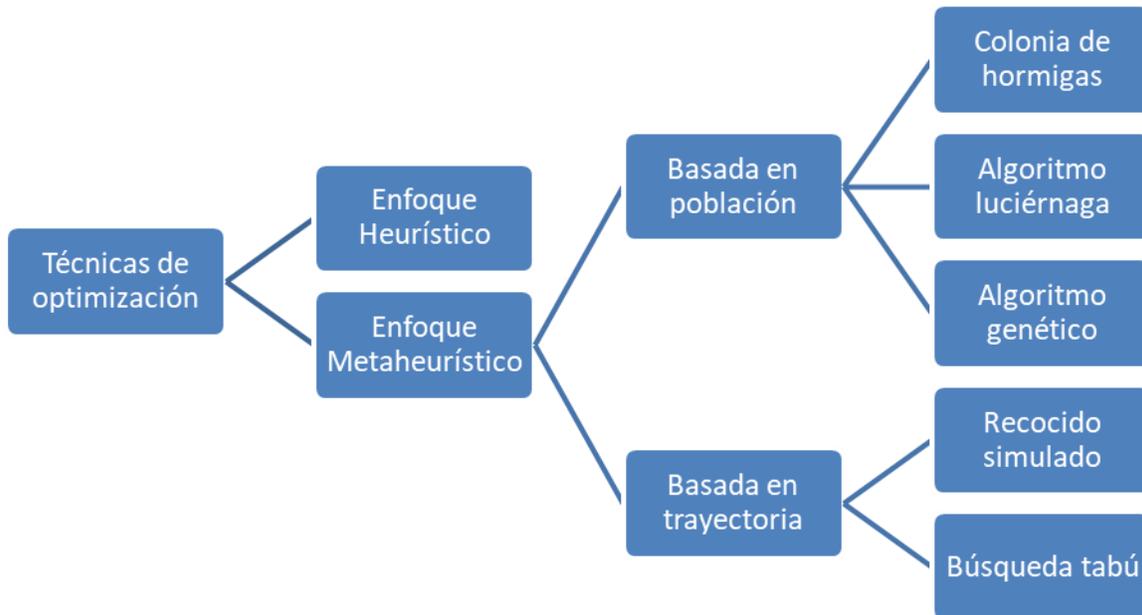


Figura 6. Clasificación de técnicas empleadas con mayor frecuencia.

2.2.1 Enfoque heurístico

Los métodos heurísticos resuelven un problema complejo de optimización mediante una aproximación intuitiva, en la que se utiliza la estructura del problema para obtener una solución de manera eficiente. El propósito de estos enfoques guiar el proceso de búsqueda en la dirección más provechosa, posiblemente sacrificando demandas de completitud, sugiriendo un camino a tomar cuando hay más de una opción disponible.

El algoritmo de Dijkstra optimizado encuentra el trayecto más corto entre los posibles caminos dentro de un grafo, (Mannini, Cipriani 2017) lo aplica en su propuesta utilizando información extraída de CFD (*floating car data*) para conocer la ubicación de un vehículo y ofrecer una ruta optima mediante un algoritmo para calcular el camino más corto. Su estudio se basó en la ciudad de Roma, utilizando la base de datos FCD local y tomando una muestra de 100,000 vehículos. Su estrategia ofrece al conductor un tiempo estimado para encontrar lugar disponible en la calle y se puede utilizar incluso como una herramienta sin conexión a internet.

Para (Tang, Song, Miller y Zhou, 2016) la cuestión principal en su estrategia es minimizar la estimación de costos por posibles caminos y el tiempo que toma cruzarlos, teniendo en cuenta diferentes factores de importancia para minimizar el tiempo de los vehículos al recorrer un trayecto se propuso un modelo propio para encontrar rutas de costo mínimo utilizando métodos gráficos y adoptando teorías geográfica-temporales para crear una red de caminos que, mide los enlaces en cuestión de tiempo. El modelo desarrollado ofrece una estimación de ruta orientada al tráfico. La solución óptima de algoritmos aplicables puede utilizarse en tareas para estimación en tiempo real o minería de datos fuera de línea.

Utilizando un análisis de Poisson no estacionario (Peng y Li, 2016) describe una estrategia que no depende del uso de sensores para conocer la cantidad de espacios disponibles en los estacionamientos, lo cual demanda actualización de la información en tiempo real, infraestructura y mantenimiento. En lugar de ello se propone utilizar una búsqueda basada en análisis de datos históricos y un modelo basado en procesos no estacionarios, tomando en consideración la información de diferentes estacionamientos, se puede ofrecer una opción con altas probabilidades de encontrar espacios disponibles al conductor.

2.2.2 Enfoque metaheurístico

Los enfoques de optimización metaheurísticos utilizan parámetros dados por el usuario para resolver un problema, basados en un modelo heurístico. Generalmente aplicados a problemas que no tienen un algoritmo específico para llegar a una solución satisfactoria o no es posible implementar un método de manera óptima.

Basados en población

La colonia de hormigas optimizada (ACO) es un algoritmo basado en poblaciones que explora diferentes rutas hasta localizar un camino óptimo, utilizado por (Wang, Shi y Zhang, 2020) en su propuesta para encontrar un nuevo método mejorando la información heurística para no caer en los mínimos locales; debido al gran número de espacios y vehículos que manejan, la topología en un estacionamiento cerrado y que los vehículos

no están limitados en los caminos a escoger este sistema de estacionamiento inteligente permite una mejora en la eficiencia para reducir el trayecto, la cual se incrementa cuando la cantidad de nodos crece a más de 1000, en comparación con otros métodos.

Entre los algoritmos genéticos encontramos a (Thomas y Kovoov, 2018) y (Aydin, M. Karakose y E. Karakose, 2017), que utilizan este algoritmo metaheurístico para localizar un espacio disponible, en un establecimiento privado o en las calles respectivamente. Los pasos generales para este tipo de algoritmo son: tomar una población inicial, seleccionar mejores candidatos, cruzarlos y mutar los resultados para generar una probable mejor alternativa; siguiendo un ciclo de los pasos anteriores hasta cumplir una condición de terminación.

Los sistemas multi-agentes fueron utilizados por (Okoso, Otaki y Nishi, 2019) y (Bischoff y Nagel, 2017). Estos sistemas pueden resolver problemas que resulten muy difíciles para un sistema monolítico o de un solo agente. Ambos autores aprovechan un sistema de simulación donde se trata a los vehículos como un agente, ya sea en un estacionamiento cerrado o las calles de la ciudad en Berlín, respectivamente.

En la solución de (Okoso et al, 2019) se emplean dos aproximaciones dentro de un estacionamiento confinado, utilizando un método competitivo y cooperativo. El primero garantiza soluciones óptimas en teoría, ambos tienen ventajas y desventajas, aunque de manera cooperativa se utilizan más recursos y tiempo de computación. (Bischoff y Nagel, 2017) utiliza agentes para estudiar el comportamiento del tráfico en la ciudad de Berlín, Alemania; considerando el comportamiento para buscar estacionamiento en las actividades diarias de los conductores para cuantificar la demanda de estacionamiento y el tiempo promedio utilizado durante la búsqueda.

Utilizando un algoritmo luciérnaga (*firefly algorithm*) junto con una red neuronal artificial (Singh, Dutta, Singhal y Choudhury, 2020) propone utilizarlos en secuencia para buscar una ruta y encontrar espacio disponible mediante el uso de sensores en un estacionamiento confinado.

Basados en trayectorias

En (Aydin, Karakose y Karakose, 2017) se implementa una aplicación móvil utilizando sensores, IoT y su sistema de SPS para buscar un lugar disponible en la calle, reduciendo las opciones dentro del trayecto del usuario para localizar un lugar disponible con la ruta más corta; logrando mejores resultados aplicando un método de ruleta para su selección.

(Thomas y Kovoov, 2018) propone una solución para estacionamientos confinados para aparcar los vehículos (con ayuda de un trolley) en donde los automovilistas no tienen interacción con el sistema, salvo al dejar o recoger su vehículo. Utiliza su algoritmo para optimizar la búsqueda de espacio por regiones, reduciendo el tiempo de espera y aumentando la utilización de espacios.

Algunos autores emplean más de un método para aprovechar sus ventajas o cubrir alguna limitación de los mismos. Por ejemplo (Idri, Oukarfi, Boulmakoul, Zeitouni y Masri, 2017) aplica el algoritmo del camino más corto conocido como Dijkstra junto con A* para reducir el número de rutas a explorar. A* es una solución a profundidad que puede encontrar el trayecto más corto pero consume mayor cantidad de tiempo; utilizando ambos a la vez en un grafo dirigido multimodal, con una sola salida y una llegada, logran un mejor desempeño que aplicando ambos por separado. Sus resultados muestran que el consumo de tiempo no se incrementa tanto como el algoritmo A*, se puede apreciar la diferencia al utilizar más nodos puesto que una mínima cantidad no representa un mejor desempeño.

Dada la naturaleza del problema abordado en este trabajo, que es NP-complejo, la exploración de los métodos heurísticos es una alternativa viable, pues se obtiene una solución eficiente para encontrar un trayecto en menor tiempo y necesitando menos recursos que los métodos metaheurísticos, los cuales no siempre obtienen una solución óptima en un tiempo reducido.

2.2.3 Comparativo de enfoques encontrados de búsqueda

Se presenta una comparación entre los diferentes enfoques (heurísticos y metaheurísticos), sus ventajas y desventajas, así como sus ejemplos más representativos de estas técnicas (Tabla 5).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de métodos heurísticos y metaheurísticos.

TIPO DE ENFOQUE	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	EJEMPLOS DE MÉTODOS
Técnicas Heurísticas	Resuelven problemas de optimización mediante una aproximación intuitiva y pueden aplicarse en una gran diversidad de problemas.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Son preferibles sobre búsquedas no informadas por realizar una búsqueda exhaustiva. ▪ Encuentran una solución válida en tiempos razonables. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Si encuentra una solución no se asegura que tenga las mejores propiedades ▪ Se puede caer en máximos o mínimos locales. 	El problema del viajero. Búsqueda en profundidad. Búsqueda en amplitud. Ascensión de colinas. Recocido simulado. Algoritmo A*
Enfoques Metaheurísticos	Resuelven problemas aplicando parámetros provenientes del entorno donde serán aplicados en procesos generales donde se tiene una técnica heurística definida.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se aplican a problemas donde no es posible implementar un método de manera óptima. ▪ Utilizados en problemas de optimización combinatoria. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No siempre se obtiene una solución óptima. ▪ Suelen ser menos eficientes que los heurísticos específicos. 	Colonia de hormigas optimizada (OAC). Algoritmo luciérnaga. Algoritmos genéticos. Algoritmos meméticos. Optimización estocástica.

En un escenario vial, como la ciudad de Xalapa, con un flujo de tránsito similar al de urbes mayores pero en un área reducida; el centro de la capital, donde se agrupa la mayoría de comercios y oficinas, exhibe un tráfico superior al de ciudades con la misma población; debido a la infraestructura con calles de un solo sentido y rutas limitadas tenemos un exceso de tráfico que, durante las horas pico, reducen las opciones que un automovilista puede tomar.

Para resolver el problema de encontrar una ruta viable a cualquier destino dentro del primer cuadro de la ciudad, los métodos heurísticos proporcionan técnicas de búsqueda eficientes para considerar varias alternativas y obtener buenos resultados en un tiempo razonable.

También proporciona una solución sencilla de implementar y procesar para asegurar una ruta viable lo más precisa posible a un conductor ante un escenario que cambia rápidamente como el tránsito vehicular con la expectativa de generar un método guía que asista al conductor en tiempo real. Por lo que la propuesta se enfocará en ese sentido.

2.3 Potencial propuesta

Como resultado de la revisión del estado del arte, tanto para detección de espacios como propuestas de ruta, y dado el escenario en el que el trabajo se desarrolla (el primer cuadro extendido de la ciudad), se propone una estrategia híbrida para aprovechar las ventajas de las técnicas disponibles, prescindiendo del uso de sensores y optando por una estrategia estadística utilizando registros generados por simulación de la vialidad. Por lo que la propuesta que se someterá a prueba, integra lo siguiente:

- Propuesta de ruta
 - Los estacionamientos viables cerca del destino se localizan por la ruta más corta (algoritmo Dijkstra) y el recorrido utiliza el origen y los estacionamientos cercanos para proponer una ruta.
 - Encontrar una ruta basada en búsqueda de profundidad en un grafo con pesos y dirección, donde los pesos refieren la longitud de cada arco y la dirección el sentido de las calles (las calles de doble sentido se interpretan como dos arcos paralelos).
 - Las trayectorias propuestas se evalúan con el método de factores ponderados, el cual toma en consideración el nivel de tráfico, cantidad de intersecciones y semáforos.
- Estimación del tráfico
 - Información estadística del flujo de tránsito (en metros por segundo) recabado en los últimos cinco minutos basada en promedios de los históricos generados.

CAPÍTULO 3. Método propuesto

3.1 Modelado de entorno urbano

El algoritmo guía a proponer, con base a un origen y destino establecido por un automovilista, será responsable de determinar la mejor propuesta de estacionamiento destino, con base a una serie de parámetros. Para esa identificación, se requiere información relativa al entorno bajo el cual opera el algoritmo, misma que es:

- La topografía de la ciudad que incluye las distancias.
- La configuración de estacionamientos públicos (de cobro).
- Datos estadísticos sobre el tráfico por calle.
- Ubicación de semáforos vehiculares y peatonales.

3.1.1 Representación de la ciudad

La **topografía de la ciudad**, es una representación gráfica de *calles, carriles, sentidos e intersecciones*. Este aspecto es resuelto por la adquisición del área muestra (primer cuadro extendido de la ciudad de Xalapa, Veracruz México), mismo que se transforma en un grafo ponderado dirigido.

En la implementación para su validación, esto es generado por *Open Street Maps* y transferido a la plataforma de simulación SUMO, donde los pesos son proporcionados por estas plataformas e incluyen la *longitud de cada tramo de calle*. Esto puede observarse en la Figura 7.

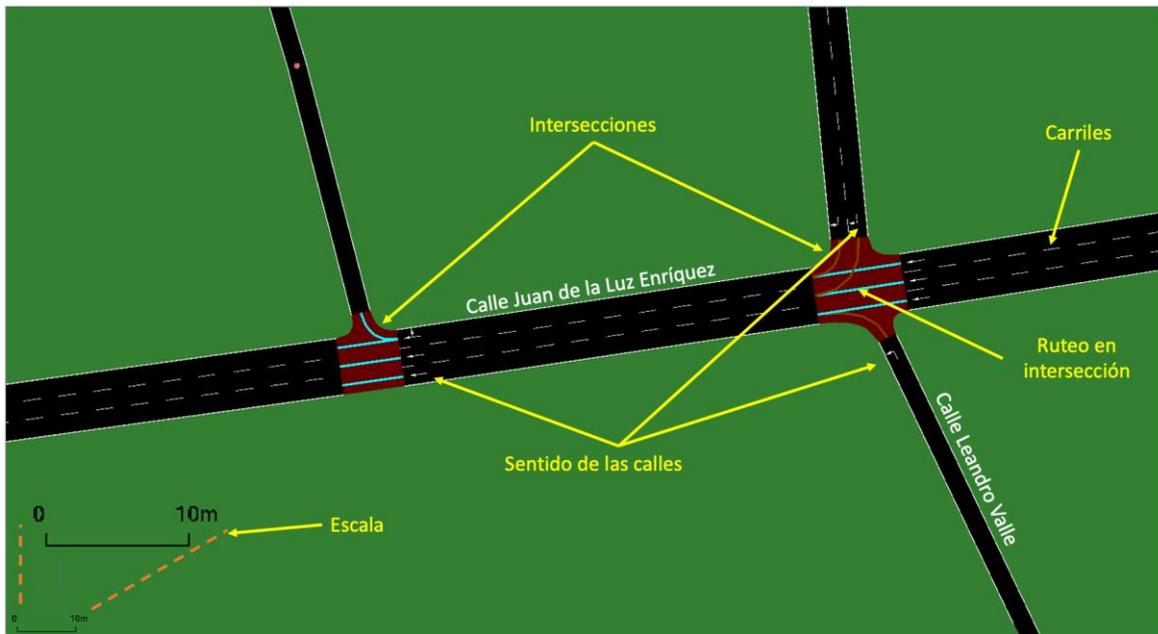


Figura 7. Representación SUMO de calles, carriles, sentidos, intersecciones y escala para longitud.

Debido a que la operación lógica del grafo de la ciudad en SUMO está basada en los arcos, esto es, las calles delimitadas por las intersecciones, y con la finalidad de permitir la implementación del algoritmo propuesto, se debió interpretar el grafo origen de *Open Street Maps* en una **matriz de adyacencia ponderada** basada *nodos*, que mantiene como peso la *longitud neta* de cada arco, conservando la información de los *sentidos* (Figura 8).

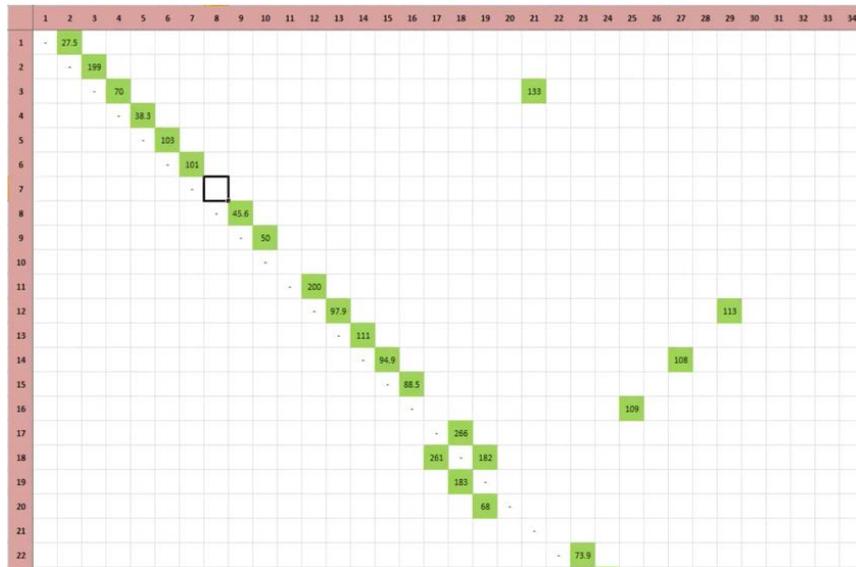


Figura 8. Matriz de adyacencia ponderada (extracto).

3.1.2 Configuración de espacios disponibles

Del trabajo de campo que consistió en el levantamiento de la información sobre los **estacionamientos públicos (de cobro) en la muestra**, se incluyeron en SUMO 34 locales indicando su *ubicación* (Figura 9) configurando el número de cajones de los que dispone cada uno (*capacidad*), cuya parametrización se observa en la Figura 10.



Figura 9. Configuración en SUMO de estacionamientos y sus capacidades.

```

<additional xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://gmo.dir.de/xsd/additional_file.xsd"
<parkingArea id="AOUFAR" lane="AlonsoOuido#1_0" startPos="5.00" endPos="15.00" roadsideCapacity="40"/>
<parkingArea id="AOUZAR" lane="AlonsoOuido#0_0" startPos="31.00" endPos="41.00" roadsideCapacity="30"/>
<parkingArea id="BUDCAB" lane="BenitoJuarez#1_0" startPos="5.00" endPos="12.60" roadsideCapacity="20"/>
<parkingArea id="BUJESR" lane="BenitoJuarez#0_0" startPos="25.00" endPos="35.00" roadsideCapacity="0"/>
<parkingArea id="BUJUUA1" lane="BenitoJuarez#0_0" startPos="66.60" endPos="73.87" roadsideCapacity="23"/>
<parkingArea id="BUJUUA2" lane="BenitoJuarez#4_0" startPos="50.00" endPos="60.00" roadsideCapacity="23"/>
<parkingArea id="DRLCHE" lane="DrLucio#4_0" startPos="30.00" endPos="40.00" length="5.6" roadsideCapacity="0"/>
<parkingArea id="DRLDRL" lane="DrLucio#4_0" startPos="45.00" endPos="55.00" roadsideCapacity="36"/>
<parkingArea id="DRLMOC" lane="DrLucio#2_0" startPos="84.66" endPos="94.66" roadsideCapacity="0"/>
<parkingArea id="FCJMID" lane="FUClavijero#0_0" startPos="44.00" endPos="55.00" roadsideCapacity="30"/>
<parkingArea id="FERRESQ" lane="Ferrin#1_0" startPos="30.00" endPos="45.00" roadsideCapacity="30"/>
<parkingArea id="FERFER" lane="Ferrin#1_0" startPos="10.00" endPos="25.00" roadsideCapacity="40"/>
<parkingArea id="FUCCLA" lane="FUClavijero#2_0" startPos="137.00" endPos="180.00" roadsideCapacity="26"/>
<parkingArea id="FUCPFE" lane="FUClavijero#2_0" startPos="148.00" endPos="158.00" roadsideCapacity="66"/>
<parkingArea id="FUCSCO" lane="FUClavijero#1_0" startPos="70.00" endPos="80.00" roadsideCapacity="25"/>
<parkingArea id="GZACAS" lane="GZamora#1_0" startPos="25.00" endPos="30.00" roadsideCapacity="20"/>
<parkingArea id="GZACyR" lane="GZamora#1_0" startPos="70.00" endPos="80.00" roadsideCapacity="66"/>
<parkingArea id="GZAZAM" lane="GZamora#0_0" startPos="80.00" endPos="90.00" roadsideCapacity="23"/>
<parkingArea id="IALALL" lane="Allende#1_0" startPos="111.00" endPos="121.00" roadsideCapacity="12"/>
<parkingArea id="IASRSL" lane="Zaragoza#1_0" startPos="70.00" endPos="80.00" roadsideCapacity="66"/>
<parkingArea id="JAZAZD" lane="JoseAzuet#0_0" startPos="15.00" endPos="25.00" roadsideCapacity="11"/>
<parkingArea id="JOARPL" lane="JesusGarcia_0" startPos="80.00" endPos="90.00" roadsideCapacity="20"/>
<parkingArea id="JMMATA" lane="JMMata#0_0" startPos="15.00" endPos="25.00" roadsideCapacity="14"/>
<parkingArea id="MBAPLA" lane="MiguelBarragan#0_0" startPos="65.00" endPos="75.00" roadsideCapacity="20"/>
<parkingArea id="MFADIA" lane="Altamirano#2_0" startPos="44.00" endPos="55.00" roadsideCapacity="12"/>
<parkingArea id="MFALER" lane="Altamirano#3_0" startPos="15.00" endPos="25.00" roadsideCapacity="30"/>
<parkingArea id="MPASAN" lane="Altamirano#1_0" startPos="35.00" endPos="45.00" roadsideCapacity="20"/>
<parkingArea id="MPASBE" lane="Altamirano#3_0" startPos="40.00" endPos="50.00" roadsideCapacity="37"/>
<parkingArea id="MRBDFM" lane="NicolasBravo#0_0" startPos="95.00" endPos="105.00" roadsideCapacity="60"/>
<parkingArea id="PVEENR" lane="Primoverdad#1_0" startPos="3.00" endPos="13.00" roadsideCapacity="40"/>
<parkingArea id="REVAGA" lane="Revolucion#2_0" startPos="20.00" endPos="30.00" roadsideCapacity="38"/>
<parkingArea id="REVCAT" lane="Revolucion#0_0" startPos="75.00" endPos="85.00" roadsideCapacity="30"/>
<parkingArea id="REVPAR" lane="Revolucion#2_0" startPos="90.00" endPos="100.00" roadsideCapacity="35"/>
<parkingArea id="UGAURS" lane="UrsuloGalvan#1_0" startPos="50.00" endPos="60.00" roadsideCapacity="66"/>
</additional>

```

Figura 10. Parametrización de cada estacionamiento de la muestra.

3.1.3 Consideraciones de tráfico vehicular

Ante la imposibilidad de realizar un despliegue de campo para muestrear datos de tráfico reales, por la restricción debido a la contingencia sanitaria prevaleciente por COVID-19, para estimar un flujo de tráfico acorde al nivel de servicio posible por la configuración de la muestra, se realizaron simulaciones de tránsito para conseguir información de carga en las vialidades. Se ejecutaron dos corridas por 10 minutos, con 500 vehículos para los 12 arcos de mayor circulación (Figura 11), esto permitió recabar los datos de velocidad promedio (Tabla 6).

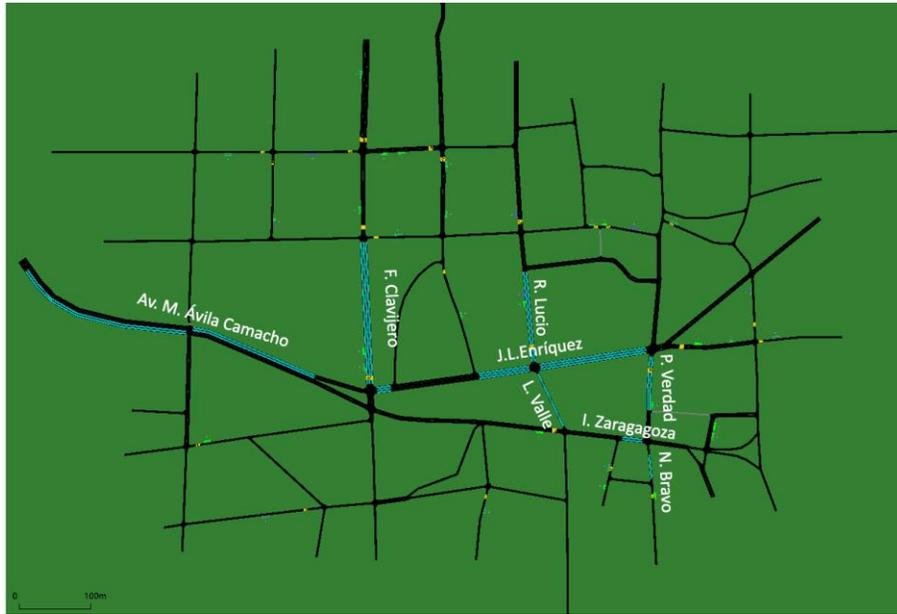


Figura 11. Calles de mayor carga de vehicular identificadas con SUMO.

Tabla 6. Velocidad promedio obtenida por simulación para determinar niveles de tráfico por tramo (arco).

Calles	Velocidad promedio (m/s)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AvCamacho#2	0	10.59	11.05	9.5	9.96	10.5	11.21	10.3	10.52	0
AvCamacho#6	0	10.37	0	0	11.38	11.47	12.29	0	0	0
DrLucio#4	3.99	8.14	3.83	2.55	6.26	3.19	3.34	9.26	5.35	0.79
Enriquez#1	0.47	0.55	0.19	2.93	0.83	1.17	2.44	1.24	8.2	4.64
Enriquez#2	5.74	5.41	5.16	5.96	6.88	8.29	2.09	6.05	8.02	2.88
Enriquez#3	0	10.54	11.49	12.09	10.76	12.29	9.97	11.11	12.01	11.79
Enriquez#5	0	3.87	0.76	4.97	3.16	1.72	5.5	1.3	0.33	4.94
FJClavijero#2	10.85	18.97	13.13	8.43	17.19	16.39	11.05	15.37	8.19	0
LeandroValle	6.13	4.35	0.77	2.3	1.44	0.43	2.92	2.35	2.02	3.97
NicolasBravo#1	0	2.57	1.8	4.63	1.69	10.47	8.9	6.08	0	0
Primoverdad#1	9.87	6.93	7.52	3.07	3.83	3.88	3.29	10.71	8.06	2.19
Zaragoza#3	0	11.97	11.92	10.26	11.81	15.03	9.49	3.57	3.63	6.5

3.1.4 Elementos de control de tráfico (semáforos)

Para terminar de configurar la información requerida del entorno urbano para la prueba del algoritmo propuesto, se tomó del levantamiento de campo la identificación de los semáforos existentes a la fecha (tanto peatonales como vehiculares), y se incorporaron a SUMO (Figura 12).



Figura 12. Configuración SUMO de semáforos.

3.2 Método propuesto

3.2.1 Procesos principales

El algoritmo propuesto integra tres módulos: 1) selección de estacionamientos próximos al destino (ReParking); 2) generación de rutas (RuteoITSX), y 3) selección de la mejor ruta (SugerenciaITSX), cuyas entradas/salidas se muestran en el diagrama de bloques de la Figura 13.

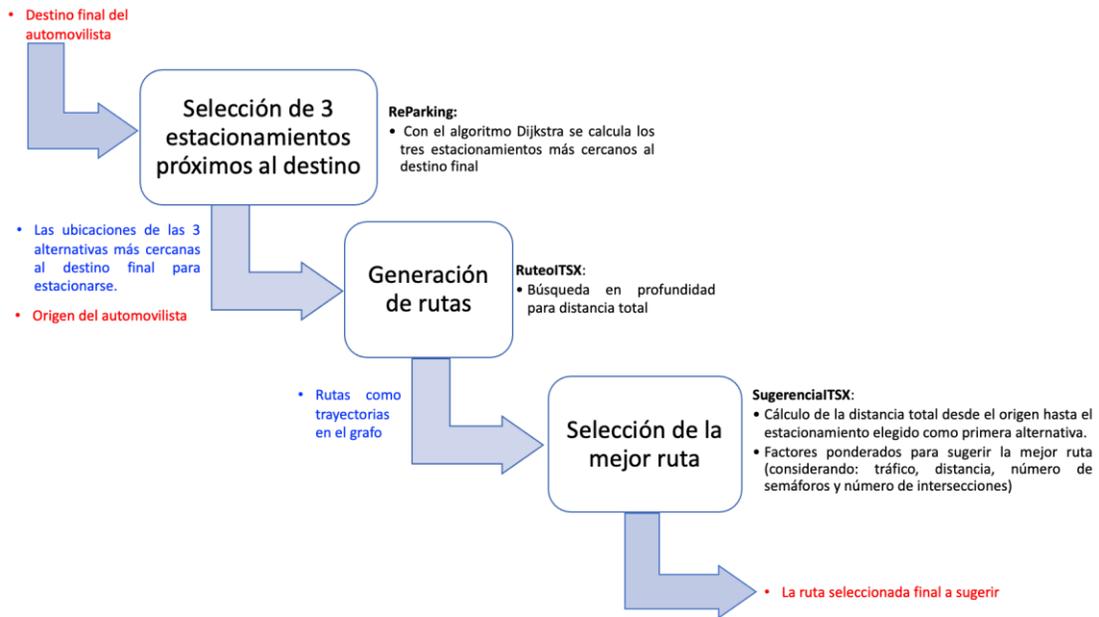


Figura 13. Flujo general del algoritmo propuesto.

En la Figura 13 se indican con rojo, las entradas y salidas generales del algoritmo (origen y destino del automovilista, y, ruta final seleccionada, respectivamente). Las salidas intermedias se presentan en color azul y se integran como entrada de cada siguiente proceso.

En primera instancia se tiene como entrada la información del vehículo, esto es, su identificador y el punto de origen (ubicación actual de salida del vehículo) y destino (lugar real al que se dirige el automovilista), estas ubicaciones referidas a las coordenadas dentro el mapeo (para efectos de validación acotado a la muestra).

3.2.2 Selección de tres estacionamientos próximos al destino por Dijkstra

El destino final real del automovilista se considera como entrada al primer módulo (**ReParking**, escrito Phyton), donde es tomado como punto de referencia para ubicar los tres estacionamientos más cercanos a dicho destino final. Esto se realiza utilizando el algoritmo Dijkstra (Figura 14), que calcula por cada estacionamiento la distancia más corta desde el destino real del automovilista. Esto permite conocer la distancia residual que recorrería el automovilista a pie, desde donde potencialmente puede dejar aparcado el vehículo. Con esta base se seleccionan los tres estacionamientos de menor recorrido a pie.

```
#mide distancias del destino a 95 nodos
def calculate_distances(graphD, starting_vertex):
    distances = {vertex: float(8888) for vertex in graphD}
    distances[starting_vertex] = 0

    pq = [(0, starting_vertex)]
    while len(pq) > 0:
        current_distance, current_vertex = heapq.heappop(pq)

        # Nodos agregados en multiple ocasiones. Solo procesa un vertex la primea vez que se remueve
        if current_distance > distances[current_vertex]:
            continue

        for neighbor, weight in graphD[current_vertex].items():
            distance = current_distance + weight

            # Solo considera este camino si es mejor al ya encontrado
            if distance < distances[neighbor]:
                distances[neighbor] = distance
                heapq.heappush(pq, (distance, neighbor))

    return distances
```

Figura 14. ReParking codificado en Phyton con Dijkstra.

3.2.3 Trayectos por búsqueda en profundidad

Posteriormente, se calculan las rutas completas desde el origen del que parte el vehículo, hasta cada uno de los tres estacionamientos seleccionados, aplicando un algoritmo de búsqueda en profundidad (DFS *deep first search*), para encontrar los posibles caminos a seguir en cada una de ellas y elegir la ruta más corta en cada caso, determinándose al mismo tiempo la distancia total a recorrer. Esto constituye el segundo módulo (**RuteoITSX**, que integra la propuesta original), que al final genera como salida la ruta y la distancia de cada una de las tres soluciones. Eso fue implementado en Python (Figura 15).

```
99
100  def dfs_paths(graph, start, goal, path=None):
101  if path is None:
102  path = [start]
103  if start == goal:
104  yield path
105  print (path)
106  for next in graph[start] - set(path):
107  yield from dfs_paths(graph, next, goal, path + [next])
108
109  list(dfs_paths(graph, 'n18', 'n22'))
110  #generates multiple solutions
```

Figura 15. Código en Python de búsqueda en profundidad RutasITSX (extracto).

3.2.4 Selección de la mejor ruta por factores ponderados

Para elegir la mejor ruta, se implementa **SugerenciaITSX** (Tabla 7), donde se efectúa un proceso de ponderación que toma en cuenta la distancia de la trayectoria entre el origen y cada uno los tres estacionamientos calculada por **RuteoITSX**, así como, para cada caso, la afluencia de tráfico relacionada a los tramos que deberían recorrerse, la cantidad de intersecciones que la ruta atraviesa y el total de semáforos dentro de la trayectoria calculada. Las variables discretizadas y las ponderaciones propuestas, se identifican a detalle en la Tabla 7.

Tabla 7. Variables discretizadas.

Nombre	Descripción	Tipo-rango	Discretización	Ponderación/Pesos
--------	-------------	------------	----------------	-------------------

Distancia	Distancia entre el origen del vehículo y un estacionamiento	Tipo: Continua Rango: Min-70 m Max-1,860 m	Corta - 70 a 517 m Mediana - 518 a 964 m Larga - 965 a 1,411 m Muy larga - 1,412 a 1,860 m	Ponderación: 40% Pesos: Corta - 2.5 Mediana - 5 Larga - 7.5 Muy larga - 10
Tráfico	Fluidez de circulación por tramo, en este caso representada por la velocidad promedio a la que es posible circular.	Tipo: Continua Rango: Min- 0.19 m/s Max- 18.97 m/s	Libre - 15.22 a 18.97 m Poco transitada - 11.47 a 15.21 m/s Transitada - 7.71 a 11.46 m/s Muy transitada - 3.96 a 7.7 m/s Detenido - 0.19 a 3.95 m/s	Ponderación: 30% Pesos: Libre - 2 Poco transitada - 4 Transitada - 6 Muy transitada - 8 Detenido - 10
Intersecciones	Punto de la vialidad donde se cruzan dos o más caminos y permite al usuario intercambio entre los mismos.	Tipo: Discreto Rango: Ninguno	Muy Pocas - menos de 6 Pocas - entre 6 y 10 Número regular - entre 11 y 15 Muchas - entre 16 y 20 Número máximo – más de 20	Ponderación: 20% Pesos: Muy pocas - 2 Pocas - 4 Regular - 6 Alto - 8 Muy alto - 10
Semáforos	Dispositivo de señalización luminosa que regula el tráfico en las vías públicas.	Tipo: Discreto Rango: Ninguno	Sin semáforos – 0 Pocos semáforos – 1 a 2 semáforos Más semáforos – 3 a 4 semáforos Muchos semáforos – 5 a 6 semáforos	Ponderación: 10% Pesos: Sin - 2.5 Pocos - 5 Varios - 7.5 Muchos - 10

3.2.4.1 Variables y ponderaciones

Las variables seleccionadas se obtuvieron basándose en una encuesta al público en general, con una muestra de 731 automovilistas en la ciudad de Xalapa; la cual indica las cuestiones principales al momento de buscar un lugar de estacionamiento en grado de importancia, entre las más relevantes encontramos la proximidad a su destino y la facilidad de entrada y salida (Figuras 16 y 17).

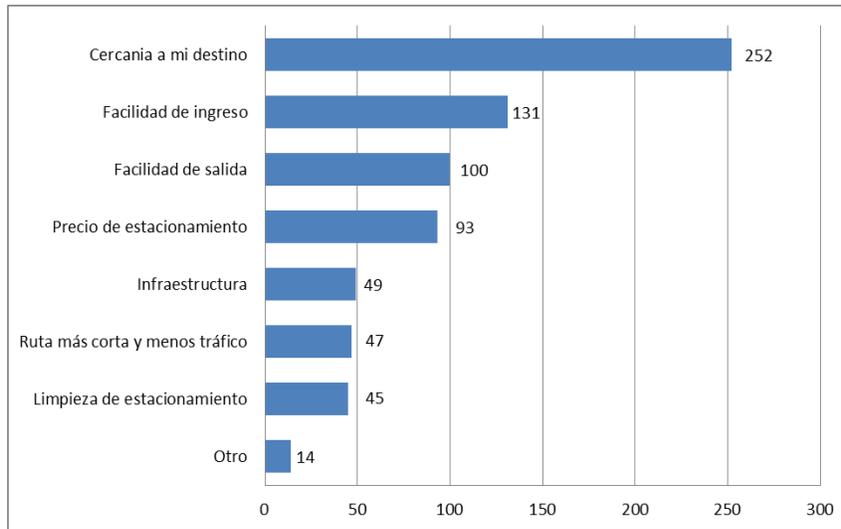


Figura 16. Resultados de encuesta a automovilistas (estudio de campo).

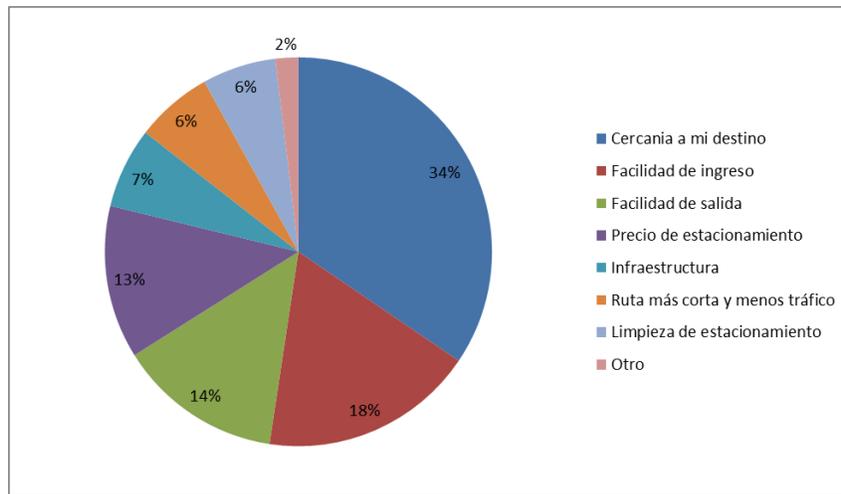


Figura 17. Representación porcentual (estudio de campo).

Muchos de estos criterios son propios de los establecimientos, por lo que el algoritmo de búsqueda se enfoca principalmente en la cercanía al destino, ruta más corta y menor cantidad de tráfico. Las intersecciones y semáforos que deben cruzarse durante el recorrido forman parte de la distancia total en la ruta.

El porcentaje de pesos para la ponderación se determina por las opiniones de los automovilistas, ya que la cercanía del estacionamiento es más importante que la cantidad de tráfico, éste último se evalúa con una ponderación de 30% mientras

que la distancia obtiene un 40%. La cantidad de intersecciones a cruzar (20%) viene en tercer puesto que, en ocasiones, la ruta más corta puede tener más vueltas que las cuadras largas con menos cruces. Y con solo un 10% la cantidad de semáforos, ya que en el primer cuadro de la ciudad quedan tan pocos que puede haber recorridos que no atraviesan ninguno, pero aun contribuyen a la formación de tráfico vehicular y embotellamientos.

Hay que señalar que estos pesos son considerados por su relevancia y teniendo en cuenta la mayoría de las opiniones del público objetivo; en un trabajo futuro estos porcentajes pueden ajustarse para cada individuo y, en consecuencia, obtener un trayecto diferente que se adapte a sus preferencias. Ya que se pretende comprobar la efectividad del método propuesto las variables deben permanecer iguales para cada escenario.

Para implementar el método de factores ponderados y encontrar la solución más viable debemos representar las alternativas por un análisis cuantitativo, otorgándole a cada factor un valor discreto entre 1-10 en escala de importancia, el cual se multiplica por los pesos asignados a cada criterio. Se tomaron valores de ejemplo, recabados en simulaciones previas, para determinar un máximo y mínimo de cada variable.

La distancia total recorrida se considera desde la más corta (70 m) hasta la más larga (1860m) y dividiendo la diferencia en 4 intervalos de 447 metros.

El tránsito vehicular, medido en metros por segundo, va desde 0.19 m/s hasta 18.97 m/s con 5 intervalos de 3.76 m/s para representar diferentes grados de tráfico, desde libre con un valor de 2 hasta detenido con un valor 10.

Tomando en cuenta la trayectoria más larga en una de las simulaciones como ejemplo, se contaron 25 intersecciones cruzando dicho camino, mientras que la ruta más corta solo atravesaba 5. Consiguiendo 5 intervalos para ponderarse como 2, 4, 6, 8, 10.

Por último, se tienen 4 intervalos de semáforos, en caso de obtener una ruta sin semáforos se pondera como 2.5, de 1-2 semáforos como 5, 3-4 como 7.5 y 10 en caso de cruzar 5 ó 6 semáforos.

3.2.4.2 Método propuesto

El algoritmo de **RuteoITSX** y **SugerencialITSX** están implementados en lenguaje Python, ya que es compatible con la plataforma SUMO y permite ejecutar herramientas de simulación precargadas en la librería de dicha plataforma. Su estructura se describe en la Figura 18.

```
Leer vehículo: ID, origen, destino
Correr reparking argumento(destino)
Almacenamos la ubicación de origen, est1, est2, est3 en el grafo
    origen <- nO
    est1 <- nX
    est2 <- nY
    est3 <- nZ
    caminoX <- DFS (nO, nX)
    caminoY <- DFS (nO, nY)
    caminoZ <- DFS (nO, nZ)

    //camino incluye cada identificador de arco durante la trayectoria

Ponderación (caminoX, caminoY, caminoZ)
    Inters <- sumatoria total de nodos
    Distancia <- sumatoria de arcos
    Semaforo <- sumatoria de semaforos
    Trafico <- 2.5

    SI camino[i]=trafico[i] ENTONCES
        Trafico<- trafico/# camino
    SI caminoX<=caminoY ENTONCES
        Si caminoX<=caminoZ ENTONCES
            Ruta<-caminoX
            SINO Ruta<-caminoZ
        SINO SI caminoY<=caminoZ ENTONCES
            Ruta<-caminoY
            SINO Ruta<-caminoZ

Devolvemos Ruta en arcos
Guardamos nueva Ruta en vehiculoID/

FIN
```

Figura 18. Pseudocódigo de SugerencialITSX.

CAPÍTULO 4. Evaluación por simulación

4.1 Condiciones de la simulación

Al realizar la experimentación, se tomaron en cuenta algunas consideraciones en su ejecución, mismas que son las siguientes:

- En la ejecución, un número de vehículos que buscan estacionamiento (con o sin el algoritmo propuesto), salen del área acotada que se está simulando. Por lo que se considera que se han estacionado pero fuera de dicha área, sin embargo, se cuenta con la información acumulada hasta que se salen de dicha área.
- De los automóviles errantes, no se contabiliza información alguna. Este parque vehicular sólo genera tráfico.
- En pruebas preliminares, se observó que dado el acotamiento del área, una muestra significativa sobre el parque vehicular completo de la ciudad, es inviable, dado que saturan el sistema deteniendo totalmente el tráfico. Esto se explica, porque en ningún momento, en realidad confluyen en un área tan pequeña, todos vehículos existentes. Por lo que se acotó la muestra de vehículos, tomándose 200 vehículos para la confluencia en la muestra acotada y 800 de tráfico.
- Otro aspecto que en la prueba preliminares de la simulación, se observó, fue el hecho de que el lanzamiento casi simultáneo de los automóviles generaba también saturación, de tal forma que no podía observarse el efecto del algoritmo propuesto. Por lo que se ajustaron los tiempos de entrada de los vehículos a 1 automóvil/segundo, para automóviles y para los vehículos en búsqueda de estacionamiento, por lo que entran al sistema simulado dos automóviles por segundo.
- Los vehículo se distinguieron por color, teniendo la siguiente codificación:
 - Rojo.- Automóvil buscando estacionamiento sin el algoritmo propuesto.

- Azul.- Automóvil buscando estacionamiento con el algoritmo propuesto.
- Amarillo.- Automóvil errante, que sólo genera tráfico.

4.2 Resultados

El resultado de la simulación se obtiene en un archivo bajo formato XML llamado *TripInfo*, que contiene la información en bruto de todos los vehículos (Figura 19).

```

<!-- generated on 02/01/21 22:50:19 by Eclipse SUMO GUI Version 1.7.0
-->
<tripinfo xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns="http://sumo.dlr.de/xsd/tripinfo_file.xsd">
  <tripinfo id="27" depart="27.00" departLane="JMata#0_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="38.00" arrivalLane="JMata#0_0" arrivalPos="92.10" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="846.305722" CO2_abs="40651.176354" HC_abs="4.805432" PMx_abs="0.743738" NOx_abs="16.941168" fuel_abs="17.474336" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="39" depart="39.00" departLane="BenitoJuarez#0_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="47.00" arrivalLane="BenitoJuarez#0_0" arrivalPos="71.00" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="1028.798068" CO2_abs="51344.639715" HC_abs="5.909340" PMx_abs="1.050020" NOx_abs="22.113449" fuel_abs="22.070830" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="8" depart="11.00" departLane="AvCamacho#7_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="3.00" arrival="50.00" arrivalLane="JHerrera#1_0" arrivalPos="55.00" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="1714.428675" CO2_abs="100907.039558" HC_abs="10.142482" PMx_abs="1.637822" NOx_abs="40.597897" fuel_abs="43.375952" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="7" depart="7.00" departLane="JMata#0_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="84.00" arrivalLane="IgnacioAldama#0_0" arrivalPos="125.70" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="4249.967322" CO2_abs="245500.118079" HC_abs="25.143938" PMx_abs="4.552725" NOx_abs="102.335402" fuel_abs="105.530017" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="51" depart="51.00" departLane="JesusGarcia_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="87.00" arrivalLane="IgnacioAldama#0_0" arrivalPos="125.70" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="2126.756923" CO2_abs="136315.908810" HC_abs="12.873559" PMx_abs="2.524903" NOx_abs="56.473758" fuel_abs="58.596220" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="C3" depart="35.00" departLane="Rojas_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="3.00" arrival="92.00" arrivalLane="Revolucion#1_1" arrivalPos="289.80" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="2597.815448" CO2_abs="177013.726739" HC_abs="15.900952" PMx_abs="3.105646" NOx_abs="71.740726" fuel_abs="76.090589" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="32" depart="32.00" departLane="Rojas_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="94.00" arrivalLane="Revolucion#3_0" arrivalPos="289.80" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="2332.999859" CO2_abs="159362.117957" HC_abs="14.332453" PMx_abs="2.587417" NOx_abs="63.555242" fuel_abs="68.503219" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="79" depart="79.00" departLane="AvCamacho#7_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="99.00" arrivalLane="AvCamacho#7_0" arrivalPos="181.70" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="906.932886" CO2_abs="49724.921043" HC_abs="5.284173" PMx_abs="0.836402" NOx_abs="20.218555" fuel_abs="21.374786" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="49" depart="49.00" departLane="Zaragoza#8_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="102.00" arrivalLane="SebastianCam#1_0" arrivalPos="258.00" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="3113.736426" CO2_abs="206820.766165" HC_abs="19.067182" PMx_abs="3.932292" NOx_abs="86.102445" fuel_abs="88.902938" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="33" depart="33.00" departLane="AvCamacho#7_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="103.00" arrivalLane="368704982_0" arrivalPos="70.60" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="3076.151230" CO2_abs="182827.740157" HC_abs="18.306292" PMx_abs="3.301277" NOx_abs="75.610992" fuel_abs="78.589901" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="15" depart="21.00" departLane="Roabarrena#2_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="6.00" arrival="105.00" arrivalLane="Revolucion#0_0" arrivalPos="153.00" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="4886.493938" CO2_abs="234461.485497" HC_abs="27.792795" PMx_abs="4.549785" NOx_abs="99.220234" fuel_abs="100.785361" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="C49" depart="52.00" departLane="Zaragoza#8_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="3.00" arrival="106.00" arrivalLane="SebastianCam#1_0" arrivalPos="258.00" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="2983.225706" CO2_abs="206551.358438" HC_abs="18.392073" PMx_abs="3.750261" NOx_abs="84.558831" fuel_abs="88.787315" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="35" depart="35.00" departLane="AvCamacho#6_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="0.00" arrival="107.00" arrivalLane="Zaragoza#1_0" arrivalPos="104.10" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="2964.057666" CO2_abs="203085.459039" HC_abs="18.281623" PMx_abs="3.593252" NOx_abs="82.863900" fuel_abs="87.297629" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
  <tripinfo id="C51" depart="57.00" departLane="JesusGarcia_0" departPos="5.10" departSpeed="0.00" departDelay="6.00" arrival="111.00" arrivalLane="IgnacioAldama#1_0" arrivalPos="21.00" arrivalDelay="0.00"
    <emissions CO_abs="2401.770803" CO2_abs="160861.653746" HC_abs="14.717355" PMx_abs="2.857333" NOx_abs="65.718522" fuel_abs="69.147473" electricity_abs="0"/>
  </tripinfo>
</tripinfo>

```

Figura 19. Información obtenida en *TripInfo*.

Este archivo es vaciado en una forma de hoja cálculo, teniéndose al momento tres experimentos completos (Anexo B). Para evaluar los resultados, se consideran los siguientes parámetros divididos en dos grupos, los automóviles que logran estacionarse y los que salen del área de muestra, siendo los siguientes:

- Total de automóviles, en unidades.
- Longitud de ruta (más corta, más larga y promedio), en metros.
- Tiempo de ruta (más pequeño, más grande y promedio), en segundos.
- Emisiones (CO, CO₂, HC, PMx y NOx), en kilogramos.
- Consumo de gasolina, en litros.

Los resultados finales, se aprecian en la Tabla 8

Tabla 8. Resultados obtenidos de la simulación.

Experimento	TRATAMIENTOS					
	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4	Tratamiento 5	Tratamiento 6
Cantidad de vehículos que buscan estacionamiento por el método del más cercano a su destino	200	160	120	80	40	190
Cantidad de vehículos que buscan estacionamiento por el método propuesto	0	40	80	120	160	200
% de adopción del método propuesto	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Automóviles errantes	800	800	800	800	800	800
RESULTADOS	PORCENTAJE DE VEHÍCULOS UTILIZANDO EL MÉTODO PROPUESTO					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Automóviles que Sí lograron estacionarse	101	114	124	141	148	160
Automóviles que NO lograron estacionarse	99	86	76	59	52	40
Pomedio de distancia de recorrido (m)	988	925	921	886	878	881
Promedio de tiempo de recorrido (s)	220	195	193	173	172	171
CO (kg) Acumulado ESTACIONADOS	1.745	1.677	1.863	1.817	1.871	2.052
CO (kg) Acumulado NO ESTACIONADOS	1.439	1.227	1.156	0.856	0.778	0.613
CO (kg) Acumulado TODOS	3.184	2.904	3.019	2.673	2.649	2.665
CO (kg) Promedio por vehículo estacionado	0.0173	0.0147	0.0150	0.0129	0.0126	0.0128
CO ₂ (kg) Acumulado ESTACIONADOS	51.208	51.614	56.512	58.331	59.963	65.827
CO ₂ (kg) Acumulado NO ESTACIONADOS	46.289	40.327	36.861	28.292	25.7	19.744
CO ₂ (kg) Acumulado TODOS	97.497	91.941	93.373	86.623	85.663	85.571
CO ₂ (kg) Promedio por vehículo estacionado	0.51	0.45	0.46	0.41	0.41	0.41
Gasolina (l)	22.010	22.187	24.293	25.075	25.777	28.297
Gasolina (l) Promedio por vehículo estacionado	0.218	0.195	0.196	0.178	0.174	0.177
HC (kg) Total acumulado	0.009	0.009	0.01	0.01	0.01	0.011
PMx (kg) Total acumulado	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
NOx (kg) Total acumulado	0.022	0.022	0.024	0.025	0.026	0.028
PMx (kg) Promedio por vehículo estacionado	0.000099	0.000088	0.000081	0.000071	0.000068	0.000063
HC (kg) Promedio por vehículo estacionado	0.0000891	0.0000789	0.0000806	0.0000709	0.0000676	0.0000688
NOx (kg) Promedio por vehículo estacionado	0.0002178	0.0001930	0.0001935	0.0001773	0.0001757	0.0001750

4.3 Discusión de resultados

Al finalizar los experimentos podemos apreciar que en la medida en que más vehículos ocupan el método propuesto, aumenta la cantidad de vehículos que logran exitosamente estacionarse, pasando de un 50% a un 80% los vehículos estacionados cuando todos aplican el método propuesto, esto es, un incremento del 30% en la tasa de éxito. Los vehículos que se estacionan no salen del área muestra, ya que son redirigidos a un estacionamiento cercano al destino final buscando una ruta viable. En la Figura 20, se muestra el incremento observado en la proporción de autos que logran estacionarse.

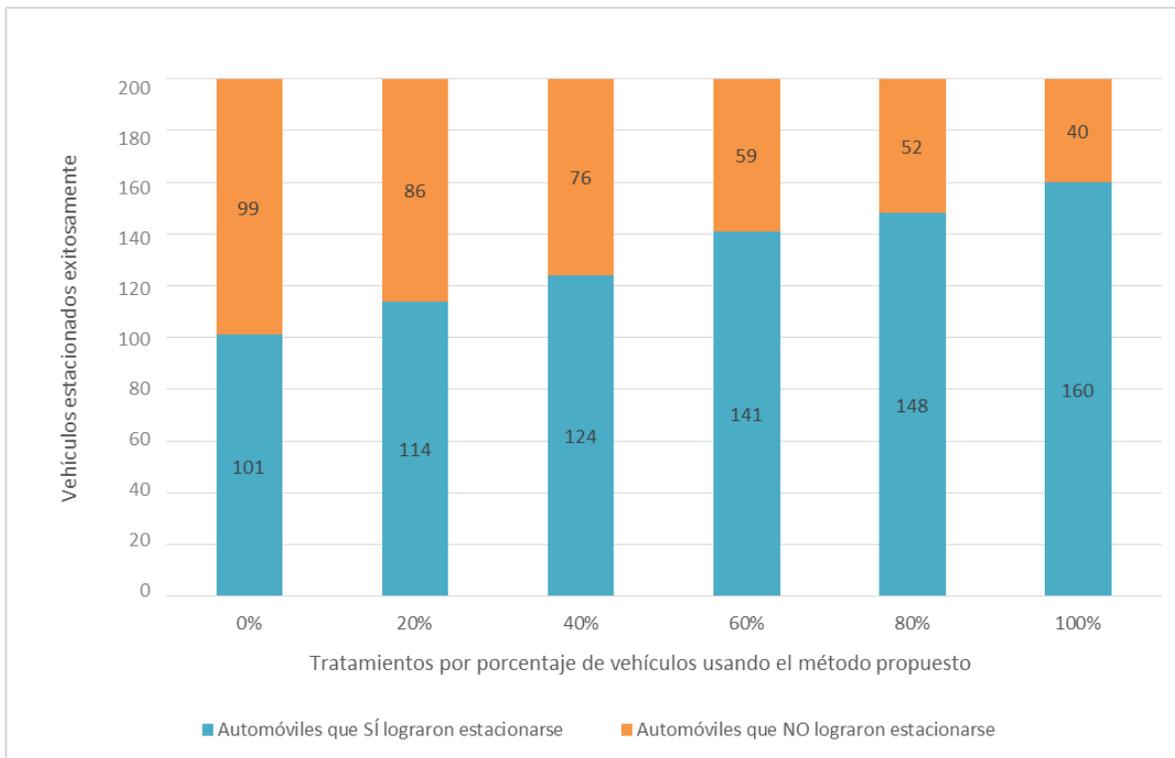


Figura 20. Proporción de vehículos estacionados exitosamente con diferentes porcentajes de vehículos utilizando el método propuesto.

La Figura 21 presenta el efecto de la aplicación del método propuesto sobre el promedio de la distancia que recorren los vehículos que logran estacionarse exitosamente. Conforme se incrementa el número de vehículos que utilizan el método propuesto, hasta llegar a que todos lo apliquen, se disminuye un 10.8% la distancia promedio de recorrido que realizan los automóviles para estacionarse. Se observa que los beneficios obtenidos en reducción de trayecto, son marginales después del 60% de adopción del método propuesto.

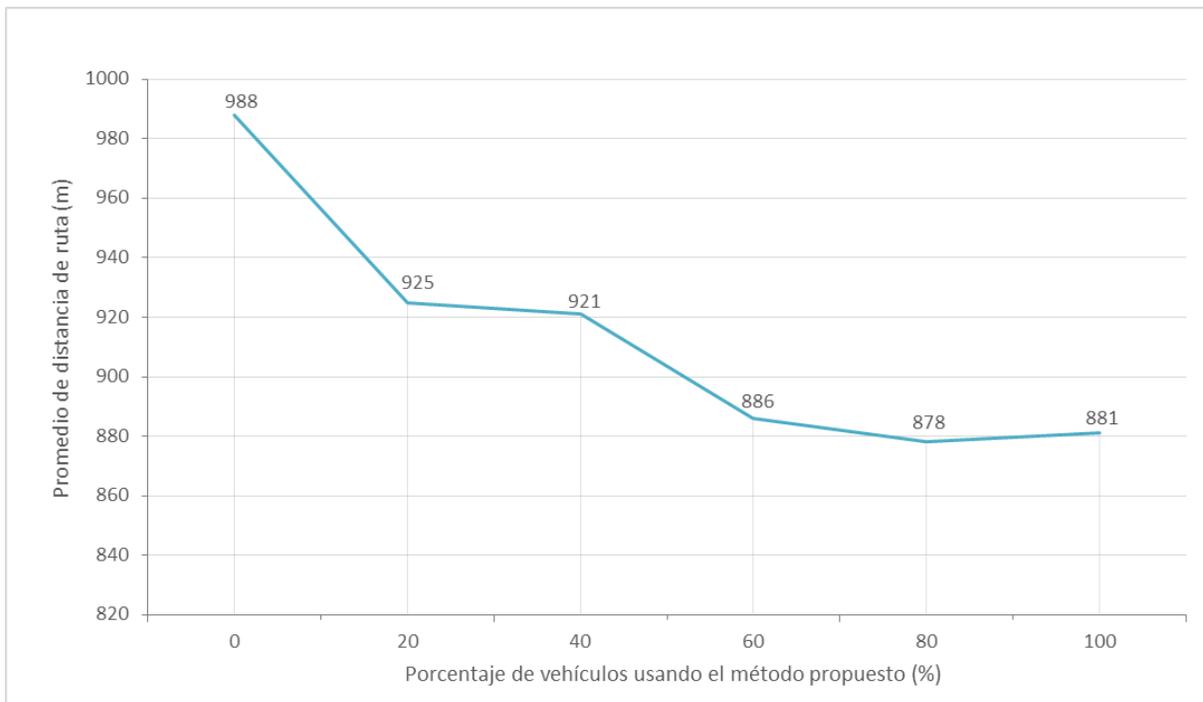


Figura 21. Promedio de distancia de ruta con diferentes porcentajes de vehículos utilizando el método propuesto.

En la Figura 22 se muestran los tiempos promedio del recorrido al aplicar el método propuesto en cada tratamiento, esta observación debe realizarse, ya que, en un fenómeno de circulación vehicular con tráfico y semáforos, la distancia y el tiempo no necesariamente guardan una relación proporcional. Se observa que conforme se incrementa el número de vehículos que utilizan el método propuesto, hasta llegar a que todos lo apliquen, se disminuye en un 22.3% el tiempo promedio de recorrido que realizan los vehículos para estacionarse. El beneficio en reducción de tiempo es mayor que el obtenido en distancia, tomando en cuenta que el método considera evitar semáforos y congestionamiento, que generan detenciones y gasto en tiempo, más no necesariamente en distancia recorrida. Al igual que con la observación del comportamiento de la distancia promedio de ruta, a partir del 60% de la adopción del método propuesto, la mejora en tiempo es marginal.

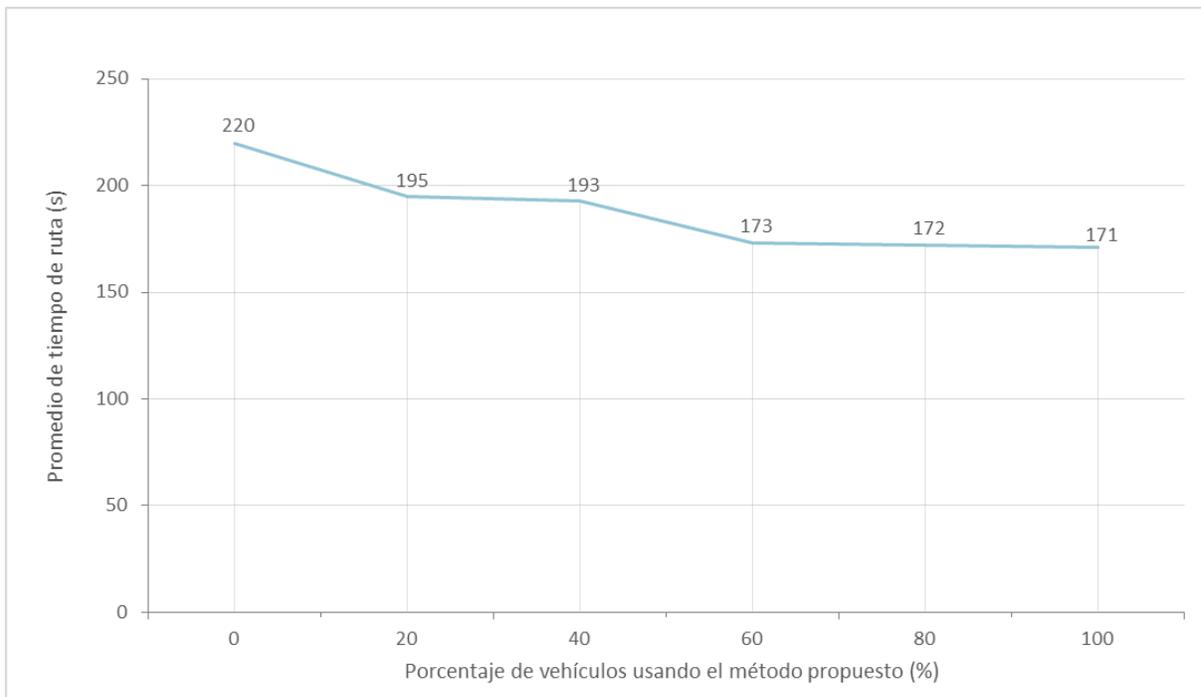


Figura 22. Promedio de tiempo de ruta con diferentes porcentajes de vehículos utilizando el método propuesto.

Para evaluar el impacto potencial ambiental del uso del método propuesto en la búsqueda de estacionamiento en términos de emisiones a la atmósfera, se recabaron datos desde los experimentos de simulación, cuyos resultados se presentan a continuación.

Las Figuras 23 y 24 presentan el efecto del incremento en la cobertura del uso del método propuesto en cada tratamiento, en las emisiones de CO₂ y CO (dióxido y monóxido de carbono), mostrándose tanto las emisiones acumuladas como los promedios de emisión en vehículos estacionados exitosamente, en el entendido de que los acumulados se incrementan en función de que más vehículos logran estacionarse, por lo que debe tomarse en cuenta el impacto promedio.

La Figura 23a refleja un incremento de emisiones acumuladas de CO₂, de 51.2 a 65.8 kg, sin embargo, la emisión promedio por vehículo estacionado ha disminuido un 18.9% (Figura 23b). Esto representa una mejora en la eficiencia del costo ambiental relativo a la tasa de éxito en la búsqueda de lugar de aparcamiento.

Al igual que con los beneficios de distancia y tiempo, el método propuesto refleja mejoras marginales a partir del 60% de vehículos que lo aplican.

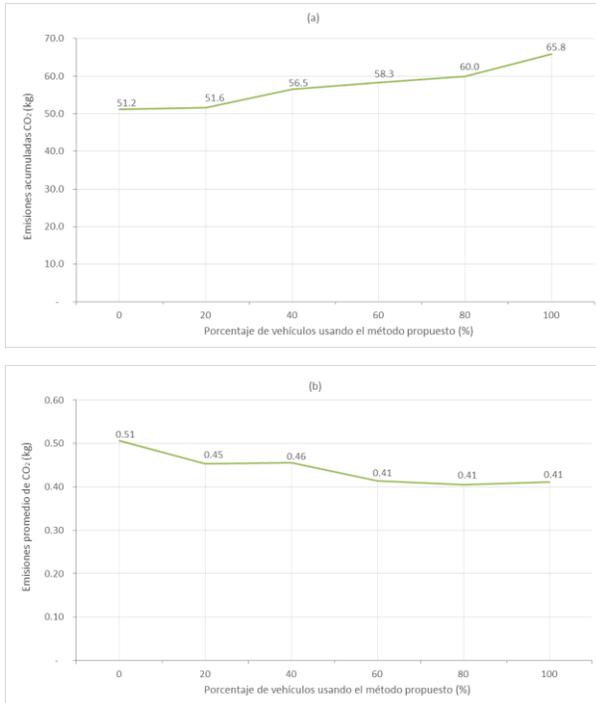


Figura 23. (a) Emisiones acumuladas de CO₂ y (b) Emisiones promedio de CO₂, en vehículos estacionados exitosamente.

La Figura 24a refleja un incremento de emisiones acumuladas de CO, de 1.745 a 2.052 kg, sin embargo, la emisión promedio por vehículo estacionado ha disminuido un 25.8% (Figura 24b), lo que representa una mejora en la eficiencia del costo ambiental relativo a la tasa de éxito en la búsqueda de lugar de aparcamiento. Al igual que con los beneficios de distancia y tiempo, el método propuesto refleja mejoras marginales a partir del 60% de vehículos que lo aplican.

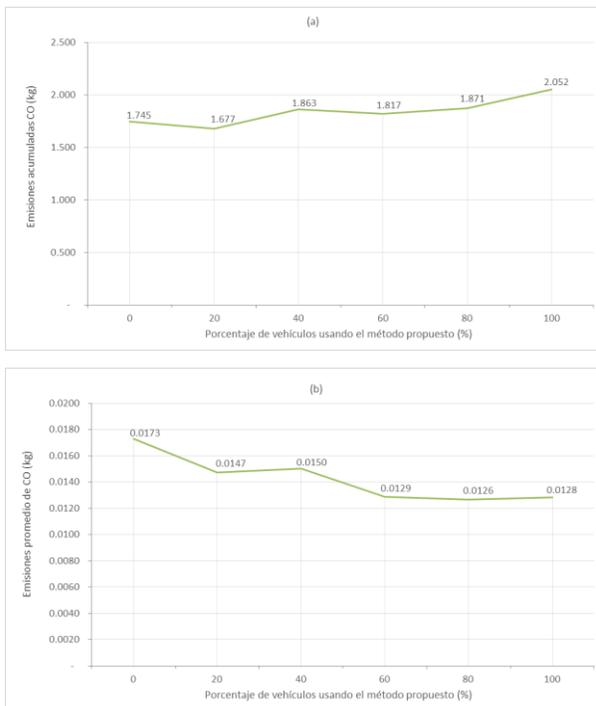


Figura 24. (a) Emisiones acumuladas de CO y (b) Emisiones promedio de CO, en vehículos estacionados exitosamente.

El consumo de combustible acumulado y promedio en los vehículos estacionados exitosamente en cada tratamiento, se expone en la Figura 25 un incremento en el consumo total de combustible, de 22.010 a 28.297 kg (Figura 25a), sin embargo, el consumo promedio por vehículo estacionado ha disminuido un 18.8% (Figura 25b), lo que se explica principalmente por el número de vehículos que logran estacionarse exitosamente. De igual manera, se confirma que hasta el 60% de aplicación del método propuesto en los vehículos, es donde se observan los mayores beneficios.

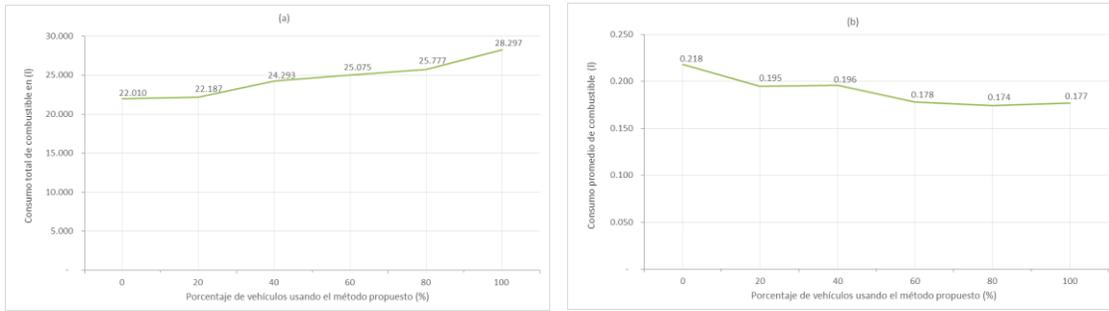


Figura 25. (a) Consumo total de combustible y (b) Consumo promedio de combustible, en vehículos estacionados exitosamente.

Las Figuras 26 y 27 comparan las emisiones de CO y CO₂ acumuladas incluyendo tanto los automóviles estacionados exitosamente como aquellos que no lograron estacionarse, con la finalidad de observar las tendencias globales en toda la muestra de vehículos que buscan aparcamiento.

En la Figura 26, donde se muestran las emisiones totales de CO, se observa que conforme se incrementa el uso del método propuesto, más vehículos logran estacionarse incrementándose las emisiones de CO que ellos emiten en 17.6% al tratarse de más número de vehículos, al mismo tiempo las emisiones de los vehículos que no logran estacionarse y salen del área de monitoreo, disminuye en un 57.4%, esto tiene un efecto en las emisiones acumuladas por ambos grupos en el área bajo estudio, que es una disminución total del 16.3% de emisiones en el área. Esto demuestra que se logra un incremento del 30% en la tasa de éxito de aparcamiento (Figura 21) disminuyéndose las emisiones de CO concentradas en la zona urbana acotada, lo que valida los beneficios del uso del método propuesto.

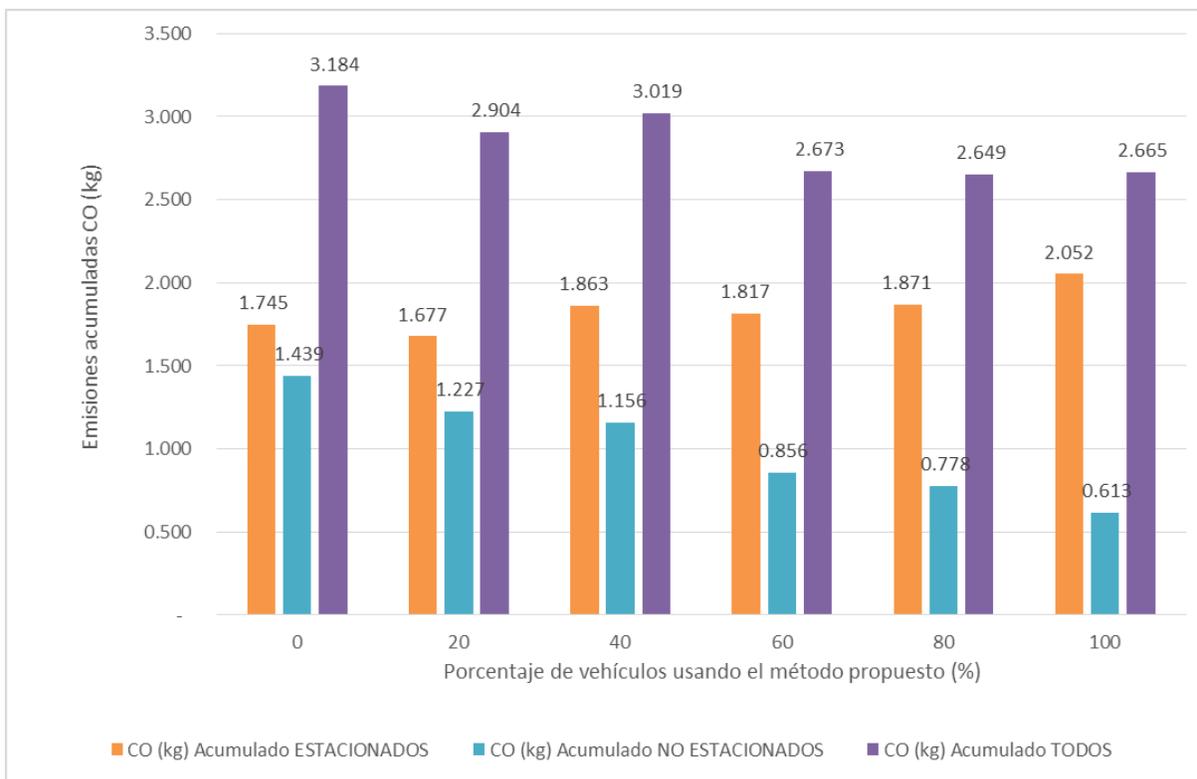


Figura 26. Emisiones totales de CO en diferentes porcentajes de vehículos utilizando el método propuesto.

La Figura 27 confirma la tendencia de disminución en las emisiones totales de CO₂ observándose que al incrementar el uso del método propuesto en cada tratamiento, si bien se incrementan las emisiones de los vehículos que logran estacionarse (28.5% más), se decreentan (57.3% menos) las emisiones de aquellos que no. Aunque no hay una proporcionalidad es evidente el decremento en las emisiones totales (12.2%), lo cual confirma el beneficio del uso del método propuesto.

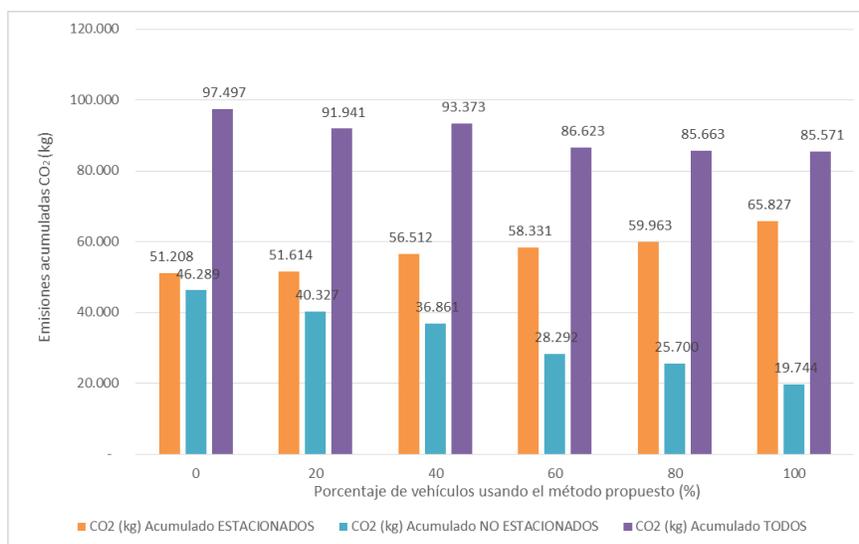


Figura 27. Emisiones totales de CO₂ en diferentes porcentajes de vehículos utilizando el método propuesto.

La Figura 28 presenta las tendencias en los promedios de otras emisiones, se observa que conforme se incrementa el uso del método propuesto en los vehículos en busca de estacionamiento, se disminuyen los promedios de emisiones de NO_x (36.9%), HC (19.7%) y PM_x (22.8%) por vehículo estacionado exitosamente.

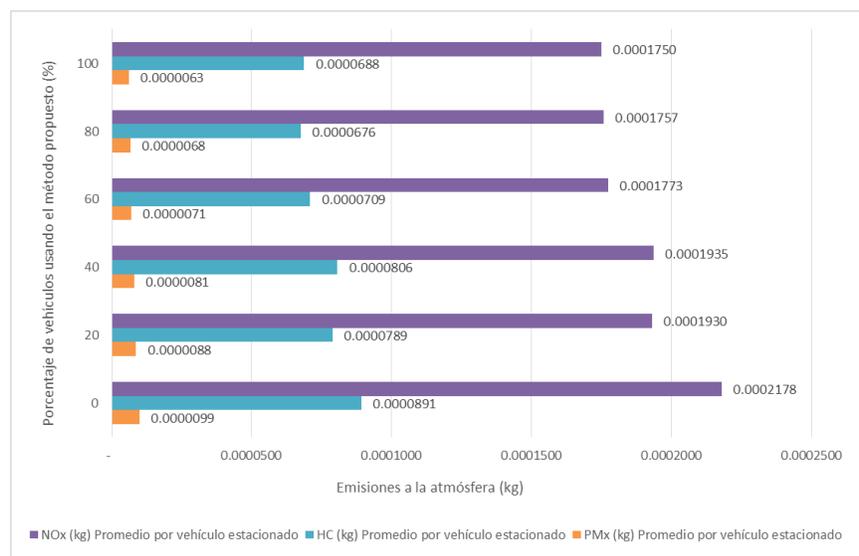


Figura 28. Emisiones promedio por vehículo estacionado de NO_x, HC y PM_x, en diferentes porcentajes de vehículos utilizando el método propuesto.

4.4 Principales conclusiones

Con base en lo anterior y después de analizar los datos recabados de la simulación podemos concluir los siguientes puntos de esta tesis:

- Se propone un método de ruteo que mejora la trayectoria sugerida para encontrar un lugar de estacionamiento, basándose en un punto de origen y un destino a partir del cual se identifican los tres estacionamientos más cercanos; posteriormente, por medio de una búsqueda en profundidad se calculan las distancias para llegar a los mismos desde la posición original del automovilista y se aplica una ponderación que considera la cantidad de intersecciones, la distancia del recorrido, semáforos y tráfico durante la trayectoria.
- Utilizando la plataforma SUMO para la simulación computacional y la ejecución de un script en Python, se implementó el método propuesto que nos permite obtener una ruta sugerida, misma que sirve de guía para los automovilistas en búsqueda de un lugar de estacionamiento dentro de un espacio limitado en una zona urbana.
- Para comprobar el rendimiento del método propuesto recabamos información estadística de cada vehículo, y tomando el promedio del total de automóviles, se comparan los resultados obtenidos en intervalos de la aplicación del método propuesto al 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de vehículos en búsqueda de estacionamiento, esto permite observar la mejora conforme el algoritmo es adoptado por más automovilistas. En cada repetición se mantienen los orígenes y destinos de los vehículos, lo cual permite aislar la observación del efecto del método propuesto.
- El método propuesto impacta en la cantidad de vehículos que logran estacionarse, para el caso del experimento se observó un incremento del 30% sobre la tasa de éxito de lograr aparcamiento.

- Se observa una reducción en la distancia promedio (10.8%) y el tiempo promedio (22.3%) empleados por los vehículos que logran estacionarse.
- Se aprecia que en promedio, la mejora porcentual en tiempo es mayor que la de distancia, tomando en cuenta que se ha incluido la ponderación de rutas la preferencia de aquéllas con menor cantidad de cruces y semáforos, lo que no necesariamente representa menor distancia.
- En la parte ambiental se observa que las emisiones acumuladas se incrementan en el conjunto de vehículos que se estacionan exitosamente, debido a que dicho conjunto es mayor conforme más vehículos adoptan el método, sin embargo los promedios por vehículo disminuyen: CO₂ (18.9%), CO (25.8%), NO_x (36.9%), HC (19.7%) y PM_x (22.8%), esto representa la mejora en la eficiencia del costo ambiental relativo a la tasa de éxito en la búsqueda de estacionamiento.
- En cuanto al efecto acumulado de emisiones de CO y CO₂ aunque se incrementan en el conjunto de autos que logran estacionarse, se disminuye por efecto de los autos que no logran estacionarse saliendo de la zona acotada urbana, teniendo en general una disminución de la concentración de estos contaminantes en dicha zona; en CO₂ (12.2%) y en CO (16.3%).
- Con respecto al consumo de combustible promedio consumido por vehículo estacionado exitosamente, se logra una disminución de 18.8%.
- En todas las mediciones se observa un beneficio sostenido hasta el 60% de automóviles que adoptan el método propuesto, porcentaje a partir del cual los beneficios son marginales.

4.5 Trabajos futuros

Una vez que se ha validado por simulación el método propuesto, se debe analizar su comportamiento bajo diferentes cargas horarias, esto es considerando elementos de cambio por horas pico. Lo cual sería factible realizando un levantamiento estadístico sobre alguna avenida cuyas condiciones de flujo

vehicular, resulten importantes; permitiendo la evaluación del método propuesto desde otro punto de vista.

Para complementar la evaluación del algoritmo se puede elaborar un análisis de sensibilidad y robustez que identifiquen la forma en que el método propuesto aborda el ajuste ante perturbaciones de diferentes dimensiones.

También es importante realizar la integración del método propuesto en un sistema que permita abordar una prueba acotada, implementando el método en un sistema web que respalde la operación de una aplicación móvil. Esta integración obligará a resolver aspectos de escalamiento, enfocándose en la ingeniería de un software que permita la operación a un usuario real, identificando todas las condiciones operativas que influirán en la calidad de una aplicación de este tipo, como puede ser el diseño arquitectónico; considerando los parámetros críticos de rendimiento, seguridad y disponibilidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulkader, O., Bamhdi, A., Thayananthan, V., Jambi, K. y Alrasheedi M. (2018). A novel and secure smart parking management system (SPMS) based on integration of WSN, RFID and IoT. *15th Learning and technology conference (L&T)* (2018). doi: <https://doi.org/10.1109/LT.2018.8368492> Arabia Saudita
- Abidi, S., Krichen, S., Alba, E. y Molina, J. (2015) A new heuristic for solving the parking assignment problem. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 15, 85–97 (2017) <https://doi.org/10.1007/s13177-016-0123-1>
- Administración Pública de la Ciudad de México (2016). *Gaceta oficial de la ciudad de México* Recuperado de http://data.fmpt.cdmx.gob.mx/121.1/NORMAS_VIATICOS.pdf
- Al-Turjman, F., & Malekloo, A. (2019). Smart parking in IoT-enabled cities: A survey. *Sustainable Cities and Society*, 49(December 2018). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101608>
- Aydin, L., Karakose, M. y Karakose, E. (2017) A navigation and reservation based smart parking platform using generic optimization for smart cities. *5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair. (ICSG)* (2017) doi: <https://doi.org/10.1109/SGCF.2017.7947615> Estambul, Turquía.
- Banco Interamericano de Desarrollo, (2018,) Manual de gestión inteligente del espacio público. Recuperado de https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/cooperate/international/pdf/urb_elac_3_manual_es.pdf
- Barriga, J. J., Sulca, J., Luis, J. L., Ulloa, A., Portero, D., Andrade, R., & Guun, S. Y. (2019). Smart parking: A literature review from the technological perspective. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(21). <https://doi.org/10.3390/app9214569>

- Bischoff, J., & Nagel, K. (2017). Integrating explicit parking search into a transport simulation. *Procedia Computer Science*, 109, 881–886. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.414>
- Camacho, F., Cárdenas, C. y Muñoz, D. (2017) Emerging technologies and research challenges for intelligent transportation systems: 5G, HetNets and SDN. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 12, 327–335 (2018) doi: <https://doi.org/10.1007/s12008-017-0391-2>
- Expansión política (2019) El congestionamiento vial cuesta a los mexicanos hasta 18 días por año. *Expansión Política*. Recuperado el 1 de mayo de 2020 de <https://politica.expansion.mx/mexico/2019/09/10/mexicanos-pierden-18-dias-anual-traffic-imco>
- Fraiefr. M. & Fernström. M. (2016). Investigation of Smart Parking Systems and their technologies *Thirty Seventh International Conference on Information Systems*, Dublin 2016, recuperado de https://www.researchgate.net/publication/311535831_Investigation_of_Smart_Parking_Systems_and_their_technologies
- Gaceta de la Comisión Permanente (2016) *Reglamento de tránsito de la ciudad de México*. Recuperado el 27 de mayo de 2020 de <http://www.paot.org.mx/>
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2017). Recuperado de http://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b1a0211fbbf641ca1907a9a3ff4bdb5.pdf
- Gómez, S. (2012) *Metodología de la investigación*. ISBN 978-607-733-149-0. México: Red Tercer Milenio
- H. Ayuntamiento de Xalapa. (2018) *Organigrama de la administración pública municipal 2018-2021*. Xalapa, 2018, recuperado de <https://ayuntamiento.xalapa.gob.mx>

- Hassoune, K., Dachry, W., Moutaouakkil, F., & Medromi, H. (2016). Smart parking systems: A survey. *SITA 2016 - 11th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications*. <https://doi.org/10.1109/SITA.2016.7772297>
- Houissa, A., Barth, D., Faul, N. y Mautor, T., (2017) A learning algorithm to minimize the expectation time of finding a parking place in urban area. 22nd IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC 2017) doi: <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ISCC.2017.8024494> Bolonia, Italia.
- Idri, A., Oukarfi, M., Boulmakoul, A., Zeitouni, K., & Masri, A. (2017). A new time-dependent shortest path algorithm for multimodal transportation network. *Procedia Computer Science*, 109, 692–697. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.379>
- Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México (2012), *La importancia de reducción del uso del automóvil en México*, recuperado de <http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Importancia-de-reduccion-de-uso-del-auto.pdf>
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) (2019) *Índice de movilidad urbana*. Recuperado de <https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2019/01/I%CC%81ndice-de-Movilidad-Urbana.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2019) Recuperado de <https://www.inegi.org.mx/>
- INRIX (2019) *2018 Global Traffic Scorecard Report*. Recuperado el 10 de marzo de 2020 de <https://inrix.com/scorecard/>
- Islas-Rivera, V. (2000) Llegando tarde al compromiso: la crisis del transporte en la ciudad de México. doi: 10.2307/j.ctv3f8qbr. México: El colegio de México

- Jian, D., Ni, X. y Zhang, L. (2015) A discriminated release strategy for parking variable message sign display problem using agent-based simulation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17(1): 38-47 (2016) doi: 10.1109/TITS.2015.2445929 China
- Kang, D., Lv, Y. y Chen, Y. (2017) Short-term traffic flow prediction with LSTM recurrent neural network. *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) 2017*. doi: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317872> Yokohama, Japan
- Kayal, P., & Perros, H. (2020). Through a Smart Parking Implementation. *2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*, 331–336.
- Kayri, M. (2016) Predictive Abilities of Bayesian Regularization and Levenberg-Marquardt Algorithms in Artificial Neural Networks: A Comparative Empirical Study on Social Data. *Mathematical and Computational Applications* 21(20): 1-11 (2016) doi: 10.3390/mca21020020. Turquía
- Kitchenham, B. y Stuart, M. (2007) Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Durham, UK
- Kotb, A., Shen, Y. y Huang, Y. (2017) Smart parking guidance, monitoring and reservations: a review. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 9(2): 6-16 doi: <https://doi.org/10.1109/MITS.2017.2666586>
- Kumar, B. y Kameswara, M. (2016) A prototype for IoT based car parking management system for smart cities. *Indian Journal of Science and Technology* 9(17) (2016) doi: 10.17485/IJST/2016/V9I17/92973. India
- Lin, T., Rivano, H., & Le Mouel, F. (2017). A Survey of Smart Parking Solutions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(12), 3229–3253. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2685143>

- Liu, M., Naoun-Sawaya, J., Gu, Y., Lecue, F. y Shorten, R. (2018) A distributed Markovian parking assist system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 20(6) (2019)
- Maddox, T. (2018) *Smart cities: A cheat sheet*. Recuperado el 11 de enero de 2020 de <https://www.techrepublic.com/article/smart-cities-the-smart-persons-guide>
- Mannini, L., Cipriani, E., Crisalli, U., Gemma, A., & Vaccaro, G. (2017). On-Street Parking Search Time Estimation Using FCD Data. *Transportation Research Procedia*, 27, 929–936. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.149>
- Mazhar, R., Anand, P., Awais, A. y Suengmin, R. (2016) Urban planning and building smart cities based on IoT using Big data analytics. *Computer Networks* 101 (2016) doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.023>
- Mazloui, E., Rose, G., Currie, G. y Moridpour, S. (2011) Prediction intervals to account for uncertainties in neural network predictions: Methodology and application in bus travel time prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 24(3): 534-542 doi: 10.1016/j.engappai.2010.11.004
- Okoso, A., Otaki, K., & Nishi, T. (2019). Multi-Agent Path Finding with Priority for Cooperative Automated Valet Parking. *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*, 2135–2140. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2019.8917112>
- Paidi, V., Fleyeh, H., Håkansson, J., & Nyberg, R. G. (2018). Smart parking sensors, technologies and applications for open parking lots: A review. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(8), 735–741. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2017.0406>
- Pearson A., Robertson Malt S. y Rittenmeyer L. (2011). *Synthesising Qualitative Evidence*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.

- Pei, Y., Wu, H. y Huang, D. (2017) MADM-based smart parking guidance algorithm. *Public Library of Science* doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188283>.
China
- Peng, L., & Li, H. (2016). Searching parking spaces in urban environments based on non-stationary Poisson process analysis. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 1951–1956. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795871>
- Pham, T., Tsai, M., Nguyen, D., Dow, C. y Deng, D. (2015) A cloud based smart-parking system based on internet-of-things technologies. *IEEE Access* 3: 1581-1591 doi: 10.1109/ACCESS.2015.2477299
- Real Academia Española (2020). Recuperado de <https://dle.rae.es/tr%C3%A1nsito>
- Sampieri, R., Collado, C. y Lucio, P. (2004) *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill Latinoamérica.
- Sánchez, J. (2017) *Conceptos claros de estadística*. Conceptos Claros Recuperado de <https://conceptosclaros.com/como-analizar-datos/>
- Saranghi, M., Das, S. K., & Babu, K. S. (2019). Smart Parking System: Survey on Sensors, Technologies and Applications. *1st IEEE International Conference on Advances in Information Technology, ICAIT 2019 - Proceedings*, 250–255. <https://doi.org/10.1109/ICAIT47043.2019.8987378>
- Singh, R., Dutta, C., Singhal, N., & Choudhury, T. (2020). An Improved Vehicle Parking Mechanism to reduce Parking Space Searching Time using Firefly Algorithm and Feed Forward Back Propagation Method. *Procedia Computer Science*, 167(2019), 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.394>
- Stolfi, D., Alba, E. y Yao, X. (2017). Predicting Car Park Occupancy Rates in Smart Cities. *International Conference on Smart Cities* pp 107-117. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59513-9_11

- Tang, J., Song, Y., Miller, H. J., & Zhou, X. (2016). Estimating the most likely space-time paths, dwell times and path uncertainties from vehicle trajectory data: A time geographic method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 66, 176–194. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.08.014>
- Thomas, D., & Koor, B. C. (2018). A Genetic Algorithm Approach to Autonomous Smart Vehicle Parking system. *Procedia Computer Science*, 125, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.011>
- Tomar, P., Kaur, G. y Singh, P. (2018) A prototype of IoT-based real time smart street parking system for smart cities. *Internet of Things and Big Data Analytics Toward Next-Generation Intelligence*, pp.243-263 doi: 10.1007/978-3-319-60435-0_10
- Wang, M., Dong, D., Li, X., Song, L. y Pang, D. (2017) A novel parking system designed for smart cities. *Journal of Information Security* 09(04): 299-314 doi: 10.4236/jis.2018.94020
- Wang, X., Shi, H., & Zhang, C. (2020). Path Planning for Intelligent Parking System Based on Improved Ant Colony Optimization. *IEEE Access*, 8, 65267–65273. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984802>
- World population prospects (2019) *2019 Revision of World Population Prospects*. Recuperado el 11 de mayo de 2020 de <https://population.un.org/wpp>.
- Wu, X., Wang, Y., Chen, H., Liang, K. y Shu, L. (2015) A parking management system based on background difference detecting Algorithm. *ICST Transactions on Scalable Information Systems* 2(7) doi: 10.4108/eai.19-8-2015.2260044. China.
- Xu, W. (2020). *Shortest Path Searching for Logistics Based on simulated annealing algorithm*. [Advances in Intelligent Systems and Computing] (Vol. 194 AISC)

Anexo A. Revisión Sistemática de la Literatura

Survey on Parking Guidance, Methods and Techniques

Luis R. González-Martínez
Instituto Tecnológico
Superior de Xalapa
197o00007@itsx.edu.mx

María Angélica Cerdán
Instituto Tecnológico
Superior de Xalapa
angelica.c@xalapa.tecnm.mx

Ángel J. Sánchez-García
Facultad de Estadística e
Informática
Universidad Veracruzana
angesanchez@uv.mx

Abstract

With the rapid advance on new emerging technologies and deployment of smart applications to drivers in navigation and parking, the solutions dedicated for smart parking have been increased. In this paper a Systematic Literature Review focused on the software side of smart parking systems is presented. More specifically about the strategies used to search for a parking space and the path to find an available slot. After the search process, eighteen jobs were reported. From these papers, different methods and techniques used to manage the information about vehicles and parking lots in an urban setting are reported. The resulting evaluation on the state of the art will be used to find open issues for future projects.

Keywords – *Smart parking, parking system, guide, algorithm.*

1. Introduction

Due to the growth and concentration of the population in metropolitan areas, the use of cars has become a necessity for citizens. The Mexican Institute for Competitiveness (IMCO by its acronym in Spanish) warns that the number of cars in Mexico is growing faster than the population. From 1990 to 2017 the vehicle fleet grew at an annual rate of 5.3%, while the population grew only by 1.5% [1]. The IMCO also measured the economic impact and income opportunities of traffic jams caused by excess traffic in the main cities of the country, revealing that this problem generates losses of 94,000 million pesos per year, users of public transport lose 69,000 million pesos per year while people, 25,000 million pesos. The increase of automobile use in Mexico and the congestion they cause, generates various associated impact on the environment, the economy, human health and the spatial structure of cities [2]. Given that the growing number of vehicles in cities tends to exceed the capacity to create said infrastructure, the search for parking is part of the problem to be solved

that impacts urban mobility and the environment [3]. To mitigate the problem, the concept of smart mobility arises, which is a way of addressing how people move, seeking a cleaner, safer and more efficient city [4]. It includes the use of bike paths, automatic control of road signs, public lighting and the reduction of vehicular traffic through guiding algorithms and Smart Parking systems, which help drivers to reduce travel distances and/or time in road congestion. In the search to optimize the motorist's route in urban areas when searching for parking, solutions have been proposed to locate an available space. This requires updated information on traffic, vehicle location and potential available spaces, among other factors [5] [6].

The objective of this work is to analyze the methods and techniques implemented by the parking search and guidance algorithms, their advantages and the way they have been tested, in order to identify open issues.

This paper is distributed as follows: Section 2 presents the context and related work. Section 3 describes the methodology for the Systematic Literature Review (RSL). Section 4 presents the discussion of the results obtained from the RSL. Finally, the conclusions and future work are presented in Section 5.

2. Related work and background

Parking lots can be classified according to their purpose and operation into the following types: parking on public roads, in buildings (public or private), rental of parking spaces, exclusive of commercial premises and in large commercial squares [6]; these parking lots present different characteristics in their physical and operational infrastructure. The regulations vary according to the governments: at the national, municipal and state levels. Also, each country at the international level establishes its own policies based on the management of urban space and in turn work together to improve the urban dimension among its members [7]. The management of parking spaces is

included in the concept of smart cities, where solutions that incorporate Technology are sought, as an emergency on the subject in recent years. In this context, they eight reviews on the state of the art were identified, mainly dealing with aspects of sensors, technologies and applications (Table I). From these, no work specifically addresses the comparison between methods and techniques applied in guidance systems.

TABLE I. Background reviews.

Work and scope	Automation technologies	Smart Parking Systems	Guidance methods and techniques
[8]	✓	✓	✗
2016-2018			
[9]	✓	✓	✗
2009-2018			
[10]	✓	✓	✗
2014-2018			
[11]	✓	✓	✗
2000-2016			
[12]	✓	✓	✗
2000-2017			
[13]	✓	✓	✗
2008-2016			
[14]	✓	✗	✗
2012-2016			
[15]	✗	✓	✗
2000-2016			

In [8], technologies and applications are studied by categorizing the systems into manual, semi-automatic or automatic, and in terms of management. They are analyzed in systems by blind search, parking guidance, traffic-based, smart payment, payment electronic and robotic systems. This work classifies the types of sensors that are used, and the algorithms used to recognize the license plates (based on generic algorithms, RBFNN and SVM).

In [9], seven reviews are taken as a reference, from 2009 to 2018, analyzing sensors, communication protocols, interface software, security and privacy, new applications and open topics. These authors classify smart parking systems (SPS) into four layers: sensors, network, middleware, and applications. These systems fall into three different categories: centralized-assisted SPS, distributed-assisted SPS, and Non-assisted SPS (NAPS). It also provides a summary and comparison of the main types of sensors, as well as design factors in software, hardware and interoperability.

Other works also compare the sensor schemes used in different SPS [10], identifying schemes related to the handling of cameras, ultrasound, cellular sensor, infrared, radar and magnetometers, among others. They

also make a division of the software and it is classified according to: information management, prediction or E-Parking; being the information management used more frequently. In the network layer they identify five categories: wireless IoT protocol, WiFi, 3G / 4G, Bluetooth, or wired. Authors propose a guide table for researchers looking to use sensors in their system. In this review, the guiding algorithms were not touched, but they focus on the interface of the sensors and the use of this technology.

In [11] the author mainly focus on clarifying the methods used in 60 publications, grouping them according to which algorithms or sensor network were used: Smart Parking Systems based on agents, SPS based on fuzzy logic, Systems based on wireless sensor network, SPS based in V2I communication (vehicle-infrastructure), SPS based on GPS, SPS based on computer vision, SPS based on radio frequency technology and other hybrid systems such as IoT.

In [12] authors take seven literature reviews, from 2000 to 2017, as a reference to analyze and compare the types of sensors used in parking lots, finding 13 different technologies used in those writings. The sensors are described as: active or passive infrared sensor, ultrasonic sensor, inductive cycle detectors, guided parking systems, radio frequency identification, magnetometer and microwave radar.

In [13] the authors take as a reference 14 Smart Parking Systems from 2008 to 2016. First, they compare the advantages and disadvantages individually and later on divide them into 6 parts: collection, deployment, services, connection, processing and IHM (Interface Human-System). Guidance methods used in conjunction with these sensors are not mentioned.

The authors in [14] consider protocols used for smart parking but their performance has not been quantified in previous works. In their study they present four protocols: CoAP (Constrained Application Protocol), MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), XMPP (eXtensible Messaging and Presence Protocol) and MQTT over WebSocket.

In [15] publications from 2000-2016 were taken focusing on the development and evolution of smart parking. They classified the referenced literature by its functionality into three main macro-themes: Information collection, System deployment, and Service dissemination. They carry out a collection of information of all the proposed methods, taking into account: data source, deployment, storage, service, how to determine parking and network layer.

Based on the previous work, it can be observed that the studies focused on the guide algorithms are limited and their attention is insufficient; the vast majority focuses on the hardware part (mainly sensors), its advantages and limitations. For this reason, a

systematic review focused mainly on the application of guidance systems, their methods and techniques used from 2016 to 2020 was carried out.

3. Methodology

The methodology used in the Systematic Literature Review was based on the Kitchenham study [16] and divided into 4 phases: planning, execution, extraction and finally synthesis of information.

3.1 Planning phase

During the planning phase, the following main questions to answer were established:

- Q1. What algorithms are used to find a parking slot?
- Q2. How is defined the route to get to the parking lot?
- Q3. What scenario or conditions were taken for the experimentation?

In the same way, keywords (smart, parking, system, guide, algorithm) and their synonyms were identified for the search strings; the search's results can be filtered by year in the chosen databases. The search strings were structured based on the characteristics of the search engine used and they are shown in Table II.

TABLE II. Database and Search Strings.

Database	Applied search String
IEEE Xplore https://ieeexplore.ieee.org/	(smart OR intelligent) AND parking AND (guide OR navigation OR search OR path) AND (algorithm OR strategy OR method)
Science Direct https://www.sciencedirect.com/	(smart OR intelligent) AND parking AND (guide OR navigation OR search) AND (path OR algorithm OR method)
ACM https://dl.acm.org/	parking AND ((guide OR control OR navigation OR search OR path) OR (model OR system OR application) OR (algorithm OR strategy OR method))
Springer https://link.springer.com/	parking AND (system OR management) AND (guide OR navigation) AND (algorithm OR strategy OR method) NOT (CARS or IOT or robot or autonomous or indoor)

The results obtained in each of the information sources were evaluated with the inclusion and exclusion criteria shown in Table III.

TABLE III. Evaluation criteria

Criteria	Description
Inclusion 1	The publication year between 2016 and 2020
Inclusion 2	It is a Journal or conference paper
Inclusion 3	It must be written in English
Inclusion 4	It has at least 2 keywords in the title
Exclusion 1	It is a book, technical report, patent or poster
Exclusion 2	It is a duplicate publication

3.2 Execution phase

Fig. 1 shows the articles identified after the application of the inclusion and exclusion criteria.

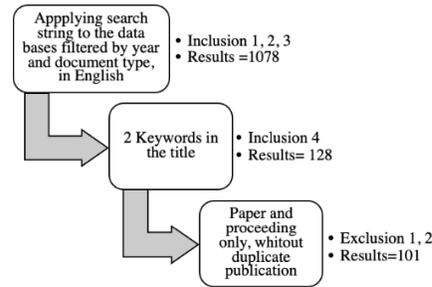


Fig.1 Studies selection processes.

3.3 Extraction phase

The 101 articles were evaluated by reading the abstract, identification of sections and the results, to evaluate the focus of the works and the emphasis on the subject related to the guide applications, leaving 44 documents. They were read in their entirety, to assess their quality in relation to answering the three research questions, identifying 18 papers, generating an extraction matrix.

3.4 Synthesis phase

The information was synthesized from the extraction matrix, classifying the contents in a meta aggregation of categories as is shown in Table IV.

TABLE IV. Findings categories.

Question	Category
Q1	Applied method or technique
	Control group or contrast
Q2	Definition of available spaces
	Scenario for route search
	Route generation strategy
	Presentation to the user
Q3	Efficiency and effectiveness measurement
	Hardware and software technologies used
	Experimental Design

4. Results

Answering *Q1*, systems based on mathematical models and algorithms of different types were found to find available parking. The most frequent were genetic algorithms [17][26][34], based on multi-agent systems [24][30][33], A* search [18][19] and Neural Networks [20][22]. The rest of the works applied a diversity of methods, own mathematicians [21], [23] Dijkstra, [27] Matching Theory, [28] Ant Colonies, [29] Poisson Analysis, [32] Simulated Annealing, and some others proposing the combination of two methods to generate a solution [18][20][25][26][31].

Each work addresses the issue in a unique way and its contribution or innovation is related to its respective particular solution. The identified improvements include the addition of efficiency coefficients, dynamic path calculations, simulation integration, quality functions for path pruning, improvement effects by combination of methods and techniques, as well as the integration of geolocation systems and autonomous cars. Part of the improvements also includes additional features, such as the consideration of driver preferences and environmental impact, as relevant parameters.

Most works compare the performance of their proposal against itself [17][18][19][20][21][22][27][28] or a modification of it [19][23][24][33]. This is to be expected since they are based on statistical calculations and simulation rather than field tests to verify their methodology, others such as [31] compare against random search and Simulated Annealing, and in [32] against dynamic shortest path. Others are not specific in the validation process applied.

Regarding *Q2*, to define the route the first step is to identify the available space. In several works [17][20][34] is considered the acquisition of data from sensors. In [19][27][29] predictive algorithms and statistical estimation are applied. In [22] information by GPS estimating occupancy is acquired to deduce availability and using floating car data to control and manage the location and speed in the new generation of vehicles in [23].

Also with the answer to this question, three main scenarios are easily distinguished: a) Closed parking [17][20][24][25][28], b) Directed graphs [18][21][27][31][32][33], and c) Street networks [19][22][23][26][29][30][34].

To determine the route, a variety of strategies are integrated. By areas with the highest probability to find space [17][29], multimodal algorithms [18] or optimized [19][28]. Other studies carry out combinations [20] [23] [25] [27] or with their own proposals [21] [27]. The other works include minimum cost functions, evolutionary algorithms of stable state,

shortest path, simulated annealing, discriminated release or genetic algorithms.

The indication of the route depends on the scenario of each work: those who claim autonomy in the vehicle carry out navigation on board [17][24][28], those oriented to a driver use mapping [19][21][29][34], and in [33] variable message in signaling is considered.

Regarding *Q3*, the variables most used to measure effectiveness are: distance traveled [18][25][28], probability of success [19][22][29], and vehicles successfully parked [20][27][29][33]. The waiting time at the entrance of the parking lot [17][24], failure rate [22][29], fitness value [31][34] and changes in parking demand [30] are also used.

Regarding efficiency, the rate of vehicles parked in time is considered [17][20][22], degree of use by zone according to schedule [17][22][33], waiting rate by number of vehicles [17], CPU usage and computation time [18][21], multivalued efficiency function [19], average time of location of place to park [20][23][25][27], route graph reduction [24][28][32], absence of collisions [24], remaining walking distance to destination and earnings for establishments [27].

Some authors include the use of a certain infrastructure or sensor network depending on their particular scenario, as shown in Table V.

TABLE V. Hardware comparison.

Most used hardware platforms	Number of papers
Radio Frequency sensor	2
Autonomous Vehicle	2
Ad hoc structure	1
Ultrasonic sensor	1
Variable Message Signalling	1
Probe	1
GPS	1
Not indicated	9

In Table VI the programs used most frequently in the works found are compared.

TABLE VI. Comparison of platforms, frameworks and languages used.

Software platforms	Number of papers
MATLAB	4
Python	2
Java	2
Application Ad hoc	1
C / C# / C++	1
SUMO	1
Not indicated	8

Different approaches are also presented to address the issue, due to the various strategies applied and the independent way in which the authors validated their

tests, either in urban scenarios [19][21][22][23][26][29][30][32], confined parking lots [17][20][24][25][28]. Most of the proposals had some simulation procedure to obtain their results.

Samples are determined by range of hours and number of vehicles [17][20][22][27][29], by repetitions [19][24][27][29][31][33], by time [22][23][27] and by space [23][27][32].

Table 7 shows the main advantages that the authors identified in their work.

5. Conclusion and future work

In this paper, state-of-the-art information regarding proposed solutions for intelligent transport systems was gathered and analyzed, which are increasingly focused on software solutions for smart parking, trying to take advantage of new technologies (Table VII) in the field of intelligent mobility and to leave behind the scheme of an infrastructure based on sensor networks. The main conclusions of this review are detailed below.

TABLE VII. Main advantages identified.

Advantage	Number of papers
Greater efficiency	5
Greater chance of finding space	5
Less time to get to a parking slot	3
Highest total occupancy	2
CPU time reduction	2
Less distance traveled	1
Use in offline application	1

The intelligent metaheuristic methods demonstrate their potential adaptation for the resolution of the guide in the urban environment, so it is interesting to explore other techniques of this type to assess their performance, against the genetic algorithms, which are the most used.

The ways to identify the routes depend to a large extent on the identification of areas with probability of success (with available spaces), generally limited by a search radius. In this sense, the main challenge is the acquisition of occupation information, depending on the scenario particular urban.

Regarding the experimental designs, only one work includes the evaluation of environmental impacts, which would be a parameter of interest, since the search for parking has a direct impact on vehicle congestion and the consequent emissions.

It is observed that simulation is the main means of validation, since it allows to evaluate the efficiency and effectiveness at a lower cost. On the other hand, the usefulness of platforms such as Open Street Map, SUMO and MATLAB, for the Development of applications is relevant. There is significant potential in

the use of this tool for the development of smart cities, so it will be a starting point for our future research in the area.

6. Acknowledgments

The first author thanks to “CONACyT, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología” in Mexico for its financial support with the scholarship program “Becas nacionales” 2019-000002-01NACF-04666.

7. References

- [1] Instituto Mexicano para la Competitividad, *Índice de movilidad urbana: barrios mejor conectados para ciudades más incluyentes*, available at <https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2019/01/I%CC%81ndice-de-Movilidad-Urbana.pdf>
- [2] Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México, *La importancia de reducción del uso del automóvil en México*, available at <http://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/Importancia-de-reduccion-de-uso-del-auto.pdf>
- [3] T. Maddox, (2018, Jul. 16) “Smart cities: A cheat sheet”, available at <https://www.techrepublic.com/article/smart-cities-the-smart-persons-guide>
- [4] R. Mazhar, P. Anand, A. Awais and R. Suengmin, “Urban planning and building smart cities based on IoT using Big data analytics”, *Computer Networks* vol. 101, pp. 63-80, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.023>
- [5] D. Kang, Y. Lv, and Y. Chen, “Short-term traffic flow prediction with LSTM recurrent neural network”, *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317872>
- [6] H. Ayuntamiento de Xalapa. *Organigrama de la administración pública municipal 2018-2021*. Xalapa, 2018, available at <https://ayuntamiento.xalapa.gob.mx>
- [7] Banco Interamericano de Desarrollo, *Manual de gestión inteligente del espacio público*. 2018, available at https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/cooperate/international/pdf/urbelac_3_manual_es.pdf
- [8] M. Sarangi, S. K. Das and K. S. Babu, “Smart Parking System: Survey on Sensors, Technologies and Applications”, *1st IEEE International Conference on Advances in Information Technology, ICAIT 2019 - Proceedings*, 2019, pp. 250–255, <https://doi.org/10.1109/ICAIT47043.2019.8987378>
- [9] F. Al-Turjman and A. Malekloo, “Smart parking in IoT-enabled cities: A survey”, *Sustainable Cities and Society*, 2019, vol. 49, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101608>
- [10] J. J. Barriga, J. Sulca, J. L. Luis, A. Ulloa, D. Portero, R. Andrade and S. Y. Guun, “Smart parking: A literature review from the technological perspective”, *Applied Sciences (Switzerland)*, 2019, vol. 9 no. 21. <https://doi.org/10.3390/app9214569>
- [11] M. Fraiefr and M. Fernström, “Investigation of Smart Parking Systems and their technologies”, *Thirty Seventh International Conference on Information Systems*, Dublin 2016, available at

- https://www.researchgate.net/publication/311535831_Investigation_of_Smart_Parking_Systems_and_their_technologies.
- [12] V. Paidi, H. Fleyeh, J. Håkansson, and R. G. Nyberg, "Smart Parking Tools Suitability for Open Parking Lots: A Review", *Proceedings of the 4th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, Madeira, 2018, pp. 600–609. <https://doi.org/10.5220/0006812006000609>
- [13] K. Hassoune, W. Dachry, F. Moutaouakkil and H. Medromi, "Smart parking systems: A survey", *SITA 2016 - 11th International Conference on Intelligent Systems: Theories and Applications*, 2016 <https://doi.org/10.1109/SITA.2016.7772297>
- [14] P. Kayal and H. Perros, "A comparison of IoT application layer protocols through a smart parking implementation. 2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN)", 2020, pp. 331–336. <https://doi.org/10.1109/ICIN.2017.7899436>
- [15] T. Lin, H. Rivano and F. Le Mouel, "A Survey of Smart Parking Solutions", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017 vol. 18 no. 12, pp. 3229–3253. <https://doi.org/10.1109/ITITS.2017.2685143>
- [16] Kitchenham, B. and Stuart, M. *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*, Durham, UK, 2007
- [17] D. Thomas and B. C. Kooor, "A Genetic Algorithm Approach to Autonomous Smart Vehicle Parking system", *Procedia Computer Science*, 2018 vol. 125, pp. 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.011>
- [18] A. Idri, M. Oukarfi, A. Boulmakoul, K. Zeitouni and A. Masri, "A new time-dependent shortest path algorithm for multimodal transportation network", *Procedia Computer Science*, 2017 vol. 109, pp. 692–697. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.379>
- [19] M. Hedderich, U. Fastenrath, G. Isaac and K. Bogenberger, "Adapting the A* algorithm for park spot routing", *Transportation Research Procedia*, 2017 vol. 27, pp. 1066–1073. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.013>
- [20] R. Singh, C. Dutta, N. Singhal and T. Choudhury, "An Improved Vehicle Parking Mechanism to reduce Parking Space Searching Time using Firefly Algorithm and Feed Forward Back Propagation Method", *Procedia Computer Science*, 2019 vol. 167, pp. 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.394>
- [21] J. Tang, Y. Song, H. J. Miller and X. Zhou, (2016). "Estimating the most likely space-time paths, dwell times and path uncertainties from vehicle trajectory data: A time geographic method", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2016 vol. 66, pp. 176–194. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.08.014>
- [22] Y. Nie, K. Xu, H. Chen and L. Peng, "Crowd-parking: A New Idea of Parking Guidance Based on Crowdsourcing of Parking Location Information from Automobiles", *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2019 vol. Oct, pp. 2779–2784. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927134>
- [23] L. Mannini, E. Cipriani, U. Crisalli, A. Gemma and G. Vaccaro, "On-Street Parking Search Time Estimation Using FCD Data", *Transportation Research Procedia*, 2017 vol. 27, pp. 929–936. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.149>
- [24] A. Okoso, K. Otaki and T. Nishi, "Multi-Agent Path Finding with Priority for Cooperative Automated Valet Parking", *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, ITSC 2019*, pp. 2135–2140. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2019.8917112>
- [25] Yujin and G. Xiaoxue, "Optimal Route Planning of Parking Lot Based on Dijkstra Algorithm", *Proceedings - 2017 International Conference on Robots and Intelligent System, ICRIS 2017*, pp. 221–224. <https://doi.org/10.1109/ICRIS.2017.62>
- [26] T. Shen, K. Hua and J. Liu, "Optimized Public Parking Location Modelling for Green Intelligent Transportation System Using Genetic Algorithms", *IEEE Access*, 2019 vol. 7, pp. 176870–176883. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957803>
- [27] T. Nakazato and T. Namerikawa, "Parking Lot Allocation Based on Matching Theory using Prediction-based Optimal Vehicle Routing", *International Conference on Control, Automation and Systems, 2019-Octob (Iccas)*, pp. 1004–1009. <https://doi.org/10.23919/ICCAS47443.2019.8971616>
- [28] X. Wang, H. Shi and C. Zhang, "Path Planning for Intelligent Parking System Based on Improved Ant Colony Optimization", *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 65267–65273. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2984802>
- [29] L. Peng and H. Li, "Searching parking spaces in urban environments based on non-stationary poisson process analysis", *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2016*, pp. 1951–1956. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795871>
- [30] J. Bischoff and K. Nagel, "Integrating explicit parking search into a transport simulation", *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 109, pp. 881–886. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.414> [BMW]
- [31] J. Arellano-Verdejo and E. Alba, "Optimal allocation of public parking slots using evolutionary Algorithms", *Proceedings - 2016 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, IEEE INCoS 2016*, pp. 222–228. <https://doi.org/10.1109/INCoS.2016.21>
- [32] W. Xu, "Shortest Path Searching for Logistics Based on simulated annealing algorithm", *Springer Nature Singapore*, 2020, AISC vol. 194, pp. 3–10. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3308-2_1
- [33] D. J. Sun, X. Y. Ni and L. H. Zhang, (2015). "A discriminated release strategy for parking variable message sign display problem using agent-based simulation", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, vol. 17(1), pp. 38–47. <https://doi.org/10.1109/ITITS.2015.2445929>
- [34] I. Aydin, M. Karakose and E. Karakose, "A navigation and reservation based smart parking platform using genetic optimization for smart cities", In *ICSG 2017 - 5th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair 2017*, pp. 120–124. <https://doi.org/10.1109/SGCF.2017.7947615>

Anexo B. Datos obtenidos de la simulación

Tabla B1. Tratamiento 1- 0% de vehículos en búsqueda de estacionamiento con el método propuesto (GRUPO CONTROL) (extracto).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
id	depart	departLane	arrival	arrivalLane	duration	routeLength	waitingTime	waitingCount	stopTime	timeLoss	speedFactor	CO_abs	CO2_abs	HC_abs	PMX_abs	NOx_abs	fuel_abs
2	C0	3 JHerrera#2_0	-1		1317	1251.42	41	1	1137	85.09	1.01	13344.92339	510274.9961	72.738561	9.997306	216.145889	219.34847
3	C10	18 RoaBarcena#2_0	-1		1302	1095.63	28	4	1142	67.31	0.91	9610.077626	407301.9616	53.34744	7.879645	172.259616	175.083373
4	C101	104 Salonio_0	300	AvCamacho#2_1	196	1375.9	39	3	0	86.08	0.96	11707.77703	507513.1338	65.210309	9.489767	212.03962	218.160607
5	C103	106 DrLucio#4_0	-1		1214	921.31	41	3	1046	101.03	1.04	12429.2952	437107.4296	66.918664	8.984209	188.596415	187.896562
6	C104	107 DrLucio#0_0	-1		1213	1146.55	202	20	712	404.41	0.88	40790.10068	911804.0674	207.06349	20.01107	401.348274	391.962161
7	C105	108 BenitoJuarez#0_0	194	RoaBarcena#0_0	86	521.43	23	2	0	49.79	1.1	6341.082659	245185.0247	34.683624	4.997272	104.950649	105.395695
8	C106	109 Enriquez#4_0	-1		1211	691.24	27	2	1114	50.86	1.13	7696.082246	303535.5657	42.193463	6.148136	129.540338	130.478301
9	C108	111 GZamora#1_0	282	NicolasBravo#1_0	171	1103.91	49	2	0	84.25	0.95	12170.71437	435644.5829	65.643988	8.516454	184.136079	187.268325
10	C109	115 Altamirano#4_0	187	BenitoJuarez#6_0	72	669.51	2	1	0	22.92	1.01	3765.935186	211856.1794	22.162303	4.022739	88.851641	91.067872
11	C111	114 GZamora#0_0	-1		1206	819.29	48	3	1058	86.75	0.97	11593.0521	381632.2201	61.775905	7.786569	163.705882	164.050573
12	C112	120 Allenede#1_0	-1		1200	1590.13	122	9	779	301.89	0.99	27332.56607	791032.662	142.99766	16.255634	340.75331	340.040329
13	C113	122 FJClavijero#2_0	202	SebastianCam#1_0	80	857.75	0	0	0	17.9	1.02	3673.437063	237849.1592	22.32091	4.213372	97.259006	102.241182
14	C114	123 Altamirano#4_0	324	Zaragoza#4_0	201	1121.58	74	2	0	117.91	1.01	16817.90745	521377.9402	88.765218	10.439485	221.911387	224.123638
15	C115	116 Allenede#3_0	507	AvCamacho#3_0	391	1181.87	188	8	0	293.1	0.97	34597.66357	800596.6573	176.259669	17.317341	350.365422	344.156215
16	C116	157 IgnacioAldama#0_0	324	JoseAzqueta#1_0	167	1490.11	7	1	0	59.16	1.04	8810.960046	498534.2253	51.893457	9.320894	208.134889	214.29863
17	C118	130 UrsuloGalvan#1_0	-1		1190	1315.52	162	9	782	322.47	1.14	35241.1376	876285.9925	181.037343	19.154786	384.453601	376.690613
18	C119	169 IgnacioAldama#0_0	-1		1151	351.75	1	1	1113	14.2	1.11	2228.947365	132343.8174	13.242199	2.505106	55.323778	56.888834
19	C120	123 DrPedroRendon_0	-1		1197	992.44	70	3	1010	107.91	0.93	15436.29518	480660.881	81.584188	9.809896	206.131983	206.620308
20	C122	124 AvCamacho#6_0	301	NicolasBravo#1_0	177	1074.36	53	2	0	77.29	0.88	12383.72321	400675.7969	65.741543	7.784822	169.441626	172.237521
21	C123	124 AvCamacho#8_0	-1		1194	1100.55	65	4	999	114.93	0.99	14371.66024	463052.547	76.319771	9.330836	197.476496	199.050855
22	C126	136 Allenede#2_0	-1		1184	1049.73	149	8	797	305.86	0.98	32872.82346	771275.2761	167.731117	16.777892	338.489286	331.551121
23	C127	127 FJClavijero#0_0	-1		1193	973.74	102	7	970	141.78	0.88	19008.52735	491742.4547	98.062752	10.276497	212.172299	211.386325
24	C129	132 BenitoJuarez#0_0	-1		1188	866.59	52	4	1004	92.75	0.71	12672.64814	383514.6672	66.588832	7.280758	161.729166	164.861403
25	C13	16 AlonsoGuido#0_0	332	Allenede#4_0	316	1054.09	166	8	0	237.02	1	30664.36524	748252.5318	157.188227	16.200742	326.966662	321.653409
26	C130	130 GZamora#1_0	454	LeandroValle_0	324	938.94	191	5	0	251.55	0.96	34124.68474	756856.9538	173.166604	17.000507	334.939263	325.353912
27	C131	137 CPuerto#5_0	287	AvCamacho#1_1	150	1089.22	25	2	0	87.94	1.3	9204.392816	404803.8281	51.457772	7.832058	170.83232	174.009263
28	C132	135 Rojas_0	272	MiguelHidalgo#1_0	137	1101.22	18	3	0	56.81	1.01	7833.495117	362575.7886	44.214948	7.012477	152.803476	155.856756
29	C133	136 Insurgentes#0_0	-1		1184	1338.33	121	4	876	189.87	0.84	26290.75974	714046.9695	136.389607	14.638108	307.597762	306.947989
30	C135	145 RoaBarcena#3_0	263	BenitoJuarez#6_0	118	815.09	9	2	0	36.94	0.75	5128.999108	231915.0184	28.736332	4.049274	95.521828	99.691651
31	C138	141 Altamirano#0_0	282	IgnacioAldama#1_0	141	1623.48	0	0	0	35.43	1.13	6853.157275	480382.5228	42.462684	8.700522	196.599946	206.495217
32	C139	146 BenitoJuarez#2_0	554	JHerrera#3_0	408	768.41	164	13	0	352.41	1.04	36167.45078	784646.034	183.094766	17.694422	348.7249	337.300206
33	C14	17 Salonio_0	367	JHerrera#3_0	350	1358.02	142	8	0	251.14	1.03	30731.36159	840601.2029	159.695694	17.962121	366.066912	361.348739
34	C140	143 MiguelBarragan#0_0	344	AvCamacho#3_0	201	1169.98	70	3	0	102.2	0.96	14249.72033	436246.6288	75.051761	8.465007	183.837964	187.529
35	C141	144 JHerrera#1_0	-1		1176	1276.98	165	16	740	352.22	1.13	33538.79894	860707.1941	172.963351	18.676041	377.275099	369.99297
36	C142	145 FJClavijero#2_0	202	UrsuloGalvan#2_0	57	602.16	0	0	0	10.38	0.96	2283.245231	151441.5904	13.937181	2.555017	61.077619	65.098413
37	C143	146 Rojas_0	541	Allenede#4_0	395	864.71	185	14	0	328.51	0.98	35612.6194	782062.3763	180.530438	17.619019	346.626551	336.189295
38	C144	147 Enriquez#2_0	-1		1173	495.96	49	3	1064	68.59	0.92	10102.20974	282207.4525	52.646571	6.018147	122.927115	121.312175
39	C145	153 -691374150#1_0	629	Revolucion#3_0	476	1814.36	152	14	0	336.13	0.96	33123.38046	915038.6298	172.291351	19.140941	396.34604	393.34741
40	C146	154 JHerrera#2_0	-1		1166	916.18	151	13	781	330.65	1.26	31528.01484	745690.5805	161.090721	16.519392	329.121021	320.552264
41	C147	150 NicolasBravo#0_0	309	IgnacioAldama#1_0	159	1036.68	36	4	0	81.24	0.97	9480.400429	387044.7527	52.27524	7.527144	163.387762	166.375876

Tabla B2. Tratamiento 2- 20% de vehículos en búsqueda de estacionamiento con el método propuesto (extracto).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Id	depart	departLane	departPos	departSpeed	departDelay	arrival	arrivalLane	arrivalPos	arrivalSpeed	duration	routeLength	waltingTime	waltingCount	stopTime	timeLoss	rerouteNo	devices	vType	speedFactor	vaporized	CO_abs
2	C0	3	JHerrera#2_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1317	994.74	39	1	1172	70.54	0	tripinfo_C0 emissions_C0	DEFAULT_VEHTYPE	1.01		10773.72428
3	C10	18	RoaBarcelona#2_0	5.1	0	8	-1		-1	-1	1302	869.35	14	2	1186	43.22	0	tripinfo_C10 emissions_C10	DEFAULT_VEHTYPE	0.91		5861.032716
4	C101	104	Salonico_0	5.1	0	3	306	AvCamacho#2_0	183.2	9.45	202	1375.9	35	5	0	92.71	0	tripinfo_C101 emissions_C101	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		11380.81664
5	C103	106	DrLucio#4_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1214	914.79	31	4	1067	80.34	0	tripinfo_C103 emissions_C103	DEFAULT_VEHTYPE	1.04		8666.975141
6	C104	107	DrLucio#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1213	1147.6	170	14	759	358.1	0	tripinfo_C104 emissions_C104	DEFAULT_VEHTYPE	0.88		33647.0389
7	C105	108	BenitoJuarez#0_0	5.1	0	3	194	RoaBarcelona#0_0	86.7	14.45	89	521.43	16	2	0	49.42	0	tripinfo_C105 emissions_C105	DEFAULT_VEHTYPE	1.1		5787.137518
8	C106	109	Enriquez#4_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1211	691.6	25	1	1118	46.61	0	tripinfo_C106 emissions_C106	DEFAULT_VEHTYPE	1.13		7508.035458
9	C108	111	GZamora#1_0	5.1	0	3	282	NicolasBravo#1_0	59.1	9.47	171	1103.91	39	2	0	84.16	0	tripinfo_C108 emissions_C108	DEFAULT_VEHTYPE	0.95		12045.71068
10	C109	117	Altamirano#4_0	5.1	0	8	193	BenitoJuarez#6_0	97.5	14.05	76	669.51	1	1	0	26.86	0	tripinfo_C109 emissions_C109	DEFAULT_VEHTYPE	1.01		4182.248964
11	C111	114	GZamora#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1206	819.29	43	5	1050	94.8	0	tripinfo_C111 emissions_C111	DEFAULT_VEHTYPE	0.97		10372.64416
12	C112	119	Allende#1_0	5.1	0	7	-1		-1	-1	1201	1590.12	90	10	802	280.66	0	tripinfo_C112 emissions_C112	DEFAULT_VEHTYPE	0.99		25663.95194
13	C113	121	FJClavijero#2_0	5.1	0	8	200	SebastianCam#1_0	258	13.54	79	857.75	0	0	0	17.78	0	tripinfo_C113 emissions_C113	DEFAULT_VEHTYPE	1.02		3719.444641
14	C114	123	Altamirano#4_0	5.1	0	9	327	Zaragoza#4_0	46.8	12.76	204	1121.58	71	2	0	121.42	0	tripinfo_C114 emissions_C114	DEFAULT_VEHTYPE	1.01		16910.70922
15	C115	118	Allende#3_0	5.1	0	3	507	AvCamacho#3_0	290.7	10.14	389	1181.87	165	9	0	291.25	0	tripinfo_C115 emissions_C115	DEFAULT_VEHTYPE	0.97		31884.19987
16	C116	148	IgnacioAldama#0_0	5.1	0	32	325	JoseAzueta#1_0	140	14.38	177	1490.11	7	2	0	69.75	0	tripinfo_C116 emissions_C116	DEFAULT_VEHTYPE	1.04		8706.744956
17	C118	127	UrsuloGalvan#1_0	5.1	0	9	-1		-1	-1	1193	1316.14	188	12	786	320.92	0	tripinfo_C118 emissions_C118	DEFAULT_VEHTYPE	1.14		37736.78701
18	C119	162	IgnacioAldama#0_0	5.1	0	43	-1		-1	-1	1158	351.73	0	0	1116	18.23	0	tripinfo_C119 emissions_C119	DEFAULT_VEHTYPE	1.11	end	2712.66269
19	C120	123	DrPedroRendon_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1197	993.92	67	2	1010	107.87	0	tripinfo_C120 emissions_C120	DEFAULT_VEHTYPE	0.93		15576.63648
20	C122	125	AvCamacho#6_0	5.1	0	3	293	NicolasBravo#1_0	59.1	11.95	168	1074.36	41	2	0	68.48	0	tripinfo_C122 emissions_C122	DEFAULT_VEHTYPE	0.88		9836.649058
21	C123	124	AvCamacho#8_0	5.1	0	1	-1		-1	-1	1196	1101.05	51	6	1000	114.86	0	tripinfo_C123 emissions_C123	DEFAULT_VEHTYPE	0.99		12444.8436
22	C126	139	Allende#2_0	5.1	0	13	-1		-1	-1	1181	1049.36	148	11	803	296.82	0	tripinfo_C126 emissions_C126	DEFAULT_VEHTYPE	0.98		30027.36839
23	C127	127	FJClavijero#0_0	5.1	0	0	-1		-1	-1	1193	974.84	92	6	978	133.23	0	tripinfo_C127 emissions_C127	DEFAULT_VEHTYPE	0.88		15254.83794
24	C129	132	BenitoJuarez#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1188	876.53	52	2	997	98.53	0	tripinfo_C129 emissions_C129	DEFAULT_VEHTYPE	0.71		14230.63863
25	C13	16	AlonsoGuido#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1304	936.02	53	3	1141	92.59	0	tripinfo_C13 emissions_C13	DEFAULT_VEHTYPE	1		13870.11515
26	C130	130	GZamora#1_0	5.1	0	0	454	LeandroValle_0	82.1	6.18	324	938.94	177	5	0	251.6	0	tripinfo_C130 emissions_C130	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		22151.62813
27	C131	134	C Puertoll#5_0	5.1	0	3	286	AvCamacho#1_1	68	17.04	152	1089.22	26	2	0	89.36	0	tripinfo_C131 emissions_C131	DEFAULT_VEHTYPE	1.3		9531.73757
28	C132	136	Rojas_0	5.1	0	4	330	MiguelHidalgo#1_0	36.4	13.82	194	1105.04	67	4	0	111.71	0	tripinfo_C132 emissions_C132	DEFAULT_VEHTYPE	1.01		14198.14398
29	C133	136	Insurgentes#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1184	1338.33	114	8	885	180.77	0	tripinfo_C133 emissions_C133	DEFAULT_VEHTYPE	0.84		23329.79924
30	C135	145	RoaBarcelona#3_0	5.1	0	10	267	BenitoJuarez#6_0	97.5	10.3	122	835.05	8	2	0	41.52	0	tripinfo_C135 emissions_C135	DEFAULT_VEHTYPE	0.75		6136.101506
31	C138	141	Altamirano#0_0	5.1	0	3	315	IgnacioAldama#1_0	210.9	14.86	174	1623.48	10	3	0	68.87	0	tripinfo_C138 emissions_C138	DEFAULT_VEHTYPE	1.13		8738.324638
32	C139	146	BenitoJuarez#2_0	5.1	0	7	516	JHerrera#3_0	72.5	13.4	370	788.41	144	9	0	314.55	0	tripinfo_C139 emissions_C139	DEFAULT_VEHTYPE	1.04		32081.12447
33	C14	17	Salonico_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1303	1030.44	26	3	1156	71.53	0	tripinfo_C14 emissions_C14	DEFAULT_VEHTYPE	1.03		9088.463978
34	C140	143	MiguelBarragan#0_0	5.1	0	3	325	AvCamacho#3_0	260.7	10.21	182	1169.98	53	2	0	83.46	0	tripinfo_C140 emissions_C140	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		12524.85773
35	C141	144	JHerrera#1_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1176	1276.98	163	13	770	322.16	0	tripinfo_C141 emissions_C141	DEFAULT_VEHTYPE	1.13		25306.78876
36	C142	145	FJClavijero#2_0	5.1	0	3	202	UrsuloGalvan#2_0	80	12.73	57	602.16	0	0	0	10.43	0	tripinfo_C142 emissions_C142	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		2526.477685
37	C143	146	Rojas_0	5.1	0	3	475	Allende#1_0	103.2	13.18	329	864.71	131	13	0	262.44	0	tripinfo_C143 emissions_C143	DEFAULT_VEHTYPE	0.98		25478.48208
38	C144	147	Enriquez#2_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1173	497.28	51	2	1064	68.57	0	tripinfo_C144 emissions_C144	DEFAULT_VEHTYPE	0.92		10285.79612
39	C145	148	-891374150#1_0	5.1	0	3	614	Revolucion#3_0	289.8	12.67	466	1814.36	169	9	0	328.54	0	tripinfo_C145 emissions_C145	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		36522.10855
40	C146	154	JHerrera#2_0	5.1	0	8	-1		-1	-1	1166	916.17	159	15	794	317.94	0	tripinfo_C146 emissions_C146	DEFAULT_VEHTYPE	1.26	end	31182.901
41	C147	150	NicolasBravo#0_0	5.1	0	3	304	IgnacioAldama#1_0	210.9	13.24	154	1036.68	36	4	0	76.85	0	tripinfo_C147 emissions_C147	DEFAULT_VEHTYPE	0.97		8446.328992

Tabla B3. Tratamiento 3- 40% de vehículos en búsqueda de estacionamiento con el método propuesto (extracto).

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
id	depart	departLane	departPos	departSpeed	departDelay	arrival	arrivalLane	arrivalPos	arrivalSpeed	duration	routeLength	waitingTime	waitingCount	stopTime	timeLoss	rerouteNo	devices	vType	speedFactor	vaporized	CO	abs
2	C0	3 JHerrera#2_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1317	995.2	39	1	1170	71.97	0	tripinfo_C0 emissions_C0	DEFAULT_VEHTYPE	1.01		10839.18618	
3	C10	18 RoaBarcena#2_0	5.1	0	8	-1		-1	-1	1302	869.36	14	2	1186	43.21	0	tripinfo_C10 emissions_C10	DEFAULT_VEHTYPE	0.91		6068.493228	
4	C101	104 Salonic_0	5.1	0	3	306 AvCamacho#2_0	183.2	10.17	202	1375.9	33	3	0	91.79	0	tripinfo_C101 emissions_C101	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		11514.74003		
5	C103	106 DrLucio#4_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1214	918.99	34	3	1064	83.61	0	tripinfo_C103 emissions_C103	DEFAULT_VEHTYPE	1.04		9679.445915	
6	C104	107 DrLucio#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1213	1147.91	220	15	720	396.5	0	tripinfo_C104 emissions_C104	DEFAULT_VEHTYPE	0.88		42946.37129	
7	C105	108 BenitoJuarez#0_0	5.1	0	3	187 RoaBarcena#0_0	86.7	14.07	79	521.43	4	2	0	42.87	0	tripinfo_C105 emissions_C105	DEFAULT_VEHTYPE	1.1		5050.833739		
8	C106	109 Enriquez#4_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1211	691.59	21	1	1114	49.91	0	tripinfo_C106 emissions_C106	DEFAULT_VEHTYPE	1.13		7128.573601	
9	C108	111 GZamora#1_0	5.1	0	3	283 NicolasBravo#1_0	59.1	10.31	172	1103.51	36	2	0	84.94	0	tripinfo_C108 emissions_C108	DEFAULT_VEHTYPE	0.95		12331.06279		
10	C109	117 Altamirano#4_0	5.1	0	8	187 BenitoJuarez#6_0	97.5	13.51	70	669.51	0	0	0	20.25	0	tripinfo_C109 emissions_C109	DEFAULT_VEHTYPE	1.01		3997.050799		
11	C111	114 GZamora#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1206	819.31	48	3	1057	87.49	0	tripinfo_C111 emissions_C111	DEFAULT_VEHTYPE	0.97		10935.90775	
12	C112	119 Allenede#1_0	5.1	0	7	-1		-1	-1	1201	1590.11	141	10	771	311.41	0	tripinfo_C112 emissions_C112	DEFAULT_VEHTYPE	0.99		31250.48034	
13	C113	119 FIClavijero#2_0	5.1	0	6	208 SebastianCam#1_0	258	13.52	89	853.93	0	0	0	28.12	0	tripinfo_C113 emissions_C113	DEFAULT_VEHTYPE	1.02		4893.191382		
14	C114	125 Altamirano#4_0	5.1	0	11	320 Zaragoza#1_0	46.8	13.9	195	1125.34	70	3	0	112.42	0	tripinfo_C114 emissions_C114	DEFAULT_VEHTYPE	1.01		15385.19567		
15	C115	118 Allenede#3_0	5.1	0	3	506 AvCamacho#3_0	260.7	10.23	388	1181.87	188	8	0	289.74	0	tripinfo_C115 emissions_C115	DEFAULT_VEHTYPE	0.97		35224.06675		
16	C116	119 IgnacioAldama#0_0	5.1	0	3	327 JoseAzuela#1_0	140	13.36	208	1490.11	39	3	0	101.75	0	tripinfo_C116 emissions_C116	DEFAULT_VEHTYPE	1.04		13230.64532		
17	C118	131 UrsuloGalvana#1_0	5.1	0	13	-1		-1	-1	1189	1316.12	162	13	791	312.46	0	tripinfo_C118 emissions_C118	DEFAULT_VEHTYPE	1.14		33017.10667	
18	C119	148 IgnacioAldama#0_0	5.1	0	29	-1		-1	-1	1172	351.74	0	0	1133	15.36	0	tripinfo_C119 emissions_C119	DEFAULT_VEHTYPE	1.11 end		2204.185971	
19	C120	123 DrPedroRendon_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1197	994.92	70	4	1004	114	0	tripinfo_C120 emissions_C120	DEFAULT_VEHTYPE	0.93		15505.02192	
20	C122	125 AvCamacho#6_0	5.1	0	3	290 NicolasBravo#1_0	59.1	11.33	165	1074.36	39	2	0	65.15	0	tripinfo_C122 emissions_C122	DEFAULT_VEHTYPE	0.88		10023.66151		
21	C123	124 AvCamacho#8_0	5.1	0	1	-1		-1	-1	1196	1101.04	73	6	981	132.79	0	tripinfo_C123 emissions_C123	DEFAULT_VEHTYPE	0.99		13785.24951	
22	C126	129 Allenede#2_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1191	1049.36	195	6	814	296.29	0	tripinfo_C126 emissions_C126	DEFAULT_VEHTYPE	0.98		35233.08133	
23	C127	127 FIClavijero#0_0	5.1	0	0	-1		-1	-1	1193	975.13	88	3	988	122.9	0	tripinfo_C127 emissions_C127	DEFAULT_VEHTYPE	0.88		17105.04727	
24	C129	132 BenitoJuarez#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1188	876.68	53	4	998	97.27	0	tripinfo_C129 emissions_C129	DEFAULT_VEHTYPE	0.71		12800.43739	
25	C13	16 AlonsoGuido#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1304	937.69	46	3	1147	85.71	0	tripinfo_C13 emissions_C13	DEFAULT_VEHTYPE	1		12806.66946	
26	C130	132 GZamora#1_0	5.1	0	2	453 LeandroValle_0	82.1	5.41	321	938.94	176	6	0	248.96	0	tripinfo_C130 emissions_C130	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		33385.47599		
27	C131	134 CPuerto#5_0	5.1	0	3	289 AvCamacho#1_1	68	15.04	155	1089.22	25	2	0	92.81	0	tripinfo_C131 emissions_C131	DEFAULT_VEHTYPE	1.3		10370.196		
28	C132	136 Rojas_0	5.1	0	4	270 MiguelHidalgo#1_0	36.4	13.46	134	1101.22	21	2	0	54.16	0	tripinfo_C132 emissions_C132	DEFAULT_VEHTYPE	1.01		7851.175213		
29	C133	136 Insurgentes#0_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1184	1347.07	91	8	897	168.11	0	tripinfo_C133 emissions_C133	DEFAULT_VEHTYPE	0.84		20296.31183	
30	C135	148 RoaBarcena#3_0	5.1	0	13	270 BenitoJuarez#6_0	97.5	9.72	122	815.09	12	2	0	41.96	0	tripinfo_C135 emissions_C135	DEFAULT_VEHTYPE	0.75		5563.678724		
31	C138	141 Altamirano#0_0	5.1	0	3	316 IgnacioAldama#1_0	210.9	14.39	175	1623.48	11	4	0	70.07	0	tripinfo_C138 emissions_C138	DEFAULT_VEHTYPE	1.13		9153.882413		
32	C139	146 BenitoJuarez#2_0	5.1	0	7	576 JHerrera#3_0	72.5	13.34	430	768.41	193	15	0	374.8	0	tripinfo_C139 emissions_C139	DEFAULT_VEHTYPE	1.04		35800.23564		
33	C14	17 Salonic_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1303	1030.43	25	2	1159	68.59	0	tripinfo_C14 emissions_C14	DEFAULT_VEHTYPE	1.03		8794.061196	
34	C140	143 MiguelBarragan#0_0	5.1	0	3	325 AvCamacho#3_0	260.7	10.12	182	1169.98	57	2	0	82.37	0	tripinfo_C140 emissions_C140	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		12079.04619		
35	C141	144 JHerrera#1_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1176	1276.99	121	9	822	269.65	0	tripinfo_C141 emissions_C141	DEFAULT_VEHTYPE	1.13		27415.11479	
36	C142	145 FIClavijero#2_0	5.1	0	3	202 UrsuloGalvan#2_0	80	12.64	57	602.16	0	0	0	10.32	0	tripinfo_C142 emissions_C142	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		2204.369766		
37	C143	146 Rojas_0	5.1	0	3	500 Allenede#4_0	103.2	12.68	354	864.71	188	11	0	286.73	0	tripinfo_C143 emissions_C143	DEFAULT_VEHTYPE	0.98		32801.67156		
38	C144	147 Enriquez#2_0	5.1	0	3	-1		-1	-1	1173	497.71	48	2	1062	70.46	0	tripinfo_C144 emissions_C144	DEFAULT_VEHTYPE	0.92		10197.23083	
39	C145	150 -691374150#1_0	5.1	0	5	617 Revolucion#3_0	289.8	12.44	467	1814.36	185	11	0	328.16	0	tripinfo_C145 emissions_C145	DEFAULT_VEHTYPE	0.96		38290.45094		
40	C146	153 JHerrera#2_0	5.1	0	7	-1		-1	-1	1167	916.57	171	14	793	319.65	0	tripinfo_C146 emissions_C146	DEFAULT_VEHTYPE	1.26 end		30074.34134	
41	C147	150 NicolasBravo#0_0	5.1	0	3	315 IgnacioAldama#1_0	210.9	12.7	165	1036.68	40	4	0	87.35	0	tripinfo_C147 emissions_C147	DEFAULT_VEHTYPE	0.97		9689.742782		

Tabla B4. Tratamiento 4- 60% de vehículos en búsqueda de estacionamiento con el método propuesto (extracto).

id	depart	departLane	departDelay	arrival	arrivalLane	arrivalPos	arrivalSpeed	duration	routeLength	waitingTime	waitingCount	stopTime	timeLoss	speedFactor	CO_abs	CO2_abs	HC_abs	PMx_abs	NOx_abs	fuel_abs	
C0	3	JHerrera#2_0		3	-1		-1	1317	995.19		39	1	1171	70.97	1.01	10787.52937	383206.4632	58.100715	7.591038	162.503855	164.72694
C10	18	RoaBarcena#2_0		8	-1		-1	1302	869.35		14	2	1186	43.21	0.91	5944.851197	278929.7621	33.624157	5.22158	116.677637	119.900864
C101	104	Salonio_0		3	-1		-1	1216	1369.77		41	4	1015	94.3	0.96	12009.77629	493477.0545	66.25259	9.341642	206.689689	212.127412
C103	106	DrLucio#4_0		3	-1		-1	1214	643.38		32	3	1084	83.48	1.04	8981.535852	325098.598	48.567968	6.608159	139.800307	139.747933
C104	107	DrLucio#0_0		3	-1		-1	1213	612.04		10	2	1129	33.07	0.88	3558.616603	178254.3492	20.368033	3.168921	73.45801	76.624542
C105	108	BenitoJuarez#0_0		3	-1		-1	1212	79.13		1	1	1201	5.81	1.1	839.46657	39708.52769	4.76406	0.793667	17.030599	17.069032
C106	109	Enriquez#4_0		3	-1		-1	1211	406.74		0	0	1170	14.15	1.13	1852.713824	116950.1483	11.137734	1.98144	47.158827	50.272047
C108	111	GZamora#1_0		3	-1		-1	1209	384.05		0	0	1165	13.61	0.95	2428.399876	134982.9261	14.250456	2.572004	56.855514	58.023354
C109	117	Altamirano#4_0		8	-1		-1	1203	585.74		0	0	1138	21.03	1.01	3494.844275	191331.4167	20.426028	3.567645	79.711185	82.245349
C111	114	GZamora#0_0		3	-1		-1	1206	791.8		38	2	1083	62.47	0.97	8831.218152	304674.5037	47.374587	6.044344	129.108104	130.959046
C112	119	Allende#1_0		7	-1		-1	1201	2346.82		176	12	692	332.05	0.99	39643.44386	1176860.216	208.173478	24.410031	507.262724	505.894488
C113	119	FJClavijero#2_0		6	210	SebastianCam#1_0	258	13.91	91	857.75	0	0	29.46	1.02	4818.159449	267150.1569	28.256119	5.053239	111.935468	114.836465	
C114	125	Altamirano#4_0		11	-1		-1	1195	607.01		4	1	1108	40.82	1.01	4687.530541	223280.0709	26.603345	4.256057	94.212064	95.979054
C115	118	Allende#3_0		3	-1		-1	1202	310.25		26	1	1137	41.09	0.97	6140.77006	186044.5758	32.35665	3.95105	80.902217	79.97434
C116	119	IgnacioAldama#0_0		3	-1		-1	1201	1032.33		30	2	1045	81.84	1.04	10107.99491	423128.6843	56.021609	8.383957	180.238526	181.886473
C118	131	UrsuloGalvan#1_0		13	-1		-1	1189	1200.39		200	16	736	374.04	1.14	35772.42883	871646.256	183.328852	18.992893	382.281462	374.696805
C119	148	IgnacioAldama#0_0		29	-1		-1	1172	462.41		0	0	1123	17.14	1.11	2659.259743	155230.8635	15.798799	3.020549	65.588056	66.726882
C120	123	DrPedroRendon_0		3	-1		-1	1197	995.42		70	4	1003	114.79	0.93	14950.92677	458618.3061	78.871889	9.499591	197.866514	197.144877
C122	125	AvCamacho#6_0		3	-1		-1	1195	1937.62		126	4	840	181.26	0.88	27320.08506	807082.3607	143.236346	16.021084	343.297942	346.940047
C123	124	AvCamacho#5_0		1	-1		-1	1196	624.95		72	6	1025	124.28	0.99	15767.95724	424347.7097	81.770314	9.118012	185.382102	182.41421
C126	129	Allende#2_0		3	-1		-1	1191	1049.37		191	7	810	300.73	0.98	34579.70229	801457.8409	176.257666	17.60193	352.020947	344.526008
C127	127	FJClavijero#0_0		0	-1		-1	1193	640.81		0	0	1120	17.74	0.88	3435.218715	190433.6436	20.11256	3.447308	78.958231	81.859526
C129	132	BenitoJuarez#0_0		3	-1		-1	1188	875.17		14	2	1060	37.34	0.71	5676.745387	245890.3501	31.516688	4.131228	100.199544	105.699582
C13	16	AlonsoGuido#0_0		3	-1		-1	1304	937.68		46	3	1147	86.28	1	12800.07614	454897.5769	69.025083	9.263391	194.991995	195.54399
C130	132	GZamora#1_0		2	-1		-1	1188	488.12		44	3	1075	76.14	0.96	9152.261094	288341.9185	48.47592	6.032052	125.026145	123.948349
C131	134	CPuerto#5_0		3	-1		-1	1186	1267		36	2	1010	103.05	1.3	11523.56865	474594.2533	63.666756	9.291233	200.70349	204.009915
C132	136	Rojas_0		4	333	MiguelHidalgo#1_0	36.4	13.33	197	1105.04	61	6	0	115.34	1.01	14040.51287	485216.2426	75.318683	9.745459	206.837288	208.577446
C133	136	Insurgentes#0_0		3	-1		-1	1184	608.16		17	2	1089	40.97	0.84	5838.143421	231231.2669	31.9936	4.365137	97.162477	99.397871
C135	148	RoaBarcena#3_0		13	-1		-1	1172	732.22		5	2	1057	42.57	0.75	5723.201142	237802.7007	31.5902	4.301226	99.111358	102.222695
C138	141	Altamirano#0_0		3	-1		-1	1179	1647.17		6	1	1010	60.85	1.13	8650.838928	529563.5975	51.91507	10.006917	220.848907	227.636157
C139	146	BenitoJuarez#2_0		7	387	JHerrera#3_0	72.5	13.59	241	768.41	89	6	0	185.26	1.04	20060.19159	524825.8526	103.659868	11.184969	228.820383	225.607325
C14	17	Salonio_0		3	-1		-1	1303	1030.43		25	2	1159	68.53	1.03	8713.498789	396883.1907	49.032534	7.636422	167.156131	170.604296
C140	143	MiguelBarragan#0_0		3	344	AvCamacho#3_0	260.7	10.43	201	1169.98	71	2	0	101.51	0.96	15684.49483	472763.1768	82.471237	9.408098	200.909915	203.226171
C141	144	JHerrera#1_0		3	-1		-1	1176	838.36		230	13	748	371.84	1.13	37429.9673	815182.0754	189.568677	18.376007	361.825138	350.426836
C142	145	FJClavijero#2_0		3	201	UrsuloGalvan#2_0	80	13.07	56	602.16	0	0	10.45	0.96	2429.498213	155536.6159	14.714255	2.751961	63.617244	66.858563	
C143	146	Rojas_0		3	-1		-1	1174	251.31		16	3	1110	45.08	0.98	4297.822163	138356.7507	22.822528	2.829977	59.672136	59.474853
C144	147	Enriquez#2_0		3	-1		-1	1173	498.59		52	1	1061	71.82	0.92	10728.07037	281489.4251	55.457067	5.978393	122.310833	121.004127
C145	151	-691374150#1_0		6	625	Revolucion#3_0	289.8	12.78	474	1814.36	174	10	0	333.64	0.96	36815.41544	985432.3602	190.73053	20.605887	425.94554	423.608622
C146	154	JHerrera#2_0		8	-1		-1	1166	783.35		215	14	743	375.43	1.26	35230.94444	767849.8379	178.422258	17.324475	340.512799	330.079855
C147	150	NicolasBravo#0_0		3	315	IgnacioAldama#1_0	210.9	12.92	165	1036.68	36	4	0	87.29	0.97	9810.401325	380108.8194	53.592181	7.344112	160.050077	163.394892

Tabla B5. Tratamiento 5- 80% de vehículos en búsqueda de estacionamiento con el método propuesto (extracto).

id	depart	departLane	departDelay	arrival	arrivalLane	arrivalPos	arrivalSpeed	duration	routeLength	waitingTime	waitingCount	stopTime	timeLoss	rerouteNo	CO_abs	CO2_abs	HC_abs	PMx_abs	NOx_abs	fuel_abs
C0		3 JHerrera#2_0	3	-1		-1	-1	1317	995.19	39	1	1171	70.97	0	10787.52937	383206.4632	58.100715	7.591038	162.503855	164.72694
C10		18 RoaBarcena#2_0	8	-1		-1	-1	1302	869.35	14	2	1186	43.21	0	5944.851197	278929.7621	33.624157	5.22158	116.677637	119.900864
C101		104 Salonio_0	3	-1		-1	-1	1216	1369.94	45	5	1019	90.55	0	11979.25248	483391.0018	65.875119	9.168494	202.496317	207.791959
C103		106 DrLucio#4_0	3	-1		-1	-1	1214	643.41	32	3	1084	83.48	0	9024.561694	317487.3771	48.572878	6.43247	136.367139	136.4764
C104		107 DrLucio#0_0	3	-1		-1	-1	1213	612.02	10	2	1128	34.24	0	3658.822316	179692.5254	20.854867	3.19102	74.04094	77.242823
C105		108 BenitoJuarez#0_0	3	1		1	-1	1212	79.13	1	1	1201	5.81	0	839.46657	39708.52769	4.76406	0.793667	17.030599	17.069032
C106		109 Enriquez#4_0	3	-1		-1	-1	1211	406.74	0	0	1170	14.15	0	1852.713824	116950.1483	11.137734	1.98144	47.158827	50.272047
C108		111 GZamora#1_0	3	-1		-1	-1	1209	384.05	0	0	1165	13.61	0	2428.399876	134982.9261	14.250456	2.572004	56.855514	58.023354
C109		117 Altamirano#4_0	8	-1		-1	-1	1203	585.74	0	0	1138	21.03	0	3494.844275	191331.4167	20.426208	3.567645	79.711185	82.245349
C111		114 GZamora#0_0	3	-1		-1	-1	1206	752.23	44	3	1068	77.45	0	9851.186874	376131.9564	52.511802	6.486155	138.472004	140.193162
C112		119 Allende#1_0	7	-1		-1	-1	1201	2346.18	179	10	696	327.12	0	38617.40158	1151106.752	202.896639	23.743448	494.95923	494.824005
C114		125 Altamirano#4_0	11	-1		-1	-1	1195	607.02	4	1	1108	41.25	0	4414.792381	213635.9289	25.133817	4.055043	89.986126	91.833399
C115		118 Allende#3_0	3	-1		-1	-1	1202	310.25	26	1	1137	41.09	0	6140.77006	186044.5758	32.35665	3.95105	80.902217	79.97434
C116		119 IgnacioAldama#0_0	3	-1		-1	-1	1201	1032.77	39	3	1031	95.25	0	10657.27839	433039.3339	58.759595	8.640625	184.806774	186.146853
C118		131 UrsuloGalvan#1_0	13	-1		-1	-1	1189	1200.39	183	12	738	372.16	0	37174.81721	891685.2997	190.197547	19.594105	392.239681	383.311274
C119		148 IgnacioAldama#0_0	29	-1		-1	-1	1172	462.38	0	0	1123	17.58	0	2667.65428	154600.0695	15.821147	3.009125	65.357116	66.455744
C120		123 DrPedroRendon_0	3	-1		-1	-1	1197	995.9	70	4	1005	113.34	0	14865.85719	461867.884	78.5571	9.512576	198.677352	198.541708
C122		125 AvCamacho#6_0	3	1		1	-1	1195	1938.23	125	6	834	186.9	0	26331.55855	793671.401	138.476933	15.98504	339.475174	341.174235
C123		124 AvCamacho#8_0	1	-1		-1	-1	1196	625.27	72	6	1024	124.44	0	15662.19701	418056.6281	81.144238	9.028816	183.022259	179.709895
C126		129 Allende#2_0	3	1		1	-1	1191	1049.36	207	12	806	304.13	0	34730.17933	800111.1534	176.947645	17.7993	352.964383	343.946927
C127		127 FJClavijero#0_0	0	-1		-1	-1	1193	640.82	0	0	1118	19.74	0	3508.169247	194632.2252	20.54294	3.518598	80.637842	83.66433
C129		132 BenitoJuarez#0_0	3	-1		-1	-1	1188	875.16	13	2	1061	36.42	0	5377.374159	239639.5442	30.005647	3.986458	97.451867	103.012504
C13		16 AlonsoGuido#0_0	3	-1		-1	-1	1304	937.68	46	3	1147	86.28	0	12800.07614	454897.5769	69.025083	9.263391	194.991995	195.54399
C130		132 GZamora#1_0	2	-1		-1	-1	1188	488.11	43	3	1077	74.15	0	8737.140994	276335.5461	46.299496	5.770152	119.88	118.787193
C131		134 CPuerto#5_0	3	-1		-1	-1	1186	1267.15	36	3	1013	100.04	0	11344.24808	464463.1184	62.613561	9.108929	196.440031	199.654969
C133		136 Insurgentes#0_0	3	-1		-1	-1	1184	608.16	16	1	1089	40.88	0	5699.388354	220457.7515	31.114166	4.212526	93.048685	94.766758
C135		148 RoaBarcena#3_0	13	-1		-1	-1	1172	732.23	7	3	1044	55.51	0	6546.873643	250697.3901	35.662209	4.731832	105.813746	107.765783
C138		141 Altamirano#0_0	3	-1		-1	-1	1179	1647.7	7	2	1013	57.47	0	8835.853179	530927.3887	52.859781	10.263326	223.187108	228.221555
C14		17 Salonio_0	3	-1		-1	-1	1303	1030.43	25	2	1159	68.53	0	8713.498789	396883.1907	49.032534	7.636422	167.156131	170.604296
C141		144 JHerrera#1_0	3	1		1	-1	1176	838.37	207	11	750	369.32	0	38596.89777	834320.5561	195.319443	18.784374	370.14099	358.654286
C143		146 Rojas_0	3	-1		-1	-1	1174	251.31	27	5	1088	67.1	0	4998.374993	147428.7482	26.224019	3.075294	64.000889	63.374859
C144		147 Enriquez#2_0	3	1		1	-1	1173	499.03	54	2	1045	87.65	0	12120.62392	308270.2381	62.413395	6.560081	134.318473	132.516689
C146		154 JHerrera#2_0	8	-1		-1	-1	1166	783.34	194	12	746	372.56	0	38547.97898	814639.4901	194.638446	18.511068	362.708126	350.194327
C148		153 Enriquez#2_0	5	1		1	-1	1167	651.96	70	2	1023	88.93	0	13485.32103	337631.9139	69.29523	7.071549	145.842835	145.138855
C149		155 Allende#2_0	6	-1		-1	-1	1165	358.65	75	8	963	177.19	0	14768.6611	336578.7249	75.109226	7.440629	148.63366	144.686574
C15		24 RoaBarcena#2_0	9	-1		-1	-1	1296	526.32	8	2	1216	39.07	0	4613.940306	220512.0604	26.220781	4.289345	93.557421	94.789058
C150		153 Xilustres#0_0	3	-1		-1	-1	1167	138.65	0	0	1150	6.55	0	1057.315956	53072.42275	6.068032	1.020385	22.439675	22.813623
C151		159 Rojas_0	8	-1		-1	-1	1161	1447.62	49	7	921	113.68	0	14409.114	545788.9371	78.370856	10.328542	229.190789	234.61525
C152		155 Altamirano#3_0	3	-1		-1	-1	1165	844.59	14	3	1040	60.2	0	6528.602117	314437.7548	37.14029	5.996025	132.425634	135.16401
C156		159 Balderas_0	3	-1		-1	-1	1161	1197.58	164	10	745	325.61	0	36996.9357	861110.0555	188.695006	19.126056	380.585313	370.16839

Tabla B6. Tratamiento 6- 100% de vehículos en búsqueda de estacionamiento con el método propuesto (extracto).

Id	depart	departLane	departDelay	arriVal	arriValLane	arriValPos	arriValSpeed	duration	routeLength	waitingTime	waitingCount	stopTime	timeLoss	rerouteNo	CO ₂ abs	CO ₂ abs	HC abs	PMx abs	NOx abs	fuel abs
C0	3	JHerrera#2_0	3	-1	-1	-1	1317	995.19	39	1	1171	70.97	0	10787.52937	383206.4632	58.100715	7.591038	162.503855	164.72694	
C10	18	RoaBarcena#2_0	8	-1	-1	-1	1302	869.35	14	2	1186	43.21	0	5944.851197	278929.7621	33.624157	5.22158	116.677637	119.900864	
C101	104	Salonio_0	3	-1	-1	-1	1216	1370.54	44	4	1015	94.42	0	12453.28589	497154.8608	68.365716	9.510034	208.927646	213.70851	
C103	106	DrLucio#4_0	3	-1	-1	-1	1214	643.41	33	4	1082	85.49	0	9046.064624	320241.6041	48.73194	6.458571	137.341298	137.660342	
C104	107	DrLucio#0_0	3	-1	-1	-1	1213	612.02	10	2	1128	34.24	0	3658.822316	179692.5254	20.854867	3.19102	74.04094	77.242823	
C105	108	BenitoJuarez#0_0	3	-1	-1	-1	1212	79.13	1	1	1201	5.81	0	839.46657	39708.52769	4.76406	0.793667	17.030599	17.069032	
C106	109	Enriquez#4_0	3	-1	-1	-1	1211	406.74	0	0	1170	14.15	0	1852.713824	116950.1483	11.137734	1.98144	47.158827	50.272047	
C108	111	GZamora#1_0	3	-1	-1	-1	1209	384.05	0	0	1165	13.61	0	2428.399876	134982.9261	14.250456	2.572004	56.855514	58.023354	
C109	117	Altamirano#4_0	8	-1	-1	-1	1203	585.74	0	0	1138	21.03	0	3494.844275	191331.4167	20.426028	3.567645	79.711185	82.245349	
C111	114	GZamora#0_0	3	-1	-1	-1	1206	792.24	42	2	1069	76.45	0	9926.766606	327446.7913	52.882662	6.498115	138.959587	140.758415	
C112	119	Allende#1_0	7	-1	-1	-1	1201	2346.16	174	12	696	326.18	0	35982.08671	1087874.649	189.393794	22.327063	467.168656	467.642262	
C114	125	Altamirano#4_0	11	-1	-1	-1	1195	607.02	4	1	1108	41.25	0	4414.792381	213635.9289	25.133817	4.055043	89.986126	91.833399	
C115	118	Allenede#3_0	3	-1	-1	-1	1202	310.25	26	1	1137	41.09	0	6140.77006	186044.5758	32.35665	3.95105	80.902217	79.97434	
C116	119	IgnacioAldama#0_0	3	-1	-1	-1	1201	1032.77	33	3	1029	98.22	0	10727.91618	434269.1188	59.103358	8.645222	185.325875	186.675542	
C118	131	UrsuloGalvan#1_0	13	-1	-1	-1	1189	1201.71	202	12	742	367.71	0	36993.23578	896508.769	189.521107	19.799151	394.587802	385.384317	
C119	148	IgnacioAldama#0_0	29	-1	-1	-1	1172	462.38	0	0	1123	17.58	0	2667.65428	154600.0695	15.821147	3.009125	65.357116	66.455744	
C120	123	DrPedroRendon_0	3	-1	-1	-1	1197	995.93	70	4	1002	115.81	0	15331.86495	476993.5025	81.019008	9.733627	204.735012	205.043817	
C122	125	AvCamacho#6_0	3	-1	-1	-1	1195	1938.23	124	5	835	186.54	0	27371.61439	820648.5068	143.841257	16.520516	350.766352	352.770996	
C123	124	AvCamacho#8_0	1	-1	-1	-1	1196	625.28	72	6	1025	123.66	0	15785.59322	420502.0964	81.761366	9.077233	184.098567	180.761158	
C126	129	Allenede#2_0	3	-1	-1	-1	1191	1049.37	211	12	803	306.84	0	32502.43688	768486.8932	166.066369	16.999696	338.502161	330.351885	
C127	127	FJClavijero#0_0	0	-1	-1	-1	1193	640.82	0	0	1118	19.74	0	3508.169247	194632.2252	20.54294	3.518598	80.637842	83.66433	
C129	132	BenitoJuarez#0_0	3	-1	-1	-1	1188	875.14	13	2	1060	37.16	0	5449.484194	240365.0752	30.360221	4.058268	98.153353	103.324338	
C13	16	AlonsoGuido#0_0	3	-1	-1	-1	1304	937.68	46	3	1147	86.28	0	12800.07614	454897.5769	69.025083	9.263391	194.991995	195.54399	
C130	132	GZamora#1_0	2	-1	-1	-1	1188	488.12	43	3	1076	75.05	0	8516.639905	267877.2895	45.097872	5.608096	116.273807	115.151299	
C131	134	CPuerto#5_0	3	-1	-1	-1	1186	1267.76	37	2	1011	102.2	0	11354.87124	457151.3914	62.481504	8.960959	193.401552	196.512097	
C133	136	Insurgentes#0_0	3	-1	-1	-1	1184	608.15	16	1	1089	40.88	0	5712.455323	221296.3903	31.194434	4.233225	93.435132	95.127244	
C135	148	RoaBarcena#3_0	13	-1	-1	-1	1172	732.23	7	3	1040	59.44	0	6793.264174	251811.346	36.824077	4.862779	107.03585	108.244647	
C138	141	Altamirano#0_0	3	-1	-1	-1	1179	1647.71	5	2	1014	56.62	0	8574.707587	517194.9768	51.319112	9.838159	216.28822	222.319427	
C14	17	Salonio_0	3	-1	-1	-1	1303	1030.43	25	2	1159	68.53	0	8713.498789	396883.1907	49.032534	7.636422	167.156131	170.604296	
C141	144	JHerrera#1_0	3	-1	-1	-1	1176	839.68	228	10	751	368.26	0	39659.08273	855141.0028	200.681055	19.452304	380.583704	367.604283	
C143	146	Rojas_0	3	-1	-1	-1	1174	251.31	26	4	1089	66.1	0	4837.919139	146942.7968	25.483972	3.053497	63.724411	63.165858	
C144	147	Enriquez#2_0	3	-1	-1	-1	1173	498.56	52	1	1051	81.47	0	11343.5573	286247.3233	58.359101	6.103497	124.772982	123.049719	
C146	154	JHerrera#2_0	8	-1	-1	-1	1166	784.67	218	10	746	372.72	0	38386.26304	808626.3064	193.746233	18.463746	360.229343	347.609403	
C148	153	Enriquez#2_0	5	-1	-1	-1	1167	652.56	69	2	1019	93.03	0	13546.65064	341329.354	69.66338	7.159063	147.644154	146.728181	
C149	155	Allenede#2_0	6	-1	-1	-1	1165	360.17	118	8	910	230.07	0	20805.70093	435892.4634	104.928095	9.902539	194.12557	187.380047	
C15	24	RoaBarcena#2_0	9	-1	-1	-1	1296	526.32	8	2	1216	39.07	0	4613.940306	220512.0604	26.220781	4.289345	93.557421	94.789058	
C150	153	Xilustres#0_0	3	-1	-1	-1	1167	138.65	0	0	1150	6.55	0	1057.315956	53072.42275	6.068032	1.020385	22.439675	22.813623	
C151	159	Rojas_0	8	-1	-1	-1	1161	1448.12	60	5	911	122.93	0	16109.22777	560287.1314	86.459714	10.868586	237.160577	240.848212	
C152	155	Altamirano#3_0	3	-1	-1	-1	1165	844.61	16	5	1034	66.13	0	7250.169034	341135.8875	41.067507	6.601192	144.370686	146.64044	
C156	159	Balderas_0	3	-1	-1	-1	1161	1198.25	253	13	670	400.44	0	48835.17467	1060336.9	247.294888	24.112391	471.856229	455.81272	