



TELECOMUNICACIÓN

Campus Sur
POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE GRADO

TÍTULO: Análisis y simulación de la siniestralidad espacial relativa a la movilidad en ciudades inteligentes. Aplicación al Campus Sur de la U.P.M.

AUTOR: Víctor Díaz Jiménez

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Electrónica de Comunicaciones

TUTOR: Francisco Prieto Castrillo

DEPARTAMENTO: Electrónica física, ingeniería eléctrica y física aplicada.

VºBº

Miembros del Tribunal Calificador:

PRESIDENTE: Aurelio Berges García.

TUTOR: Francisco Prieto Castrillo.

SECRETARIO: Manuel Vázquez.

Fecha de lectura:

Calificación:

El Secretario,

Resumen

El presente proyecto se enmarca en el espectacular auge que están experimentando los VMPC (vehículos de movilidad personal compartida) como bicicletas, patinetes eléctricos, etc. dentro de la movilidad urbana y las previsiones que apuntan a una posible sustitución o complementariedad de los sistemas de movilidad urbana actualmente establecidos [1].

Estas previsiones vienen respaldadas por la continua evolución hacia ciudades inteligentes, en las cuales se busca, en el campo de la movilidad, la reducción de emisiones, la comunicación entre vehículos para la mejora del flujo de circulación y evitar atascos, la reducción de espacio vehicular y la seguridad a la hora de realizar trayectos.

Es en el campo de seguridad donde entra en juego la conveniencia de realizar un análisis sobre la seguridad vial que ofrecen los VMP [2] (vehículos de movilidad personal), cómo se adaptan al flujo de tráfico establecido en ciudades y si son compatibles a la hora de realizar desplazamientos por ella de una forma segura y fiable.

El objetivo de este proyecto es la creación de un ABM [3] (Agent-based model o modelo basado en agentes) que establezca una base para desarrollar una herramienta fiable destinada a la toma de decisiones sobre qué medidas pueden ser beneficiosas en el ámbito de la seguridad vial y allanar el terreno hacia ciudades sostenibles y seguras. Este modelo basado en agentes se centra en el análisis de cómo afecta la inclusión y el aumento de utilización de los VMPC, dentro del campus sur, en el campo de la seguridad vial y evaluar la siniestralidad que puede ocasionar entre los sistemas de movilidad ya establecidos y el uso de VMPC, entendiendo por siniestralidad la cantidad de accidentes que se producen, donde se producen y bajo que condicionantes suceden.

Resumen

Para la creación del modelo basado en agentes se ha utilizado la plataforma, de código abierto [4], Netlogo [5], plasmando el entramado vial del campus sur mediante mapas vectoriales y se ha simulado el comportamiento de los agentes a través de los informes anuales de siniestralidad recogidos en el portal de datos abiertos de la comunidad de Madrid.

Los resultados finales de este proyecto son satisfactorios en el sentido de haber desarrollado un modelo basado en agentes que imita, de forma básica, el comportamiento vial de los principales medios de transporte utilizados en el campus sur de la UPM (Universidad Politécnica de Madrid) y los VMPC, derivando en un primer análisis de si resulta segura la adopción de los VMPC para la movilidad urbana, pero, también es cierto, que el modelo basado en agentes requiere de un desarrollo más extenso para concluir en una herramienta que resulte completamente fiable, que recoja una mayor cantidad de datos de las simulaciones realizadas y permita un análisis de resultados más enriquecedor y sencillo para el usuario.

Abstract

Abstract

This work approaches the dramatic rise in the use of SPMVs (shared personal mobility vehicles) such as bicycles, electric scooters, etc. within the urban mobility, and predictions that suggest a potential replacement or complement for the existing urban mobility systems. [1]

Such predictions are supported by a consistent progress towards smart cities, whose goal is, in the context of mobility, to decrease polluting emissions, allow vehicle communication to enhance the traffic flow and avoid bottlenecks, reduce urban space for parking lots and improve safety in routes.

In terms of security, it seems appropriate to carry out a research about the traffic safety of PMV [2] (personal mobility vehicles), as well as how they adapt to the traffic flow of a city and its safety and reliability for the urban mobility.

The aim of this project is to create an ABM [3] (agent-based model) to set the foundation for the development of a reliable tool for decision-making processes regarding traffic safety measures and transition to sustainable and safe cities. This model focus on the analysis on how the implementation and increase of the use of SPMVs in the campus of Universidad Politécnica de Madrid impact the traffic safety and the determination of the accident rate (number of accidents and circumstances), taking into account the coexistence with the existing mobility systems.

The open-source [4] platform used for the development of this ABM is Netlogo [5], where a campus road network was implemented using vector maps and then simulating the agent behavior with the information of accident rates annual reports published by the Comunidad de Madrid.

Abstract

The results of the project are beneficial: the development of an agent-based model which simulates basic traffic behavior of the main means of transport in the campus of Universidad Politécnica de Madrid (UPM) and the SPMVs. Followed by an initial analysis in order to determine if it is safe to implement SPMVs in the urban mobility. However, this agent-based model requires further development in order to create a functional tool fully reliable, with additional data for the simulations, that will offer the users a deeper and simpler insight of the analysis.

Índice

Índice

Resumen	1
Abstract	3
Índice	5
Lista de acrónimos.....	7
Índice de tablas	9
Índice de figuras	10
Lista de ecuaciones.....	12
1. Introducción.....	13
1.1. Estructura del documento	14
2. Marco tecnológico	16
2.1. La evolución urbana moderna	16
2.2. Ciudades inteligentes.....	16
2.3. La movilidad inteligente o micromovilidad	17
2.4. Siniestralidad en VMPC	19
2.5. Foro Internacional de Transporte	20
2.5.1. Clasificación de VMPC.....	20
2.5.2. Pautas y recomendaciones	21
2.6. Modelos basados en agentes.....	23
2.7. Netlogo	25
3. Especificaciones y restricciones de diseño	27
4. Descripción de la solución propuesta	29
4.1. Planificación inicial	29
4.2. Recopilación de datos.....	35
4.3. Implementación en Netlogo.....	42

Índice

5.	Resultados.....	48
5.1.	Escenarios de simulación.....	48
5.2.	Configuración de escenarios.....	50
5.3.	Resultados de la simulación de escenarios	53
5.3.1.	Escenario 1	54
5.3.2.	Escenario 2	55
5.3.3.	Escenario 3	56
5.4.	Análisis de resultados y comparación de escenarios	58
6.	Presupuesto.....	62
7.	Conclusiones.....	64
7.1.	Líneas futuras de trabajo.....	65
8.	Lista de referencias bibliográficas	67

Lista de acrónimos

Lista de acrónimos

VMPC	Vehículo de Movilidad Personal Compartida
VMP	Vehículo de Movilidad Personal
SPMV	<i>Shared Personal Mobility Vehicle</i>
PMV	<i>Personal Mobility Vehicle</i>
ABM	<i>Agent-Based Model</i>
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
ITF	<i>International Transport Forum</i>
ODD	<i>Overview, Design concepts, Details</i>
IBM	<i>International Business Machine</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
SBA	Sistemas Basados en Agentes
DGT	Dirección General de Tráfico
SO	Sistemas Operativos
CNIG	Centro Nacional de Información Geográfica
SIG	Sistemas de Información Geográfica
CITSEM	Centro de Investigación en Tecnologías Software
ETSISI	Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas Informáticos
ETSIST	Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación
CSDMM	Cetro Superior de Diseño de Moda de Madrid
ETSIT	Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Topografía

Lista de acrónimos

VMU	Vehículo de Movilidad Urbana
PFG	Proyecto Fin de Grado
AEC	Asociación Española de Empresas de Consultoría

Índice de tablas

Índice de tablas

Tabla 1 Conteo de accidentes por tipo de vía y tipo de colisión 39

Índice de figuras

Fig. 1 Recorte poligonal del mapa topográfico del centro de descargas del CNIG	36
Fig. 2 Porcentaje del reparto de viajes por modo de transporte [19]	37
Fig. 3 Scatter plot con información de los porcentajes relativos a la probabilidad de accidentes en función de tipo de vía y tipo de vehículos implicados.	41
Fig. 4 Representación gráfica del entorno de simulación con la leyenda por colores de tipos de vías y destinos posibles para los agentes dinámicos.....	43
Fig. 5 Botones que componen la interfaz gráfica para la asignación de agentes	44
Fig. 6 Representación gráfica de la colisión resultante entre dos agentes dinámicos.....	45
Fig. 7 Contadores de accidentes de la interfaz gráfica	46
Fig. 8 Representación gráfica mediante colores del estado de circulación en el que se encuentran los agentes dinámicos	47
Fig. 9 Interfaz gráfica del ABM en la plataforma Netlogo.....	51
Fig. 10 Configuración de botones para la realización del escenario 1 de simulación.....	51
Fig. 11 Configuración de botones para la realización del escenario 2 de simulación.....	51
Fig. 12 Configuración de botones para la realización del escenario 3 de simulación.....	52
Fig. 13 Configuración del número de agentes y slider para la realización de todos los escenarios de simulación en el caso del 50% de uso de coches	52
Fig. 14 Representación del entorno de simulación del ABM acotado al campus sur de la UPM.....	53
Fig. 15 Gráfica con información de la media de accidentes totales producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 1 ...	54
Fig. 16 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vehículos involucrados en el escenario 1	54

Índice de figuras

Fig. 17 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vía donde se producen en el escenario 1	55
Fig. 18 Gráfica con información de la media de accidentes totales producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 2 ...	55
Fig. 19 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vehículos involucrados en el escenario 2	56
Fig. 20 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vía donde se producen en el escenario 2	56
Fig. 21 Gráfica con información de la media de accidentes totales producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 3 ...	57
Fig. 22 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vehículos involucrados en el escenario 3	57
Fig. 23 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vía donde se producen en el escenario 3	58
Fig. 24 Mapa con los accidentes resultantes de simular el escenario 2 donde se abren las calles cortadas del campus sur de la UPM	59

Lista de ecuaciones

$DA = DD \cdot 365 = 15.847.266 \cdot 365 = 5.784.252.090$	(1)	38
$DAI = DA \cdot (0,39 + 0,009 + 0,005) \approx 2.336.837.845$	(2)	38
$VSA = (VI/DAI) * 100 = 1,99 * 10 - 5 \approx$		
$0.002\% \text{ veh\u00edculos siniestrados}$ (3)	
	39
$PA = TATo = 11335817 \approx 0.1948$	(4)	40
$PA \cap CC = ACCTo = 11055817 \approx 0.19$	(5).....	40
$PA = PA \cap CCP(A) \approx 0.975$	(6).....	40
$PsA = P(CC A)365 * 24 * 60 * 60 = 0.97531536000 \approx 3.09 *$		
$10 - 8$ (7)	
	41
$PhA = P(CC A)365 * 24 = 0.9758760 \approx 1.11 * 10 - 4$	(8)....	42

1. Introducción

En la última década, los avances tecnológicos han facilitado la medición y digitalización de diversos ámbitos de nuestra vida, entre ellos, el uso que dan los habitantes a los servicios y recursos que disponen las diferentes ciudades de todo el mundo. Esto ha permitido un nuevo enfoque urbanístico en el que prima la utilización de las nuevas tecnologías, los datos recopilados y las soluciones innovadoras a problemas cotidianos, para priorizar un desarrollo sostenible lo más eficiente posible que mejore la calidad de vida de los ciudadanos. A este nuevo enfoque se le denomina ciudad inteligente [6].

El objetivo del desarrollo sostenible de las ciudades inteligentes pasa por potenciar recopilación de datos y mejorar la eficiencia de las ciudades en diferentes ámbitos [7], como la sanidad, el uso adecuado del agua, el fomento del reciclaje, la coordinación de los cuerpos de seguridad, el turismo, el consumo energético, la legislación o la gestión del tráfico, por ejemplo.

Es en este último campo mencionado, el de la gestión del tráfico, sumado a la mejora de la seguridad vial donde resulta interesante realizar un análisis de las nuevas formas de movilidad que han surgido, y que han experimentado un gran auge en los últimos años.

Estas nuevas formas de movilidad son los VMPC, que permiten complementar las diferentes formas de movilidad urbana actualmente establecidas como los coches privados o el transporte público en ciudades.

La inclusión de este tipo de vehículos en el ecosistema vial de una ciudad plantea diferentes incógnitas acerca de cómo afrontar una legislación eficiente sobre su uso o qué tipo de peligros conlleva su utilización en espacios compartidos con vehículos motorizados mucho

Introducción

más rápidos y pesados. Por estos motivos, resulta necesario realizar un análisis que permita dar respuestas a estas preguntas.

En concreto, este proyecto se centra en dar respuesta a la pregunta de si la inclusión de los VMPC en las ciudades hará de estas un lugar más seguro para circular o, por el contrario, resultará en un aumento de la siniestralidad de los usuarios de estos vehículos en zonas urbanas y, mediante el análisis de los resultados obtenidos, se analizará si resulta conveniente la creación de infraestructuras reservadas para esta clase de vehículos.

Para alcanzar estos objetivos se creará un ABM que imite el comportamiento de los diferentes medios de transporte utilizados en las ciudades, que empleará el área del campus sur de la UPM como escenario de simulación. Esto permitirá asentar las bases para la creación de una herramienta que sirva de apoyo para la toma de decisiones.

1.1.Estructura del documento

Este documento se compone de seis capítulos en los que se irán desgranando los diferentes aspectos del desarrollo de este proyecto.

En el segundo capítulo se describe el marco tecnológico donde se ubica el proyecto, donde se da una visión general de la evolución urbana hacia las ciudades inteligentes, centrándose en el concepto de movilidad inteligente o micromovilidad. Una vez aclarado el contexto tecnológico, se aborda el problema que se pretende solucionar, la siniestralidad de los VMPC y las recomendaciones y pautas aportadas por el ITF (*International Transport Forum* o foro internacional de transportes).

En el tercer capítulo se hace referencia al objetivo del proyecto y se citan las especificaciones y restricciones de diseño que se deben cumplir para alcanzar el resultado deseado.

Introducción

En el cuarto capítulo se desglosa la solución propuesta de manera detallada desde su planificación inicial se aporta un protocolo ODD (*Overview, Design concepts, Details*) [8] [9] para su mejor comprensión. Posteriormente, se ha realizado un proceso de recolección de datos relevantes para asemejar el comportamiento de los agentes a la movilidad de los medios de transporte simulados y, por último, se expone la explicación de la implementación del ABM en la plataforma Netlogo que da como resultado la herramienta para el análisis de escenarios de movilidad.

En el quinto capítulo se presentan los escenarios simulados por el modelo y se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

En el sexto capítulo se aborda el cálculo del presupuesto necesario para el desarrollo de este proyecto y el mantenimiento futuro y mejora de la herramienta resultante.

Y, en el séptimo y último capítulo de este documento se elabora una serie de conclusiones, entorno a los resultados del ABM, que evalúan la validez de la herramienta creada, además de presentar un conjunto de líneas futuras de trabajo o mejoras que refuercen la robustez de la herramienta planteada como solución al problema de la siniestralidad de los VMPC.

2. Marco tecnológico

2.1. La evolución urbana moderna

La creación y evolución urbanística siempre ha estado condicionada por diversos factores contemporáneos a la época en la que surgen los asentamientos, ya fuese la idoneidad del terreno por tener cerca los recursos naturales para la subsistencia o la defensa del lugar, la posición estratégica en rutas comerciales más adelante o la posibilidad de crecimiento económico mediante otros métodos.

Desde 1950 hasta la actualidad, la población mundial ha pasado de 2,6 millones de habitantes a 7 millones y se estima que en 2050 la esta ascienda a 9,7 millones [10]. Además, desde 2007, la mitad de la población vive en ciudades y se espera que esta ascienda hasta el 60 % en 2030 [11]. Esta situación ha generado que el 70 % de emisiones de carbono y el 60% de los recursos naturales los acaparen las principales urbes mundiales. Todo esto, sumado a otros factores, ha propiciado que el enfoque para el desarrollo urbanístico evolucione, centrándose en factores como la globalización y el progreso tecnológico [12] para así poder ofrecer soluciones a los nuevos problemas generados integrando las TIC e innovaciones de los últimos tiempos para alcanzar la sostenibilidad.

Esa sostenibilidad deseada pasa por interconectar y dar soluciones innovadoras a áreas como la gobernanza, economía, sanidad, seguridad, energía o la movilidad, entre otras, y de esta forma alcanzar la categoría de ciudad inteligente.

2.2. Ciudades inteligentes

Una ciudad inteligente es lo que en inglés se conoce como smart city. Una de las primeras definiciones de smart city se produce en 2010 por unos investigadores de IBM (*International Business Machine*) [13],

Marco tecnológico

los cuales explican que se trata de zonas urbanas que aprovechan los datos recogidos en ellas para la optimización de los servicios y recursos de la ciudad y que, además, giran a tres conceptos fundamentales: instrumentalidad, interconectividad e inteligencia.

Instrumentalidad hace referencia a las fuentes de obtención de datos del mundo real que emplean sensores físicos y virtuales; interconectividad se refiere a la integración de esos datos en una plataforma de la cual puedan enriquecerse los servicios urbanos; e inteligencia es el resultado de la utilización de los datos para alcanzar una mejor toma de decisiones a través del análisis, modelado y optimización de los servicios ofrecidos.

2.3.La movilidad inteligente o micromovilidad

Uno de los grandes problemas que se ha comentado anteriormente a los que tiene que hacer frente una ciudad inteligente, es el de la movilidad urbana. Debido a la alta concentración de población en las grandes urbes a lo largo del planeta, se está generando un creciente aumento del tráfico. Esto, a su vez, se traduce en problemas tales como: alta densidad vehicular y congestión vial, aumento de contaminación atmosférica y ruido, incremento de las emisiones de gases efecto invernadero, un mayor coste energético por desplazamiento y un incremento de los accidentes de tráfico [14].

La principal solución adoptada mundialmente para enfrentar esta clase de problemas ha sido la implantación de diferentes sistemas de transporte público, los cuales han estado en constante desarrollo y evolución hasta llegar al siglo XXI, donde dicho transporte se comprende como servicios de movilidad compartida para recorrer grandes distancias. Servicios como trenes, autobuses o el metro cumplen un papel esencial en la movilidad urbana, pero, según avanzan las tecnologías y las necesidades de la población, estos

Marco tecnológico

sistemas empiezan a verse limitados y a no cumplir con las exigencias de sostenibilidad y eficiencia de una ciudad inteligente. Es por ello que en la última década empieza a cobrar fuerza el concepto de movilidad inteligente o micromovilidad.

La movilidad inteligente o micromovilidad es una nueva forma de entender la movilidad como un servicio que de respuestas a retos como: la sostenibilidad, al dar lugar a una movilidad que integre el transporte público y privado; la inclusividad, al hacerla accesible a toda la población para no generar desigualdad y dar acceso a todo el tejido urbano; la creación de un sistema multimodal, al poner a disposición de la población diferentes medios de transporte para poder hacer un uso eficiente y fluido según la necesidad individual; y la reducción de la congestión del tráfico, al potenciar la movilidad no motorizada y evitando todos los problemas derivados del uso de vehículos privados mencionados anteriormente, siendo uno de los principales la reducción de emisiones [14].

De la necesidad de avanzar en la movilidad inteligente surge la proliferación de servicios de movilidad personal compartida con vehículos no motorizados y propulsados únicamente con energía eléctrica, como las empresas dedicadas a las bicicletas o patinetes eléctricos en las principales ciudades de todo el mundo, así como el uso de estos mismos dispositivos de forma privada, que dan lugar a un ecosistema de transporte público mucho más rico, eficiente y sostenible.

Esta inclusión de nuevos servicios se ha expandido de manera acelerada en la última década, llevando a las ciudades a enfrentarse a nuevos retos sobre la legislación vial de las nuevas formas de desplazarse para llegar a crear un ecosistema donde puedan convivir la movilidad hasta ahora conocida y la movilidad inteligente o micromovilidad.

2.4.Siniestralidad en VMPC

En Madrid, en el año 2010 se produjeron 340 accidentes de bicicletas y han ido en aumento hasta alcanzar los 921 en 2020 [15], esto evidencia que uno de los retos más importantes es conseguir que la inclusión de los VMPC en el sistema vial urbano no deba suponer un aumento de la siniestralidad, ya que, si la evolución de la movilidad no ofrece ciertas garantías de seguridad, deja de ser atractiva para la población, llegando incluso a desecharla.

La proliferación y la rápida adopción por parte de la ciudadanía en grandes ciudades de los patinetes eléctricos han empujado a los gobiernos de algunas ciudades españolas a adoptar ciertas medidas cautelares para su uso, ya que la micromovilidad empezó a apoderarse incluso de los espacios reservados para los peatones. Estas medidas no han sido uniformes en el territorio español debido a que no existía regulación previa de circulación de VMPC, salvo en el caso de las bicicletas.

En Valencia, se apostó por la creación de zonas residenciales, limitando la velocidad máxima a 20 km/h y dando lugar a áreas más seguras para el uso de VMPC. Uso que se limitó a zonas peatonales compartidas sin superar los 10 km/h, a carril bici, entre 15 y 20 km/h y a ciclocalles, hasta los 30 km/h [16].

En Barcelona, se optó por regular el uso de los VMPC en función del peso y velocidad que alcanzan, pudiendo hacer uso de calles de plataforma única, parques públicos, carril bici e incluso circular por calzadas con límites de velocidad de 30 km/h si el vehículo podía superar los 20 km/h [17].

En Madrid, se orienta el uso de VMPC a zonas e infraestructura para los ciclistas, pudiendo utilizar ciclocalles, carriles bicis y áreas

Marco tecnológico

designadas para el uso de bicicletas, así como las llamadas zonas 30, donde la velocidad máxima de las vías es de 30 km/h [18].

Como se puede apreciar en estos tres ejemplos, hay muchas similitudes en la legislación adoptada por las diferentes ciudades, pero la más importante es la limitación de la velocidad a 30 km/h como máximo. Esta no es la única similitud, ya que las tres ciudades aportan una catalogación de VMPC en función del peso y las velocidades que pueden llegar a alcanzar. Debemos de entender que estas medidas fueron propuestas por cada ciudad en función de la problemática a la que se enfrentaran, aproximadamente, en el año 2019 y por esa razón las medidas no están unificadas.

2.5. Foro Internacional de Transporte

Estas medidas adoptadas por cada ciudad, en el caso de España, no iban mal encaminadas ya que se encuentran grandes similitudes con el documento publicado en el año 2020 por el ITF titulado *Safe Micromobility* [19], donde, tras examinar el uso de vehículos destinados a la micromovilidad, se sugieren ciertas pautas para la toma de decisiones a la hora de legislar su uso y también se propone una clasificación de estos vehículos.

2.5.1. Clasificación de VMPC

Al inicio de este documento, se hace hincapié en la necesidad de conseguir una clasificación eficiente de los VMP para poder, una vez clasificados, conseguir una legislación eficiente y segura sobre el uso de los diferentes tipos de vehículos en función de sus características.

El propio documento propone una clasificación atendiendo a dos características esenciales de cualquier vehículo: su velocidad máxima y su peso.

Marco tecnológico

- Velocidad máxima.

En función de la velocidad máxima que alcancen los VMP, se propone clasificarlos en dos grupos: vehículos que alcanzan los 25 km/h como máximo y vehículos cuya velocidad de uso común oscila entre los 25 km/h y los 45 km/h

- Peso.

Atendiendo a esta característica se propone clasificar, otra vez, en dos grupos a los VMP: un primer grupo donde no se supere un peso máximo de 35 kg y un segundo donde su peso oscile entre los 35 kg y los 350 kg aproximadamente.

Hay que aclarar que, pese a que se proponga una clasificación uniforme para todo el mundo, los diferentes continentes y países que los componen pueden tener diferencias en sus clasificaciones atendiendo a diferentes factores como pueden ser la propia infraestructura que posea determinado país o la legislación actual sobre los propios vehículos, ya que, por ejemplo, en algunos países asiáticos han sido considerados como juguetes hasta hace no mucho.

2.5.2. Pautas y recomendaciones

Tras analizar el uso de diferentes VMPC y la siniestralidad reportada por diferentes países y empresas que operan en el sector de la micromovilidad, el documento aporta algunas recomendaciones ligadas al devenir legislativo, al cual se van a enfrentar tanto ciudades como fabricantes para conseguir un ecosistema vial lo más seguro posible: [20]

- Es necesario recopilar datos sobre los desplazamientos y accidentes de VMP ya que, en muchos países, este tipo de datos son escasos, incompletos o nulos, por lo que se hacen un llamamiento a gobiernos, entidades públicas, empresas y

Marco tecnológico

cuerpos de seguridad de cada estado a recopilar datos para arrojar luz sobre el desempeño de estos vehículos en cada país. Además, se sugiere aprovechar la incorporación de sensores y GPS (*Global Position System* o Sistema de Posicionamiento Global) en los VMPC para proporcionar datos útiles sobre el estado vial, poder monitorearlo de forma eficiente y que resulte en una mejora para la seguridad en las calles.

- Partiendo de la idea de que la micromovilidad solo irá en aumento, proponen diversos métodos para entrenar a la población en el uso de estos dispositivos y promover su aceptación en zonas viales urbanas, como su incorporación a las licencias de conducción, la enseñanza del uso de la bicicleta en colegios desde una temprana edad o realizar un entrenamiento previo, por parte de las compañías dedicadas a la micromovilidad, del uso de sus dispositivos.
- También hace recomendaciones a fabricantes y compañías del sector de la micromovilidad como la necesidad de mejorar la estabilidad de los dispositivos, ya que cierta parte de los accidentes sufridos por VMP se deben a caídas; la inclusión de luces de señalización e intermitentes para mejorar la visibilidad de estos vehículos y sus ocupantes; limitar el peso de los vehículos al guardar relación con la cantidad de accidentes fatales en los que se ven involucrados; mejorar los sistemas de mantenimiento, recogida y carga de los VMPC actuales y aconsejan la construcción de estaciones de carga en zonas densamente pobladas o plantear nuevas formas de alquiler de VMPC que no fomenten el exceso de velocidad y ahorro de tiempo de uso.
- Se debe crear una infraestructura de circulación protegida para los VMPC, generando espacios específicos para ello y

Marco tecnológico

regulando el tráfico en zonas donde compartan movilidad con vehículos motorizados para alejarlos de la circulación por zonas reservadas para los peatones. Todo esto se debe de afrontar centrándose en los vehículos motorizados para que la inclusión de los VMPC en zonas urbanas no suponga un mayor riesgo del actual; para ello se propone limitar la velocidad máxima a 30 km/h.

- Tras estudiar el comportamiento y uso de los VMP que no superan los 25 km/h, así como su participación en accidentes de tráfico en función de las distancias desplazadas, aseguran que, a la hora de estudiar y legislar su comportamiento vial, deben ser tratados como bicicletas. De esta forma se refuerza el punto anterior, ya que todo apunta a que los VMP no son más peligrosos que las bicicletas, vialmente hablando, y permitirá evitar una regulación excesiva.

Este último punto es especialmente interesante a la hora de estudiar el impacto que supone la incorporación de los VMPC al tránsito vial en zonas urbanas, ya que facilita y simplifica enormemente la recolección de datos debido a la escasa o nula aportación de estos por instituciones oficiales, permitiendo asemejarlos a las bicicletas, los cuales si se encuentran con facilidad en un amplio abanico de países por ser una forma de desplazamiento mucho más común.

Para abordar los análisis y estudios de la idoneidad del uso de los VMPC en entornos urbanos y su repercusión en la circulación vial, parece idóneo el uso de SBA (sistemas basados en agentes) o ABM.

2.6. Modelos basados en agentes

Entendemos por «simulación» o «modelización» el proceso de recrear el funcionamiento de un sistema o entorno real en uno generado artificialmente, asemejando su comportamiento mediante parámetros,

Marco tecnológico

con el fin de poder realizar experimentos y observaciones sobre su evolución de forma controlada [21].

En el campo de las ciencias sociales se ha popularizado enormemente el uso de la modelización basada en agentes para este tipo de estudios, sirviendo como herramientas de ayuda a la hora de la toma de decisiones [22].

Los modelos basados en agentes se utilizan para el análisis de la evolución de un sistema en función de las conductas individuales que pueden adoptar los agentes que lo conforman. Bajo esta premisa, cualquier cambio en el comportamiento de los agentes supondrá un cambio del sistema permitiendo una evolución constante, pero, además, este tipo de simulaciones, permiten crear diferentes escenarios dentro del mismo sistema que generen diferentes funcionamientos de los agentes o adaptabilidad de los mismos, estableciendo a su vez posibles cambios significativos en los resultados de las simulaciones.

Dicho esto, la modelización basada en agentes se compone, principalmente, de un conjunto de agentes, unas reglas de comportamiento de los mismos y un entorno donde interactúan y desarrollan su comportamiento [22].

Queda claro, por tanto, que la pieza central de la modelización basada en agentes son los agentes. Los agentes son las entidades significativas que harán que un sistema evolucione y deben atender a varias características [23].

- Tienen un objetivo principal u objetivos a cumplir dentro del sistema.
- Son autónomos y no necesitan del control o supervisión humana para completar sus objetivos.

Marco tecnológico

- Para definir su comportamiento y realizar su propia toma de decisiones poseen un conjunto de atributos que los condicionan.
- Son conscientes parcialmente o totalmente del entorno en el que operan, pudiendo desplazarse por él y adaptar su comportamiento en función de las circunstancias e incluso tener cierta memoria para modificar sus acciones en función de sus experiencias.
- Poseen rasgos distintivos para diferenciarse de otros agentes y adecuar su comportamiento en función del tipo de agente con el que interactúen.

2.7.Netlogo

En la actualidad existen diversas herramientas para el modelado basado en agentes como pueden ser Gama [24], Repast [25] o Cormas [26]. Todas ellas tienen diferentes formas de funcionamiento y lenguaje e incluso algunas están diseñadas para simulaciones muy concretas, como pueden ser los comportamientos y desplazamientos humanos. Resulta esencial elegir una herramienta adecuada que se adapte a las necesidades de la simulación deseada, pero algunas ofrecen versatilidad y fácil curva de aprendizaje. Es el caso de Netlogo.

Netlogo es una plataforma de código abierto destinado a las simulaciones basadas en agentes enfocados en el estudio de fenómenos sociales y naturales, creado por Uri Wilensky en 1999 y desarrollado por los investigadores de la Connected Learning and Computer Based Modeling de la Northwestern University. Está enfocado principalmente a la docencia ya que su simplicidad permite un rápido aprendizaje, pero es lo suficientemente avanzado para considerarla una buena herramienta en el campo de la investigación de diferentes ámbitos [27].

Marco tecnológico

La rápida curva de aprendizaje y su enfoque didáctico se apoya en su interfaz gráfica que sirve para configurar los experimentos de forma intuitiva y su amplia colección de ejemplos a modo de biblioteca, la cual permite cargar experimentos prediseñados y configurarlos para entender su funcionamiento.

Dentro de Netlogo, los agentes permiten agruparse en razas que tendrán diferentes atributos para configurar sus respectivos comportamientos en la simulación. Estos agentes pueden ser:

- *Turtles*: Tortugas o agentes móviles. Estos agentes pueden moverse por el entorno de simulación y tiene la capacidad de relacionarse entre ellos.
- *Patches*: parcelas o agentes estáticos. Conforman el entorno de la simulación.
- *Links*: Enlaces. Sirven para crear relaciones entre las tortugas.
- *Observer*: Agente observador. Es un agente invisible que puede dar órdenes al resto de agentes.

El comportamiento de estos agentes se puede configurar mediante el lenguaje de programación Netlogo, basado en Logo o, incluso, dar órdenes directas mediante la interfaz gráfica anteriormente mencionada [28].

3. Especificaciones y restricciones de diseño

Para llevar a cabo la ejecución del proyecto es necesario establecer unas condiciones iniciales, así como unas especificaciones y restricciones de diseño que permitan cumplir los objetivos deseados.

El objetivo de este proyecto es la creación de un modelo basado en agentes que sirva como herramienta para la toma de decisiones en cuestiones relativas a la siniestralidad que acarrea la incorporación de VMPC en el flujo vial. Esta simulación deberá generarse mediante el uso de plataformas gratuitas de código abierto para que no exista la necesidad de generar presupuesto alguno ni desembolso monetario. La plataforma encargada de ejecutar la simulación será NETLOGO y el tratamiento de los mapas topográficos necesarios para generar un entorno fácilmente comprensible será la plataforma QGIS.

El entorno escogido para la simulación estará situado en el Campus Sur de la Universidad Politécnica de Madrid y, por tanto, es necesario representarlo mediante mapas topográficos accesibles por la ciudadanía en bases de datos oficiales.

La simulación incorporará agentes que imitarán el comportamiento de los sistemas de movilidad más populares dentro del campus, como vehículos privados, coches, motocicletas, furgonetas, etc., así como VMPC. Para que estos comportamientos e interacciones entre ellos sean lo más parecidos posibles a la realidad, se ha de recopilar información sobre la siniestralidad de estos vehículos accesible en la DGT (Dirección General de Tráfico).

Para la generación de diferentes escenarios de interés dentro de la simulación, se podrá modificar mediante una interfaz gráfica que permita alterar el número de agentes totales y de cada tipo y, además, permitirá modificar el entorno de simulación cambiando las

Especificaciones y restricciones de diseño

condiciones viales, tales como habilitar un carril bici o cortar diferentes calles.

Una vez se cree la herramienta y permita generar diferentes escenarios, esta ofrecerá resultados en forma de datos referentes al número y distribución de los accidentes de tráfico ocurridos en ellos. Estos resultados de las diferentes simulaciones deberán ser comparables para favorecer la toma de decisiones y arrojar luz sobre si la inclusión de los VMPC en el ámbito vial es segura.

Resumiendo, las especificaciones de diseño son la siguientes:

- Utilizar plataformas de código abierto para la generación de la simulación basada en agentes.
- Recopilar la información necesaria en organismos oficiales o bases de datos accesibles por la ciudadanía española de forma gratuita.
- Generar diferentes escenarios mediante una interfaz gráfica que permita la modificación de la simulación en diferentes aspectos.
- Obtener unos resultados de las simulaciones que favorezcan la toma de decisiones en cuestiones viales o para la creación de infraestructuras destinadas a los VMPC.

Descripción de la solución propuesta

4. Descripción de la solución propuesta

Durante este capítulo se desarrollará el proceso de análisis del problema, planificación, búsqueda de datos relevantes y codificación que han dado como resultado la herramienta final de este proyecto.

Como se ha comentado con anterioridad, el propósito final de este proyecto es la creación de una herramienta capaz de simular el comportamiento del tráfico en ciudades y que sirva de apoyo a la hora de tomar decisiones sobre la inclusión vial de los VMPC en el ámbito urbano, principalmente en los ámbitos legislativos y de creación de infraestructuras que favorezcan la reducción de siniestralidad espacial, entendiendo esta como la cantidad y localización de accidentes de tráfico que involucran esta clase de vehículos.

A continuación, se presentará la planificación inicial de la herramienta de ABM, justificando la plataforma de implementación y las características básicas de los principales agentes de la simulación. Seguidamente, se hablará sobre la recopilación de datos y la justificación de elección de los mismos y, finalmente, el capítulo concluirá detallando la implementación llevada a cabo en la plataforma, dando como resultado final la herramienta propuesta en este proyecto.

4.1. Planificación inicial

La primera parte de este proyecto se trata de la planificación inicial del mismo siguiendo las especificaciones y restricciones de diseño comentados en el capítulo anterior.

Como ya se adelantó en el capítulo 3 de esta memoria, la plataforma escogida para la implementación del ABM propuesto es Netlogo. La elección de este entorno de programación para simulaciones basadas en agentes se centra en tres puntos principalmente: se trata de una

Descripción de la solución propuesta

plataforma de código abierto por lo que el acceso a ella es totalmente gratuita; Netlogo está escrito en java y facilita su instalación en los principales SO (Sistemas operativos) como Windows, Mac OS o Linux, facilitando de esta forma las posibles líneas de investigación futuras partiendo del ABM resultante de este proyecto y, la más importante, es una plataforma enfocada a la enseñanza y esto se traduce en una rápida curva de aprendizaje, por lo que no requiere apenas conocimientos previos sobre ABM para poder adentrarse a modelar y obtener unos resultados óptimos en el campo de la investigación.

Una vez escogida la plataforma de desarrollo es necesario dar una descripción general del modelo planificado inicialmente para facilitar su comprensión y reproducibilidad en líneas futuras de desarrollo.

La descripción de modelo que se hará a continuación, sigue el protocolo ODD, siendo este el estándar más extendido en los últimos años dentro de la comunidad de investigación centrada en ABM.

- Propósito

El propósito general de este modelo es el de establecer puntos de riesgo viales en el campus Sur de la Universidad Politécnica de Madrid para los usuarios de VMPC y analizar si la inclusión y el aumento del uso de este tipo de vehículos en entornos urbanos favorece la seguridad vial y la reducción de siniestralidad.

- Entidades, atributos y escala

Los agentes dinámicos de esta simulación, atendiendo a las recomendaciones del ITF sobre los análisis de los VMPC, se simplifican en dos tipos: Coches y bicicletas.

Coche: ID, tipo, prisa y velocidad. Además, poseerán variables de apoyo para determinar sus posibles estados y posición en la simulación como posición, origen, destino, colisionado, hora de inicialización, etc.

Descripción de la solución propuesta

Bicicleta: ID, tipo, prisa y velocidad. Al igual que los coches, poseerán variables de apoyo para determinar sus posibles estados y posición en la simulación.

Los agentes estáticos del modelo desarrollado son los patches, que únicamente aportarán información de posición en forma de coordenadas, y los links, los cuales poseen el atributo tipo-calle para determinar qué tipo de vía representan. Esto será esencial para calcular la posibilidad de colisión de los agentes más adelante.

El entorno de simulación se acotará al campus sur de la universidad politécnica de Madrid. La justificación de esta acotación del entorno se apoya en que consideramos a las ciudades como super-estructuras formadas a partir del ensamblaje de sub-sistemas de infraestructuras altamente interconectadas [1] y por este motivo los resultados de la simulación se pueden extrapolar a zonas urbanas con características viales similares. Inicialmente se concreta que la duración de un tic de tiempo de Netlogo se ajustará a la duración de un segundo en la realidad, llegando a simular un día completo, pero tal y como se justificará más adelante en este mismo capítulo, el tic de tiempo de simulación corresponderá finalmente al periodo real de 60 minutos y la simulación durará 40 días.

- Descripción general y programación del proceso

Para preparar la simulación se generará el mapa del campus sur de la universidad politécnica de Madrid a partir de archivos shape file que contengan las calles y parcelas reales de la localización. Estos mapas serán tratados mediante la herramienta de código abierto QGIS.

La simulación dará comienzo con la inicialización de los agentes en función de los parámetros establecidos mediante los botones de la interfaz gráfica de Netlogo, que asignan la cantidad de viajeros y el porcentaje de uso de cada medio de movilidad contemplado.

Descripción de la solución propuesta

Una vez inicializados empezarán a moverse según tengan establecido su horario. Esta función de movimiento se verá interrumpida de dos formas: llegando a su destino o colisionando contra otro vehículo o persona.

En caso de llegar a su destino, empezará un periodo de inactividad al cual llamaremos tiempo de estudio. Una vez terminado su tiempo de estudio, el agente volverá a su función de movimiento para llegar a la posición inicial según su ruta establecida.

En caso de colisionar, la interfaz gráfica será la encargada de mostrar la información de la posición, tipos de agentes involucrados y tipos de accidentes ocurridos. Con esta información se deberá actualizar el mapa cambiando de color aquellos agentes involucrados en algún tipo de accidente.

Los procesos que se ejecutan en un orden fijo serán la inicialización de agentes e inicio de movimiento, así como el tiempo de estudio si llegaran a su destino sin colisionar. Sin embargo, el proceso de colisión se ejecutará, siguiendo un sistema de probabilidades, en el momento que dos agentes se encuentren en la misma casilla.

En el momento que un agente llega a su destino final una vez se produzca su tiempo de estudio o colisione, morirá.

- Principios básicos

El modelo parte del número y tipo de vehículos utilizados en el campus sur de la UPM y los principales estudios de siniestralidad a nivel europeo de los VMPC. Estos datos estarán estrechamente relacionados a la hora de determinar si dos vehículos resultarán colisionados en su tránsito vial.

Descripción de la solución propuesta

- *Emergence*

Se espera que la siniestralidad espacial varíe de forma compleja si se modifican la cantidad de vehículos utilizados en la simulación y el porcentaje de uso de cada medio.

- Adaptación

Las entidades de este modelo no poseerán características o rasgos adaptativos por lo que no se esperan cambios de comportamiento a lo largo de la simulación.

- Objetivos

El objetivo de un agente será el de llegar a su lugar de estudio, permanecer el tiempo de estudio estipulado y volver a su lugar de origen sin colisionar con ningún otro vehículo.

- Aprendizaje

No se contempla el aprendizaje por parte de los agentes ya que no tienen ninguna característica adaptativa.

- Predicción

No se contempla que los agentes tengan capacidad de predicción para hacer cambios de decisiones

- Detección de entorno

Es necesario que cada vehículo sea consciente de su velocidad, el tipo de vehículo al que pertenece, el tipo de vía en el que se encuentra, así como el tipo de vehículo con el que comparte nodo para decidir si un accidente llega a producirse o no.

- Interacción

La única interacción contemplada en el modelo entre dos agentes será la de colisión, la cual afecta a ambos agentes. Además, los agentes

Descripción de la solución propuesta

podrán interactuar con el entorno mediante la función tiempo de estudio, por la que permanecerán parados un tiempo estipulado antes de volver a la función de movimiento.

- Estocasticidad

Las colisiones se producirán acorde a probabilidades en función de su velocidad, los tipos de agente que compartan nodo y el tipo de vía por el que se encuentren circulando; de esta forma ocurrirán colisiones con cierta frecuencia, pero de manera aleatoria.

- Manadas o asociaciones

El modelo planteado no contempla la asociación de agentes.

- Observación

De la implementación del modelo se espera obtener cierta información relacionada con las colisiones ocurridas para su posterior análisis. Estos datos pertenecerán tanto a los atributos de los agentes dinámicos (tipo de vehículo) como a los agentes estáticos (tipo de vía).

- Inicialización

La inicialización de la simulación se hará con una cantidad variable de participantes y se asignará manualmente mediante botones interactivos en la interfaz gráfica tanto estos como el porcentaje de usuarios de los diferentes vehículos.

La velocidad de los coches será siempre la máxima permitida en el campus, pero la velocidad de los VMPC se asignará de manera aleatoria desde un mínimo de 10 km/h hasta un máximo de 25 km/h y las horas de llegada a la universidad se realizan de forma aleatoria repartiéndose a lo largo del día en periodos de dos horas.

Descripción de la solución propuesta

- Input

Los únicos archivos para llevar a cabo la simulación son los mapas referentes a las calles y las parcelas de la UPM. Tal y como se ha mencionado anteriormente, estos mapas deben estar en formato shape file.

Una vez descrita la planificación inicial del modelo que se quiere llevar a cabo, es hora de pasar a la etapa de recopilación y tratamiento de los datos en los cuales se apoyará el ABM.

4.2. Recopilación de datos

Como se ha visto en el protocolo ODD, es necesario dos tipos de datos, principalmente, para conseguir una representación realista del comportamiento vial dentro del campus sur de la UPM: mapas de las carreteras y datos sobre la siniestralidad de vehículos comunes y VMPC.

Para la obtención de los mapas necesarios para recrear la cartografía del campus sur de la UPM se recurre a las bases de datos que pone a disposición del ciudadano tanto el gobierno español como la comunidad de Madrid.

En el centro de descargas del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica) se pueden encontrar diferentes bases de datos relacionadas con la información geográfica nacional. Para este proyecto resulta de interés la base de datos de mapas vectoriales y bases cartográficas y topográficas [29] la cual contiene ficheros vectoriales para la explotación y consulta mediante SIG (Sistemas de Información Geográfica) y concretamente, se incluye una base topográfica nacional que permitirá, mediante un recorte poligonal representado en la figura (1), obtener un mapa en formato .shp de las parcelas edificadas del campus sur de la UPM.

Descripción de la solución propuesta

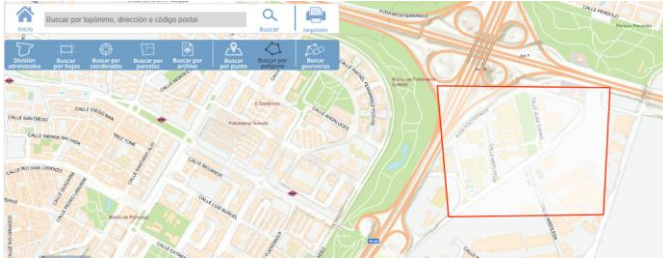


Fig. 1 Recorte poligonal del mapa topográfico del centro de descargas del CNIG

Pese a que el mapa topográfico también incluye las carreteras de España, este no resulta del todo óptimo por no representar fielmente la situación de las carreteras que conforman el campus sur de la UPM. Dado este problema, para la representación de las carreteras en la simulación, se acude al catálogo de datos abiertos de la comunidad de Madrid donde se encuentra un mapa del callejero de la comunidad de Madrid del año 2018 [30]. De este callejero se puede obtener un mapa vial urbano mucho más sencillo de cara a la simulación y aun contando con algunas inexactitudes, estas no suponen ningún problema.

Una vez se recopilan los mapas necesarios para representar el campus sur de la UPM de una forma sencilla pero fidedigna, será necesario acotarlos al entorno de simulación ya que se tratan de dos mapas distintos. Para ello se añaden como capas vectoriales en QGIS y se recortan ambos con la información de interés deseada, generando dos mapas vectoriales correspondientes a las carreteras, para que estas se puedan recorrer por los agentes dinámicos en Netlogo, y a las parcelas edificadas, para una mejor comprensión visual del mapa completo.

El otro campo que resulta estrictamente necesario para una representación realista de los comportamientos viales, tanto de vehículos ordinarios como de VMPC, en el ámbito de la siniestralidad, son la cantidad de desplazamientos y las tasas de accidentes de los diferentes vehículos que se desean modelar como agentes. Para

Descripción de la solución propuesta

conseguir datos sobre los desplazamientos realizados por las diferentes clases de vehículos anualmente, se opta por revisar la encuesta de movilidad de la comunidad de Madrid más reciente, siendo esta la del año 2018 [31], y para recabar información sobre la siniestralidad en Madrid se acude, nuevamente, al catálogo de datos de la comunidad de Madrid, en el cual se recogen las cifras de accidentes por años. [32]

Para obtener una visión general de los desplazamientos que ocurren diariamente en la comunidad de Madrid, tal y como se indica en el párrafo anterior, se revisa la encuesta de movilidad del año 2018. En este informe podemos encontrar algunos datos de interés como que en un día laboral medio se producen 15.847.266 viajes y de estos, el 39% son de vehículos privados, el 0,9% se realizan en moto y solo el 0,5% de los desplazamientos realizados por bicicletas. Lamentablemente en el año 2018 el mercado del VMPC no había experimentado aún el espectacular auge en el que se encuentran ahora, por lo que, aparte de bicicletas, no se contemplan otros VMPC en la encuesta. En la figura (2) se puede observar el reparto de viajes por modo de transporte:

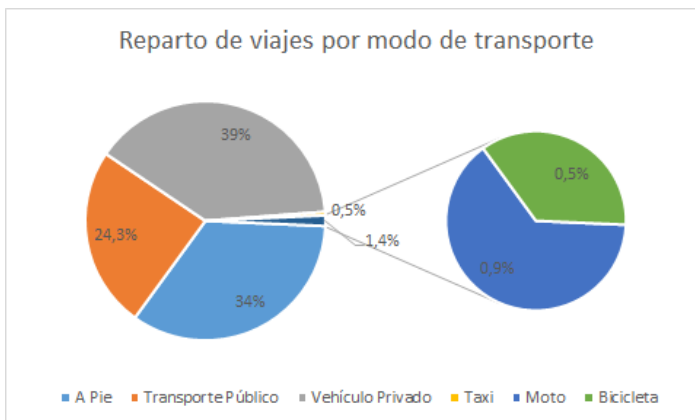


Fig. 2 Porcentaje del reparto de viajes por modo de transporte [19]

Descripción de la solución propuesta

De estos datos podemos deducir el número de viajes que se producen al año de los modos de transporte de interés para el ABM, siendo estos los vehículos privados, las motos y las bicicletas, por ser los medios de transporte más utilizados en la universidad al no modelar como agente el transporte público en la simulación. La ecuación (1) calcula el número de desplazamientos al año en la comunidad de Madrid DA a partir de los desplazamientos diarios DD y la ecuación (2) calcula el número de desplazamientos anuales de los modos de transporte de interés para la simulación DAI a partir de los desplazamientos anuales DA y los porcentajes de uso de los modos contemplados.

$$DA = DD \cdot 365 = 15.847.266 \cdot 365 = 5.784.252.090 \quad (1)$$

$$DAI = DA \cdot (0,39 + 0,009 + 0,005) \approx 2.336.837.845 \quad (2)$$

La decisión de no incluir el transporte público dentro de la simulación es tomada en el momento de comprobar que la siniestralidad entre este tipo de transporte y los VMPC no parece significativa respecto a los accidentes producidos entre vehículos privados y VMPC.

A la hora de tomar muestras de los accidentes se recurre al archivo de datos de la comunidad de Madrid del año 2019, ya que en años anteriores, el sistema de registro era diferente y no aportan datos tan completos y detallados, y en años posteriores, los datos no serían tan fiables debido a la pandemia mundial ocurrida en el año 2020 y sus consecuencias directas cuando nos enfocamos en la circulación de personas y vehículos en 2020 y 2021, donde se redujo drásticamente los desplazamientos realizados por individuo al año.

Una vez aclarada la elección del archivo y filtrándolo adecuadamente, obtenemos que en el año 2019 hubo 20.982 colisiones y 46598 vehículos implicados, si atendemos únicamente a los siniestros en los que están involucrados coches privados, furgonetas, motos, bicicletas, patinetes y VMU (vehículo de movilidad urbana). Con estos datos

Descripción de la solución propuesta

podemos calcular en la ecuación (3) el porcentaje de vehículos siniestrados al año VSA partiendo del DAI y los vehículos implicados en accidentes en 2019 VI . Este dato nos da una visión general de la siniestralidad anual, siendo esta bastante reducida.

$$VSA = (VI/DAI) * 100 = 1,99 * 10^{-5} \approx 0.002\% \text{ vehículos siniestrados } (3)$$

Para modelar el comportamiento de los agentes dentro de la simulación será necesario obtener los accidentes que se producen entre coches privados, furgonetas, motos, bicicletas, patinetes y VMU (Vehículo de Movilidad Urbana) en los tipos de vías que comprende el entorno de simulación. Estos son avenidas, calles y cruces.

Además, tal y como recomendaba el ITF, para facilitar el estudio del comportamiento y las posibles legislaciones futuras de los VMPC, se han agrupado las bicicletas, patinetes y VMU en la clase llamada bicicletas y para una mejor comprensión de la exposición de los datos, se ha optado por agrupar los coches privados, furgonetas y motos en una clase llamada coches. Esta decisión repercutirá directamente en la simulación simplificándola a dos tipos de agentes llamados también coches y bicicletas.

En la tabla (1) se muestra un conteo de accidentes distribuidos entre los diferentes tipos de vías que conforman el campus sur de la UPM y las diferentes agrupaciones de transportes indicado en el párrafo anterior.

Accidentes	Avenida	Calle	Cruce	Total
Coche - Coche	1105	3480	1041	5626
Coche - VMPC	27	119	31	177
VMPC - VMPC	1	11	2	14
Total	1133	3610	1074	5817

Tabla 1 Conteo de accidentes por tipo de vía y tipo de colisión

Descripción de la solución propuesta

De la tabla (1) se puede obtener toda la información necesaria para modelar el comportamiento de los agentes al encontrarse con otros en el mismo nodo y calcular si se producirá un siniestro entre ambos.

Mediante el cálculo de probabilidad condicionada se obtienen los porcentajes de accidentes que se producen entre cada par de medios de transporte y el tipo de vía en la que se produce.

A modo de ejemplo se muestra el cálculo de la probabilidad de que se produzca una colisión entre coches en una avenida. En la función (4) se calcula la probabilidad de que se produzca una colisión en una avenida $P(A)$ a partir del total de colisiones producidos en avenidas TA y el número total de colisiones To mostrado en la tabla (1)

$$P(A) = \frac{TA}{To} = \frac{1133}{5817} \approx 0.1948 \quad (4)$$

A continuación, en la función (5) se calcula la probabilidad de que se produzca un siniestro entre coches y en una avenida $P(A \cap CC)$ mediante el número de accidentes producidos entre coches en avenidas ACC y To .

$$P(A \cap CC) = \frac{ACC}{To} = \frac{1105}{5817} \approx 0.19 \quad (5)$$

Por último, la ecuación (6) permite calcular la probabilidad condicionada de que un accidente sea entre coches dado que se ha producido en una avenida $P(CC/A)$ a partir de las fórmulas (4) y (5)

$$P(A) = \frac{P(A \cap CC)}{P(A)} \approx 0.975 \quad (6)$$

Reproduciendo este mismo proceso para cada par de medios de transporte y vías contempladas se obtiene la figura (3) que se trata de un gráfico de correlación que permite apreciar la probabilidad en porcentajes de cada accidente.

Descripción de la solución propuesta

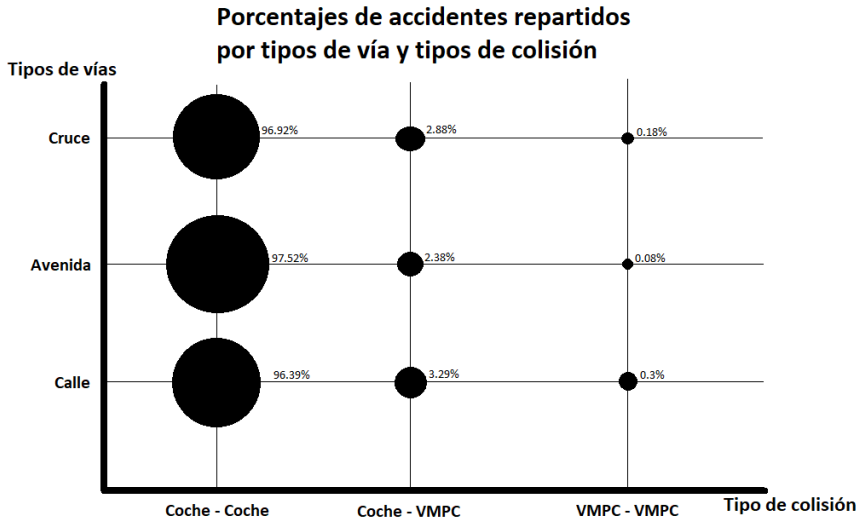


Fig. 3 Scatter plot con información de los porcentajes relativos a la probabilidad de accidentes en función de tipo de vía y tipo de vehículos implicados.

Teniendo esta información en cuenta, el siguiente paso para adecuar los valores a la simulación deseada es traducirlos a la ventana de tiempo planificada. Siguiendo el ejemplo anterior, en la ecuación (7) se adapta la $P(CC/A)$ obtenida en la ecuación (6) al periodo de 1 segundo que representará el tic de tiempo de simulación $P_s(CC/A)$.

$$P_s(A) = \frac{P(CC|A)}{365*24*60*60} = \frac{0.975}{31536000} \approx 3.09 * 10^{-8} \quad (7)$$

Tras calcular todas las probabilidades de colisión por tic de simulación y al resultar tan bajas, se toma la decisión de reajustar el tic de simulación para que represente 1 hora de tiempo y de esta forma, cada experimento realizado con la herramienta, arroje unos resultados más ricos en colisiones que permitan un mejor análisis, reduzcan la cantidad de experimentos necesarios para obtener unos resultados

Descripción de la solución propuesta

medibles y acorten el tiempo de uso de la herramienta resultante de este proyecto para llegar a unas conclusiones adecuadas.

En la ecuación (8) se muestra como calcular la probabilidad de colisión a la hora Ph para que refleje este reajuste del tic de simulación partiendo nuevamente de la $P(CC/A)$.

$$Ph(A) = \frac{P(CC|A)}{365*24} = \frac{0.975}{8760} \approx 1.11 * 10^{-4} \quad (8)$$

Visto esto, una vez calculadas todas las probabilidades condicionadas de colisión y ajustadas al tic de tiempo de simulación, se puede proceder a la implementación del modelo en la plataforma Netlogo.

4.3.Implementación en Netlogo

Para abordar la implementación de ABM en la plataforma Netlogo se ha escogido hacer una planificación gradual dividiendo el código en módulos que permitan comprobar su correcto funcionamiento antes de proseguir con el resto.

Inicialmente se configura el mapeado del campus sur de la UPM de tal forma que quede representado de forma gráfica y para ello es necesario agregar la extensión gis al modelo ya que permite utilizar mapas vectoriales.

Una vez incluido el mapa vectorial correspondiente al entramado vial del campus, es necesario tratarlo para crear links entre los nodos que lo componen. Estos links se agrupan en dos razas diferentes: *directed-link-breed* y *undirected-link-breed*. Esto se realiza para que las calles sean transitables en ambos sentidos asignándolas a la raza *undirected-link-breed* y, por el contrario, al asignar la avenida a la raza *directed-link-breed*, esta solo será transitable en sentido contrario a las agujas del reloj.

Descripción de la solución propuesta

Una vez configurados los dos mapas vectoriales, que compondrán el entorno de simulación, se colorean los links que representan los diferentes tipos de vías del campus sur y patches que representan los posibles destinos de los agentes dinámicos: biblioteca, CITSEM (Centro de Investigación en Tecnologías Software), ETSISI (Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas Informáticos), ETSIST (Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación), CSDMM (Centro Superior de Diseño de Moda de Madrid), ETSIT (Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Topografía) y cafetería. Esto facilita la comprensión del mapa a primera vista. En la figura (4) se observan las implementaciones gráficas sobre el entorno de simulación comentadas con anterioridad.



Fig. 4 Representación gráfica del entorno de simulación con la leyenda por colores de tipos de vías y destinos posibles para los agentes dinámicos

Descripción de la solución propuesta

Teniendo completamente configurada la interfaz gráfica del entorno de simulación y habiendo tratado el mapa vectorial para hacerlo transitable por los agentes dinámicos, es el momento de generar las dos razas de agentes que modelan el comportamiento de los medios de transporte contemplados: coches y bicicletas.

Para asignar el número de agentes participantes en la simulación y el reparto entre las dos razas se genera una caja para introducir el número total y un deslizador para repartir los agentes entre razas.

En la figura (5) se muestran la interfaz gráfica generada para la asignación de agentes.

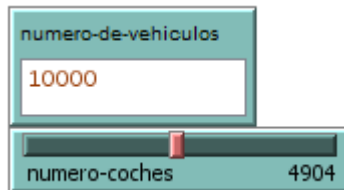


Fig. 5 Botones que componen la interfaz gráfica para la asignación de agentes

En este momento se incluye la biblioteca nw que permite utilizar el algoritmo de Dijkstra [33] para calcular los caminos más cortos hasta los destinos de cada agente. El cálculo de los caminos hasta el destino de cada agente se realiza al inicializar los agentes y en el momento que terminan su periodo de estancia en el campus.

Siguiendo con la inicialización de los agentes dinámicos, ambos se generan en la inicialización de la simulación, pero no empezarán a moverse hasta que su variable de hora-llegada coincida con los tics de simulación. De esta forma se simula la llegada de estudiantes de forma paulatina a lo largo del día. Como finalmente se cambió la ventana de tiempo, este método de comienzo de movimiento simula la llegada en diferentes días al campus a lo largo del mes.

Descripción de la solución propuesta

Este desarrollo se realiza mediante la primitiva random-normal que permite reproducir una distribución normal y que de esta forma se reparta aún más la llegada de agentes. Con esta misma primitiva se asigna el tiempo de estudio a 4 horas de media con una desviación estándar de 1 hora.

La decisión del cambio de duración de simulación de un día a un mes, comentado con anterioridad, se toma en el momento de comprobar que la probabilidad de accidentes es demasiado baja para ofrecer unos resultados analizables de las simulaciones llevadas a cabo por el ABM.

Para simular los accidentes entre agentes dinámicos se crea una función a la que se recurre cada vez que dos agentes coinciden en un mismo nodo. En ella se calcula la probabilidad de colisión y si resulta positiva, ambos agentes paran de desplazarse y cambian su color a rojo para poder observar en que punto del entramado vial han resultado siniestrados. En la figura (6) se aprecia este cambio de color.



Fig. 6 Representación gráfica de la colisión resultante entre dos agentes dinámicos

Las colisiones resultantes de la simulación se podrán observar mediante unos contadores de accidentes incluidos en la interfaz gráfica. En la figura (7) se observan los distintos contadores de siniestros incluidos en el ABM.

Descripción de la solución propuesta

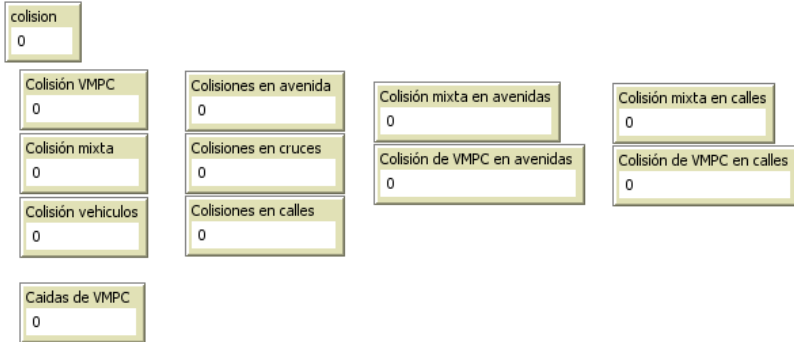


Fig. 7 Contadores de accidentes de la interfaz gráfica

Por último, para una mejor comprensión del objetivo de destino de cada agente en todo momento, se crea un sistema de colores que ayude a esta identificación.

Por una parte, los agentes que representan a los coches pueden adoptar tres colores diferentes dependiendo de su estado de simulación: marrón, si están de camino a los posibles destinos dentro de la universidad; azul, si se encuentran aparcados pasando tiempo estudiando y blanco, si se encuentran volviendo a casa después de haber pasado tiempo en la universidad.

Por otra parte, los agentes que representan a las bicicletas pueden adoptar cuatro colores diferentes: cian, si están de camino a los posibles destinos dentro de la universidad; rosa, si están de camino a los posibles destinos dentro de la universidad y además tiene prisa, por lo que no harán caso a las normas de circulación pudiendo ir en sentido contrario y ataja por calles cortadas; azul, si se encuentran aparcados pasando tiempo estudiando y blanco, si se encuentran volviendo a casa después de haber pasado tiempo en la universidad.

En la figura (8) se pueden apreciar todos los colores que pueden adoptar los agentes dinámicos del ABM.

Descripción de la solución propuesta



Fig. 8 Representación gráfica mediante colores del estado de circulación en el que se encuentran los agentes dinámicos

5. Resultados

En este capítulo se comprueba , tras finalizar el desarrollo del ABM, si los resultados de los diferentes escenarios de simulación, que se propondrán más adelante, resultan satisfactorios y si se ha alcanzado el objetivo principal del proyecto que, tal y como se ha mencionado en capítulos anteriores, es la creación de un modelo basado en agentes que establezca una base para desarrollar una herramienta fiable destinada a la toma de decisiones sobre qué medidas pueden ser beneficiosas en el ámbito de la seguridad vial centrándose en la siniestralidad de los VMPC.

A continuación, se proponen los tres escenarios de simulación planteados y seguidamente se explicará la configuración necesaria llevaba a cabo en la interfaz gráfica del modelo para cada uno de ellos. Tras esto se presentarán los resultados obtenidos en cada prueba y finalmente se interpretarán estos mismos resultados.

5.1. Escenarios de simulación

Para la comprobación del funcionamiento de ABM planteado como solución al problema de la incógnita que supone, en diferentes ámbitos, la inclusión de loa VMPC dentro del ecosistema vial actual, se han planteado tres escenarios principales de simulación modificando el número de agentes dinámicos de cada raza contemplado en el modelo.

El primer escenario de simulación propuesto respeta el entramado vial del campus sur de la UPM tal y como está dispuesto en la realidad, es decir, no disponiendo de un carril bici por cada calle y la avenida de campus y con ambas calles cerradas por uno de sus extremos, impidiendo la circulación de vehículos motorizados. De este escenario de simulación se espera la tasa de siniestralidad se asemeje a la real, calculada mediante los datos disponibles por la comunidad de Madrid

Resultados

En el segundo escenario de simulación ideado se abren las dos calles que atraviesan de forma vertical el campus por ambos extremos, permitiendo la libre circulación de vehículos motorizados y generando dos nuevos cruces de calles con avenidas. Este escenario de simulación ha sido propuesto ya que, en los mapas vectoriales encontrados del callejero de Madrid, ambas calles figuran como abiertas para su circulación por ambos extremos. De la simulación de este escenario no se esperan cambios significativos de la siniestralidad de ninguna de las dos razas de agentes dinámicos incluidos en el modelo.

En el tercer y último escenario de simulación se volverán a cortar las calles abiertas en el segundo escenario, pero se añadirá un carril bici para que los VMPC no compartan zonas viales salvo en cruces de calles con avenidas. De este escenario si se espera una reducción drástica de la siniestralidad entre VMPC y vehículos motorizados al disponer de una infraestructura propia de circulación para VMPC y reducir al mínimo su interacción vial con el resto de modos de transporte.

En los tres escenarios propuestos se harán diversas simulaciones modificando el número de agentes asignados a coches o bicicletas. De esta forma se podrá apreciar una evolución de la siniestralidad producida en cada uno de los escenarios.

La modificación del número de agentes de cada raza irá desde la asignación del 100% de los agentes a la raza coches e irá disminuyendo su tasa de uso asignando un 75%, 50%, 25%, y 0%. El resto de porcentaje se asignará a la otra raza que componen los agentes dinámicos, las bicicletas.

Para el cálculo del número de agentes que participarán en los diferentes escenarios se ha tenido en cuenta que cada simulación consta de 40 días, pero los agentes solo pueden llegar al campus durante los 30 primeros y se ha apoyado este cálculo en los informes elaborados por

Resultados

Jimena Rodríguez Sagredo y Bárbara Álvarez Pérez incluidos en sus respectivos PFG (Proyecto Fin de Grado). El cálculo del número de personas que acuden al campus sur de la UPM en el periodo de un mes, sin tener en cuenta los alumnos del centro superior de diseño de moda de Madrid ni el personal docente de cada una de las escuelas ni los trabajadores del campus, da como resultado unas 17000 personas de forma aproximada. Teniendo en cuenta este número se va a suponer que el total de personas acuden en vehículos motorizados y VMPC al campus para que los resultados de las simulaciones arrojen unos resultados más completos y numerosos en cuanto a siniestros se refieren, es decir, se simulará el caso más extremo en los escenarios propuestos. Tras comprobar una primera simulación con este número de agentes se opta por reducirlo a 10000 agentes por simulación para que la obtención de resultados sea más ágil y, en el caso de no tener un ordenador lo suficientemente potente, no se cuelgue o en el peor de los casos se apague por calentamiento.

5.2. Configuración de escenarios

Para la configuración del primer escenario de simulación, se pondrá en de apagado el botón correspondiente a la inclusión del carril bici y se encenderá el botón que corta las dos calles que atraviesan el campus de forma vertical para representar el de forma realista la disposición del campus, tal y como se ha comentado anteriormente.

En la figura (9) se aprecia la configuración inicial de la interfaz de usuario del primer escenario propuesto y en la figura (10) se ve el detalle de la configuración de botones

Resultados

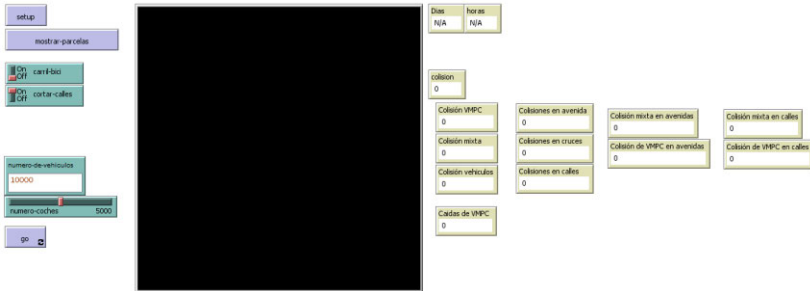


Fig. 9 Interfaz gráfica del ABM en la plataforma Netlogo

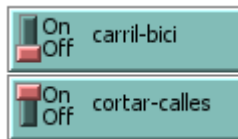


Fig. 10 Configuración de botones para la realización del escenario 1 de simulación

En el segundo escenario, ambos botones permanecerán apagados, suponiendo así la apertura de las calles del campus para hacerlas transitables para vehículos motorizados

En la figura (11) se observa el detalle del cambio realizado frente al escenario anterior.

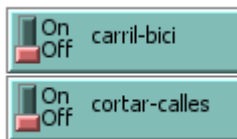


Fig. 11 Configuración de botones para la realización del escenario 2 de simulación

En el último escenario, se encenderá el botón que habilita un carril bici para la circulación de los VMPC y también se encenderá el botón para cortar las calles del campus de nuevo. De esta forma se respeta la

Resultados

disposición vial del campus sur y se separa el flujo de las diferentes razas de agentes dinámicos del modelo.

En la figura (12) se muestra la configuración de los botones de la interfaz gráfica para el tercer escenario de simulación.

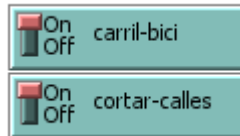


Fig. 12 Configuración de botones para la realización del escenario 3 de simulación

La configuración del número de agentes dinámicos y su reparto entre las dos razas comprendidas en el modelo es la misma para los tres escenarios propuestos. Por un lado, se escribe el número total de agentes participantes en todas las simulaciones, y por otro se moverá el deslizador que asigna el número de agentes que conformarán la raza coches del modelo. Se recuerda que resta del total de agentes y los coches será el número de agentes asignados a la raza bicicletas.

En la figura (13) se muestra el ejemplo de asignación del 50% de agentes dinámicos a cada raza comprendida en el modelo.

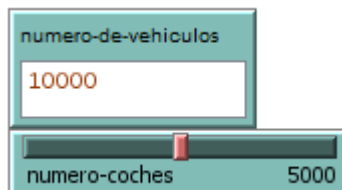


Fig. 13 Configuración del número de agentes y slider para la realización de todos los escenarios de simulación en el caso del 50% de uso de coches

Para la inicialización de las simulaciones es necesario accionar el botón setup que se encargará de generar el mapa vectorial que

Resultados

recorrerán los agentes dinámicos y los propios agentes dinámicos. Si se desea se puede activar el botón mostrar-parcelas encargado de suministrar un mapa que resulta más comprensible a contar con las parcelas del campus, una representación de los edificios mediante colores y unas carreteras más visibles.

En la figura (14) se aprecia la interfaz visual del mapa del campus que se consigue al activar el botón setup y mostrar-parcelas



Fig. 14 Representación del entorno de simulación del ABM acotado al campus sur de la UPM

Finalmente, para iniciar las simulaciones se hará clic sobre el botón go situado en la parte inferior izquierda de la interfaz gráfica de Netlogo.

5.3.Resultados de la simulación de escenarios

Para la obtención de resultados de los escenarios planteados, se han simulado cinco veces cada escenario con cada porcentaje de uso de los coches, esto hará un total de 25 simulaciones por escenario. Tras esto, se recopilan los datos resultantes de cada simulación y se hace una media de los accidentes producidos en cada una de ellas.

Resultados

5.3.1. Escenario 1

En la figura (15) se aprecia la media del total de accidentes producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 1.

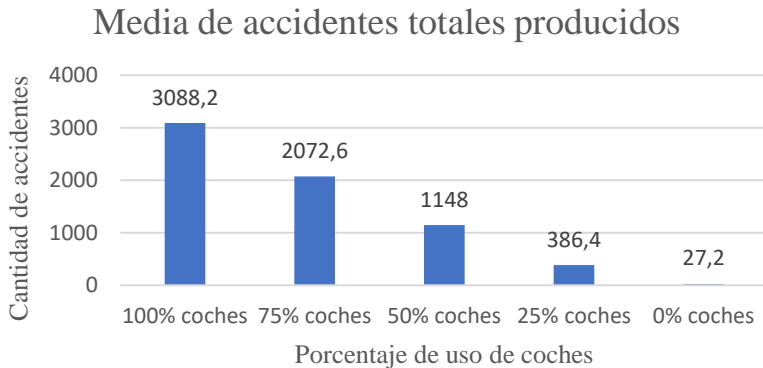


Fig. 15 Gráfica con información de la media de accidentes totales producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 1

En la figura (16) se muestra el reparto de los accidentes que se producen entre los dos tipos de agentes dinámicos del modelo.

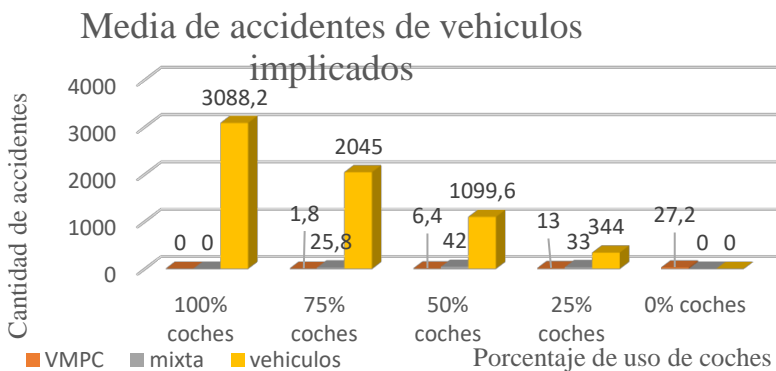


Fig. 16 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vehículos involucrados en el escenario 1

Resultados

En la figura (17) se puede observar el reparto de accidentes por tipo de vía en los que se producen.

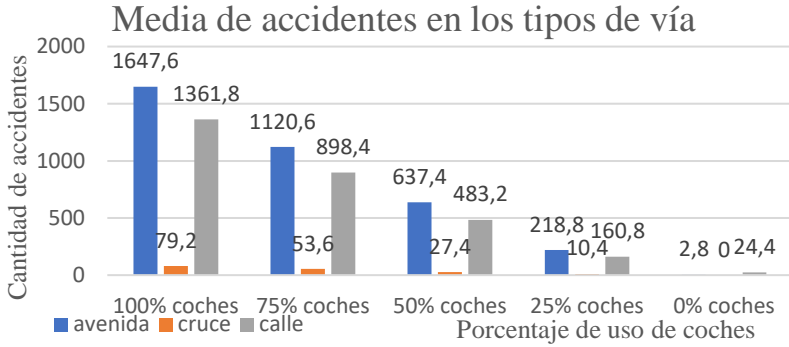


Fig. 17 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vía donde se producen en el escenario 1

5.3.2. Escenario 2

En la figura (18) se aprecia la media del total de accidentes producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 2.

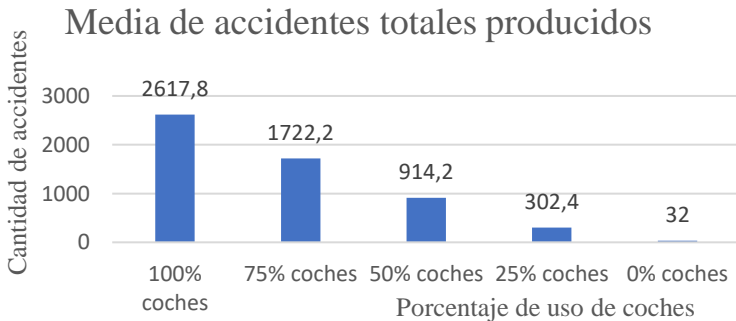


Fig. 18 Gráfica con información de la media de accidentes totales producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 2

En la figura (19) se muestra el reparto de los accidentes que se producen entre los dos tipos de agentes dinámicos del modelo.

Resultados

Media de accidentes de vehículos implicados

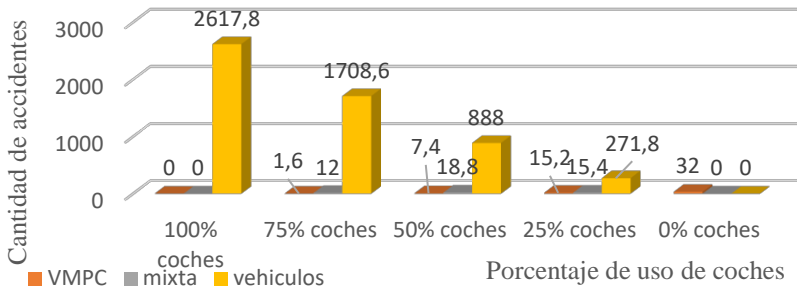


Fig. 19 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vehículos involucrados en el escenario 2

En la figura (20) se puede observar el reparto de accidentes por tipo de vía en los que se producen.

Media de accidentes en los tipos de vía

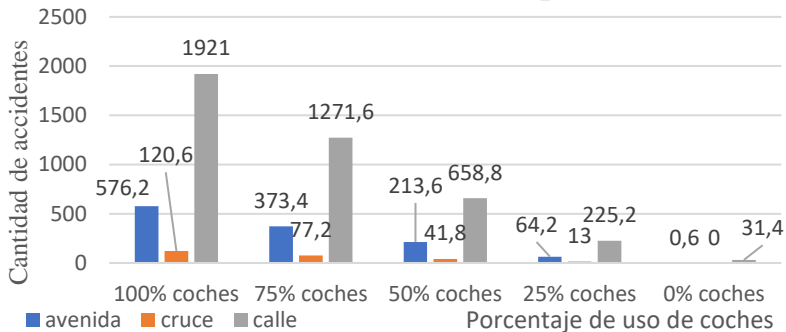


Fig. 20 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vía donde se producen en el escenario 2

5.3.3. Escenario 3

En la figura (21) se aprecia la media del total de accidentes producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 3.

Resultados

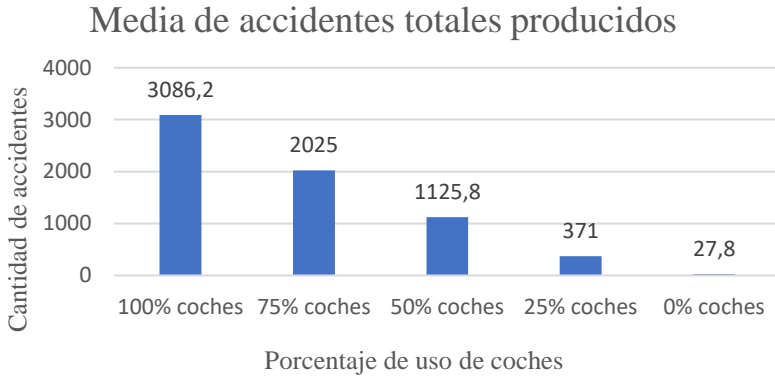


Fig. 21 Gráfica con información de la media de accidentes totales producidos en las simulaciones llevadas a cabo en el escenario 3

En la figura (22) se muestra el reparto de los accidentes que se producen entre los dos tipos de agentes dinámicos del modelo.

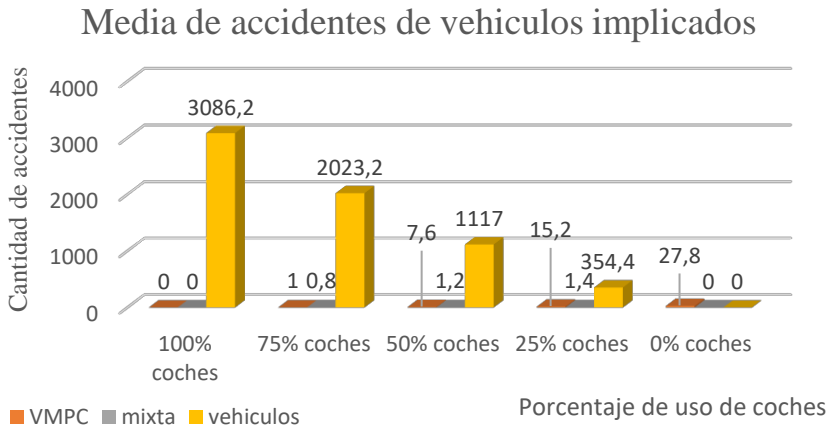


Fig. 22 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vehículos involucrados en el escenario 3

En la figura (23) se puede observar el reparto de accidentes por tipo de vía en los que se producen.

Resultados

Media de accidentes en los tipos de vía

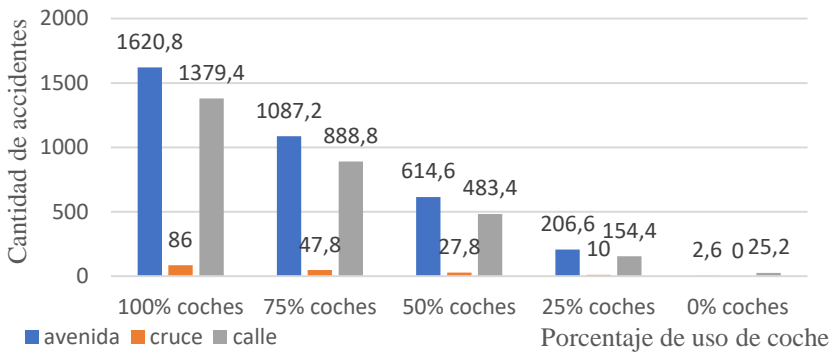


Fig. 23 Gráfica con información de la media de accidentes totales repartidos por tipo de vía donde se producen en el escenario 3

5.4. Análisis de resultados y comparación de escenarios

Para comenzar a analizar los resultados de las simulaciones se prestará atención a la figura (15), donde se muestra la media de accidentes totales a lo largo de las 25 simulaciones realizadas en el primer escenario.

Llama la atención que al asignar el 100% de uso de coches como método de transporte, se producen 3088 accidentes de media. Esta cifra resulta peculiarmente alta y se debe a la forma de moverse que tienen los agentes dinámicos por el mapa de nodos que conforman el entramado vial del modelo.

Ya que el modelo no tiene en cuenta la velocidad de cada agente para avanzar más o menos nodos por tic de tiempo, lo cual reflejaría los m/s o km/h a los que se moverían los diferentes medios de transporte, en el momento que dos agentes se encuentren el mismo nodo y tengan la misma dirección de movimiento, avanzaran un nodo por tic y esto

Resultados

resultará en un movimiento en paralelo por las diferentes vías durante un amplio periodo de tiempo. Además, hay que recordar que cada vez que dos agentes coinciden en un nodo, se calcula su posibilidad de resultar colisionados entre ellos, por lo que esto desencadena muchas posibles opciones de colisionar y da como resultado el amplio número de colisiones producidas en la simulación.

Esta situación es común en los tres escenarios de simulación por lo que hay que tener en mente que los resultados finales, haciendo un buen modelado del desplazamiento de los agentes, resultarían mucho menos abultados.

Pese a esta situación, si fijamos la atención en la figura (18), observamos que el número total de accidentes de tráfico producidos, en comparación con los escenarios 1 y 3, es bastante menor. Al abrir los extremos de las calles que cruzan verticalmente el campus sur, se genera una ruta de llegada a los destinos mucho más rápida por lo que todos los agentes optan por no recorrer la avenida. Este efecto se aprecia en el reparto de accidentes en la figura (24)



Fig. 24 Mapa con los accidentes resultantes de simular el escenario 2 donde se abren las calles cortadas del campus sur de la UPM

Resultados

Esto repercute en el número de accidentes por dos motivos. El primero de ellos es que la probabilidad de colisión más alta de todas las contempladas en el modelo se produce en accidentes entre dos coches en avenidas y como se aprecia en la figura (24), toda la parte izquierda de la avenida que rodea el campus no es usada por los agentes. El segundo motivo tiene que ver con la creación de mapa de nodos que conforman el entramado vial. Para representar una recta en el modelo se crean dos nodos y se une mediante un link, pero para representar una curva se generan muchos nodos para dar la sensación de curvatura en la representación gráfica. Esto hace que se acumulen nodos de forma excesiva en las curvas viales del campus y, tal y como se ha explicado con anterioridad, esto resulta en una acumulación de la mayor parte de los accidentes en las curvas. Como los agentes no optan por recorrer toda la parte izquierda de la avenida y en esta se encuentra una gran curva, todos los accidentes que se producen en ese punto en los escenarios 1 y 3 no quedan reflejados en el escenario 2.

Otro resultado que llama la atención es que si nos centramos en la graficas que muestra el reparto de accidentes por tipo de vía, apenas se producen siniestros en los cruces pese a tener unas probabilidades de colisión de vehículos similares a las de una calle. Esto se debe a que en el campus sur solo se encuentran dos uniones de calles con avenidas que corresponden a dos únicos nodos de todos los generados para que los agentes dinámicos se muevan. Si se observa la gráfica de la figura (20) correspondiente al escenario 2 donde se abrían las calles, generando dos nodos más de estas características, se refuerza esta teoría, ya que se puede apreciar un aumento significativo de las colisiones en los cruces.

Prestando atención a las figuras (16) (19) y (22) donde se muestran los accidentes agrupados por tipo de vehículos involucrados en los siniestros, podemos observar que en el escenario 3, donde se implementaba el carril bici para la circulación de VMPC, las colisiones

Resultados

mixtas se reducen prácticamente a cero. Esto se debe a que los únicos puntos donde pueden encontrarse coches y bicicletas en las simulaciones se corresponden a los cruces de calles con avenidas. De aquí se puede deducir que la mejor forma de incluir a los VMPC en el ecosistema vial de una ciudad es creando una infraestructura adaptada para su circulación sin tener que compartir espacio con vehículos motorizados. Además, estas colisiones se podrían reducir a cero si se incluyese, por ejemplo, pasos de peatones con semáforos en los cruces y que los VMPC pudieran utilizarlos.

Por último, tal y como se aprecia en todas las gráficas aportadas en los resultados de simulación de los tres escenarios, los accidentes disminuyen drásticamente según decrece el porcentaje el uso de los vehículos motorizados, representados por los coches en el modelo. Esta disminución oscila en torno al 35-40% cuando se reduce el uso de coches a la mitad, evidenciando lo que se adelantaba en anteriores capítulos de la memoria cuando se hablaba del ITF el cual apuntaba a que había que centrarse en los vehículos motorizados para que la inclusión de VMPC en espacios compartidos por ambos tipos de transporte no suponga un aumento de la siniestralidad.

Teniendo estos análisis en cuenta, se puede concluir del ABM desarrollado en este proyecto puede llegar a ser una buena herramienta para facilitar la toma de decisiones a la hora de afrontar el reto de la inclusión de los VMPC en los sistemas viales de las ciudades. De momento, tal y como se ha comentado, el modelo tiene algunas carencias o fallos de diseño que deben ser solventadas en el futuro para terminar de convertirse en la herramienta deseada, pero, en vista de los resultados, parece que el ABM desarrollado puede suponer una buena base para continuar el desarrollo necesario.

6. Presupuesto

En este capítulo se aborda la justificación de los costes de realización del proyecto. Se valora el coste de personal para el desarrollo de la herramienta teniendo en cuenta el convenio colectivo de la AEC (Asociación Española de Empresas de Consultoría) [34] y se calcula el coste de los materiales y el mantenimiento del sistema.

Hay que tener en cuenta que para llevar a cabo el proyecto y desarrollo de la herramienta propuesta es necesario, al menos, un perfil de ingeniero junior que realice todas las funciones y que se estima una inversión de tiempo de no menos de 320 horas. Del convenio colectivo de la AEC se calcula que la tarifa horaria para un puesto de las características necesarias para el desarrollo planteado es de unos 14 €/hora, por tanto, el coste de personal asciende a 4.480 €.

Para calcular el coste de los materiales necesarios solo se tiene en cuenta el coste del ordenador donde se lleve a cabo el desarrollo del ABM y la posterior ejecución de la herramienta resultante llevando a cabo las simulaciones oportunas puesto que todo el software utilizado es de código abierto.

Para la fluidez de las simulaciones se recomienda un ordenador de sobremesa de 8 núcleos, 8 GB de memoria RAM, 512 GB de SSD y sistema operativo Windows 10. Teniendo en cuenta estas características, el precio orientativo del ordenador se sitúa en los 600 €.

Por tanto, el presupuesto total para el desarrollo del proyecto asciende a los 5.080€

Para continuar con el desarrollo y mantenimiento de la herramienta se prevé la necesidad de una persona encargada de la mejora del ABM y un servidor donde alojar la información resultante. La tarifa horaria calculada para el puesto de desarrollo sigue siendo 14 €/hora y teniendo en cuenta que las horas laborables anuales son 1.728, si se

Presupuesto

dedicase un ingeniero a tiempo completo durante todo el año al desarrollo de la herramienta y realización de simulaciones, el precio ascendería a 24.502 €.

A la hora de elegir un servidor se opta por una opción económica al no necesitar un hardware muy potente. Un servidor de torre con las características necesarias para alojar los resultados de las simulaciones de la herramienta ronda un precio de 450 €.

Por tanto, el presupuesto total para continuar el desarrollo y mejora de la herramienta resultante del proyecto asciende a 24.952 €.

Conclusiones

7. Conclusiones

El problema planteado al inicio de este proyecto es la incertidumbre respecto al uso de VMPC en zonas urbanas. El espectacular auge de este tipo de transportes en ciudades y el incremento constante de su uso apunta a una posible sustitución de los sistemas de movilidad actualmente establecidos, centrados principalmente en el uso de vehículos motorizados.

La preocupación principal en la que se centra este proyecto, es si el aumento de uso de los VMPC y el hecho de tener que compartir espacios de circulación podría suponer un aumento de la siniestralidad vial.

Para dar respuesta a esta cuestión resulta conveniente realizar un análisis sobre la seguridad vial que pueden llegar a ofrecer los VMPC simulando su comportamiento en un entorno controlado sin que suponga ningún riesgo para los ciudadanos. Para ello se plantea un ABM desarrollado en la plataforma de código abierto Netlogo, que sirva como base para la creación de una herramienta en la cual se puedan analizar los resultados obtenidos y ayudar a la toma de decisiones, por ejemplo, en el ámbito legislativo o si es necesario la creación de infraestructuras reservadas para estas nuevas formas de movilidad.

Atendiendo a la información mostrada en esta memoria se puede concluir que se ha alcanzado el objetivo principal de crear un ABM que ayude a analizar la siniestralidad espacial que produce la inclusión de los VMPC en el tráfico urbano.

Como se ha comprobado, aún falta mejorar el ABM para que los datos resultantes de las simulaciones sean todo lo interesantes que cabría desear. Esto es debido a los diversos problemas que han ido surgiendo a lo largo de la evolución del proyecto como, por ejemplo, enfrentarse

Conclusiones

a desarrollar por primera vez un ABM en la plataforma Netlogo, derivando esto en un aumento considerable de horas de programación, que, a su vez, ha repercutido directamente en la falta de tiempo para incluir otros aspectos de la vida real que en un primer momento se pensaron incluir en el comportamiento de los agentes.

Otro de los problemas con el que se tuvo que lidiar fue la inexactitud de los datos de siniestralidad en Madrid recabados debido a no tener una nomenclatura uniforme de los tipos de vías en los que se producen accidentes. Esto refleja la necesidad por parte de las autoridades de mejorar a la hora de recabar datos para poder hacer un uso más eficiente de ellos y conseguir mejorar los servicios que se ofrecen en las ciudades

Dicho esto, sería conveniente continuar el desarrollo del ABM resultante de este proyecto para concluir en una herramienta completamente fiable y robusta.

7.1.Líneas futuras de trabajo

Para continuar el desarrollo de la herramienta propuesta conviene enriquecer el modelo de diversas formas.

Por un lado, es interesante incluir una nueva raza de agente dinámico que imite el comportamiento de los peatones, permitiendo así valorar si los VMPC pueden llegar a compartir espacios si incurrir en un aumento de la siniestralidad entre ellos. Pese a que estos datos en España no son significativos, ya que apenas se producen accidentes entre VMP y peatones, esto puede ser debido a la carencia cultural del uso de las bicicletas como medio de transporte. Cultura que si poseen otros países de Europa de donde se podría recopilar información.

Otra línea de enriquecimiento del modelo, que finalmente no se llevó a cabo por falta de tiempo, es la inclusión de la siniestralidad por perspectiva de género puesto que, según los datos que se recopilaron

Conclusiones

sobre la siniestralidad en Madrid, los hombres sufren un mayor número de accidentes que las mujeres.

Por falta de información sobre los accidentes que ocurren entre vehículos que no respetan las normas de circulación, no se pudo aprovechar el comportamiento modelado en bicicletas con prisa que añaden peligrosidad y posiblemente un incremento de siniestralidad, por lo que resultaría interesante seguir esta línea de simulación del comportamiento en el momento que se dispongan de los datos necesarios.

Para recortar en el tiempo de desarrollo se optó por agrupar los diferentes vehículos motorizados utilizados en el campus en la raza de agentes denominada coches, pero para una mayor exactitud de los datos recabados después de ejecutar las simulaciones, resultaría conveniente, al menos, separar las motos de esta raza o incluir los autobuses al ser un medio de transporte muy popular dentro del campus.

Para finalizar se propone aumentar el entorno de simulación e incluir el recorrido desde la estación de metro y cercanías cercana al campus, permitiendo así simular la siniestralidad de los VMPC en rotondas y analizar si es conveniente la instalación de zonas de carga a lo largo del entorno de simulación encuestando, por ejemplo, a los alumnos sobre si estarían dispuestos a sustituir los viajes en autobús desde la estación al campus por la movilidad sostenible que ofrecen los VMPC.

8. Lista de referencias bibliográficas

[1] “The Opportunity To Reshape Cities With Shared Mobility Data. Regina Clewlow.” forbes.com [Online], [Consulta: 23-06-2021] Disponible en:

<https://www.forbes.com/sites/reginaclewlow/2018/10/10/the-opportunity-to-reshape-cities-with-shared-mobility-data/>

[2] S. Yoshiro, “Vehicle Dynamics and Control for Sustainable Transport” presentado en 13th Asia Pacific Vibration Conference, New Zealand, 22 - 25 November 2009.

[3] C. M. Macal y M. J. North, “Tutorial on agent-based modeling and simulation”, *J Simulation* 4, 151–162, Sep. 2010.

[4] “¿Qué es el open source?” redhat.com [Online], [Consulta: 26-06-2021] Disponible en:

<https://www.redhat.com/es/topics/open-source/what-is-open-source>

[5] Wilensky, U. (1999). NetLogo. [Online], [Consulta: 03-07-2021] Disponible en: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

[6] M. Batty, K.W. Axhausen, F. Giannotti, et al. “Smart cities of the future.” *Eur. Phys. J. Spec. Top.* N° 214, pp 481–518. Nov. 2012, DOI: 10.1140/epjst/e2012-01703-3

[7] Mark Deakin & Husam Al Waer “From intelligent to smart cities”, *Intelligent Buildings International*, N° 3, pp 140-152, Jul, 2011. DOI: 10.1080/17508975.2011.586671

[8] V. Grimm et al. “A standard protocol for describing individual-based and agent-based models.” *Ecol. Model.* N° 198, pp 115–126. Sep. 2006, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023

[9] V. Grimm, U. Berger, D. DeAngelis, J.G. Polhill, J. Giske, y S. Railsback, “The ODD protocol: A review and first update.” *Ecol.*

Lista de referencias bibliográficas

Model. N° 221, pp 2760-2768. Nov, 2010. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019

[10] “Desafíos globales: Población” un.org [Online] [Consulta: 22-06-2021] Disponible en: <https://www.un.org/es/global-issues/population>

[11] “Objetivos de desarrollo sostenible. Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles“ un.org [Online][Consulta:22-0.6-2021] Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

[12] S. F. Dorotaa, “Factores de desarrollo de las ciudades sostenibles.” *Revista Universitaria de Geografía*, vol 26, N° 1, pp. 135-152 Jun. 2017.

[13] C. Harrison, B. Eckman, R. Hamilton, P. Hartswick, J. Kalagnanam, P. Williams, “Foundations for Smarter Cities”. *IBM J.Res.Dev.* 54, 1-16, Sep. 2010. DOI: 10.1147/JRD.2010.2048257

[14] F. Pérez, V. Velázquez, V. Fernández, J. Dorao, “Movilidad inteligente. TRANS y T -UPM.” *Revista Economía Industrial*, N° 395, pp. 111-121, 2015.

[15] “Accidentes de tráfico con implicación de bicicletas” datos.madrid.es [Online] [Consulta: 25-06-2021] Disponible en: <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9fbe4b2e4b284f1a5a0/?vgnnextoid=20f4a87ebb65b510VgnVCM100001d4a900aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM10000171f5a0aRCRD&vgnnextfmt=default>

[16] Anuncio del Excelentísimo Ayuntamiento de Valencia sobre aprobación definitiva de la Ordenanza de Movilidad. En: *BOP de Valencia 17 May 2019* [Online] Disponible en: <https://bop.dival.es/bop/drvisapi.dll?LO=00000001a6b7c8d9000000050000005e00000091434f18bd000000000010000000000000000000>

Lista de referencias bibliográficas

- [23] J. Pavón, A. López-P. y J. M. Galán. “Modelado basado en agentes para el estudio de sistemas complejos”, *Novática*. Nº 218, pp. 13-16. May 2012
- [24] P. Taillandier, B. Gaudou, A. Grignard, Q.N. Huynh, N. Marilleau, P. Caillou, D. Philippon, A. Drogoul, “Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform.” *Geoinformatica*, Nº 23, Abr, 2019 DOI: 10.1007/s10707-018-00339-6.
- [25] M.J. North, N.T. Collier, J. Ozik, E. Tataru, M. Altaweel, C.M. Macal, M. Bragen, y P. Sydelko, "Complex Adaptive Systems Modeling with Repast Symphony", *Complex Adaptive Systems Modeling*, Nº1 Oct. 2013. DOI: 10.1186/2194-3206-1-3.
- [26] P. Bommel, N. Bécu, C. Le Page, F. Bousquet, 2015. “Cormas, an Agent-Based simulation platform for coupling human decisions with computerized dynamics.” En *Simulation and Gaming in the Network Society*. T. Kaneda, H. Kanegae, Y. Toyoda, & P. Rizzi, Volume 9 of the series Translational Systems Sciences pp 387-410. DOI:10.1007/978-981-10-0575-6_27.
- [27] A. Aguilera, M. Posada, “Introducción al modelado basado en agentes. Una aproximación desde Netlogo” El Colegio de San Luis 2018.
- [28] A. Sastre, “Herramienta de modelado de entornos virtuales inteligentes” (Trabajo fin de grado) Escuela técnica superior de ingeniería informática de la Universidad Politécnica de Valencia, 2019. [Online] Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/128596/Sastre%20-%20Herramienta%20de%20modelado%20de%20entornos%20virtual%20es%20inteligentes.pdf?sequence=1>

Lista de referencias bibliográficas

[29] “Centro de descargas del Centro Nacional de Información Geográfica” centrodedescargas.cnig.es [Online] Disponible en: <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

[30] “Mapa del callejero de la comunidad de Madrid”. datos.comunidad.madrid Catalogo de datos abiertos [Online] Disponible en: <https://datos.comunidad.madrid/catalogo/dataset/spacmcalles2018/resource/f15b6ffa-fd25-4f4c-a381-6501aa972392>

[31] “Encuesta domiciliaria de movilidad 2018” crtm.es [Online] Disponible en: <https://www.crtm.es/conocenos/planificacion-estudios-y-proyectos/encuesta-domiciliaria/edm2018.aspx>

[32] “Accidentes de tráfico de la Ciudad de Madrid” crtm.es [Online] Disponible en: <https://www.crtm.es/conocenos/planificacion-estudios-y-proyectos/encuesta-domiciliaria/edm2018.aspx>

[33] E.W. Dijkstra, “A note on two problems in connexion with graphs.” *Numerische Mathematik*. N°1, pp269–271. 11, Jun. 1959. DOI: 10.1007/BF01386390

[34] XII Convenio colectivo estatal de empresas de consultoría, y estudios de mercado y de la opinión pública. Boletín oficial del estado, 57, 6 de marzo de 2018, 26951 a 26981. Disponible en: <https://aeconsultoras.com/wp-content/uploads/2020/01/XVII-Convenio-Colectivo-Consultoras-BOE-06-03-2018.pdf>