



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Autor: Adrián Ampuero Sánchez

Director: Dr. Antonio García y Garmendia

Madrid

Agosto de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Plan de Evacuación y Defensa de una Ciudad
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso
académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado
con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni
parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está
debidamente referenciada.



Fdo.: Adrián Ampuero Sánchez

Fecha: 25/ 08/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Dr. Antonio García y de Garmendia

Fecha: 25/ 08/ 2025

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN DEL PROYECTO	15
I. INTRODUCCIÓN	15
II. ESTADO DEL ARTE	17
III. DESARROLLO DEL PLAN DE EVACUACIÓN Y SELECCIÓN DEL MODELO	19
IV. APLICACIÓN NUMÉRICA DEL PLAN DE EVACUACIÓN.....	22
V. ANÁLISIS ECONÓMICO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	25
VI. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	27
ABSTRACT	30
I. INTRODUCTION	30
II. STATE OF THE ART	32
III. DEVELOPMENT OF THE EVACUATION PLAN AND MODEL SELECTION	34
IV. NUMERICAL APPLICATION OF THE EVACUATION PLAN.....	37
V. ECONOMIC ANALYSIS AND COMPARISON OF RESULTS.....	40
VI. CONCLUSIONS AND FUTURE DEVELOPMENTS	42
MEMORIA	45
I. INTRODUCCIÓN	46
1. MOTIVACIÓN	46
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	48
3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	49
4. ESTRUCTURA DEL PROYECTO	50
5. HERRAMIENTAS EMPLEADAS EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO	52
II. ESTADO DEL ARTE	53
1. PROPUESTA INSTITUCIONAL SOBRE LAS EVACUACIONES	55
2. FRAMEWORKS Y TEORÍAS PARA LOS PLANES DE EVACUACIÓN	60

3. MODELOS MATEMÁTICOS CUANTITATIVOS	71
4. TECNOLOGÍA EMPLEADA EN LOS PLANES DE EVACUACIÓN	81
5. CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DEL ESTADO DEL ARTE	85
III. DESARROLLO DEL PLAN DE EVACUACIÓN Y SELECCIÓN DEL MODELO	87
1. ESTUDIO DE LOS PRELIGROS DE CEUTA Y MELILLA	88
2. ESTUDIO DE LOS LUGARES SEGUROS PARA LA EVACUACIÓN	94
3. REDES DE TRANSPORTE PARA LAS CIUDADES DE CEUTA Y MELILLA.....	105
4. MATRIZ ORIGEN DESTINO (OD)	116
5. MODELOS MATEMÁTICOS A EMPLEAR EN LA SIMULACIÓN	118
6. CONCLUSIONES OBTENIDAS DEL DESARROLLO DEL PLAN DE EVACUACIÓN.....	121
IV. APLICACIÓN NUMÉRICA DEL PLAN DE EVACUACIÓN.....	123
1. CARACTERIZACIÓN DE LAS REDES DE TRANSPORTE VIAL EN CEUTA Y MELILLA	124
2. CREACIÓN DE LA MATRIZ ORIGEN DESTINO (MATRIZ OD).....	128
3. MODELO DE FRANK-WOLFE PARA LA EVACUACIÓN	140
4. CONCLUSIONES OBTENIDAS DE LA APLICACIÓN NUMÉRICA DEL PLAN DE EVACUACIÓN	167
V. ANÁLISIS ECONÓMICO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	169
1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS PLANES DE EVACUACIÓN DE CEUTA Y MELILLA	169
2. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PLAN DE EVACUACIÓN.....	179
VI. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	184
1. CONCLUSIONES.....	184
2. DESARROLLOS FUTUROS	189
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	191

ANEXOS	198
I. CÓDIGO EMPLEADO PARA LA EJECUCIÓN DEL MODELO DE EQUILIBRIO DE USUARIO	199
II. CÓDIGO EMPLEADO PARA LA EJECUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA	208

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla respecto a Marruecos	47
Figura 2. Organigrama general del PROCICAT para situaciones de emergencia	57
Figura 3. Organigrama operativo del PLATERCAM para situaciones de emergencia	58
Figura 4. Framework del Plan de Contingencia para Evacuaciones de Emergencia en Áreas Urbanas (IUE ² CP)	60
Figura 5. Componentes claves para la ejecución IUE ² CP en la villa olímpica de Pekín.	61
Figura 6. Diagrama de Flujo a seguir para la solución de los problemas de evacuación	63
Figura 7. Planificación para condiciones extraordinarias	65
Figura 8. Convergencia para las condiciones ordinarias y extraordinarias	66
Figura 9. a) Diagrama propuesto para hacer frente a un desastre. b) Zoom-In dentro de la fase de preparación del diagrama anterior.	66
Figura 10. Diagrama de Flujo para la Gestión Integral del Riesgo.	67
Figura 11. Esquema LFA adaptado a la evacuación vial	69
Figura 12. Ejemplo de una red sencilla ya resuelta mediante el modelo de Ford-Fulkerson	73
Figura 13. Red de transporte del modelo Nguyen-Dupuis.	75
Figura 14. Modelo de red de transporte de Sioux Falls.	76
Figura 15. Zona de Buffer y ruta de evacuación propuestas para un incendio.	81
Figura 16. Delimitación de las zonas de evacuación del tsunami en base a la información obtenida en tiempo real.	82
Figura 17. Vista satelital de la ciudad autónoma de Ceuta. Fuente: (Google Maps, 2025)	88
Figura 18. Vista satelital de la ciudad autónoma de Melilla. Fuente: (Google Maps, 2025)	89
Figura 19. Mapa topográfico de la ciudad autónoma de Ceuta	90
Figura 20. Vista de la frontera entre de Ceuta y Marruecos. Fuente: (Google Earth, 2025)	91
Figura 21. Vista del puesto de control del paso fronterizo El Tarajal. Fuente (Google Maps, 2020)	92
Figura 22. Mapa topográfico de la ciudad autónoma de Melilla	93

Figura 23. Mapa con las ubicaciones de Ceuta y Melilla respecto a España y Marruecos	95
Figura 24. Modelo de parking optimizado para minimizar el espacio requerido	98
Figura 25. Vista del puerto de Ceuta. Fuente: (Google Maps, 2025)	99
Figura 26. Potencial superficie de estacionamiento para los vehículos en evacuación	100
Figura 27. Vista de la zona sur de Melilla, marcados el aeropuerto, el puerto y el paso de Beni-Enzar	101
Figura 28. Potencial superficie de estacionamiento de vehículos en Rostrogordo	103
Figura 29. Red de transporte vial Cabellos Cortés para Ceuta	106
Figura 30. Red de transporte vial de Ceuta con datos de OpenStreetMap	107
Figura 31. Red de transporte vial de Melilla con datos de OpenStreetMap	108
Figura 32. Mapa de Ceuta mostrando todos los núcleos poblacionales	109
Figura 33. Red de transporte vial propuesta para la evacuación de Ceuta	110
Figura 34. Red de transporte vial propuesta para la evacuación de Ceuta con nodos	110
Figura 35. Red de transporte vial para Ceuta presentado en formato clásico de nodos y arcos	111
Figura 36. Mapa de Melilla mostrando todos los núcleos poblacionales	112
Figura 37. Red transporte vial propuesta para la evacuación de Melilla	113
Figura 38. Red de transporte vial propuesta para la evacuación de Melilla con nodos	114
Figura 39. Red de transporte vial para Melilla presentado en formato clásico de nodos y arcos	115
Figura 40. Matriz OD para un estudio de viajes entre zonas de la región de Oporto	117
Figura 41. Red de transporte vial de Ceuta con el conteo de lazos incluido	129
Figura 42. Superficie cubierta por el lazo 1 en la herramienta MapChecking	129
Figura 43. División de la asignación de nodos en Ceuta	133
Figura 44. Matriz origen-destino para la ciudad de Ceuta	134
Figura 45. Red de transporte vial de Melilla con el conteo de lazos incluido	135
Figura 46. División de la asignación de nodos en Melilla	139
Figura 47. Matriz origen-destino para la ciudad de Melilla	140
Figura 48. Diagrama de flujo del código empleado	142
Figura 49. Diagrama de flujos resultante para Ceuta con el modelo UE	146
Figura 50. Diagrama de flujos resultante para Ceuta con el modelo SO	151
Figura 51. Red de transporte vial de Ceuta con la selección de nodos que podrían ir andando	152

Figura 52. Diagrama de flujos resultante para Ceuta con el modelo SO tras la asignación de viandantes	153
Figura 53. Diagrama de flujos resultante para Melilla con el modelo UE	158
Figura 54. Diagrama de flujos resultante para Melilla con el modelo SO	162
Figura 55. Nuevo reparto de puntos de evacuación en Melilla tras incluir puerto y aeropuerto	164
Figura 56. Diagrama de flujos resultante para Melilla con el modelo SO tras la nueva configuración	165
Figura 57. Red de transporte vial de Ceuta con nodos	170
Figura 58. Red de transporte vial de Melilla con nodos	171
Figura 59. Red de transporte vial de Melilla	172
Figura 60. Red de transporte vial de Ceuta	173
Figura 61. Nodos cambiados de modo de transporte en el plan de Ceuta	174
Figura 62. Nuevo reparto de puntos de evacuación en Melilla tras incluir puerto y aeropuerto	175
Figura 63. Diagrama de flujo de la red de transporte vial de Ceuta tras la configuración final	176
Figura 64. Diagrama de flujo de la red de transporte vial de Melilla tras la configuración final	177

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los arcos de la red de transporte vial de Ceuta	125
Tabla 2. Características de los arcos de la red de transporte vial de Melilla.....	127
Tabla 3. Superficie, población civil y vehículos que se encuentran dentro de cada lazo para la red de Ceuta	130
Tabla 4. Vehículos asignados a cada nodo para el plan de evacuación en Ceuta	132
Tabla 5. Superficie, población civil y vehículos que se encuentran dentro de cada lazo para la red de Melilla	136
Tabla 6. Vehículos asignados a cada nodo para el plan de evacuación en Melilla	138
Tabla 7. Resultados obtenidos para el modelo User-Equilibrium para Ceuta.....	145
Tabla 8. Resultados obtenidos para el modelo System-Optimization para Ceuta.....	150
Tabla 9. Resultados obtenidos para el modelo User-Equilibrium para Melilla.....	157
Tabla 10. Resultados obtenidos para el modelo System-Optimization para Melilla....	162
Tabla 11. Resumen de las principales características de la comparativa entre ambas ciudades	179
Tabla 12. Desglose de costes incurridos para llevar a cabo el plan de evacuación.....	182
Tabla 13. Flujo de capitales del proyecto por cada año.....	183

RESUMEN DEL PROYECTO

Autor: Adrián Ampuero Sánchez

Director: Dr. Antonio García y Garmendia

Universidad: Universidad Pontificia de Comillas

Resumen: Este trabajo final de máster se centra en la creación y desarrollo de un plan de evacuación para las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla ante un hipotético ataque militar terrestre por parte del Reino de Marruecos. La investigación supuso que el ataque a Ceuta se iniciaría por el paso fronterizo de El Tarajal, mientras que en Melilla sucedería por el paso de Beni-Enzar. Para Ceuta el único punto de evacuación se localiza en el puerto de la ciudad, mientras que para Melilla hay 3 puntos de evacuación, puerto, aeropuerto y la zona norte de los Cortados del Aguadú. Con el objetivo de tratar de optimizar el plan de evacuación de ambas ciudades se empleó el modelo de asignación de rutas de Frank-Wolfe tanto en equilibrio de usuario como una variante de optimización del sistema, previa construcción de la red de transporte vial principal de dichas ciudades. El desarrollo de esta investigación ha permitido detectar la infraestructura crítica que se verá saturada en la ejecución del plan de evacuación, así como los tiempos requeridos para poder circular por dichas carreteras. El estudio demuestra las limitaciones de la infraestructura de ambas ciudades para manejar una situación de evacuación masiva y las necesidades existentes de mejorar la misma. Finalmente, el estudio deja latente como el uso de técnicas de modelado de transportes ayudan a una toma de decisiones basada en los datos, permitiendo elaborar protocolos de evacuación en contextos de inestabilidad geopolítica.

Palabras clave: Plan, Evacuación, Ceuta, Melilla, Frank-Wolfe

I. INTRODUCCIÓN

Las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla son dos enclaves españoles en el continente africano que se encuentran ubicadas en la entrada del océano atlántico al mar mediterráneo, esto hace que tengan un valor estratégico notorio para potencias extranjeras,

particularmente para el Reino de Marruecos que rodea enteramente ambas ciudades, como se puede apreciar en la Ilustración 1.



Ilustración 1. Localización de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla respecto a Marruecos¹

El gobierno de Rabat lleva reclamando desde hace mucho tiempo tanto las dos ciudades autónomas, así como otros territorios, incluyendo la Isla del Perejil, la cual llevo a un incidente entre ambas naciones en 2002, o el Sáhara Occidental, el cual reconoció el gobierno español como marroquí en 2022 a pesar de la histórica disputa entre las dos potencias mediterráneas.

Todo ello lleva a teorizar un ejercicio hipotético de una invasión militar terrestre por parte del Reino de Marruecos a las dos ciudades españolas, y es en este contexto en el que se desarrolla este trabajo final de máster.

En este trabajo se ha desarrollado un plan de evacuación adaptado a las condiciones específicas de cada una de las ciudades autónomas, y en las que se tiene como objetivo

¹ Antolínez I., & Jorge E., (2021)

último y prioritario ser capaz de evacuar a toda la población española residente en dichas ciudades en el menor tiempo posible, garantizando de esta manera la seguridad de la población civil.

Tampoco se pueden obviar otros objetivos secundarios como el análisis de la infraestructura existente para poder llevar a cabo el plan de evacuación, la necesidad de realizar una simulación para poder cuantificar numéricamente el plan de evacuación o un análisis económico de la viabilidad financiera de desarrollar el plan de evacuación desde la perspectiva de un despacho de ingeniería.

La investigación deberá estar alineada con los objetivos de desarrollo sostenibles número 9, industria, innovación e infraestructura, por permitir una mejor infraestructura en caso evacuación de emergencia y número 16, paz, justicia e instituciones sólidas, por diseñar un plan de evacuación que ayude a las autoridades a poner a salvo a sus ciudadanos en caso de peligro.

El trabajo seguirá la misma estructura que presenta este resumen, un capítulo introductorio, otro sobre el estado del arte, un tercero en el que desarrollará el plan de evacuación y selección del modelo, el cuarto capítulo tratará sobre la aplicación numérica del modelo, tras esto se encuentra el capítulo de análisis económica y comparación de resultados y se finalizará con el capítulo de conclusiones y desarrollos futuros.

Para llevara a cabo este trabajo se han empleado 4 principales herramientas. El paquete de Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint) imprescindible para la redacción del documento y el análisis de los datos. Datos y fuentes de información oficiales para estadísticas (incluyendo INE, DGT...) y otras aplicaciones como Google Maps o OpenStreetMap. Para la simulación se empleará el código de programación Python. Y finalmente toda la bibliografia debidamente referenciada.

II. ESTADO DEL ARTE

En el capítulo del arte se estudió la teoría que actualmente rige los planes de evacuación en caso de un ataque militar. Para ello se dividió el capítulo en tres fuentes claramente diferenciadas. La propuesta institucional sobre los planes de evacuación para Ceuta y Melilla, desde las instituciones europeas pasando por el gobierno nacional hasta los

gobiernos de las ciudades autónomas. Por otro lado, se examinará los marcos metodológicos que se emplean en los planes de evacuación y se analizará desde una perspectiva analítica y cuantitativa los planes de evacuación a través de los modelos matemáticos.

Respecto al primero de los puntos se obtuvo muy poca información. Desde las instituciones europeas han comenzado a surgir las primeras iniciativas a raíz de la guerra en Ucrania, el gobierno central por su parte reales decretos referentes a la unidad militar de emergencias, pero sin concretar nada. Lo más cercano que se encontró fueron los planes territoriales de protección civil de Ceuta (PLATERCE)² y Melilla (PLATERME)³, que son propuestas muy genéricas sobre como manejar situaciones de emergencia.

Por la parte de propuesta metodológica se encontró mucha más información, particularmente influyente fue el plan integral urbano para evacuaciones de emergencia, que se muestra en la Ilustración 2, de este ese estudio se derivan muchos conceptos clave empleados en esta investigación, como zonas de peligro, zonas de buffer...



Ilustración 2. Componentes claves para la ejecución IUE²CP en la villa olímpica de Pekín⁴

² Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Ceuta, (2008)

³ Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Melilla, (2014)

⁴ Wei et al, (2008)

Finalmente, se procedió a la aplicación numérica del trabajo, que es la parte más rica bibliográficamente hablando, y donde se describieron las principales ideas que se deben emplear en un modelo de evacuación terrestre. Esto incluye la creación de redes de transporte vial, como se muestra en el modelo de Nguyen-Dupuis⁵, o modelos para la optimización de asignación de rutas de tráfico como es el caso de Frank-Wolfe⁶, que finalmente fue el empleado en este este trabajo.

III. DESARROLLO DEL PLAN DE EVACUACIÓN Y SELECCIÓN DEL MODELO

En este capítulo se desarrolló el plan de evacuación a emplear, y se formalizó la selección del modelo a usar durante la simulación. El primer paso fue localizar los hipotéticos puntos de ataque que Marruecos podría emplear, se definió el paso fronterizo de El Tarajal para Ceuta y el de Beni-Enzar para Melilla.

Tras esto se estableció los puntos de evacuación para ambas ciudades, siendo el puerto de la ciudad para Ceuta y la zona de los cortados de Aguadú para Melilla (aunque posteriormente se añadieron más). Además, se llevó a cabo un análisis para ver el espacio disponible para estacionar los vehículos empleados en la huida.

Posteriormente se procedió a la creación de las redes de transporte vial de ambas ciudades que se muestran en las Ilustraciones 3 y 4. Para dicha red se han tenido en cuenta las principales carreteras de cada una de las ciudades (arcos de flujo) y las intersecciones entre carretas numeradas en las ilustraciones como nodos.

⁵ Nguyen, S. & Dupuis, C., (1984)

⁶ Frank, M. & Wolfe, P. (1956)

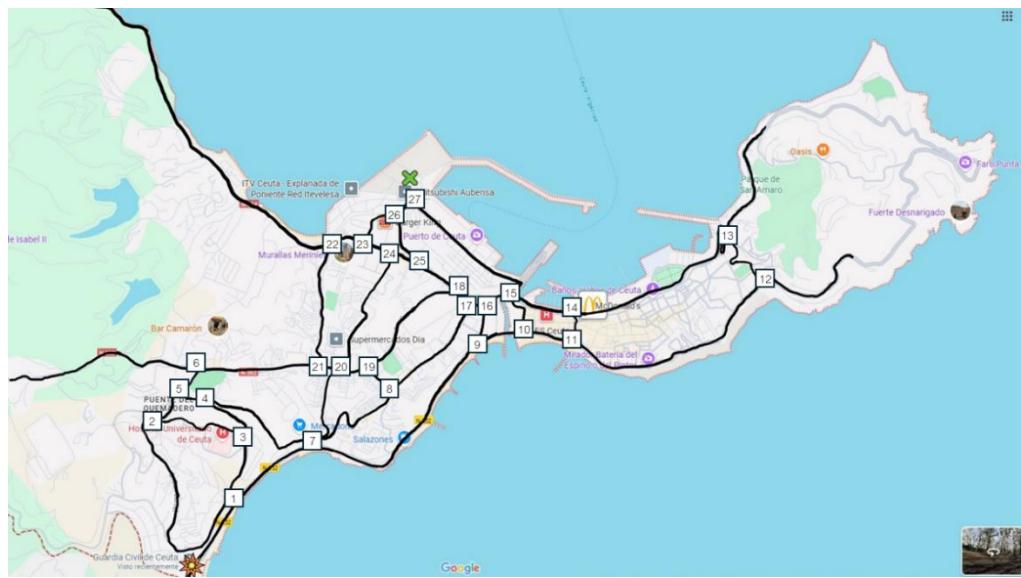


Ilustración 3. Red de transporte vial de la ciudad autónoma de Ceuta⁷

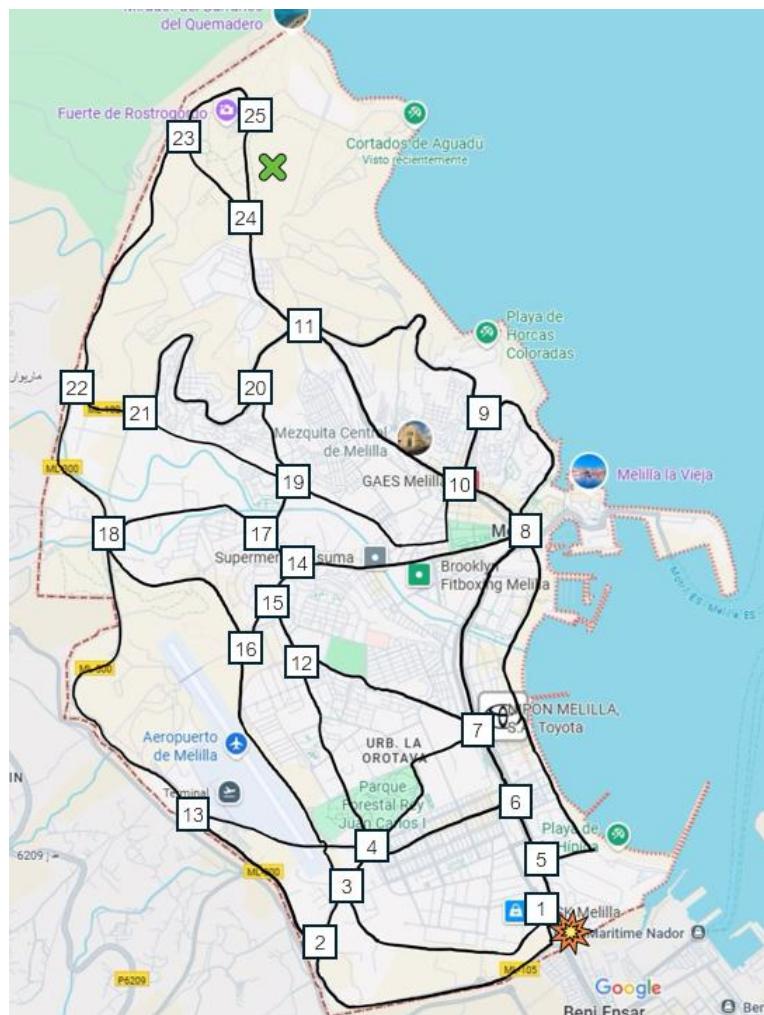


Ilustración 4. Red de transporte vial de la ciudad autónoma de Melilla⁸

⁷ Elaboración propia, (2025)

⁸ Elaboración propia, (2025)

Puesto en esquema tradicional de red de transporte se obtienen las ilustraciones 5 y 6.

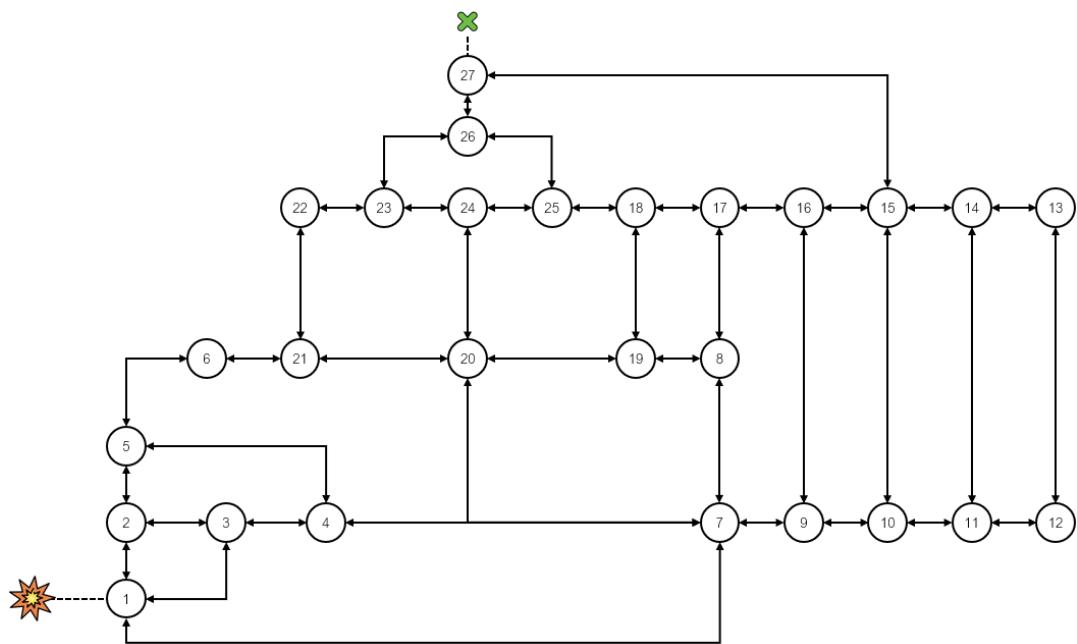


Ilustración 5. Red de transporte vial de Ceuta en formato clásico de nodos y arcos⁹

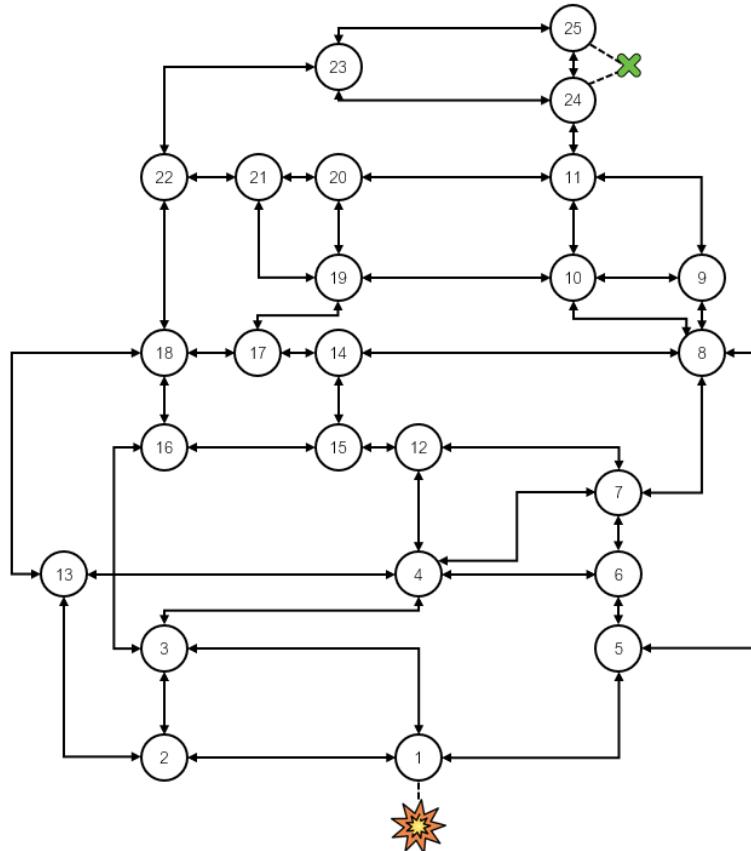


Ilustración 6. Red de transporte vial de Melilla en formato clásico de nodos y arcos¹⁰

⁹ Elaboración propia, (2025)

¹⁰ Elaboración propia, (2025)

Para finalizar el capítulo se seleccionó el modelo de Frank-Wolfe como el óptimo para simular la evacuación en Ceuta y Melilla, sin embargo, se debe mencionar que habrá 2 modelos, el modelo de Frank-Wolfe tradicional para equilibrio de usuario y una variante para el modelo de optimización del sistema, la principal diferencia radica en la función objetivo, como se muestra en las siguientes ecuaciones 1 y 2.

Función objetivo del equilibrio de usuario:

$$\min Z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad (1)$$

Función objetivo de optimización del sistema:

$$\min Z(x) = \sum_{a \in A} x_a * t_a(x_a) \quad (2)$$

IV. APLICACIÓN NUMÉRICA DEL PLAN DE EVACUACIÓN

En este capítulo se lleva a cabo la simulación del plan de evacuación, sin embargo, y para lograr que dicha simulación funcione antes se caracterizaron las redes de transporte de Ceuta y Melilla con información como las longitudes de los arcos, velocidad de libre circulación, sentido del arco...

Tras esto se obtuvieron las matrices de origen destino, en las que se muestran los viajes a realizar desde todos los nodos de las redes hasta los nodos 26 y 27 para Ceuta y 24 y 25 para Melilla.

Con toda esta información se procedió a ejecutar los modelos de Frank-Wolfe tanto en equilibrio de usuario como en optimización del sistema con los códigos adjuntados en la sección de anexos.

Debido a que tiempos de viaje y de evacuación eran menores en la variante de optimización del sistema se decidió proceder con ella para la optimización definitiva. Tras las primeras ejecuciones los resultados en ambas ciudades fueron malos con altos tiempos de evacuación debido a la saturación de las carreteras de evacuación.

Es por ello que para Ceuta se propuso que la población partiendo de los nodos más cercanos al puerto fuese andando para evitar que las carreteras saturasen de manera tan crítica, el resultado de esta optimización se presenta en la Ilustración 7.

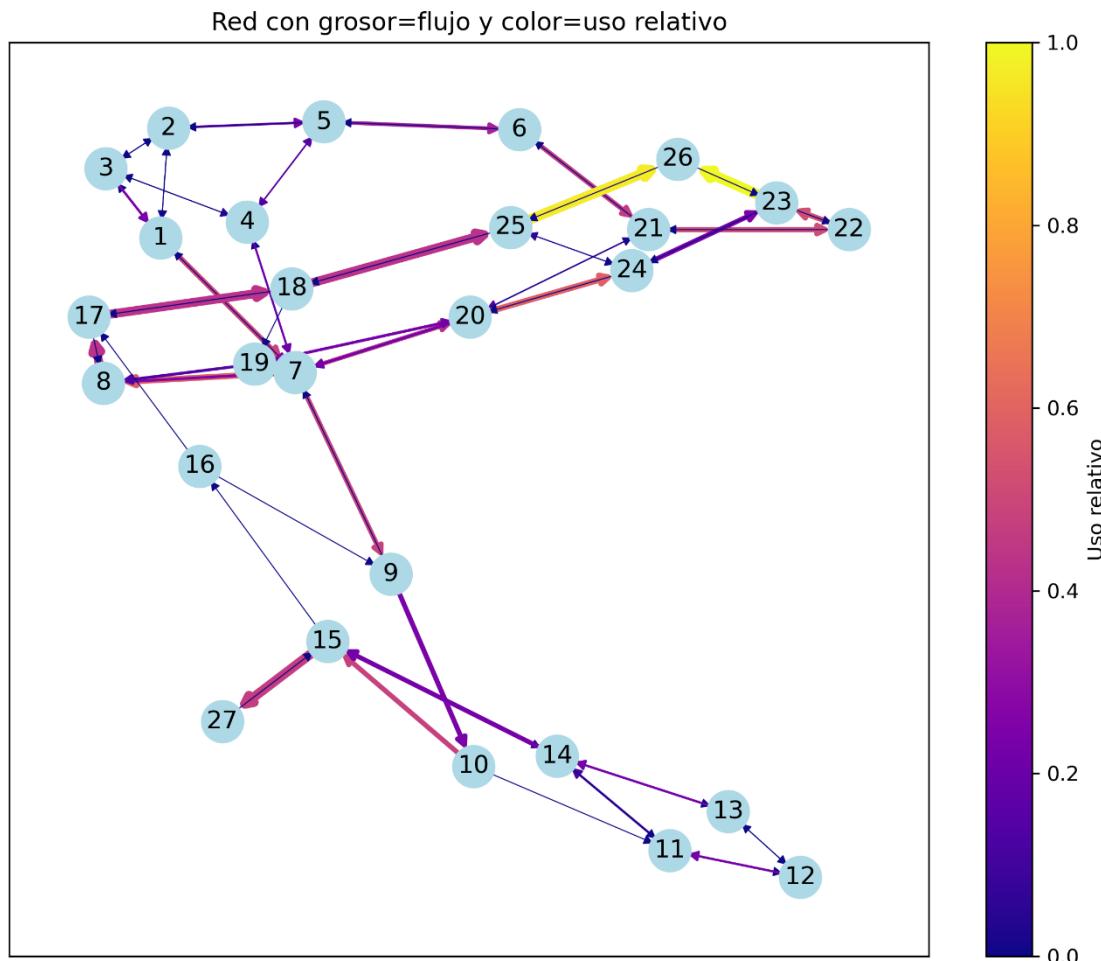


Ilustración 7. Diagrama de flujos resultante para Ceuta con el modelo SO tras la asignación de viandantes¹¹

Esto supuso una mejora considerable respecto a las primeras simulaciones para Ceuta, obteniendo un tiempo de viaje de 1080 veh*h (-74,8%) y un tiempo de evacuación de 1,70h (-43,9%), pese a que aún se aprecia saturación en las llegadas al nodo 26.

Para Melilla se optó por otra estrategia, se habilitaron 2 nuevas zonas de evacuación el puerto y el aeropuerto, redirigiendo los nodos más cercanos a sus respectivos puntos de evacuación y solamente la población más cercana al puerto iría caminando hasta su zona de evacuación, esto se puede apreciar en la Ilustración 8.

¹¹ Elaboración propia, (2025)

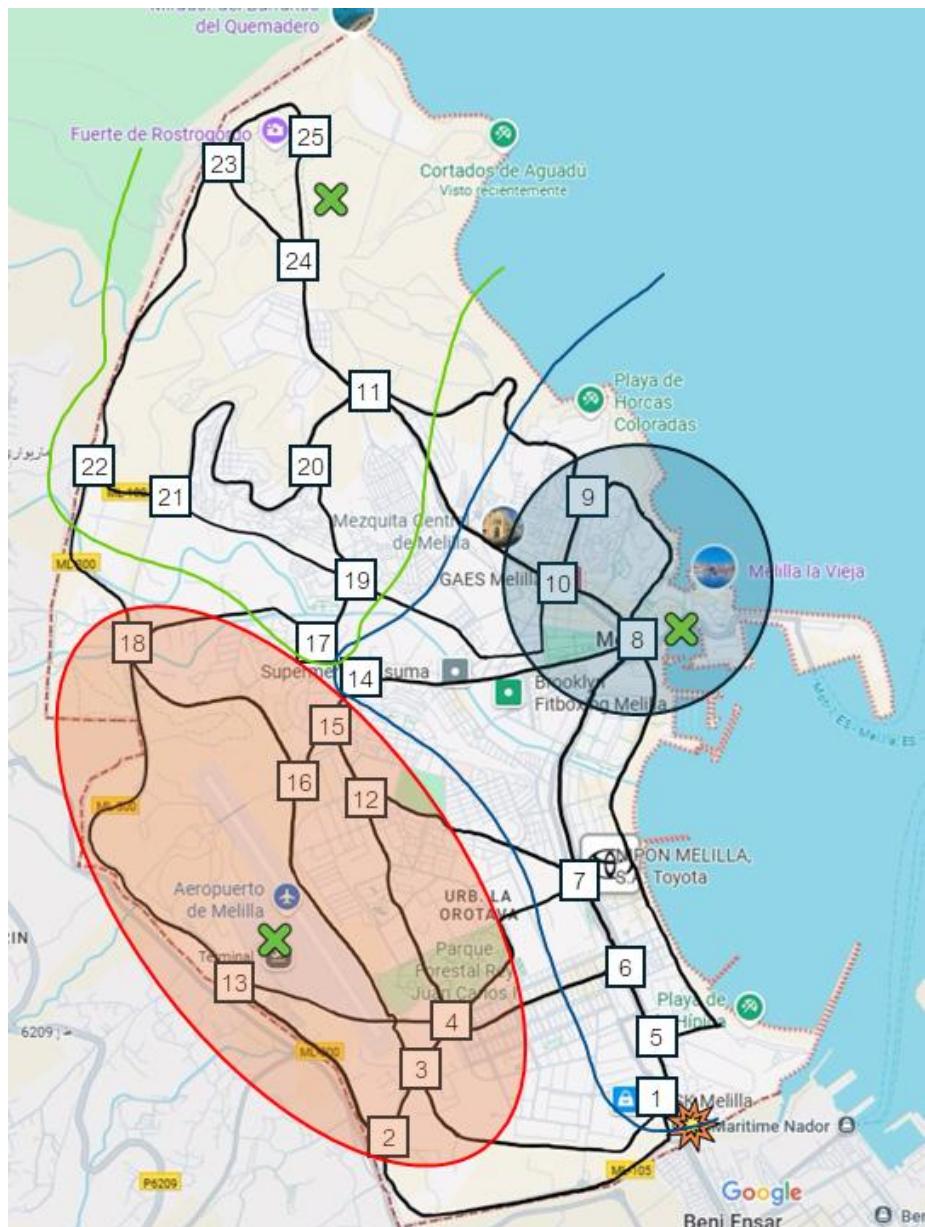


Ilustración 8. Nuevo reparto de puntos de evacuación en Melilla tras incluir puerto y aeropuerto¹²

Y de igual manera que sucedió con Ceuta, los resultados respecto a las primeras simulaciones fueron considerablemente mejores, obteniendo un tiempo de viaje de 1398 veh*h (-98,6%) y un tiempo de evacuación de 0,92h (-87,5%), el resultado de Melilla también se aprecia ligeramente saturado como se aprecia en la Ilustración 9, pero nada que ver con la primera simulación.

¹² Elaboración propia, (2025)

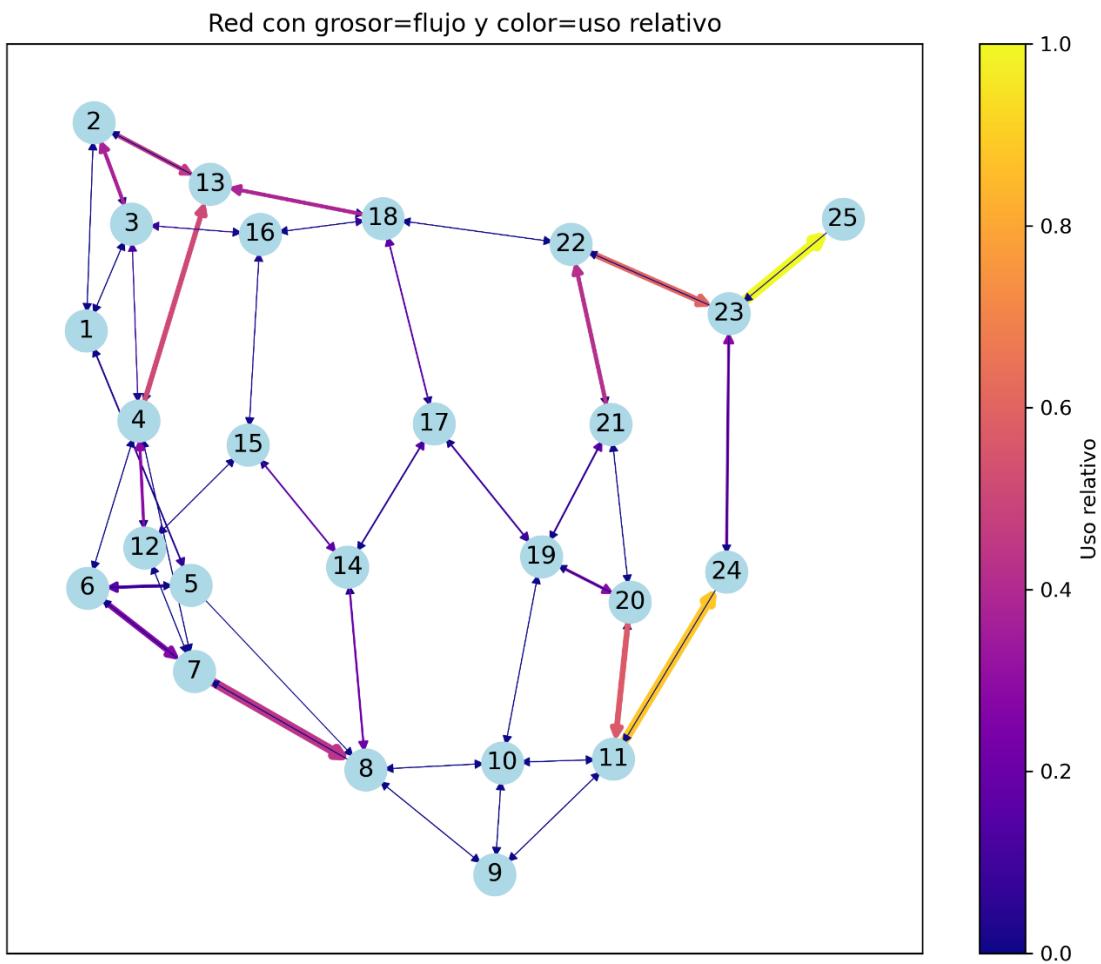


Ilustración 9. Diagrama de flujos resultante para Melilla con el modelo SO tras la nueva configuración¹³

V. ANÁLISIS ECONÓMICO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Lo primero que debe mencionarse de este capítulo es que la comparación del plan de evacuación entre ambas ciudades resulta de gran dificultad pues se está tratando de comparar dos cosas que no son iguales.

Pese a que la población total a evacuar es similar la estructura de las redes no lo es como bien se puede apreciar en las Ilustraciones 5 y 6. La red que presenta Melilla es mucho más mallada que la de Ceuta, haciendo que haya un mayor número de interconexiones y rutas entre nodos.

¹³ Elaboración propia, (2025)

Además, la red de Melilla posee casi todos los arcos con doble sentido, mientras que en Ceuta hay muchas carreteras que no poseen doble sentido, dificultando la capacidad de evacuación en la ciudad ceutí.

Todo lo anterior sumado a la mayor capacidad de evacuación que posee Melilla tras la adición del puerto y el aeropuerto hace que el tiempo de evacuación sea casi la mitad en Melilla que en Ceuta, como se aprecia en el siguiente Listado 1.

Característica	Ceuta	Melilla
Nº de nodos en red	27	25
Nº de arcos en red	71	81
Nº de evacuados andando hasta puerto	33.209	12.634
Nº de evacuados en coche hasta puerto	47.890	23.724
Nº de evacuados en coche hasta aeropuerto	-	19.087
Nº de evacuados en coche hasta otras zonas	-	28.309
Nodos de evacuación	26 y 27	8, 13, 24 y 25
Capacidad de evacuación (veh/h)	7.200	21.600
Tiempo de viaje (veh*h)	1.080	1.398
Tiempo de evacuación (h)	1,70	0,92

Listado 1. Resumen de las principales características de las evacuaciones en Ceuta y Melilla¹⁴

Sin embargo, el tiempo de viaje es superior en Melilla que, en Ceuta, pero también tiene sentido debido a que el total de kilómetros de carreteras que hay en Melilla es casi el doble que, en Ceuta, haciendo que los tiempos de viaje también sean supiores.

Para el análisis económico se calculó el valor actual neto (VAN) del proyecto para verificar si esta investigación aportaba valor o no, así como la tasa interna de retorno (TIR) para ver como la variación de los tipos de interés podría poner en riesgo el valor aportado del proyecto.

¹⁴ Elaboración propia, (2025)

Para este cálculo se ha estimado todos los costes que pudiera tener el proyecto a modo de inversión inicial, incluyendo el salario del ingeniero, costes de software, maquetación de proyecto, contingencias... que suman un total de 5.940 €.

Por la parte de ingresos se supuso una venta al ministerio de Defensa en el año 1 por valor de 3000 €, otra venta al gobierno de Melilla en el año 2 por 2000 € y una última venta al gobierno de Ceuta por otros 2000 € en el año 3.

Descontando estos capitales se obtiene que el valor del VAN es de +808,16 €, lo cual indica que el proyecto aporta valor, y el valor de la TIR es de 9,41 %, lo cual indica que es muy difícil que el proyecto llegue a destruir valor ante una subida de la inflación.

VI. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Este trabajo final de máster ha analizado y optimizado los planes de evacuación en escenarios de conflicto bélico, centrándose en el caso específico de Ceuta y Melilla ante un posible ataque militar terrestre por parte de Marruecos. El estudio confirma la relevancia de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y 16 (Paz, Justicia e Instituciones Sólidas), al contribuir tanto a la resiliencia de la infraestructura como a la preparación institucional.

La revisión del estado del arte reveló una carencia significativa en la planificación institucional, ya que ni España ni la Unión Europea cuentan con protocolos detallados de evacuación para estas ciudades. En contraste, la literatura metodológica y analítica sí es extensa, siendo el modelo de asignación de rutas de Frank-Wolfe el seleccionado como base para la simulación.

El plan de evacuación desarrollado en esta investigación definió posibles puntos de ataque (El Tarajal en Ceuta y Beni-Enzar en Melilla), nodos de evacuación e infraestructuras críticas. Ceuta depende principalmente de su puerto, mientras que Melilla dispone de tres puntos de evacuación (puerto, aeropuerto y Cortados del Aguadú). Las simulaciones demostraron que los modelos de optimización del sistema superan a los de equilibrio de usuario, reduciendo de manera significativa los tiempos de evacuación. Medidas como fomentar la evacuación a pie para la población cercana a los puertos resultaron clave para disminuir la congestión vial.

Los resultados mostraron que la red más mallada de Melilla y su mayor capacidad de evacuación permiten una evacuación más rápida (0,92 h frente a 1,70 h en Ceuta), a pesar de tiempos de viaje superiores debido a la mayor longitud de la red. No obstante, estos valores siguen siendo teóricos y en un escenario real los tiempos serían considerablemente mayores. Además, la mayor distancia de Melilla respecto a la península subraya la necesidad de mantener una presencia militar elevada para garantizar la protección civil. Desde una perspectiva económica, el proyecto se mostró viable, con un VAN positivo de 808,16 € y una TIR del 9,41 %.

Las líneas de investigación futura deberían centrarse en la construcción de matrices origen destino más realistas utilizando datos censales, la exploración de métodos alternativos de asignación de nodos de evacuación (p. ej., probabilísticos o basados en capacidad) y el empleo de modelos dinámicos que capten el comportamiento del tráfico en función del tiempo. Estas mejoras aportarían estrategias de evacuación más precisas y operativamente viables.

ABSTRACT

Author: Adrián Ampuero Sánchez

Supervisor: Dr. Antonio García y Garmendia

University: Pontifical University of Comillas

Abstract: This master's thesis focuses on the design and development of an evacuation plan for the autonomous cities of Ceuta and Melilla in the event of a hypothetical land-based military attack by the Kingdom of Morocco. The study assumes that an assault on Ceuta would originate from the El Tarajal border crossing, while in Melilla it would occur through the Beni-Enzar checkpoint. In the case of Ceuta, the sole evacuation point identified is the city's port, whereas for Melilla three potential evacuation routes were considered: the port, the airport, and the northern area of the Aguadú Cliffs. To optimize the evacuation strategies of both cities, the research applied the Frank-Wolfe route assignment model, evaluating both user equilibrium conditions and a system optimization variant, following the reconstruction of the main urban road networks. This methodological approach allowed for the identification of critical infrastructure that would likely experience congestion during the implementation of the evacuation plan, as well as the estimation of the time required to travel through the affected road segments. The results highlight the limitations of current infrastructure in handling mass evacuations and suggest that strategic planning and potential infrastructure reinforcements are necessary to improve resilience. Ultimately, the research demonstrates how transport modeling techniques can contribute to evidence-based decision-making in urban security planning, offering valuable guidance for the design of evacuation protocols in contexts of geopolitical vulnerability.

Keywords: Plan, Evacuation, Ceuta, Melilla, Frank-Wolfe

I. INTRODUCTION

The autonomous cities of Ceuta and Melilla are two Spanish enclaves located on the African continent, positioned at the entrance from the Atlantic Ocean to the Mediterranean Sea. This geographic setting grants them considerable strategic value for

foreign powers, particularly for the Kingdom of Morocco, which entirely surrounds both cities, as illustrated in Figure 1.



Figure 1. Location of the autonomous cities of Ceuta and Melilla with respect to Morocco¹⁵

The government of Rabat has long claimed sovereignty over the two autonomous cities, as well as over other territories, including Perejil Island—which led to a diplomatic incident between the two nations in 2002—and Western Sahara, which Spain officially recognized as Moroccan in 2022 despite the historical dispute between the two Mediterranean powers. These circumstances provide the basis for theorizing a hypothetical land-based military invasion of the Spanish cities by Morocco, a scenario in which this master’s thesis is situated.

Within this framework, the research develops an evacuation plan tailored to the specific conditions of each city, with the ultimate and primary objective of ensuring the safe evacuation of the Spanish population in the shortest possible time, thereby safeguarding

¹⁵ Antolínez I., & Jorge E., (2021)

civilian security. Secondary objectives include analyzing the existing infrastructure required to implement the evacuation plan, conducting simulations to quantify its performance numerically, and evaluating the economic feasibility of its development from an engineering consultancy perspective.

The study is aligned with Sustainable Development Goal 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure), by fostering resilient infrastructure in the event of an emergency evacuation, and Goal 16 (Peace, Justice, and Strong Institutions), by designing a plan that would assist authorities in protecting citizens in times of crisis.

The thesis follows the structure outlined in this summary: an introductory chapter, a state-of-the-art review, a chapter on the design of the evacuation plan and model selection, followed by numerical applications of the model, an economic analysis and results comparison, and finally, conclusions and future developments.

To carry out this research, four main tools were employed: Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint) for drafting and data analysis; official statistical data sources (including INE, DGT, among others) as well as applications such as Google Maps and OpenStreetMap; Python programming for simulations; and a comprehensive, properly referenced bibliography.

II. STATE OF THE ART

In the state-of-the-art chapter, the theoretical framework governing evacuation plans in the event of a military attack was examined. To structure this analysis, the chapter was divided into three distinct sources: the institutional proposals for evacuation plans concerning Ceuta and Melilla, ranging from European institutions to the national government and finally the local autonomous governments; the methodological frameworks applied in evacuation planning; and, lastly, an analytical and quantitative approach to evacuation through mathematical modeling.

Regarding the first dimension, very limited information was available. At the European level, initial initiatives have begun to emerge in response to the war in Ukraine, while the Spanish central government has published royal decrees concerning the Military Emergency Unit, though without further specification. The closest references identified

were the territorial civil protection plans of Ceuta (PLATERCE)¹⁶ and Melilla (PLATERME)¹⁷, both of which provide only generic guidelines on how to address emergency situations.

In contrast, the methodological proposals offered considerably more substantial insights. Particularly influential was the integrated urban evacuation emergency contingency plan, presented in Figure 2. This study contributed many of the key concepts employed in the present research, such as danger zones and buffer zones.



Figure 2. Key components for the implementation of the IUE²CP in Beijing's Olympic Village¹⁸

Finally, the numerical application of evacuation modeling, which is the most bibliographically rich aspect of the research, was reviewed. This section described the main approaches that must be considered in the development of a land-based evacuation model. Among these are the construction of road transport networks, such as the Nguyen-Dupuis¹⁹ model, and traffic route assignment optimization models, including the Frank-Wolfe²⁰ algorithm, the latter being ultimately adopted in this study.

¹⁶ Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Ceuta, (2008)

¹⁷ Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Melilla, (2014)

¹⁸ Wei et al, (2008)

¹⁹ Nguyen, S. & Dupuis, C., (1984)

²⁰ Frank, M. & Wolfe, P. (1956)

III. DEVELOPMENT OF THE EVACUATION PLAN AND MODEL SELECTION

In this chapter, the evacuation plan to be implemented was developed, and the selection of the model to be used during the simulation was formalized. The first step was to identify the hypothetical points of attack that Morocco could employ. For Ceuta, the El Tarajal border crossing was defined, and for Melilla, the Beni-Enzar checkpoint.

Following this, the evacuation points for both cities were established: the city port in the case of Ceuta, and the Aguadú Cliffs area for Melilla (with additional points later incorporated). An analysis was also carried out to determine the available space for parking vehicles that would be used during the evacuation process.

Subsequently, the road transport networks of both cities were created, as shown in Figures 3 and 4. These networks took into account the main roads of each city (represented as flow arcs) as well as the intersections between roads, which were numbered and represented as nodes in the figures.

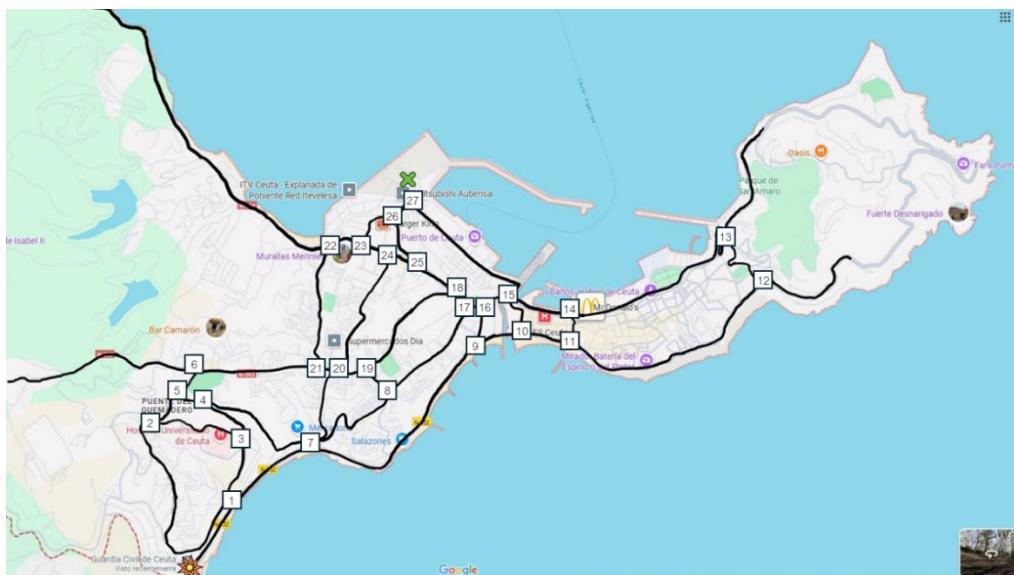


Figure 3. Road transport network of the Autonomous City of Ceuta²¹

²¹ Author's elaboration, (2025)

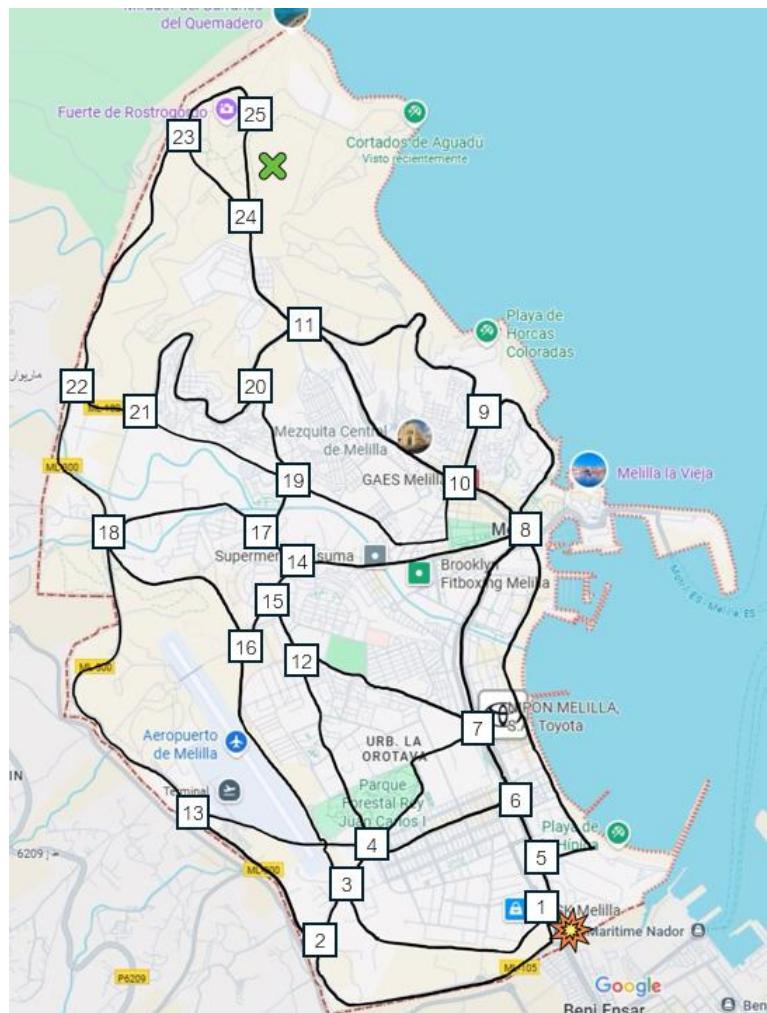


Figure 4. Road transport network of the Autonomous City of Melilla²²

When arranged in the traditional transport network scheme, the resulting representations are shown in Figures 5 and 6.

²² Author's elaboration, (2025)

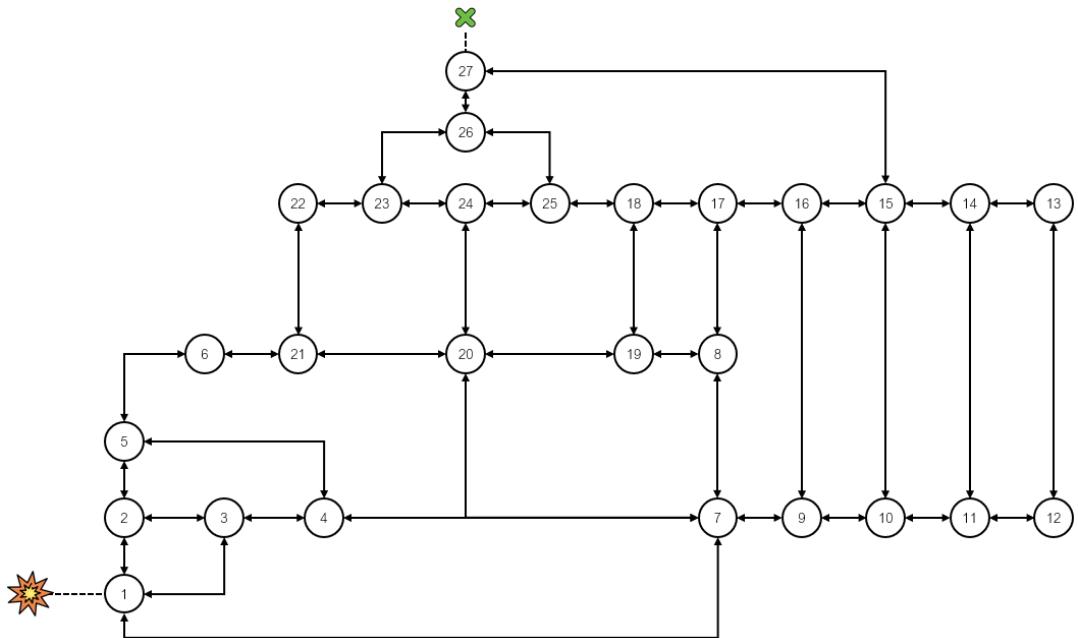


Figure 5. Road transport network of Ceuta in the classical node–arc format²³

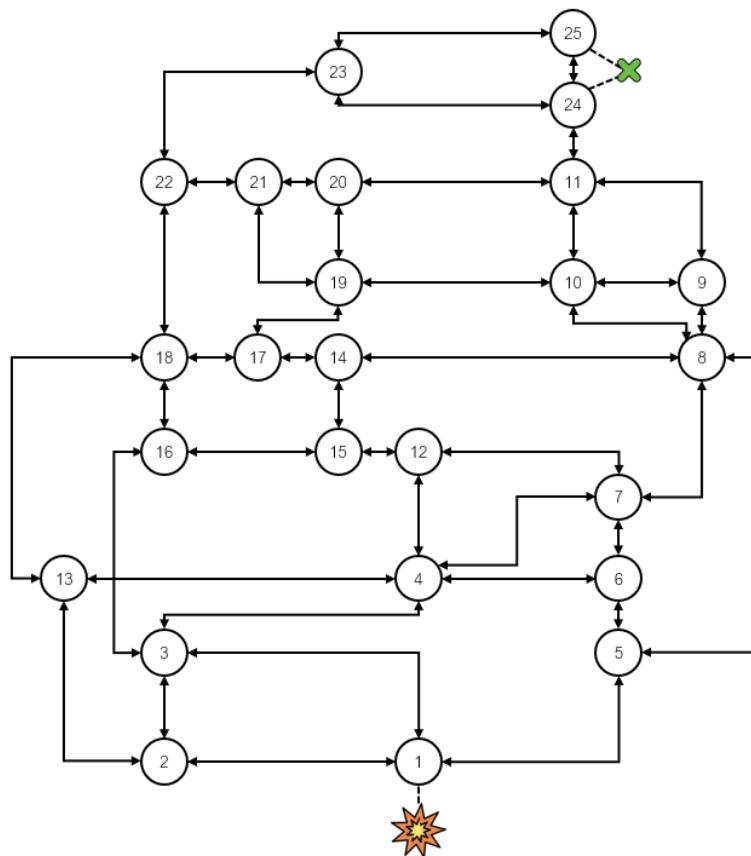


Figure 6. Road transport network of Melilla in the classical node–arc format²⁴

²³ Author's elaboration, (2025)

²⁴ Author's elaboration, (2025)

To conclude the chapter, the Frank-Wolfe model was selected as the most appropriate method to simulate the evacuation of Ceuta and Melilla. It must be noted, however, that two variants of the model will be used: the traditional Frank-Wolfe formulation for user equilibrium, and a system optimization variant. The main difference lies in the objective function, as illustrated in the following Equations (1) and (2).

Objective function for user equilibrium:

$$\min Z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad (1)$$

Objective function for the system optimization:

$$\min Z(x) = \sum_{a \in A} x_a * t_a(x_a) \quad (2)$$

IV. NUMERICAL APPLICATION OF THE EVACUATION PLAN

In this chapter, the evacuation plan simulation was carried out. However, in order for the simulation to function properly, the transport networks of Ceuta and Melilla were first characterized with information such as arc lengths, free-flow speeds, arc directions, and other relevant parameters.

Following this, origin–destination matrices were obtained, showing the trips to be made from all network nodes to nodes 26 and 27 in the case of Ceuta, and nodes 24 and 25 for Melilla. Using this data, the Frank-Wolfe models were executed under both user equilibrium and system optimization approaches, with the corresponding codes included in the annex section.

Since travel and evacuation times were significantly shorter in the system optimization variant, this model was selected for the definitive optimization. Nonetheless, the initial simulations for both cities yielded poor results, with high evacuation times caused by severe congestion on evacuation routes.

To address this in Ceuta, it was proposed that the population originating from nodes closest to the port evacuate on foot, thereby reducing critical saturation of the road network. The results of this optimization are presented in Figure 7.

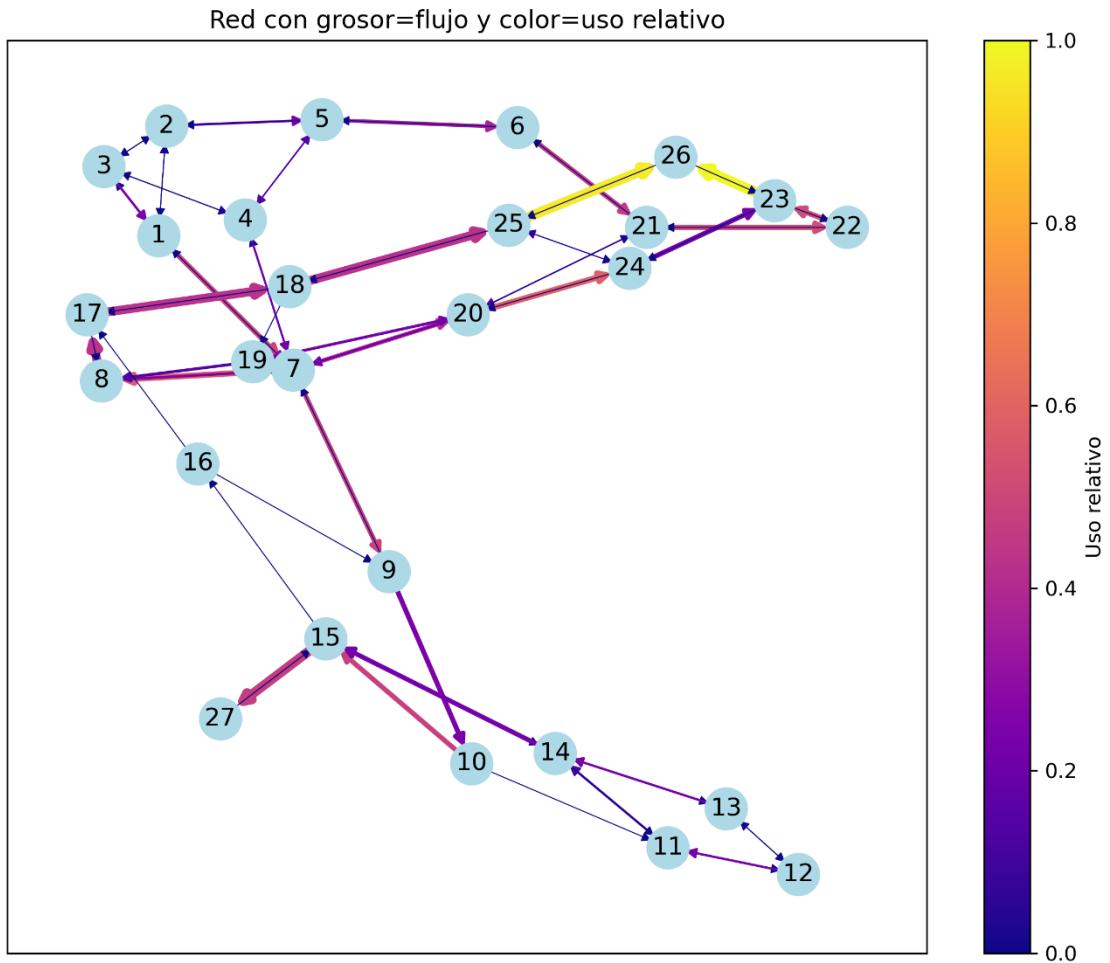


Figure 7. Resulting flow diagram for Ceuta with the SO model after pedestrian assignment²⁵

This adjustment led to a considerable improvement compared to the first simulations for Ceuta, with travel time reduced to 1080 veh*h (-74.8%) and evacuation time reduced to 1.70 h (-43.9%), although congestion at arrivals to node 26 was still evident.

For Melilla, a different strategy was adopted. Two new evacuation zones, the port and the airport were enabled. Nodes closest to each evacuation point were redirected accordingly, while only the population in proximity to the port would evacuate on foot. This reconfiguration is shown in Figure 8.

²⁵ Author's elaboration, (2025)

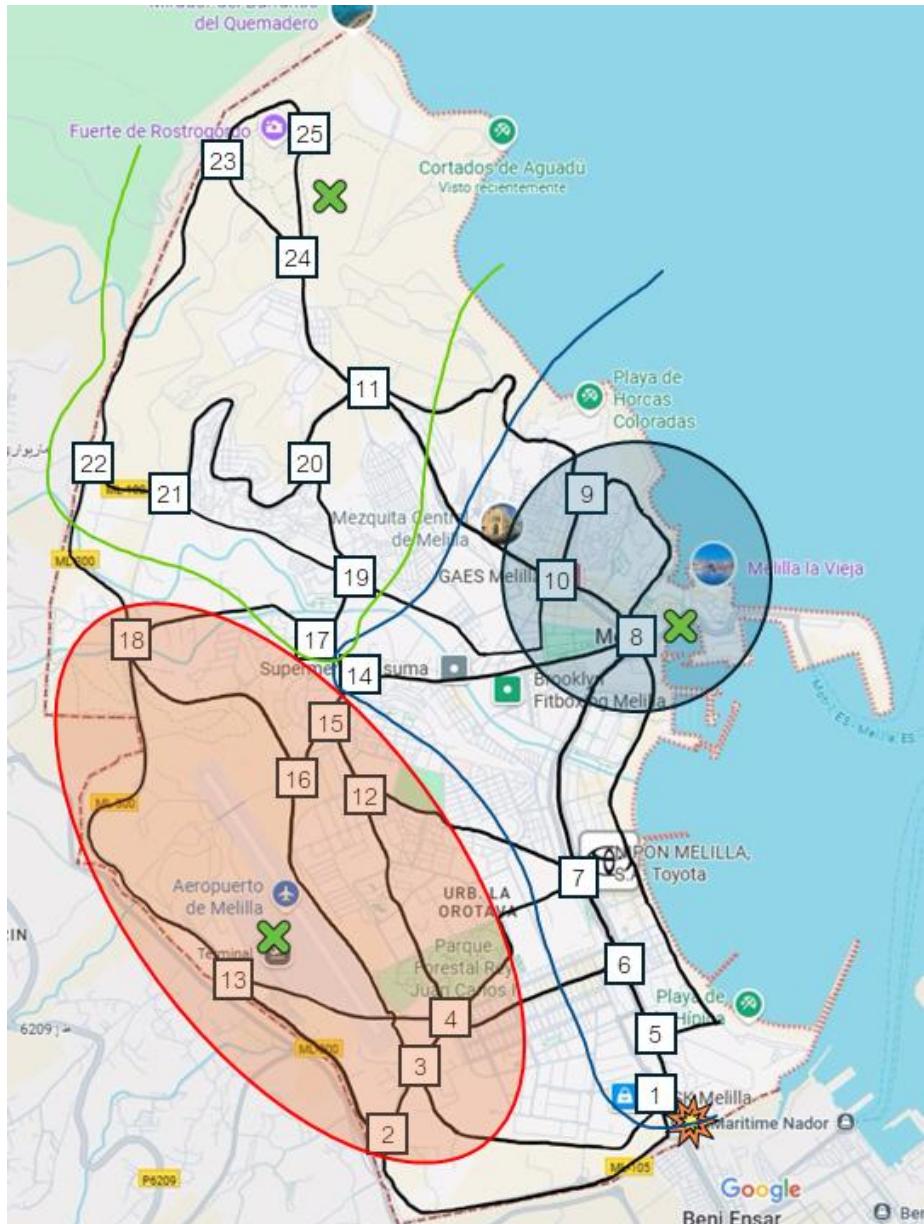


Figure 8. Redistribution of evacuation points in Melilla after including the port and airport²⁶

As in the case of Ceuta, results improved significantly compared to the initial simulations, with travel time reduced to 1398 veh*h (-98.6%) and evacuation time reduced to 0.92 h (-87.5%). Although some congestion was still observed, particularly around arrivals, the level was far lower than in the first simulation, as illustrated in Figure 9.

²⁶ Author's elaboration, (2025)

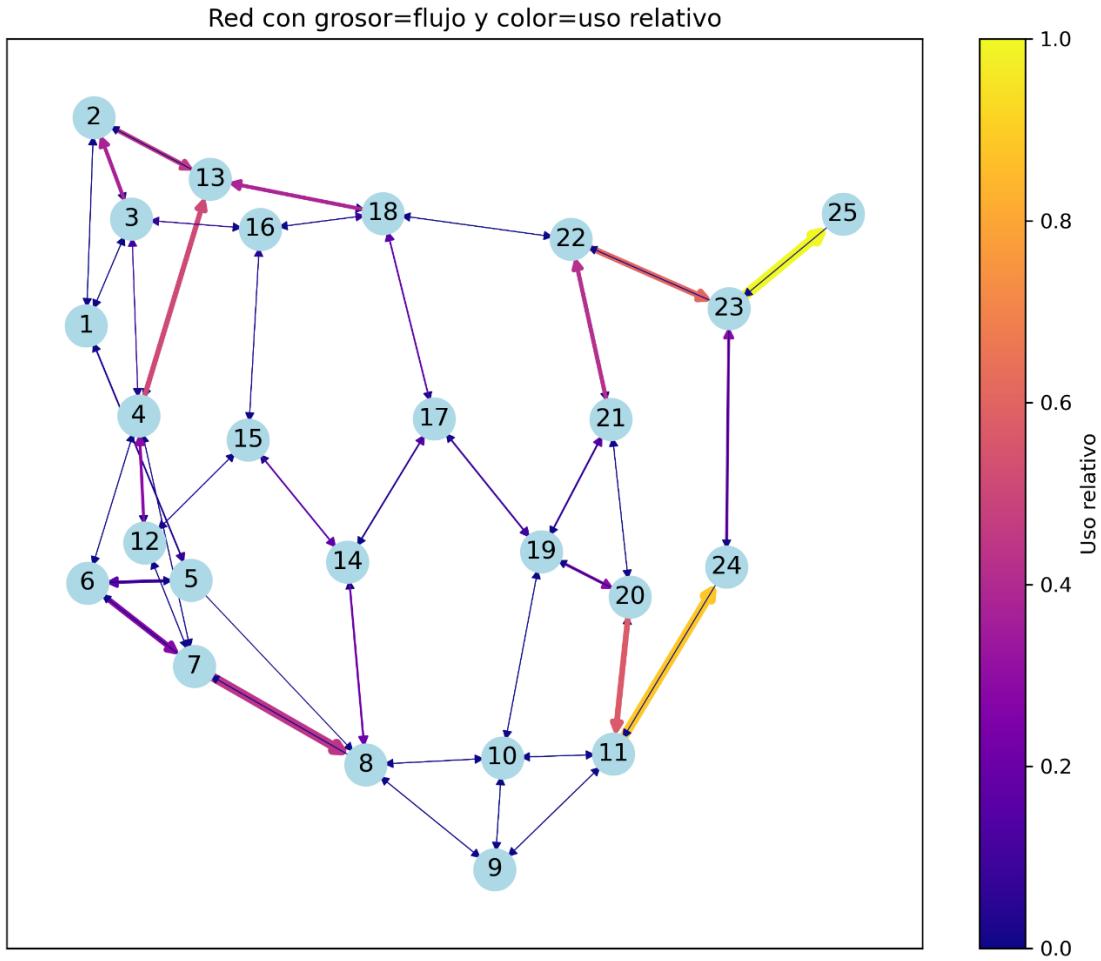


Figure 9. Resulting flow diagram for Melilla with the SO model after the new configuration²⁷

V. ECONOMIC ANALYSIS AND COMPARISON OF RESULTS

The first point to highlight in this chapter is that comparing the evacuation plans of the two cities presents significant challenges, as the cases are inherently different.

Although the total population to be evacuated is similar, the structures of the transport networks differ considerably, as shown in Figures 5 and 6. Melilla's network is far more meshed than that of Ceuta, offering a higher number of interconnections and alternative routes between nodes.

In addition, Melilla's network has nearly all arcs configured as bidirectional, while in Ceuta many roads are one-way, which restricts the city's evacuation capacity. Combined with the higher evacuation capacity of Melilla after incorporating both the port and the

²⁷ Author's elaboration, (2025)

airport, this results in evacuation times being almost half of those in Ceuta, as summarized in Table 1.

Characteristic	Ceuta	Melilla
No. of nodes in the NW	27	25
No. of arcs in the NW	71	81
Evacuees walking to the port	33.209	12.634
Evacuees driving to the port	47.890	23.724
Evacuees driving to the airport	-	19.087
Evacuees driving to other areas	-	28.309
Evacuation nodes	26 and 27	8, 13, 24 and 25
Evacuation capacity (veh/h)	7.200	21.600
Travel time (veh*h)	1.080	1.398
Evacuation time (h)	1,70	0,92

Table 1. Summary of the main characteristics of evacuations in Ceuta and Melilla²⁸

It is worth noting, however, that travel time in Melilla is higher than in Ceuta. This can be explained by the fact that the total length of the road network in Melilla is nearly double that of Ceuta, which naturally results in longer travel times.

For the economic analysis, the Net Present Value (NPV) of the project was calculated to assess whether this research generates added value, as well as the Internal Rate of Return (IRR) to determine how fluctuations in interest rates might threaten the project's viability.

The costs of the project were estimated as an initial investment, including the engineer's salary, software expenses, project layout, and contingencies, amounting to a total of €5,940. On the revenue side, three hypothetical sales were considered: a sale to the Ministry of Defense in year 1 for €3,000; a sale to the Government of Melilla in year 2 for €2,000; and a final sale to the Government of Ceuta for €2,000 in year 3.

²⁸ Author's elaboration, (2025)

Discounting these cash flows results in an NPV of +€808.16, indicating that the project generates value, and an IRR of 9.41%, suggesting that it is highly unlikely for the project to lose value even under rising inflation scenarios.

VI. CONCLUSIONS AND FUTURE DEVELOPMENTS

This master's thesis has analyzed and optimized evacuation plans under scenarios of armed conflict, focusing on the specific case of Ceuta and Melilla facing a potential land-based military attack from Morocco. The study confirms the relevance of Sustainable Development Goals 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) and 16 (Peace, Justice, and Strong Institutions), by contributing both to infrastructural resilience and institutional preparedness.

The state-of-the-art review revealed a significant gap in institutional planning, as neither Spain nor the EU provides detailed evacuation protocols for these cities. By contrast, methodological and analytical literature is extensive, with the Frank-Wolfe route assignment model selected as the basis for simulation.

The evacuation plan developed in this thesis defined potential attack points (El Tarajal in Ceuta, Beni-Enzar in Melilla), evacuation nodes, and critical infrastructure. Ceuta relies primarily on its port, whereas Melilla benefits from three evacuation points (port, airport, and Aguadú Cliffs). Simulations demonstrated that system-optimized models outperform user equilibrium, significantly reducing evacuation times. Measures such as encouraging walking evacuations for populations near ports proved crucial to alleviating road congestion.

Results showed that Melilla's more interconnected network and greater evacuation capacity enabled faster evacuation (0.92 h vs. 1.70 h for Ceuta), despite longer overall travel times due to a larger network. Nevertheless, these values remain theoretical and would be longer in real-world scenarios. Additionally, Melilla's greater distance from mainland Spain highlights the importance of sustained military presence to ensure civilian protection during evacuation. From an economic perspective, the project proved feasible, with a positive NPV of €808.16 and an IRR of 9.41%.

Future research should focus on building more realistic origin–destination matrices using census data, exploring alternative evacuation assignment methods (e.g., probabilistic or capacity-based), and employing dynamic models to capture time-dependent traffic behavior. These improvements would provide more accurate, operationally viable evacuation strategies.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

MEMORIA

I. INTRODUCCIÓN

Ceuta y Melilla son dos ciudades autónomas españolas, que juntas apenas superan los 30 Km² de superficie, y que se encuentran ubicadas en el norte de África haciendo frontera con el Reino de Marruecos. Pese a no ser muy extensas, poseen un gran número de población (pasando los 150.000 habitantes entre ambas), a parte de ser dos enclaves estratégicos gracias a su privilegiada posición.

Sin embargo, el hecho de que Marruecos esté reclamando, cada vez con mayor ahínco, la propiedad de ambas ciudades autónomas hace pensar que quizá pueda llegar en algún momento un ataque bélico terrestre con el objetivo de conquistar ambas ciudades. Ante la posibilidad de este escenario y la falta un claro plan de evacuación definido surge este trabajo final de máster.

1. MOTIVACIÓN

Augusto Pinochet definió la geopolítica como “la rama de las ciencias políticas que, basada en los conocimientos geográficos, históricos, sociológicos, económicos, estratégicos y políticos; pasados y presentes, estudia en conjunto la vida y desarrollo de una masa humana organizada en un espacio terrestre, analizando sus múltiples y recíprocas influencias (sangre suelo) para deducir sus objetivos y estudiar sus proyecciones, con el fin de lograr en el futuro un mayor bienestar y felicidad en el pueblo.”²⁹

Sin embargo, para lograr ese bienestar y esa felicidad, no solo basta con ser poseedor de todos esos conocimientos del pueblo que se dirige, si no también de otros pueblos, sobre todo si colindan con el propio.

En este sentido las relaciones diplomáticas entre países resultan cruciales para respetar lo ajeno, pero defendiendo lo propio, y es evidente que las relaciones diplomáticas del Reino de España con el Reino de Marruecos no atraviesan su mejor situación, de hecho, parece

²⁹ Pinochet Ugarte, A. (1984)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

que hubiera cierto “servilismo” desde el actual gobierno español hacia el gobierno de Rabat.

Esto se puede apreciar en acciones como el reconocimiento de la propiedad del Sáhara occidental , (disputa histórica que España y Marruecos han mantenido desde hace casi medio siglo), la cesión del control aduanero en la ciudad de Melilla o regalar subvenciones al gobierno marroquí para que este compre trenes (mientras que los trenes de muchas comunidades españolas se encuentran en malas condiciones).

Como ya se mencionó en el apartado anterior, Ceuta y Melilla constituyen dos enclaves estratégicos muy relevantes en la entrada al mar mediterráneo, como se muestra en la Figura 1, y que hace tiempo que el Reino de Marruecos está deseando poseer.



Figura 1. Localización de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla respecto a Marruecos³⁰

³⁰ Antolínez I., & Jorge E., (2021)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

No es menester de este trabajo final de máster evaluar las probabilidades reales que hay de que verdaderamente el Reino de Marruecos se decida a atacar las ciudades autónomas. De hecho, conviene recordar que este trabajo se trata de un ejercicio de hipotético, no necesariamente implica que Marruecos (o ninguna otra potencia extranjera vaya a tratar de atacar militarmente ninguna parte del territorio nacional).

Sin embargo, es cierto que el gobierno marroquí ha mostrado un particular interés por dichas ciudades autónomas, y dado que en su momento trató de tomar la Isla de Perejil, no resulta un ejercicio de imaginación descabellado la posible invasión militar de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla.

Y en un hipotético escenario en el que eso sucediese, quienes más sufrirían las consecuencias serían las poblaciones civiles de ambas ciudades, ya que no tendrían recursos para enfrentar la amenaza y tampoco tendrían una alternativa bien definida de huida y puesta a salvo.

Y es con esta intención con la que se desarrolla el siguiente trabajo final de máster. Conviene recordar que, si bien este trabajo está planteado para una potencial situación de conflicto bélico, no trata de animar a ello bajo ningún concepto, de hecho, ojalá jamás se tenga que utilizar. Sin embargo, en caso de que deba usarse, que al menos sirva para salvar el mayor número de vidas de inocentes civiles posibles.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este apartado debe responder a la pregunta de qué se espera conseguir con este trabajo final de máster.

El primordial objetivo que tiene este trabajo es el de crear un plan de evacuación por si hubiera un hipotético ataque militar por parte de una potencia extranjera a las ciudades autónomas españolas de Ceuta y Melilla.

Esto, necesariamente, implica establecer como objetivo de segundo nivel, ser capaz de localizar y diferenciar las posibles y óptimas rutas de evacuación, así como los puntos de concentración de los civiles para ser rescatados, y los potenciales puntos de riesgo de

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

ataque. Y en la medida de lo posible se tratará de ubicar aquellos puntos a evitar en el proceso de evacuación de las ciudades autónomas.

Otro de los objetivos de este plan de evacuación debe ser el análisis de la infraestructura en ambas ciudades autónomas a la hora de llevar a cabo un plan de evacuación. Dicha infraestructura debe incluir las principales carreteras e intersecciones de las ciudades, así como infraestructura de transportes como puertos o aeropuertos.

Tampoco se puede obviar como objetivo que este plan de evacuación debe de estar validado mediante algún tipo de simulación que permita obtener tiempos de evacuación e incluso compararlo con otros modelos de evacuación.

Como último objetivo de este trabajo, es necesario que se verifique la viabilidad económica de desarrollar el proyecto desde un punto de vista financiero para un ingeniero trabajando en el desarrollo de un proyecto sobre un plan de evacuación.

3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

No solo se deben de tener en consideración los objetivos previamente mencionados, si no que un trabajo final de máster también debe de aportar algo a su comunidad, es por ello que debe de estar alineado con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

A simple vista este TFM se puede relacionar con facilidad con los siguientes objetivos de desarrollo sostenible:

Por un lado, parece evidente que el objetivo nº9 de los ODS, industria innovación e infraestructura, se encuentra imbuido en este TFM, ya que este trabajo permite discernir y localizar la infraestructura que pudiera ser crucial para una posible evacuación en caso de que las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla se vieran bajo ataque militar por parte de una potencia extranjera.

Por otro lado, es fácil localizar el objetivo nº16, paz justicia e instituciones sólidas, en este trabajo final de máster. Si bien no está enfocado a la parte de la paz, pues se trata de un trabajo ideado para una situación de conflicto bélico, el hecho de poseer un plan de

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

evacuación que permita poner a la población civil a salvo hará que aumente la credibilidad en las instituciones públicas.

4. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

En cuanto a la estructura que se empleará para llevar a cabo el trabajo final de máster, se realizará según el siguiente esquema:

Primeramente, se redactará el capítulo introductorio al trabajo en el que se encuentra la motivación de realizar el proyecto, los principales objetivos que se van a perseguir durante el proyecto, incluyendo también el alineamiento con los objetivos de desarrollo sostenible, las herramientas que se emplearán en el desarrollo del proyecto, y por supuesto, también el apartado actual sobre la estructura del trabajo de investigación que se realizará

Tras esto, se encuentra el capítulo del estado del arte, en el que se habrá de buscar y comparar toda la información presentada y relativa a los planes de evacuación (preferiblemente si se trata de planes de evacuación en caso de ataque militar). Este debe incluir desde planes oficiales empleados por las instituciones públicas (Unión Europea, gobiernos nacional, autonómico y municipal), frameworks metodológicos desarrollados por expertos en materia de evacuación (y preferiblemente en casos de evacuación por ataques militares) y modelos matemáticos que permitan cuantificar numéricamente los planes de evacuación.

Acto seguido se realizará el capítulo del desarrollo del plan de evacuación y selección del modelo, en el que se estudiarán las zonas de posibles ataques bélicos terrestres para las ciudades autónomas, las posibles zonas de evacuación de los ciudadanos y la arquitectura de la red de transporte vial que situará los nodos y arcos relevantes de cada ciudad. Así mismo se hará la selección del modelo matemático que regirá la simulación que se mostrará en el siguiente capítulo, la cual será imprescindible para poder obtener valores numéricos de los planes de evacuación.

Como siguiente capítulo se presentará la aplicación numérica del plan de evacuación, en el cual se caracterizará la red de transporte vial, se creará la matriz origen destino para

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

conocer los viajes que deben hacerse durante el plan de evacuación, y se simulará mediante el modelo de Frank-Wolfe tanto en equilibrio de usuario como optimización del sistema la asignación de rutas con la finalidad de ir perfeccionando el plan de evacuación hasta poder reducir al mínimos los tiempos de viaje así como los tiempos de evacuación de los dos planes de evacuación.

Tras esto se procederá al apartado de análisis económico y presentación de resultados, en el que se compararán los mejores resultados obtenidos en las simulaciones para Ceuta y Melilla (incluyendo una tabla resumen comparativa con la información más relevante para los planes de evacuación). Y, posteriormente, se analizará desde una perspectiva económica la viabilidad de desarrollar el plan de evacuación mediante el cálculo del valor actual neto y la tasa interna de retorno.

Finalmente se presentará un apartado con las conclusiones, implicaciones y aprendizajes obtenidos en el desarrollo de este trabajo final de máster en todos sus capítulos, y acto seguido se mostrará también un apartado de desarrollos futuros y aspectos a mejorar en los que futuros proyectos de investigación en esta área podrían profundizar y optimizar aún más los resultados que se expondrán en este trabajo.

Por supuesto, se incluirá también un capítulo final en el que se presentará toda la bibliografía, debidamente referenciada, que se haya ido empleando a lo largo del trabajo a través de las referencias a pie de página.

Y, como detalle extra, se incluirá también un capítulo de anexos en el que se adjuntarán los códigos que se empleen en el desarrollo del trabajo, previsiblemente habrá uno para el modelo de equilibrio de Usuario y otro para el modelo de optimización del sistema, no se duplicarán para cada ciudad autónoma pues solo cambiaría el input del código, no el código en sí mismo.

5. HERRAMIENTAS EMPLEADAS EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

Lógicamente para tratar de realizar un trabajo lo más riguroso posible se habrá de contar con las herramientas adecuadas para ello, a continuación, se mencionan todos los recursos que se emplearán en el desarrollo del trabajo.

Por un lado, se contará con el paquete Microsoft Office, el cual juega un papel crucial a la hora de poder redactar este trabajo en Microsoft Word, así como el análisis de datos que se realizará en Microsoft Excel o la presentación de la defensa que se usará Microsoft PowerPoint.

No se puede dejarlo de lado el uso de datos y estadísticas oficiales, como por ejemplo la población censada en las ciudades autónomas a través del INE o la cantidad de vehículos matriculados a través de la DGT. Así mismo, se hará uso también de aplicaciones como Google Maps o OpenStreetMap para la obtención de datos sobre planos o carreteras.

En cuanto a la parte de simulación se debe mencionar que se usará el lenguaje de programación Python mediante el navegador anaconda. Dicho código permitirá simular los planes de evacuación en cada una de las ciudades e ir probando diferentes situaciones de evacuación.

Y, por último, se habrá de contar con una fuerte y extensa bibliografía que respalde todo el proceso llevado a cabo en este trabajo.

II. ESTADO DEL ARTE

Este apartado del trabajo final de máster tiene como objetivo estudiar y conocer los diferentes modelos, teorías y prácticas aplicadas a la hora de llevar a cabo la evacuación de una ciudad que se encuentra bajo riesgo de ataque o catástrofe natural. Es esencial conocer todo lo anteriormente mencionado pues será a partir de ello sobre lo que se construya para elaborar este trabajo.

En la recopilación de información teórica sobre la que construir el trabajo final de máster se hará especial hincapié en aquellos papers, informes, libros o documentos que muestren frameworks desarrollados y pasos a seguir en caso de tener que evacuar una ciudad bajo ataque militar. No obstante, también se estudiarán otros posibles frameworks para situaciones de evacuaciones de ciudades como puede ser el caso de terremotos o inundaciones, no tanto por el hecho de que se prepara a la ciudad frente a este tipo de adversidades, si no porque puede haber muchos pasos comunes entre ambos tipos de evacuación.

También se estudiará con mucho detenimiento aquellas teorías matemáticas que propongan cómo modelizar la evacuación en términos numéricos. Hay muchos tipos de modelos matemáticos que se han ido creando para este tipo de situaciones, los hay más enfocados en teorías de flujo y contraflujo³¹, otros apuestan por teoría de colas... Lógicamente no existe un modelo perfecto que sea capaz de predecir el comportamiento de una población en caso de evacuación por ataque militar, sin embargo, algunos de los modelos que se mostrarán a continuación lo modelan con mucho acierto.

Otra de las fuentes que se usarán para obtener información sobre el estado actual de los planes de evacuación serán los organismos oficiales, desde la Unión Europea hasta planes municipales pasando por planes gubernamentales. A priori es de esperar que existan normativas por parte de las autoridades en las que se detalle cómo actuar frente a situaciones como las que pretende simular este TFM, sin embargo, es muy común que los gobernantes no hayan previsto dichas situaciones hasta que ya hayan sucedido. Así que

³¹ Nguyen, S. & Dupuis, C., (1984)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

toda literatura que se pueda obtener por parte de las administraciones será bienvenida, y en caso de disponer de poca dará todavía más valor a este trabajo final.

El enfoque de la literatura de este trabajo debe de ser capaz de abarcar tanto la literatura a alto nivel, en la cual se muestren grandes pinceladas e ideas de evacuación en un contexto muy genérico hasta planes que traten evacuaciones a un nivel mucho más particular, como por ejemplo que establezcan un adecuado sentido de circulación en las calles.³²

No se puede olvidar también que habrá que realizar un breve estudio sobre la tecnología y sistemas actualmente empleados para poder solventar crisis y situaciones como las expuestas en este trabajo. Y eso incluye desde las aplicaciones ampliamente utilizadas a la hora de crear planes de evacuación y rutas de huida de los peligros hasta tecnología puntera como realidad virtual aplicada a evacuaciones o incluso potenciales usos que el Internet de las cosas “IoT” podría tener para estas situaciones.

Por supuesto habrá que estudiar si en el pasado se hubieran dado casos de evacuaciones en alguna de las dos localidades (lógicamente no en un ataque militar como tal ya que esto no ha sucedido en tiempo contemporáneos), pero quizás sí que haya habido algún tipo de evacuación a menor escala, lo cual permitirá estudiar las respuestas dadas con anterioridad a situaciones de emergencia y ver si se pueden mejorar.

También puede resultar de interés estudiar otros tipos de evacuaciones que hayan sucedido en pequeñas ciudades costeras rodeadas de otro país como podría ser el ejemplo de Mónaco, que además presenta unas características mediterráneas similares a las de ambas ciudades autóctonas.

³² Brestchneider, S., (2012).

1. PROPUESTA INSTITUCIONAL SOBRE LAS EVACUACIONES

El primero de los apartados que se procede a revisar es la propuesta que realizan todas las administraciones públicas (instituciones europeas, gobierno nacional y regionales, así como municipales) de cara a realizar una evacuación de emergencia en caso de un ataque militar.

Comenzando por los organismos europeos, que son el grupo institucional sobre el que mayor información se ha encontrado para la realización de este trabajo. Lo cual, observado con detenimiento, tiene bastante sentido. Los organismos europeos han de procurar el bien para todos los países miembros de la comunidad europea, esto lógicamente supone una mayor superficie a “defender”, pero, sobre todo, implica defender los intereses geopolíticos de cada uno de los estados miembros que conforman la unión, y eso inevitablemente va a suponer un cierto número de conflictos bélicos.

Y como respuesta a esos potenciales conflictos es normal que se cuente con planes de evacuación en caso de un conflicto armado. Particularmente toda la guerra en Ucrania ha supuesto un cambio de paradigma en Europa con respecto a los conflictos armados, especialmente por la cercanía de este conflicto y por las posibles ansias expansionistas que ha demostrado Rusia³³.

Cabe destacar el informe “Safer together: Strengthening Europe’s civilian and military preparedness and readiness”³⁴ en él los organismos europeos evalúan distintos riesgos críticos que enfrentan las naciones europeas (incluyendo pandemias, ciberataques o conflictos armados). El estudio propone una integración global que junte tanto actuaciones militares como civiles, no obstante, lo verdaderamente relevante de este informe reside en las aproximadamente 80 propuestas que realiza. Algunas de estas medidas incluyen promulgar una cultura de preparación ciudadana que incluya kits de supervivencia de 72 horas o planes de agrupación familiar rápida en situaciones de emergencia, otras medidas se centran en la continuidad de servicios esencial como son el transporte o la energía que permitan hacer frente a la situación y también hay medidas

³³ Faraldo, J. M., (2023)

³⁴ European Commission, (2024)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

que buscan crear un marco legal común que defina un protocolo de actuación conjunta de las diferentes naciones.

En la “Preparedness Union Strategy”³⁵ del pasado marzo la Comisión Europea, se comienza a desarrollar con mayor detalle algunas de las iniciativas explicadas en el anterior informe de la comisión, por primera vez se comienza a hablar de fechas estimadas de implantación de las medidas propuestas. La mayoría de las fechas estimadas son para 2026 y 2027. Sin embargo, lo crítico de esta estrategia es que no aporta la metodología que debe usarse para poder lograr los objetivos, se trata de unas guías de acciones a implementar por parte de los estados.

Si bien Europa ha comenzado a dar pasos en la dirección correcta de poseer un plan de emergencias contra situaciones de conflicto bélico todavía debe ser mucho más concretizado y especificado por parte de los estados, y con claros pasos de implementación.

Ya centrando el estudio en un plan estatal, es decir, las propuestas de evacuación que presenta el gobierno de España, no se ha encontrado un plan de evacuación definido como tal. Lo más cercano que se ha encontrado relativo a emergencias bélicas ha sido la Unidad Militar de Emergencias (UME), y más particularmente los reales decretos 416/2006³⁶, en el que se establece la organización y despliegue de esta unidad, y 1097/2011³⁷, en el que se aprueba el protocolo de intervención de la Unidad Militar de Emergencias.

Si bien tener un cuerpo militar preparado para intervenir en situaciones de emergencia es, sin duda alguna, un punto muy positivo, la falta de un claro y definido plan de evacuación por parte del estado deja ver que la existencia de este trabajo tiene más sentido que nunca, máxime teniendo en cuenta la actual situación geopolítica mundial.

Las siguientes instituciones que deben ser estudiadas son las comunidades autónomas. Dado el alto grado de competencias transferidas no es de extrañar que las autonomías tuvieran algún tipo de responsabilidad sobre las evacuaciones de emergencia de sus respectivos territorios.

³⁵ European Commission, (2025).

³⁶ Ministerio de Defensa, (2006).

³⁷ Ministerio de Defensa, (2011).

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Y se encontraron planes territoriales de protección civil de algunas comunidades autónomas. Por ejemplo, en Cataluña se cuenta con el “Pla Territorial de Protecció Civil de Cantalunya (PROCICAT)”³⁸, el cual establece los supuestos en los que este plan debe entrar en acción, así como los diferentes responsables organizativos de coordinar el plan y el rol que debe tener cada uno. No obstante, el plan no contempla como emergencia un posible ataque bélico por parte de una potencia extranjera y tampoco no entra a tanto detalle en los pasos a seguir de cara a una evacuación de emergencia, sin embargo, esto constituye el primer y más tangible acercamiento a lo que debería de ser un plan de evacuación.

En la Figura 2, mostrada a continuación, se presenta el organigrama general que Protección Civil de Cataluña propone para gestionar las posibles situaciones de emergencia.

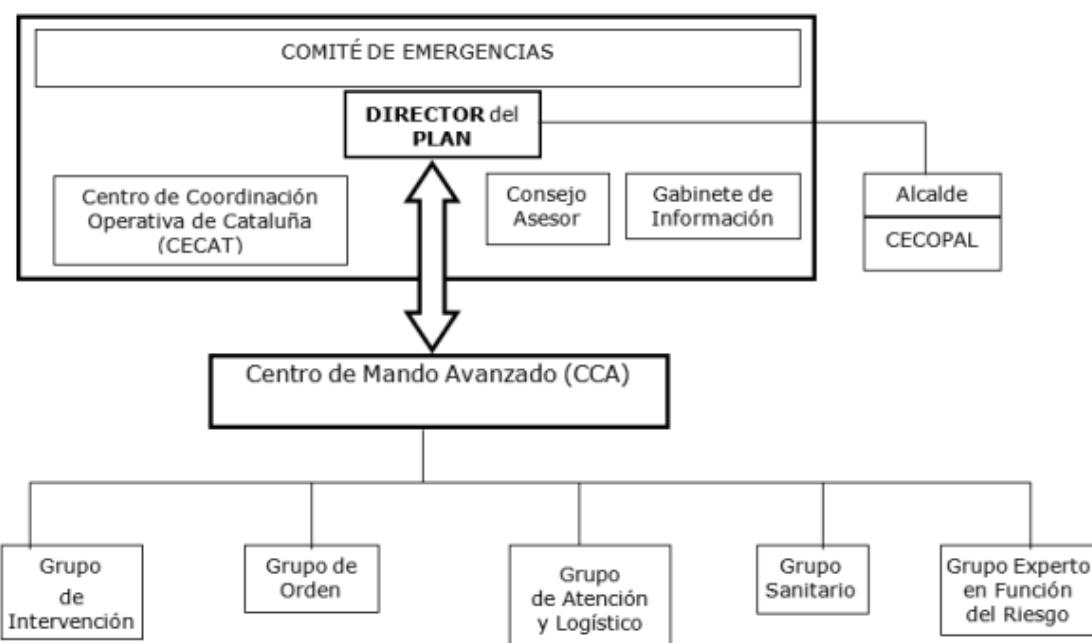


Figura 2. Organigrama general del PROCICAT para situaciones de emergencia

Con la misma idea que el PROCICAT, la Comunidad de Madrid dispone de su propio plan de emergencias, “Plan Territorial de Protección Civil de la Comunidad de Madrid (PLATERCAM)”³⁹. Y lo cierto es que posee las mismas virtudes y defectos del plan

³⁸ Protecció Civil de Catalunya, (2022).

³⁹ Protección Civil de la Comunidad de Madrid, (2019)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

catalán. De hecho, las similitudes entre ambos planes son muy evidentes solo hace falta ver el organigrama operativo del PLATERCAM, mostrado en la Figura 3.

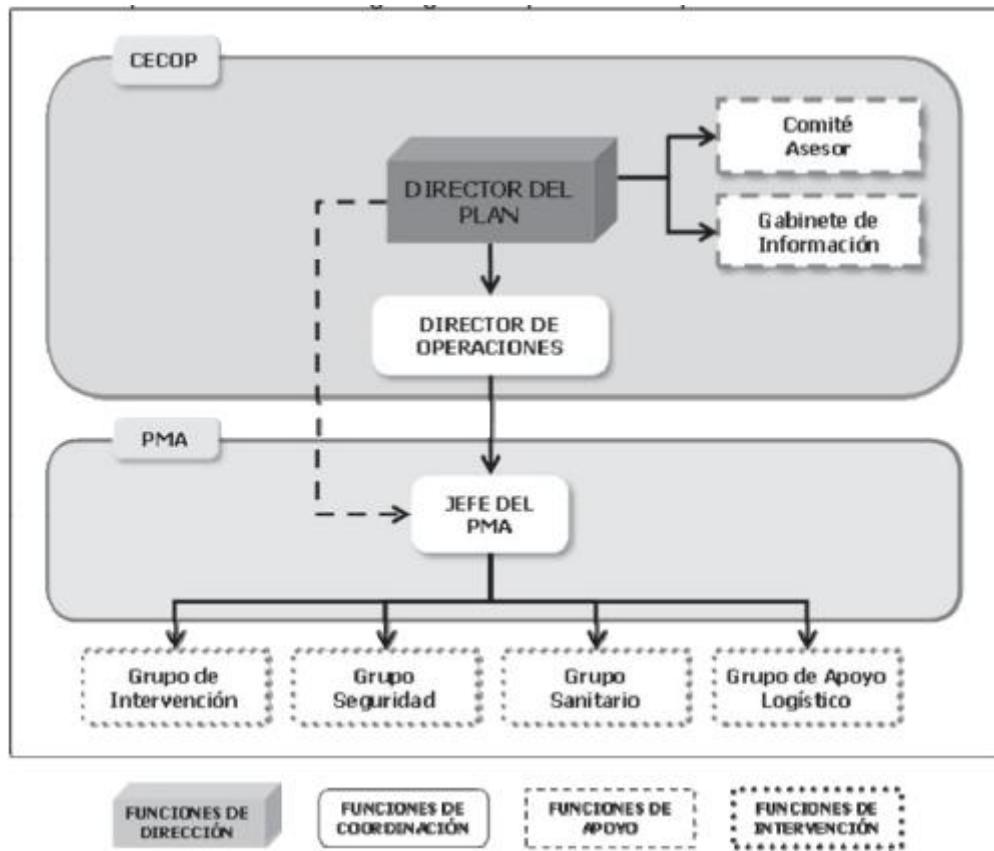


Figura 3. Organigrama operativo del PLATERCAM para situaciones de emergencia⁴⁰

Por último, se debe estudiar si hubiese planes de evacuación específicamente diseñados para Ceuta y Melilla, y a ser posible que contemplasen situaciones de invasión militar de las ciudades por una potencia extranjera, que en este caso será Marruecos.

Como ya sucedió con las otras comunidades autónomas, las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla también cuentan con sus planes territoriales de Protección Civil (PLATERCE⁴¹ para Ceuta y PLATERME⁴² para Melilla). Sin embargo, y dado que son estas ciudades las que se van a estudiar durante este trabajo final de máster, ya se está esperando un plan mucho más definido y concreto a este nivel, y tanto el PLATERME como el PLATERCE

⁴⁰ Protección Civil de la Comunidad de Madrid, (2019)

⁴¹ Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Ceuta, (2008)

⁴² Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Melilla, (2014)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

son planes generalistas que ni siquiera consideran la posibilidad de que las ciudades sufren un intento de conquista por parte de una potencia extranjera.

Pero, obviando los dos planes anteriormente mencionados, no existe, y si existe no es público, un plan de evacuación para las ciudades autónomas, en general, y un plan de evacuación para una situación de ataque en particular.

Algo que también puede ser útil para esta investigación es indagar en posibles antecedentes de situaciones reales (o simuladas) de evacuaciones que se haya llevado a cabo en las ciudades.

Lo cierto es que ha habido un par de simulacros en Melilla, el primero de ellos fue un simulacro de emergencia en 2017 en el que se simulaba un terremoto de nivel 2 en la ciudad⁴³, para ello se desplegó a la UME con la supervisión del Centro de Coordinación Operativa Integrado (CECOPI), y para el segundo de ellos se trabajó una situación de escenario multiemergencia⁴⁴ en 2019, y para este segundo simulacro se involucró a la UME, a la Comandancia Militar, a la Guardia Civil y policías.

A parte de estas simulaciones de emergencia también se han llevado a cabo despliegues militares con la finalidad de demostrar fuerza y así disuadir a cualquier potencia extranjera de tratar de tomar las ciudades por la fuerza como fue el caso del despliegue realizado el pasado febrero, en el cual se desplegaron a equipos tácticos, el regimiento Montesa nº3 y el de regulares nº54.

Todo lo anterior deja constancia de que existe todavía una necesidad de la realización de un plan específico de evacuación para las ciudades autónomas españolas en África, por si sufrieran algún ataque militar.

⁴³ Ministerio de Defensa, (2017)

⁴⁴ Ministerio de Defensa, (2019)

2. FRAMEWORKS Y TEORÍAS PARA LOS PLANES DE EVACUACIÓN

Habiendo estudiado la literatura que han presentado los diferentes organismos públicos, se propone ahora la realización del estudio de la literatura propuesta por investigadores y expertos en la materia de los planes de evacuación, y si puede ser con un enfoque en evacuación por ataque bélico, mejor.

Esta sección, a diferencia de la anterior, va a tener un enfoque a mucho más detalle en las teorías propuestas, porque la literatura así lo permite, además, muchos de los estudios que se mostrarán a continuación suelen estar explicados mediante un framework (marco de trabajo), a menudo representado como un diagrama de flujo con los pasos a seguir.

Un primer estudio propuesto es un clásico en las evacuaciones en áreas urbanas en desastres que han sido provocadas por seres humanos⁴⁵, como podrían ser atentados terroristas o ataque bélicos. El framework de este estudio se presenta en la Figura 4.

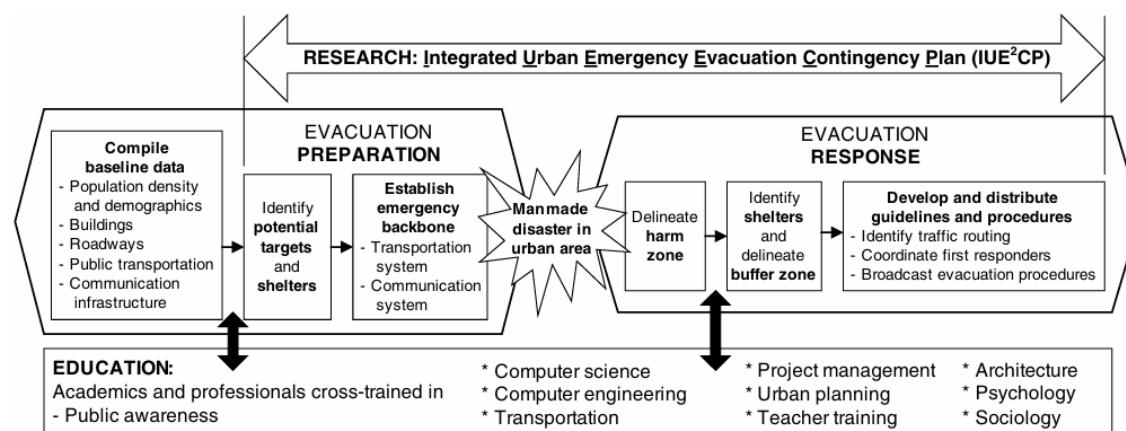


Figura 4. Framework del Plan de Contingencia para Evacuaciones de Emergencia en Áreas Urbanas (IUE²CP)⁴⁶

El plan consta de 2 partes claramente diferenciadas, una anterior al desastre, la parte de preparación de la evacuación, y otra posterior al mismo, conocida como respuesta de la evacuación.

De cara a preparar el plan de evacuación existen tres fases. La primera de ellas es la compilación de los datos relevantes para el plan, esto incluye la densidad de población

⁴⁵ Wei et al, (2008)

⁴⁶ Wei et al, (2008)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

del área urbana, los edificios que se encuentran en dicha área, las carreteras dentro del área de evacuación, el transporte público disponible y la infraestructura de comunicaciones.

Una vez se hayan recopilado estos datos, se puede proceder a la realización IUE²CP (Integrated Urban Evacuation Emergency Contingency Plan), y lo primero de todo es ubicar los potenciales objetivos que las personas o potencias extranjeras tuvieran en su punto de mira para atacar, en el caso del estudio se teorizó sobre un potencial ataque a la villa olímpica de Pekín (ya que las olimpiadas de 2008 se celebraron en dicha ciudad). Esto se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Componentes claves para la ejecución IUE²CP en la villa olímpica de Pekín.⁴⁷

Y como último paso de la preparación para la evacuación, se debe establecer “la columna vertebral” del plan de evacuación, la cual está compuesta por la red de carretas que permitirá huir de la zona del desastre, en la Figura 5 aparecen marcadas en verde todas ellas.

⁴⁷ Wei et al, (2008)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

La segunda parte del plan se enfoca en cómo actuar una vez haya sucedido el desastre. El primer paso es reconocer y delimitar la zona que se ha visto afectada por el desastre provocado por el ser humano. Lógicamente el tamaño del área dependerá de la naturaleza del desastre, no será lo mismo un atentado terrorista que emplea un vehículo motorizado para atropellar viandantes, que la colocación de un artefacto explosivo o un arma química en una zona pública.

En la Figura 5, esta área aparece marcada con franjas rojas y blancas y delimitada por trazos gruesos rojos que marcan la frontera de la zona de peligro. Así mismo, dentro de esta zona de peligro se deben de establecer puntos de carga de evacuados que deberán ser transportados a las zonas de seguridad. Estos puntos aparecen marcados como cruces moradas en la Figura 5.

Una vez completado el paso anterior, se debe delimitar la “Buffer Zone”, que es una zona en la que la población civil no está expuesta a un peligro inminente por parte del desastre (zona morada punteada en la figura), pero que se verá afectada por la ejecución del plan de evacuación (como, por ejemplo, que el personal no esencial no tenga acceso a dicha zona mientras dure el peligro y la evacuación). También se deberán identificar los refugios (marcados con estrellas rojas en la Figura 5) en lo que se podrán atender a los evacuados que huyen de la zona del desastre.

Finalmente, se debe identificar las posibles rutas de tráfico para evacuar a todos los civiles no esenciales que se encuentren tanto en la zona del desastre como la del Buffer, así como coordinar las primeras respuestas al desastre provocado y anunciar a toda la población implicada los procedimientos de evacuación que se van a seguir en el área para que todo el mundo pueda cooperar.

Y todo este framework, tanto la parte de preparación como la parte de respuesta al desastre debe de estar alineado con la parte académica, es decir, se deben de seguir las recomendaciones diferentes especialistas en planificación urbanas, en transportes, en ingeniería de computación para resolver de manera matemáticamente óptima los flujos poblacionales por diferentes carretas (ver el siguiente apartado), así como las recomendaciones de psicólogos y sociólogos a la hora de tratar tanto a los viandantes traumatizados por el desastre ocurrido, así como la mejor manera de comunicar a la población lo sucedido y el plan de actuación.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

A continuación, se presenta un framework que permite integrar dos problemas clásicos en las situaciones de evacuación de emergencia, tanto la elección del refugio, así como la asignación de rutas, y ambas lo hace de manera dinámica, el estudio es “An Agent-Based Dynamic Framework for Population Evacuation Management”⁴⁸.

Los autores proponen, la Figura 6, mostrada a continuación como el framework a seguir.

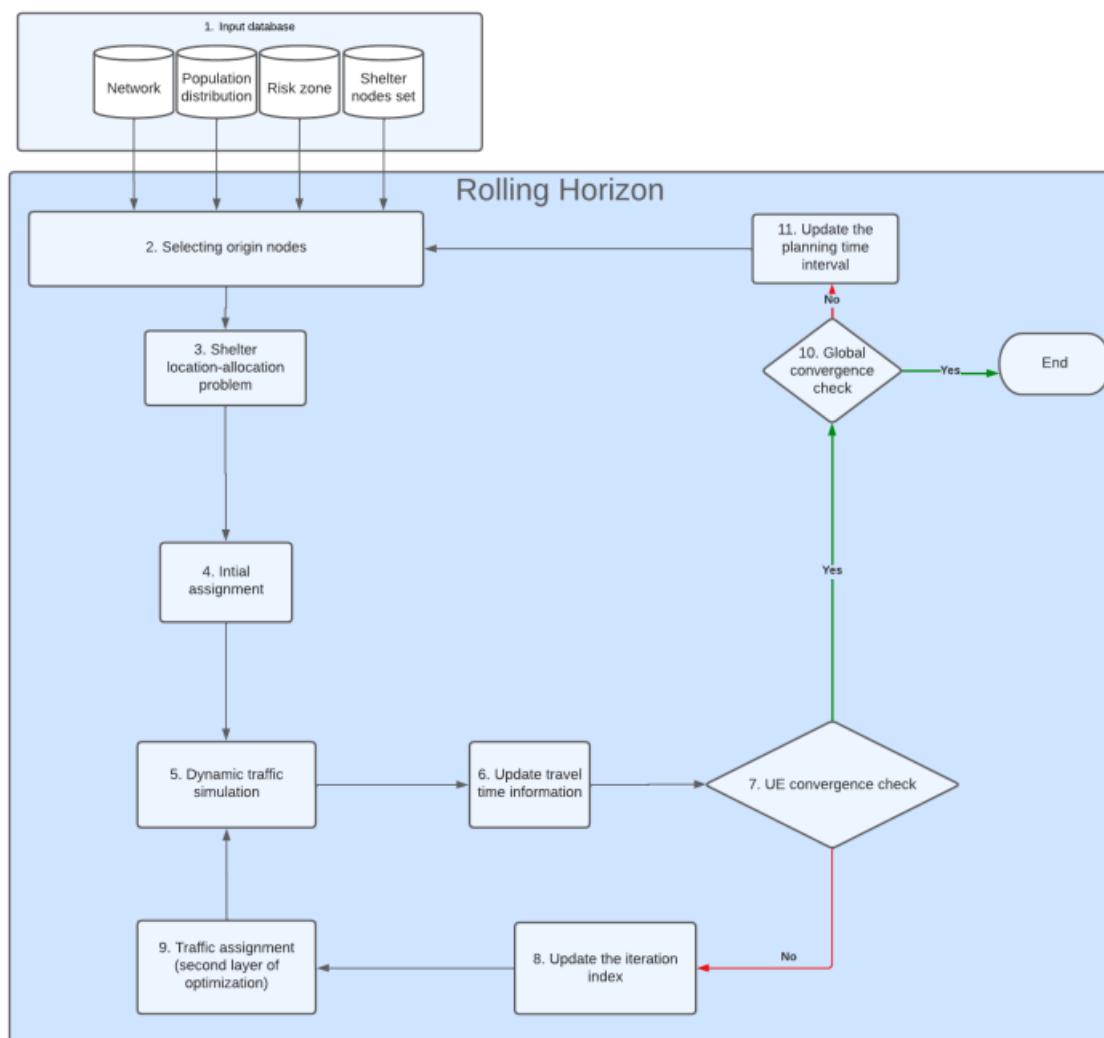


Figura 6. Diagrama de Flujo a seguir para la solución de los problemas de evacuación⁴⁹

Este framework sugiere el uso de un método iterativo para el constante cálculo del problema del refugio, así como del problema de asignación de tráfico. Una vez se tienen los datos de inicio (input database) que incluyen la información de la red, la distribución de la población, la zona de riesgo y los nodos de refugio, se seleccionan los nodos de

⁴⁸ Idoudi et al, (2022)

⁴⁹ Idoudi et al, (2022)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

origen y se ejecuta el problema de elección de refugio “Shelter Allocation Problem” (SAP).

Tras esto ya se dispone de una primera asignación de tráfico “Dinamyc Traffic Assignment” (DTA), y se procede a la realización de una simulación dinámica (paso 5 de la Figura 6).

Con los resultados obtenidos, se actualiza la información que tardarían todos los usuarios con el actual modelo propuesto (con los refugios y rutas seleccionadas) (paso 6 del diagrama). Y se realiza un “User Equilibrium Convergence Check”, es decir, el sistema comprueba que ningún usuario mejoraría su tiempo si se cambiase de ruta.

Si algún usuario pudiera mejorar su tiempo, entonces el algoritmo no habría convergido y se debería actualizar los índices de iteración (paso 8) y volver a realizar la asignación de rutas (paso 9) y volver a correr la simulación (paso 5).

Este ciclo se realizará cuantas veces sean necesarias hasta llegar a un equilibrio de convergencia del usuario. Si eso ocurriera, entonces se procedería a la realización de la verificación de convergencia global (paso 10), en la cual se verifica si con las rutas actualmente distribuidas, los refugios estarían bien asignados, si esa fuera la situación entonces el diagrama habría llegado a su punto óptimo.

Pero si, por el contrario, esa no fuera la situación, se debería reiniciar el proceso habiendo actualizado el tiempo de intervalo de planificación (paso 11) y regresando a la selección de los nodos de origen nuevamente.

Tras este estudio, también resulta interesante ver el siguiente trabajo, “Risk Reduction in transport System in Emergency Conditions: A Framework for Evacuation Planning”⁵⁰. El cual se encuentra muy vinculado con lo presentado en el apartado anterior de normativa y metodología propuesta por parte de las instituciones.

Los autores del artículo entendieron que, si bien hay marcos operativos para las evacuaciones en las Naciones Unidas y en la Comisión Europea, en muchas ocasiones no existe uniformidad entre ambas y mucho menos entre los marcos que poseen las diferentes naciones que integran ambos organismos.

⁵⁰ Rindone, C. & Panuccio, P., (2022)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

En el estudio se propone que la planificación para las condiciones extraordinarias debe derivar tanto de los artículos científicos que los académicos han ido publicando en esta materia como las leyes nacionales y regionales, como se observa en la Figura 7.

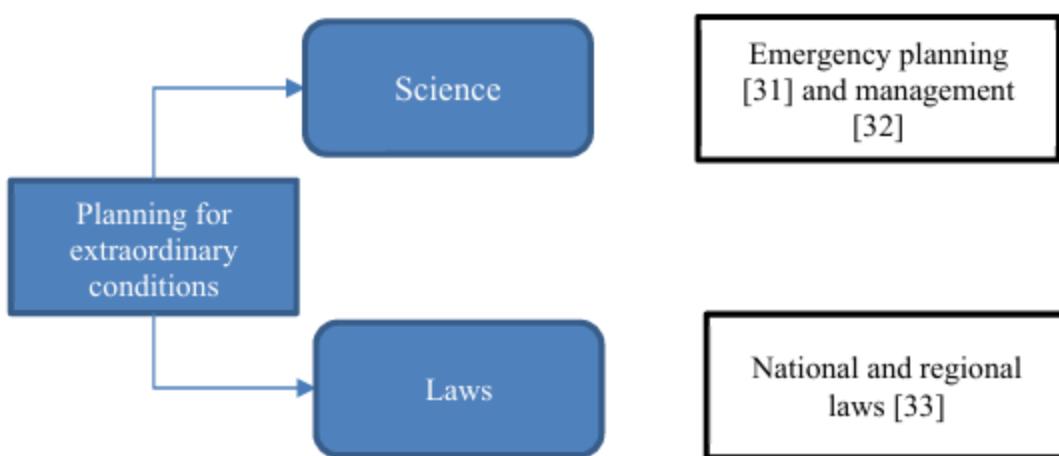


Figura 7. Planificación para condiciones extraordinarias⁵¹

Además, el artículo también menciona que para combinar la planificación de las situaciones extraordinarias con las situaciones ordinarias no solo basta con tener en cuenta los dos factores previamente mencionados, si no que además hay que añadir la práctica como tercer factor clave para poder conciliar ambas condiciones, como se muestra en la Figura 8.

⁵¹ Rindone, C. & Panuccio, P., (2022)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

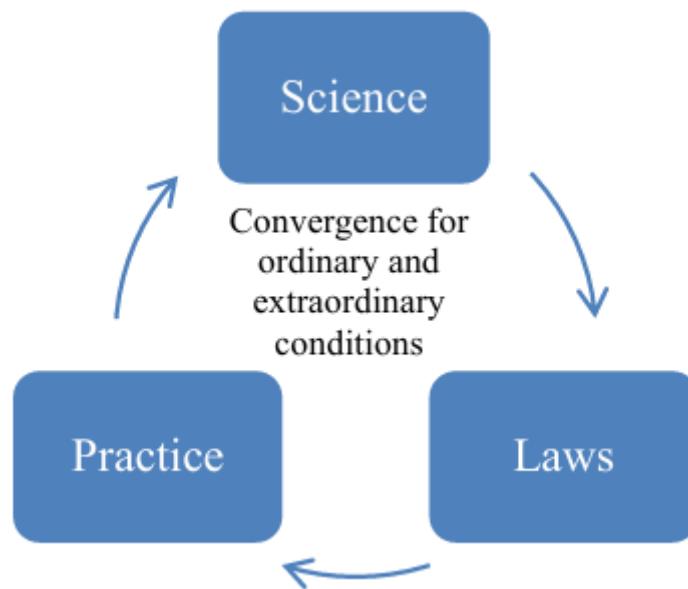


Figura 8. Convergencia para las condiciones ordinarias y extraordinarias⁵²

Finalmente, el estudio también menciona que el framework propuesto debe tener un carácter circular, como el que se muestra en la Figura 9 a), en el cual siempre se debe de estar iterando entre un estado de prevención, a preparación, a respuesta (solo en caso de que ocurra), y a recuperación tras el desastre.

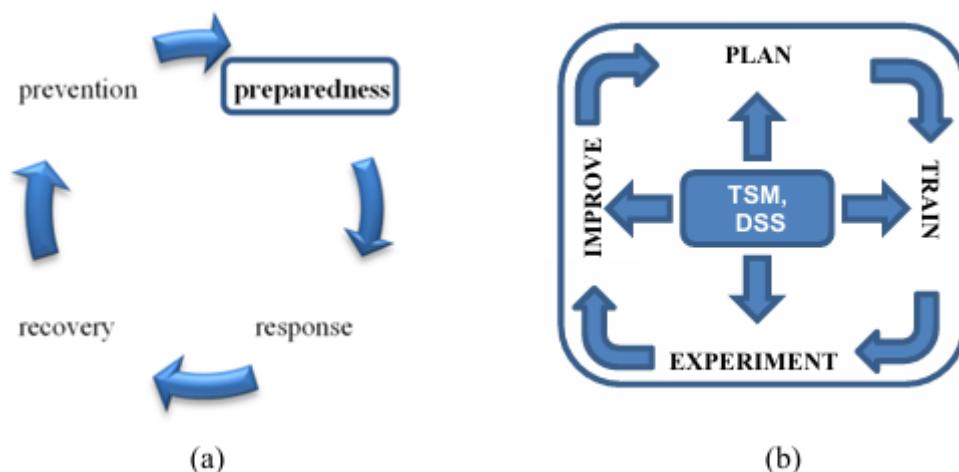


Figura 9. a) Diagrama propuesto para hacer frente a un desastre. b) Zoom-In dentro de la fase de preparación del diagrama anterior.⁵³

Así mismo, el artículo también menciona que, dentro de la fase de preparación para el desastre, los modelos de sistemas de transporte “Transport System Models” (TSM) y los

⁵² Rindone, C. & Panuccio, P., (2022)

⁵³ Rindone, C. & Panuccio, P., (2022)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

sistemas de soporte de decisión “Decision Support System” (DSS), deben ubicarse en el centro del ciclo “Plan, Train, Experiment, Improve”, Plan, Entrenamiento, Experimento y Mejora, porque permiten a los científicos cuantificar la toma de decisiones

Otro estudio que también es importante mencionar este ámbito es el de “Evaluación de Riesgos y Gestión en Desastres. 10 Preguntas para la Década Actual.”⁵⁴ En el cual se abordan los principales riesgos de la década de los 2000, sin embargo, lo interesante para este trabajo son los elementos que el profesor Maturana considera esenciales para una gestión integral del riesgo, los cuales se presentan en la Figura 10.



Figura 10. Diagrama de Flujo para la Gestión Integral del Riesgo.⁵⁵

En el estudio se proponen unas fases muy similares a las que se propusieron en el anterior estudio. Se trata de un ciclo donde siempre debe de haber una fase de prevención, y mitigación (ambas con la finalidad de disminuir los efectos tanto de posibilidad como de impacto en caso de que el riesgo suceda).

⁵⁴ Maturana, A., (2011)

⁵⁵ Maturana, A., (2011)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Tras esto se debe contar con una fase de preparación (si se supiera que el riesgo va o puede ocurrir en una determinada fecha).

Tras estas fases previas, se procede al riesgo como tal, dónde siempre se debe de informar lo antes posible de la existencia del mismo (fase de alerta temprana). Una vez se encuentra sumido en la fase de riesgo (conocida como crisis), se debe de tratar de “apagar el incendio” lo más rápido posible para que el impacto sea lo menor posible tanto en vidas humanas como en daños materiales.

Habiendo cubierto la parte más crítica del ciclo, se deben ejecutar las fases de rehabilitación (de todo aquello que pueda ser reutilizado tras el desastre) y la fase de reconstrucción (de todo aquello que haya quedado seriamente dañado tras el mismo).

Sin embargo, algo nuevo que aporta este estudio y que es de gran interés son los tres estudios centrales que sirven para elaborar de manera adecuada y personalizada el plan de actuación que se debe proponer frente al riesgo en cuestión.

El artículo menciona que se debe de hacer un estudio de vulnerabilidades, en el caso que ocupa a este trabajo podría tratarse de estudiar las debilidades que presentan las fronteras de Ceuta y Melilla desde un punto de vista militar.

Por otro lado, el estudio de recursos sería conocer si las ciudades autónomas disponen de todo lo necesario para poder llevar a cabo el plan de evacuación y eso incluye desde los transportes necesarios para la evacuación, la existencia de los puntos de evacuación, la adecuada preparación de la infraestructura para dicha tarea...

Y finalmente se encuentra el estudio de amenazas, que como se mencionó con anterioridad, se asume que Marruecos presenta un interés histórico y estratégico por controlar las ciudades autónomas españolas en suelo africano. Sin embargo, esto no significa que vaya a hacerlo o que actualmente exista ningún tipo de plan por parte del gobierno de Rabat por llevar a cabo tales acciones.

De cualquier manera, este estudio corresponde a los organismos gubernamentales y servicios de inteligencia españoles, y que muy probablemente ya se haya hecho, y no se tenga constancia de cara al público general.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Como último estudio de la parte metodológica se propone “Safety of Users in Road Evacuation: The Logical Framework Approach in Evacuation Planning”⁵⁶. En este caso, los autores del estudio plantean la vinculación de un esquema “Logic Framework Approach” (LFA) que tradicionalmente tiene 5 etapas (Inputs, Activities, Outputs, Outcomes y Goals) y se usa para tratar de estructurar proyectos con la planificación de una evacuación mediante carreteras.

A continuación, se muestra en la Figura 11 el esquema LFA ya adaptado a la planificación de una evacuación vial propuesta por el estudio.

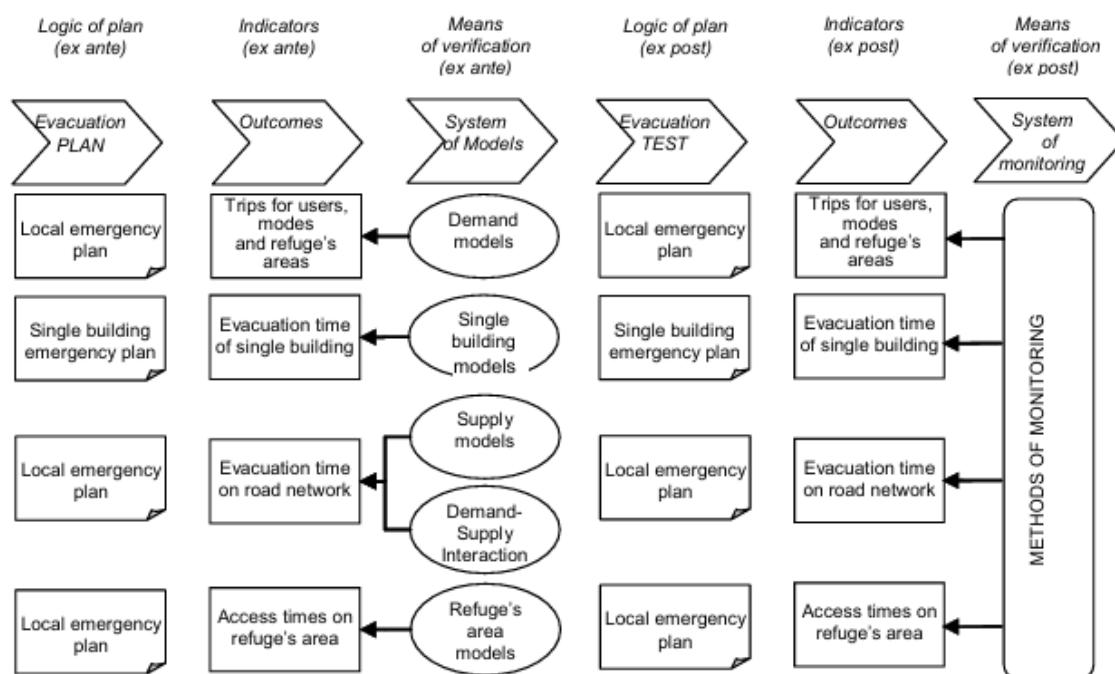


Figura 11. Esquema LFA adaptado a la evacuación vial⁵⁷

El esquema LFA consta de 2 partes, una componente de Ex-ante (es decir, que ocurre antes de la implementación del plan, son las primeras columnas del esquema). Y por otra parte está el Ex-post (que se lleva a cabo después de la implementación del plan, 3 columnas finales del esquema).

Ambos pasos cuentan con exactamente las mismas columnas, que son: “Logic of Plan” (dónde se definen los elementos del plan, es decir, qué se quiere hacer), “Indicators” (que permiten medir si la lógica del plan está funcionando como esperado, tanto ex-ante como

⁵⁶ Russo, F. & Rindone, C., (2008)

⁵⁷ Russo, F. & Rindone, C., (2008)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

ex-post) y finalmente “Means of Verification” (que definen las herramientas a emplear para verificar esos resultados).

Y luego se puede leer por filas, en el caso que ocupa a este trabajo es particularmente interesante leer la fila 3. Se trata de un plan local de emergencia que pretende medir si funciona a través del tiempo de evacuación de una red de carreteras y para ello se emplearán tanto modelos de oferta como de interacción oferta-demanda. Y una vez llevado a cabo el plan de emergencia, el resultado debería ser un tiempo total en la red de carreteras y dicho tiempo podrá ser medido mediante los diferentes métodos de monitoreo de variables.

3. MODELOS MATEMÁTICOS CUANTITATIVOS

Si bien el apartado anterior hacía referencia a frameworks y teorías de evacuación en una perspectiva cualitativa, a continuación, se procede a realizar un estudio de la literatura desde una perspectiva cuantitativa y numérica.

No cabe duda de que la literatura cualitativa aporta gran valor a este TFM, sin embargo, y dado que es un trabajo de ingeniería, no se puede obviar que se ha de contar con una fuerte base numérica que justifique el plan de evacuación de emergencia si la ciudad es atacada. De hecho, es gracias a los valores numéricos que se vayan a emplear, que se puede justificar como de bueno (o malo) es el plan que se vaya a proponer, así como las posibles mejoras a realizar, y los diferentes escenarios que se simulen más adelante.

Un primer estudio que resulta de alto grado de interés para este trabajo es “Mathematical Models for Evacuation Planning in Urban Areas”⁵⁸, en esta publicación se proponen diferentes modelos de planes de evacuación, aunque todos ellos simulan casos de evacuación por desastres naturales o accidentes como inundaciones, terremotos o fugas químicas. Este modelo es relevante para situaciones en las que haya muchas intersecciones, y tráfico intenso, está más bien pensado para ciudades densamente pobladas urbes, como podría ser el caso de Madrid o Barcelona. Si bien no es el caso de las ciudades autónomas Ceuta y Melilla, no se debe desestimar lo que este estudio pueda aportar al trabajo.

El estudio realiza 6 tipos de modelos. El primero de ellos simula un modelo de flujo dinámico con variables mixtas enteras, emplea una red expandida en el tiempo, es decir, nodos y arcos se van replicando en función de intervalos temporales, lo cual permite simular un atasco con gran fidelidad. Esto es viable para un área pequeña, pero al escalarlo a un tamaño de ciudad se vuelve intratable, por eso se propone el segundo modelo que relaja las condiciones del primero, pero pierde veracidad. El tercer modelo cambia la aproximación y supone que existe patrones de evacuación, o sea, que solamente se pueda circular en un determinado sentido, o los cruces solo se puedan tomar girando a la derecha y no cruzando la carretera perpendicular.

⁵⁸ Brestchneider, S., (2012).

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

En el cuarto modelo se opta por simplificar la asunción de las intersecciones, ya que nuevamente torna al modelo excesivamente complejo. El quinto modelo, a diferencia de los 4 anteriores asume que no solo puede haber coches individuales, si no que también hay otros vehículos (como autobuses), lo cual facilita la reducción del tráfico. El último modelo es una variante del anterior, en el cual se simplifica ligeramente la red empleada, y se realiza un nuevo ajuste final sobre las intersecciones más complejas.

Otro de los estudios sobre modelos matemáticos que se deben mencionar a la hora de estudiar la literatura matemática es “Large-Scale Zone-Based Evacuation Planning: Models, Algorithms, and Evaluation”⁵⁹, en dicho estudio los autores presentan un plan de evacuación a gran escala.

Para poder lograr dicho objetivo, se propone trocear el área en cuestión en áreas mucho más pequeñas de tal manera que cada una de las subáreas tengan sus propias rutas de evacuación, así como sus propios horarios de salida.

Para llevar a cabo la simulación, los autores emplean el tradicional modelo de flujos dinámicos de grafos expandidos en el tiempo de Ford-Fulkerson⁶⁰, este modelo permite mediante varias iteraciones lograr localizar el flujo máximo limitante en los diferentes arcos que tenga la red de transporte.

⁵⁹ Hasan, M. & Van Hentenryck, P. (2020)

⁶⁰ Ford Jr, L. & Fulkerson, D. (1956)

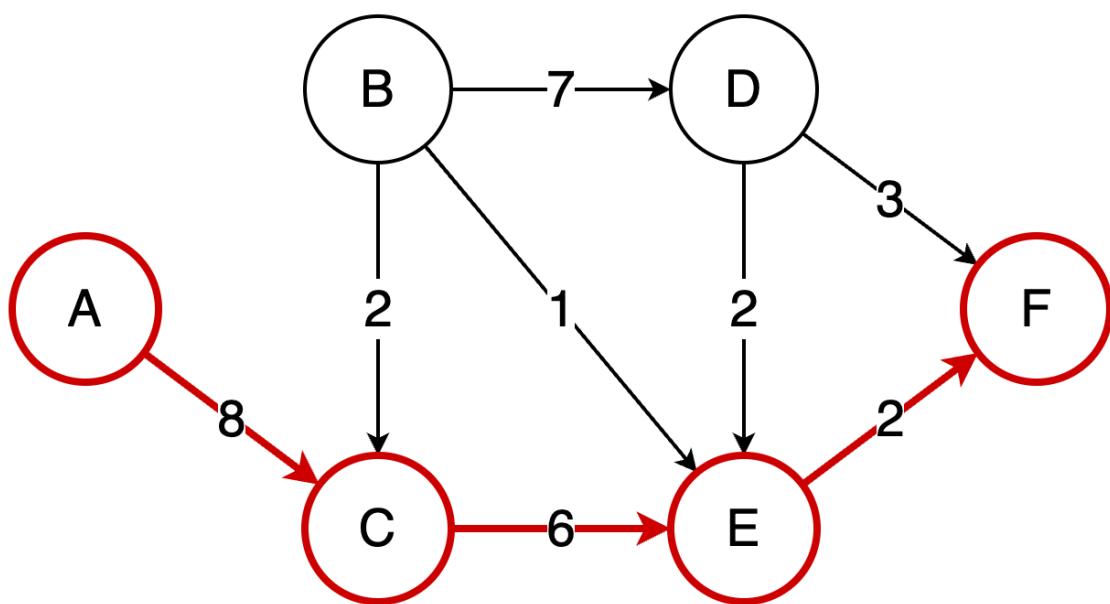


Figura 12. Ejemplo de una red sencilla ya resuelta mediante el modelo de Ford-Fulkerson

Este estudio fue simulado en el área de Hawkesbury–Nepean, al noroeste de Sídney en Australia, donde se creó una red de aproximadamente 30.000 y 75.000 aristas. En el estudio se llegó a la conclusión que empleando su método se lograba aumentar la eficiencia operativa en la evacuación.

Sin embargo, y afortunadamente para este trabajo, el modelo de Ford-Fulkerson no es el único que permite resolver de redes de transporte mediante el uso de flujos y contraflujos. No obstante, antes de proceder a presentar los diversos modelos que existen para la resolución de redes de transporte es conveniente definir qué es una red de transporte y qué modelos existen ya estandarizados para el estudio de los diferentes algoritmos de resolución de las redes de flujos y contraflujos.

Una red de transporte es un grafo o dibujo que trata de representar la estructura, en este caso vial, de una determinada zona. Estos grafos están compuestos por nodos (que son las interconexiones entre las diferentes carreteras) y los enlaces (o arcos) que son las carreteras que interconectan los nodos.⁶¹

Además, la red de transporte también debe definir otras características relevantes de la infraestructura como por ejemplo los nodos de origen y destino, la capacidad o el volumen

⁶¹ De Moor, B. & Maerivoet, S., (2005)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

de flujo que presentarán los enlaces, y consecuentemente el tiempo (también conocido como coste) de recorrer dichos enlaces.

Es decir, se trata de plasmar la realidad de la infraestructura de un lugar, en el caso de este trabajo serán las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, para a raíz de ahí, poder emplear unos modelos o algoritmos que permitan resolver el flujo de tráfico especificado en la red de transporte.

Sin embargo, existen ya algunas redes de transporte ficticias o reales que se han usado en numerosas ocasiones para ensayar los diferentes modelos propuestos. En este sentido, el modelo de Nguyen-Dupuis⁶² es ampliamente usado por la comunidad académica para poner a prueba modelos de flujos y contraflujos.

A continuación, se presenta la Figura 13, en la que se presenta la red de transporte empleada en el modelo de Nguyen-Dupuis.

⁶² Nguyen, S. & Dupuis, C., (1984)

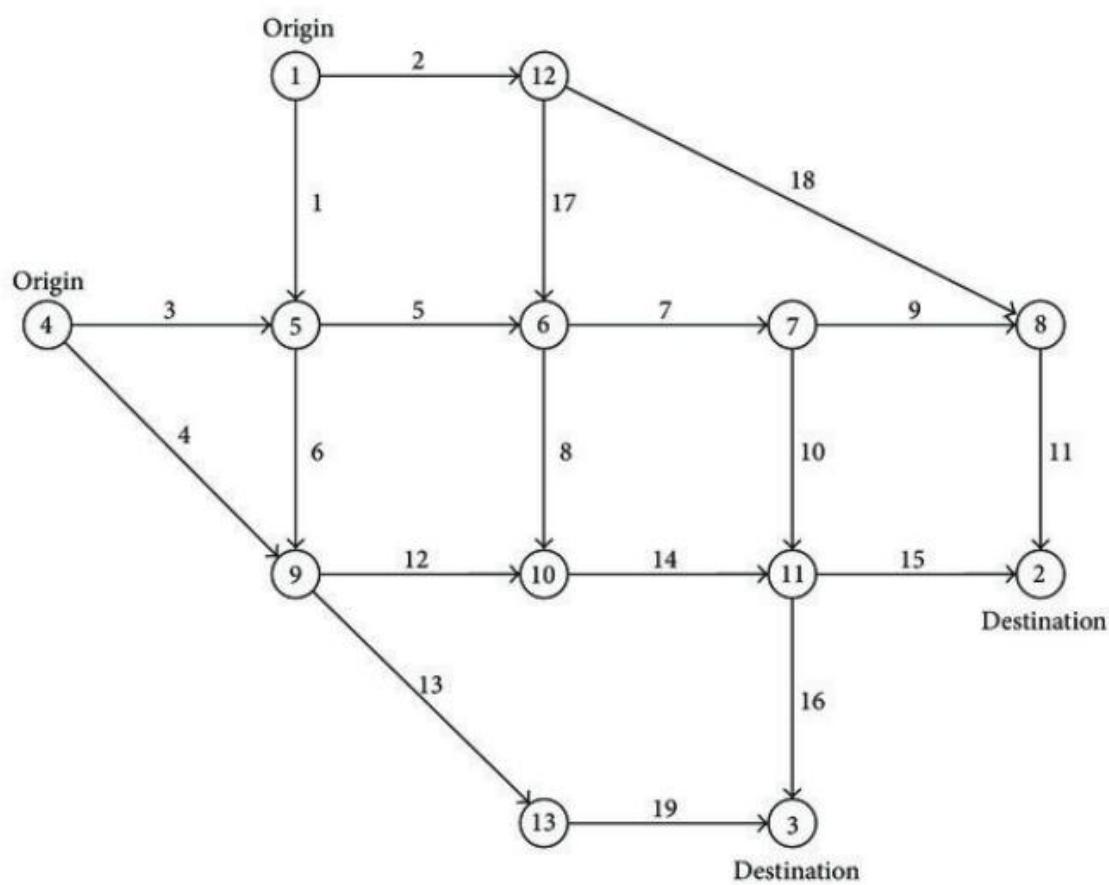


Figura 13. Red de transporte del modelo Nguyen-Dupuis.⁶³

Esta característica red siempre se representa de la misma manera, esto es, cuenta con un total de 13 nudos y 38 enlaces (representado como 19 “carreteras”, pero que permiten ir en ambos sentidos). Los nodos de origen son siempre el 1 y 4, y los nodos de destino son el 2 y 3, es indiferente el nodo de destino al que se llegue, lo relevante es que todos los vehículos lleguen.

A partir de aquí se suele construir una matriz de origen-destino (OD), la cual muestra todos los desplazamientos existentes entre cada par de nodos, y una vez se tiene todo lo mencionado anteriormente, se procede a ejecutar los algoritmos, de los cuales se hablará más adelante, que permitirán resolver esta red de transporte.

⁶³ Nguyen, S. & Dupuis, C., (1984)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Es importante recalcar que esta red es completamente ficticia, es decir, no representa ninguna estructura vial de ningún lugar en particular, sencillamente se ha ido generalizando como un estándar dentro del mundo académico del modelado de tráfico.

Sin embargo, no es el único estándar que existe, de hecho, el modelo presentando en la Figura 14 es otro comúnmente empleado en las investigaciones de planificación de tráfico.

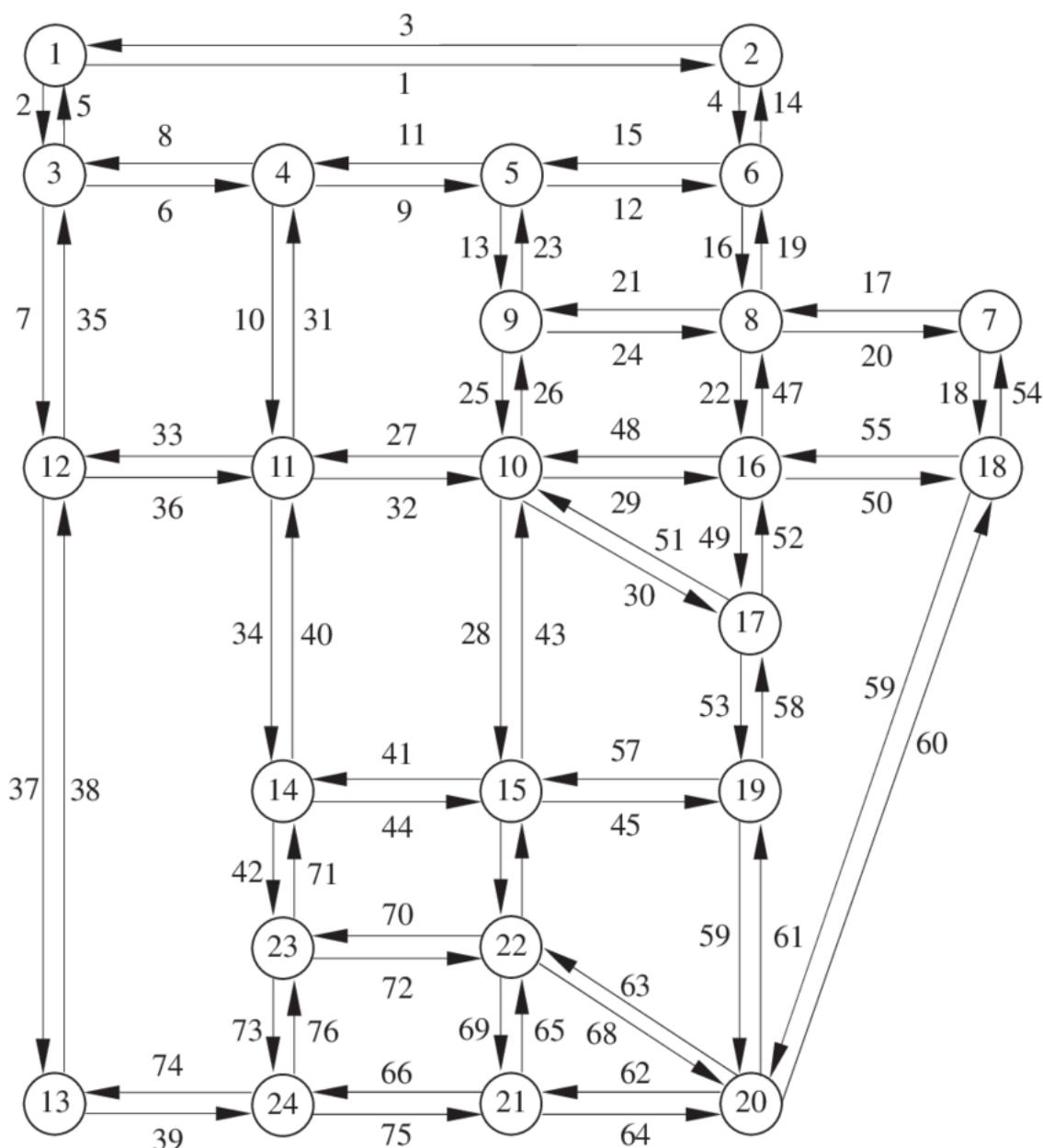


Figura 14. Modelo de red de transporte de Sioux Falls.⁶⁴

⁶⁴ Morlok et al, (1973)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

El modelo de Sioux Falls⁶⁵, basado en la ciudad de homónima de Dakota del Sur, es un modelo que cuenta con 24 nodos y un total de 38 enlaces (76 arcos al permitir doble sentido en todas ellas, como se aprecia en la figura). En este caso la matriz de origen destino crece hasta tener un total de 552 pares.

Similar a como sucedía con Nguyen-Dupuis, esta red es usada para probar generalmente los algoritmos de equilibrio de usuario y de equilibrio del sistema, los cuales se estudiarán en breves.

Es interesante como ambas redes de transporte son a menudo usadas para comparar diferentes algoritmos de resolución de flujos, como por ejemplo este estudio⁶⁶, en el cual se compara el modelo de programación estocástica para variables heterogéneas en ambas redes de transporte. Si bien el modelo de Sioux Falls resulta de mayor tamaño que el de Nguyen-Dupuis, ambos sirven para modelar ciudades de pequeño a mediano tamaño, de hecho, para dar una idea al lector, Sioux Falls poseía en 2020 una población de 192.517 según el United States Census Bureau⁶⁷.

Sin embargo, y en cuanto a tamaño se refiere no son el objetivo de esta investigación, pero existen otros modelos que se utilizan para estudiar grandes ciudades, como es el caso del modelo de Anaheim⁶⁸, el cual simula la mencionada ciudad, en el norteamericano estado de California. Dicha red cuenta con 416 nodos y 914 enlaces, sigue siendo usado en la literatura para estudiar los algoritmos de asignación de tráfico solo que para ciudades de mucho mayor tamaño y no se contemplan escenarios de evacuación.

Y por llevarlo todavía más al extremo hay estudios en los que se ha simulado grandes ciudades como es el caso de Berlín⁶⁹, usando el simulador MATSim, esto incluye topología urbana real como semáforos, calles cortadas o transporte público, sin embargo, esto no aplica a este trabajo pues complica mucho el estudio para ciudades muy pequeñas.

⁶⁵ Morlok et al, (1973)

⁶⁶ Zhang et al, (2020).

⁶⁷ United States Census Bureau, (2020).

⁶⁸ Chen et al, (2002)

⁶⁹ Kaddoura et al, (2019)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Una vez se conoce el “terreno de juego” sobre el que se va a realizar el estudio, lo lógico es conocer las “herramientas” que se van a emplear para poder resolver la planificación del tráfico en caso de evacuación en las ciudades de Ceuta y Melilla.

Tradicionalmente ha habido dos tipos de modelos que han sido ampliamente usados por la comunidad académica la hora de tratar de predecir el tráfico. Por un lado, se encuentran los modelos de tráfico estáticos, y frente a estos se hallan los modelos de tráfico dinámicos⁷⁰.

Los modelos del primer tipo asumen que las condiciones del tráfico son estacionarias (es decir, que no cambian con el tiempo), o que solamente los valores medios resultan de interés para el estudio. Frente a esto se encuentran los modelos del segundo tipo, que entienden que las condiciones del tráfico cambian en función tanto del nodo de la red que se esté estudiando como del momento en el tiempo en el que se encuentre.

En ambos casos se buscar determinar la asignación de tráfico de los conductores. Los modelos del segundo tipo como por ejemplo el estudio de “Estimación del estado del tráfico usando las dinámicas estocásticas lagrangianas”⁷¹ o “Convexidad y robustez de la asignación dinámica de tráfico y el libro control de la red”⁷² son buena prueba de que estos modelos funcionan muy bien a la hora de realizar asignaciones de tráfico, sin embargo, para modelado a realizar en este trabajo final de máster resultan excesivamente complejos para la aplicación de ciudades tan pequeñas como Ceuta o Mellila, es por eso que se pondrá el foco sobre los modelos de carácter estático.

Volviendo a los modelos estáticos de asignación de tráfico, se puede distinguir entre 2 grandes subgrupos, los de equilibrio de usuario (siguiendo el primer principio de Wardrop⁷³) y los de optimización del sistema (los cuales tiene como premisa el segundo principio de Wardrop⁷⁴).

Los de equilibrio de usuario, se basan en que ningún conductor es capaz de reducir su tiempo de viaje eligiendo una ruta diferente. Y dentro de esta categoría existen una gran cantidad de modelos, entre ellos hay modelos que suponen que los conductores poseen

⁷⁰ Nogal Macho, M. (2011)

⁷¹ Jabari et al (2018)

⁷² Como et al (2015)

⁷³ Wardrop, J. (1952)

⁷⁴ Wardrop, J. (1952)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

conocimientos sobre la ruta a tomar⁷⁵ y hay otros donde se asume que los usuarios no poseen dicha información como son el caso del Modelo de Ferris, Meeraus y Rutherford⁷⁶ o el modelo de Castillo et al⁷⁷

Y frente a estos modelos se encuentran los de optimización del sistema, los cuales tiene como principal objetivo que el tiempo total (o promedio) sea el menor posible a través de la asignación de rutas, aunque eso suponga que no todos los conductores hagan el mínimo tiempo que podrían hacer en una libre selección de ruta (es por eso que los modelos del apartado anterior a menudo también se les conoce como modelo “greedy” o avariciosos).

El modelo, casi por excelencia, de los sistemas de optimización es el de Frank-Wolfe⁷⁸, el cual propone un sistema iterativo hasta llegar a un resultado óptimo, es un algoritmo bastante robusto y muy adecuado para redes pequeñas, como es el caso de este trabajo. Otro algoritmo bastante empleado en estos casos es el de “System-Optimal Routing of Traffic Flows with User Constraints in Networks with Congestion”⁷⁹, el cual obtiene grandes resultados pues aplica restricciones a las rutas (como por ejemplo longitud máxima recorrida).

Y finalmente han ido surgiendo modelos más recientes como el de Morandi⁸⁰, que suponen una combinación entre equilibrio del usuario y optimización del sistema con la finalidad de solventar los problemas de tráfico.

Y como último estudio de este apartado del marco teórico se propone el siguiente modelo “A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems”⁸¹, en el que se analiza el plan de evacuación, pero esta vez desde una perspectiva de evacuación de emergencia para peatones, no vehículos.

Lo interesante de este estudio, frente a los anteriores es que a parte de abordar la congestión que van a sufrir las diferentes vías de escape en una evacuación, también se

⁷⁵ Beckmann et al, (1956)

⁷⁶ Ferris et al, (1998)

⁷⁷ Castillo et al, (2008)

⁷⁸ Frank, M. & Wolfe, P. (1956)

⁷⁹ Jahn et al, (2004)

⁸⁰ Morandi, V., (2021)

⁸¹ Beliën et al, (2016).

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

centra en simular cuellos de botella que se puedan tener a lo largo del recorrido, lo cual da un gran realismo a esta revisión.

A lo largo de la revisión emplea 4 de los grandes modelos a la hora de generar estudios sobre planes de evacuación. Los modelos de flujos (y contraflujos) de red, también se emplearon algoritmos de recocido simulado (annealing simulated), el cual permite localizar óptimos utilizando teorías metaheurísticas dentro de una región con muchos óptimos, lo cual lo transforma en idóneo para buscar el punto óptimo en situaciones de evacuación. En el estudio también se emplearon autómatas celulares (es un modelo que consiste en la partición del espacio en células más pequeñas que cada uno funcionan con unas reglas determinadas en un período de tiempo determinado, muy común para simular atascos en función del tiempo y la región). Y finalmente, en el estudio se empleó también modelos de teoría de colas para simular correctamente los efectos de la densidad de población y las esperas que esto genera.

4. TECNOLOGÍA EMPLEADA EN LOS PLANES DE EVACUACIÓN

Como último apartado de este marco teórico se propone hacer una breve revisión de las tecnologías empleadas en los planes de evacuación y el potencial impacto que estas pudieran tener en caso de llevarse a cabo una evacuación de emergencia en la ciudad de Ceuta o Melilla.

En el estudio de “A GIS-Based DSS for Evacuation Planning”⁸², en el cual se propone la evacuación a tres diferentes desastres naturales (incendio, huracán y terremoto), y aunque el modelo empleado es G-BEP (General Building Evacuation Planning), que no aplica para este trabajo, lo interesante reside en ver como los autores emplean ArcGIS para el diseño de las zonas de Buffer, así como las rutas hasta las mismas, como se puede apreciar en la Figura 15, presentada a continuación.

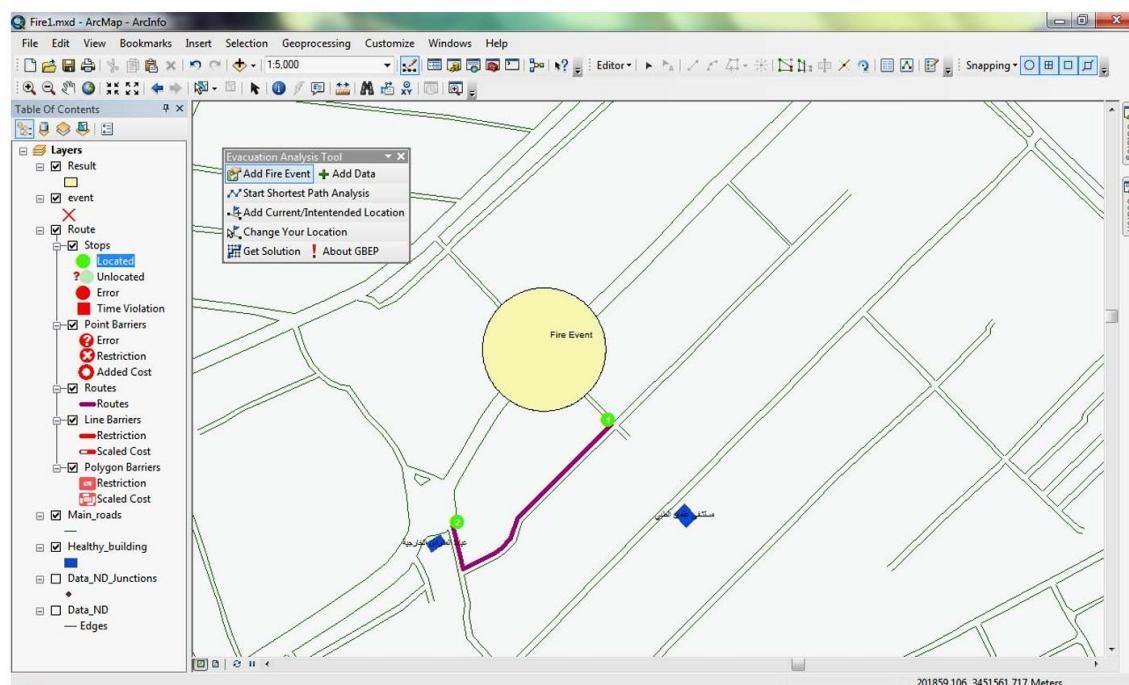


Figura 15. Zona de Buffer y ruta de evacuación propuestas para un incendio.⁸³

Y en este sentido, los autores no son los únicos que han empleado el mencionado software, en otros estudios como “Survey on Using GIS in Evacuation Planning”⁸⁴ o “

⁸² Mohamed et al, (2012)

⁸³ Mohamed et al, (2012)

⁸⁴ El-Hamied et al, (2012)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

3D Building Evacuation Route Modelling and Visualization”⁸⁵ para un plan de evacuación a nivel tridimensional dentro de los edificios también se ha empleado ArcGIS para poder modelar el plan de evacuación, las rutas de huida y las zonas de seguridad.

Otro artículo que también es relevante mencionar a la hora de estudiar la tecnología vigente en los planes de evacuación es el de “Tsunami response behaviour during and following two local-source earthquakes in Wellington, New Zealand”⁸⁶, principalmente porque es capaz de monitorizar en tiempo real la evolución de la crecida del tsunami y delimitar zonas de evacuación como se muestra en la Figura 16.

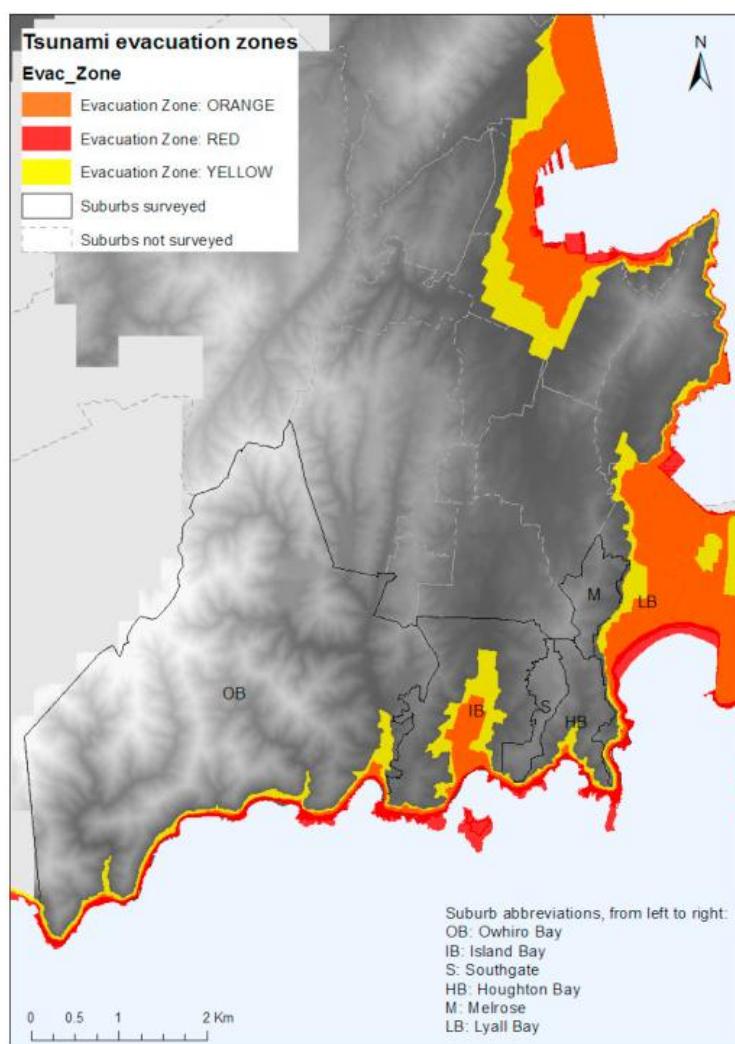


Figura 16. Delimitación de las zonas de evacuación del tsunami en base a la información obtenida en tiempo real.⁸⁷

⁸⁵ Chan, W. & Costas, A., (2014)

⁸⁶ Fraser et al, (2016)

⁸⁷ Fraser et al, (2016)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

No obstante, la tecnología también ha mejorado en muchas otras áreas como por ejemplo en la realidad virtual, y si bien no es un ámbito donde el primer uso vaya a ser para planes de evacuación de una ciudad entera sí que puede suponer un avance significativo para las evacuaciones dentro de edificios, como se deriva del estudio “Virtual Reality in Building Evacuation: A Review”⁸⁸

Esta nueva tecnología permite al personal de rescate, como podrían ser bomberos en un incendio simular un rescate de evacuación en un edificio en llamas de la manera más realista posible haciendo que los simulacros sean mucho más inmersivos y con una mayor frecuencia con respecto a lo que se suele hacer en la actualidad.

Pero no solo la tecnología de realidad virtual ha progresado mucho en estas últimas décadas. Otra de las grandes tecnologías es el famoso “Internet de las Cosas” (IoT), el cual también ha demostrado ser aplicable a campos de planificación de evacuaciones en situaciones de emergencia.

El estudio “CLOTHO: A Large-Scale Internet of Things-Based Crowd Evacuation Planning System for Disaster Management”⁸⁹, hace un claro manifiesto sobre la necesidad de planificar las evacuaciones masivas para casos de emergencia (tanto naturales como provocados por humanos) con IoT.

El estudio plantea la instalación de terminales móviles IoT que permitan capturar en tiempo real la información del entorno y posición de las personas. Y lo cierto es que en el caso que ocupa al trabajo es fácilmente realizable ya que al conocerse la ubicación de donde ocurrirá el desastre es fácil ubicar los sensores para capturar la información.

Y toda esta información será enviada a tiempo real al sistema de backend de la nube, dónde se almacenarían los datos, se procesarían mediante los modelos de cálculos mostrados en el apartado anterior y se enviarían direcciones de evacuación en tiempo real a la población de las ciudades autónomas. Todo esto resultaría en una evacuación mucho más rápida y eficiente, y en definitiva en un menor número de víctimas mortales civiles.

⁸⁸ Hung et al, (2025)

⁸⁹ Xu et al, (2018)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

En esta misma línea se encuentra también el estudio “A hybrid IoT-based approach for emergency evacuation”⁹⁰, que también propone la instalación de sensores y del sistema backend de cloud computing, pero distingue entre dos tipos de navegadores de emergencia.

Por un lado, están los “Localizd Emergency Navigator” (LEN), empleado en escenarios de menor riesgo y funcionando de manera local. Y, por el contrario, están los “High-Risk Emergency Navigator” (HREN), se emplea en escenarios de alto riesgo, en los que se gestionan las rutas seguras desde la nube.

Y el sistema permite decidir en tiempo real que tipo de navegador usar en base a la intensidad del peligro, el bloqueo de los pasillos o la densidad de gente. Todo esto lleva, al igual que sucedió con el estudio anterior, a una considerable mejora de la eficiencia en la ejecución de los planes de evacuación respecto a evacuaciones que no emplean la tecnología IoT.

⁹⁰ Al-Nabhan et al, (2019)

5. CONCLUSIONES EXTRAÍDAS DEL ESTADO DEL ARTE

Este apartado ha permitido entender, con gran profundidad, toda la literatura actualmente disponible para los diferentes planes, modelos, teorías y tecnologías empleados en las evacuaciones en situaciones de emergencia ,en general, y las evacuaciones para las ciudades de Ceuta y Melilla en particular.

Desde la perspectiva institucional existe una aparente, y peligrosa, falta planes de evacuación bien detallados sobre cómo actuar en caso de un ataque militar por parte de una potencia extranjera. En ese sentido, desde los organismos europeos han comenzado a sacar normativa e informes⁹¹ como reacción a la guerra de Ucrania. En cuanto al panorama nacional no existe ningún informe o plan de evacuación en caso de ataque bélico (o al menos no consta de manera pública), lo más cercano son los planes de actuación territorial para las dos ciudades autónomas.⁹²⁹³

Si se torna el foco sobre los marcos metodológicos de actuación la cosa cambia, de particular interés resulta todo el planteamiento sobre la creación de diferentes zonas (emergencia y buffer) y el establecimiento de refugios⁹⁴. Tampoco se puede obviar la importancia que debe tener la adaptabilidad del modelo para optimizar las condiciones de evacuación⁹⁵ o el alineamiento que debe mantener el plan ex-ante y ex-post para corroborar que la implantación del plan es exitosa⁹⁶.

Sin duda alguna, la parte más nutrida se encuentra en los modelos cuantitativos. De ellos se deriva la importancia de crear una adecuada red de transporte vial⁹⁷⁹⁸ sobre la que se pueda llevar a cabo el plan de evacuación y seleccionar un adecuado modelo que permita simular y optimizar el plan de evacuación.⁹⁹

⁹¹ European Commission, (2025)

⁹² Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Ceuta, (2008)

⁹³ Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Melilla, (2014)

⁹⁴ Wei et al, (2008)

⁹⁵ Idoudi et al, (2022)

⁹⁶ Russo, F. & Rindone, C., (2008)

⁹⁷ Nguyen, S. & Dupuis, C., (1984)

⁹⁸ Morlok et al, (1973)

⁹⁹ Frank, M. & Wolfe, P. (1956)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Finalmente, tampoco se puede obviar el positivo impacto que las nuevas tecnologías pueden aportar a los planes de evacuación.¹⁰⁰

A continuación, se procederá a desarrollar el plan de evacuación, así como a seleccionar el modelo matemático que representará dicho plan.

¹⁰⁰ Xu et al, (2018)

III. DESARROLLO DEL PLAN DE EVACUACIÓN Y SELECCIÓN DEL MODELO

Habiendo ya explorado todo el marco teórico, se procede ahora a desarrollar el plan de evacuación que se deberá de ejecutar en caso de que las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla se vean sometidas a un ataque militar terrestre por parte de una potencia extranjera.

Para poder tener un óptimo plan de evacuación este deberá considerar los siguientes pasos a seguir. Lo primero de todo se deberá hacer un estudio de los potenciales peligros, posteriormente, y habiendo ubicado el lugar del peligro se deberán establecer los posibles lugares de evacuación (se deberá tener en cuenta la viabilidad de la zona de evacuación con factores como la disponibilidad de vehículos de evacuación, o la existencia de plazas suficientes como para estacionar todos los vehículos en la huida).

Una vez establecida esta base se deberá proceder a la creación de la red vial de evacuación, en dicha red se deberán especificar los nodos y enlaces que conforman la red, y lo que es más importante, se habrá de establecer las características de dichos enlaces, ya que esto jugará un papel crucial a la hora de obtener los resultados del plan de evacuación.

Con este paso finalizado, se continuará el plan con la formulación de la matriz origen-destino (Matriz OD), en la que se indicará los viajes entre los diferentes arcos. Estos viajes se considerarán como los viajes iniciales preestablecidos, aunque es muy factible que muchos de estos viajes se vean modificados al ejecutar los modelos matemáticos cuantitativos.

Dichos modelos se ejecutarán en el siguiente paso dando lugar a una asignación de rutas de evacuación. Inicialmente los modelos propuestos serán el modelo de Frank-Wolfe y el modelo de Beckmann, los cuales irán haciendo iteraciones hasta lograr un resultado óptimo.

La idea es que estos algoritmos ayuden a minimizar el tiempo de evacuación permitiendo así salvar el máximo número de vidas humanas.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

1. ESTUDIO DE LOS PRELIGROS DE CEUTA Y MELILLA

Como primer paso del plan de evacuación se habrá de evaluar los peligros a los que se enfrentan las ciudades autónomas en territorio africano.

En el caso que ocupa a esta investigación se tratará de un ataque terrestre por parte de una potencia extranjera, si se observan las Figuras 17 y 18, presentadas a continuación, se muestran el mapa de cada una de las dos ciudades autónomas.

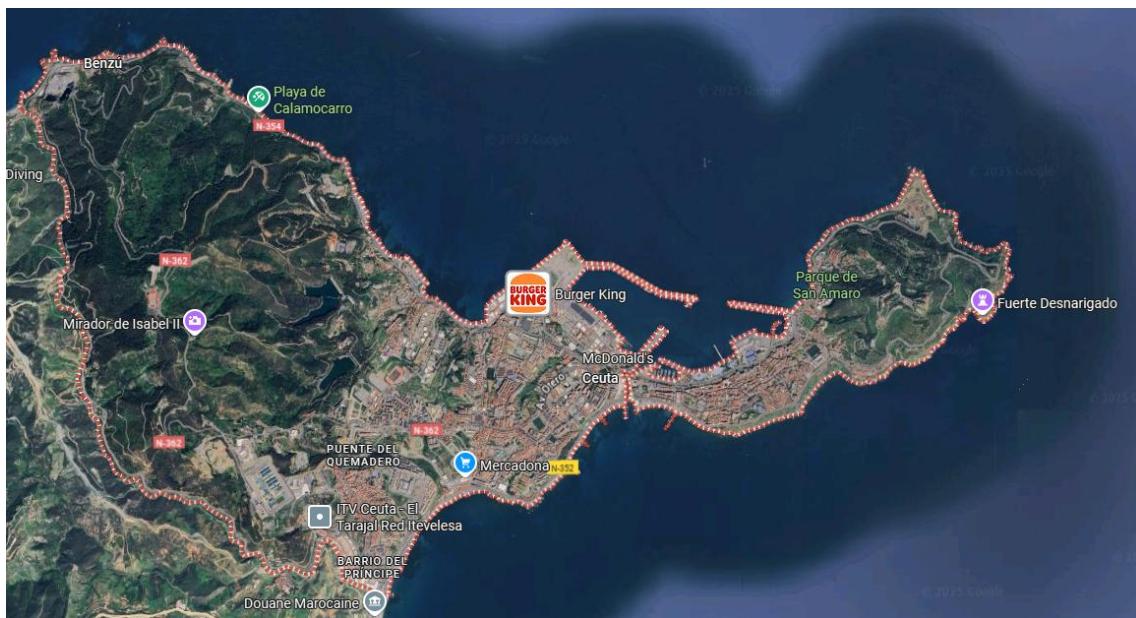


Figura 17. Vista satelital de la ciudad autónoma de Ceuta. Fuente: (Google Maps, 2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

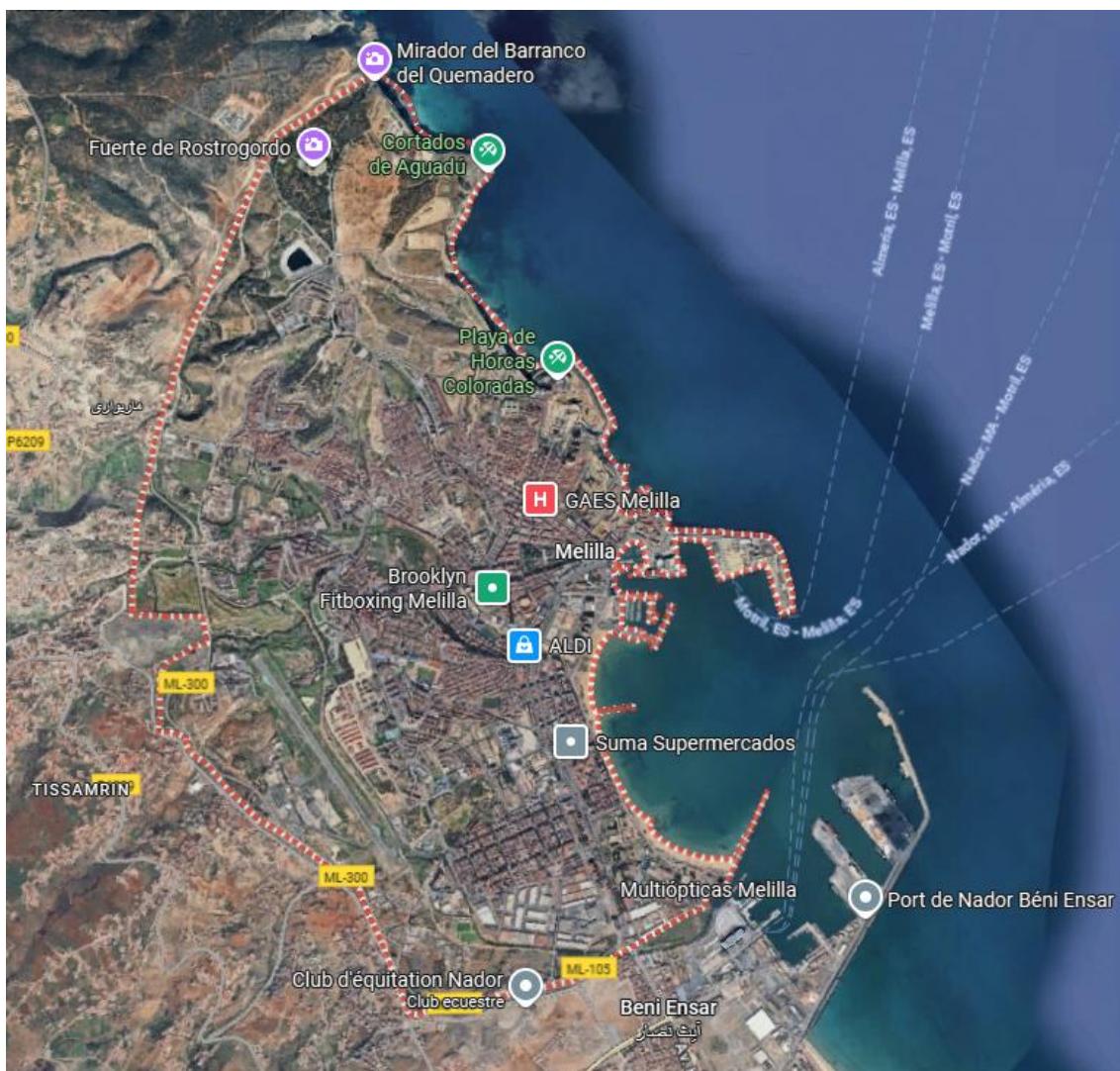


Figura 18. Vista satelital de la ciudad autónoma de Melilla. Fuente: (Google Maps, 2025)

Como se aprecia en ambas Figuras, ambas ciudades autónomas se encuentran rodeadas enteramente por el Reino de Marruecos y ambas presentan costa, permitiendo salida al mar.

Es por ello que, en caso de sufrir un hipotético ataque militar terrestre este vendría orquestado por el gobierno de Rabat, sin embargo, la cuestión relevante no es el quién si no el cómo.

¿Por dónde atacaría, hipotéticamente, el gobierno marroquí las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla?

Se procede a iniciar el análisis de los peligros con la ciudad autónoma de Ceuta. La ciudad autónoma de Ceuta posee una superficie de 18,5 Km² y comparte 8 Km lineales de

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

frontera con Marruecos. Debido a situaciones de inmigración irregular, el perímetro de la frontera española se encuentra protegido por una valla de acero que originalmente poseía una altura de 3 metros construidos entre los años 93-96, sin embargo, durante los años venideros dicha altura ha ido incrementando hasta los 6 a 10 metros¹⁰¹, y en algunos tramos cuentan con otras medidas de seguridad como concertinas, videocámaras, sensores de movimiento...

Todo esto hace que plantear un ataque terrestre por este tramo de muro sea francamente complicado y lo es todavía más si se examina el terreno en el que se encuentra la frontera, a continuación, se presenta la Figura 19, en la que se muestra el mapa topográfico de Ceuta.

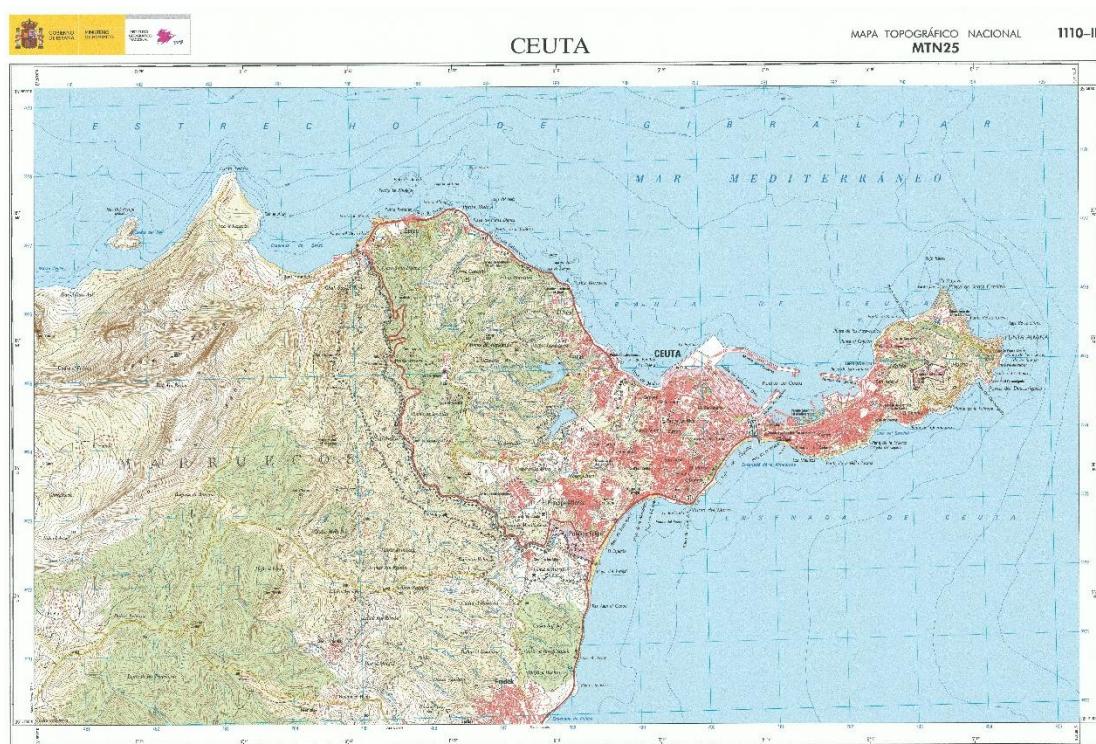


Figura 19. Mapa topográfico de la ciudad autónoma de Ceuta¹⁰²

Y se muestra aún más claramente en la Figura 20, mostrada a continuación y obtenida a través de Google Earth.

¹⁰¹ Presidencia del Gobierno, (2019)

¹⁰² Instituto Geográfico Nacional, (2018)

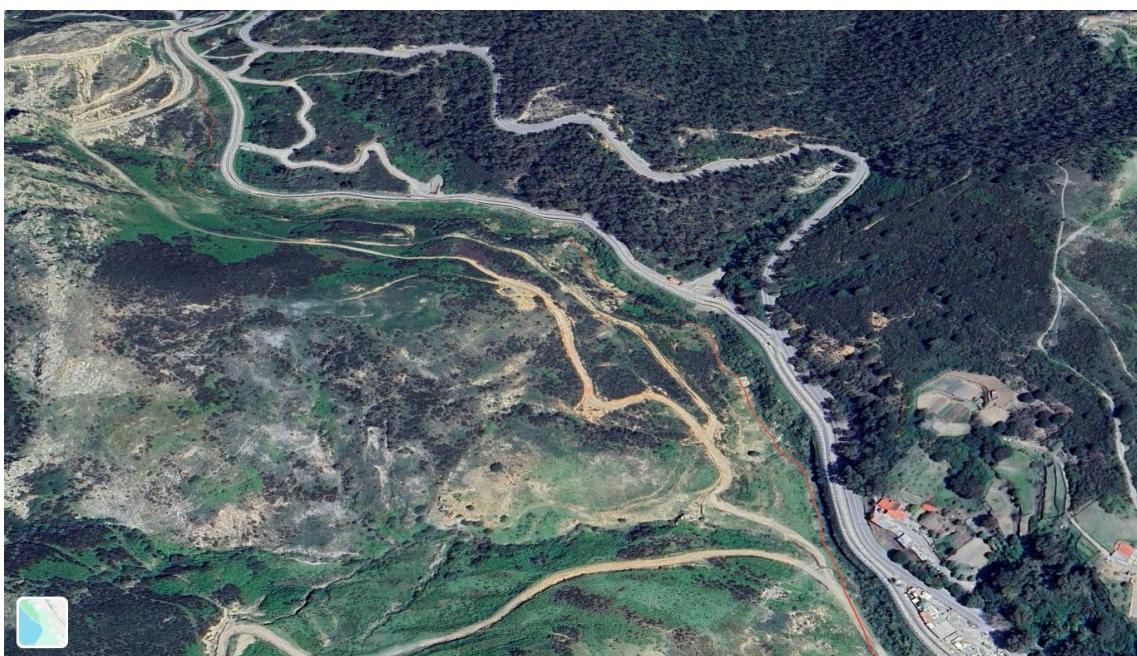


Figura 20. Vista de la frontera entre Ceuta y Marruecos. Fuente: (Google Earth, 2025)

Se aprecia como la frontera, mostrada como una línea roja en la Figura 20, coincide con un valle entre dos laderas de montañas y esa posición es francamente mala para tratar de iniciar una invasión terrestre pues el lado defensor podrá combatir teniendo una ventaja de altura sobre el lado atacante.

Es por ello que las opciones se reducen a dos, que sería realizar el ataque por el paso fronterizo norte o paso de Benzú y frente a esta posibilidad se encuentra realizarlo por el paso fronterizo sur o paso de El Tarajal, que es el paso por el que mayor número de personas y mercancías atraviesan las fronteras de Ceuta.

Dado que ya se ha realizado un estudio que plantea un hipotético ataque sobre la ciudad de Ceuta desde el paso fronterizo de Benzú¹⁰³, se planteará que el gobierno marroquí intentará atacar la ciudad autónoma de Ceuta desde el paso fronterizo de El Tarajal, el cual se muestra en la Figura 21, presentada a continuación.

¹⁰³ Cabellos, M., (2024)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

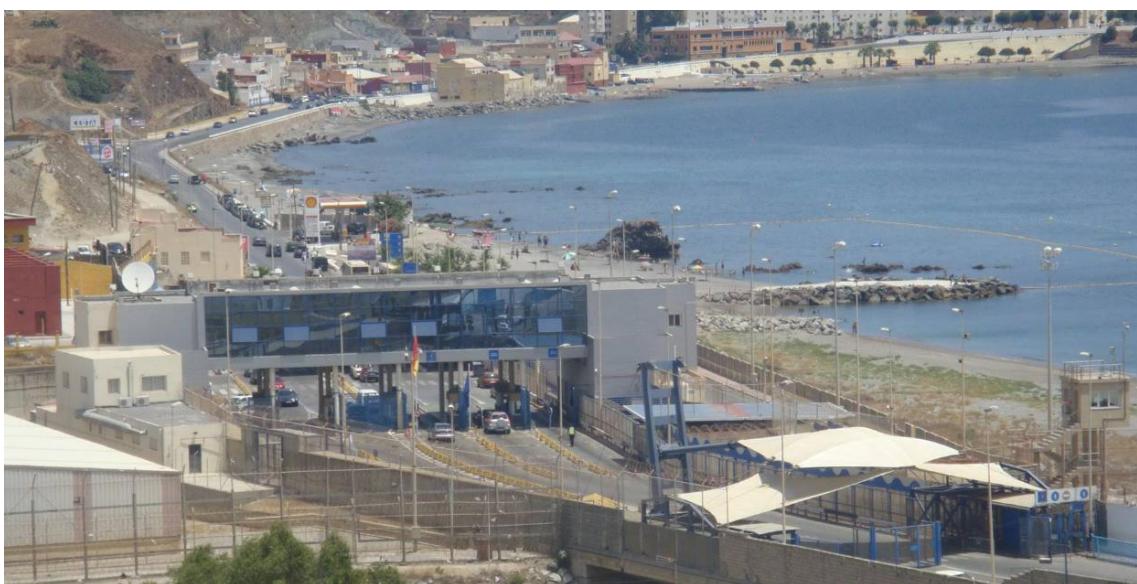


Figura 21. Vista del puesto de control del paso fronterizo El Tarajal. Fuente (Google Maps, 2020)

Habiendo estudiado el posible punto de ataque de Ceuta se procederá a realizar lo propio con la ciudad autónoma de Melilla.

La ciudad autónoma de Melilla posee una superficie 12,3 Km², y comparte un total de aproximadamente 11 Km de frontera con el Reino de Marruecos. Similar a como sucedía con la ciudad ceutí, Melilla está fuertemente protegida gracias a una valla triple que cuenta con una altura de unos 6 o 7 metros dependiendo de la zona, que está pesado para hacer frente a la inmigración ilegal que a menudo intenta saltar esta frontera para poder llegar a España y a Europa.

En el caso que ocupa al estudio dicha frontera nuevamente supone una ventaja táctica para la defensa de la ciudad, pues complica al invasor una potencial fácil entrada por el perímetro de la ciudad.

Originalmente la ciudad de Melilla contaba con varios pasos fronterizos que eran utilizados en el día a día para la entrada tanto de personas como de mercancías (Beni-Enzar, Farhana, Barrio Chino y Mariguari). No obstante, a partir del 2020 se cerraron todos los pasos fronterizos y solo a partir del 2022 se reabrió el paso de Beni-Enzar, es por ello que se tomará este paso como punto de ataque inicial y epicentro del desastre.

Nuevamente conviene recordar que esto es un ejercicio hipotético y que no necesariamente tiene que suceder en este punto, sin embargo, se considera lo más probable dado a las facilidades que el acceso terrestre proporciona.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

En este sentido es relevante mencionar que, a diferencia de Ceuta, en Melilla la frontera no se encuentra ubicada en un valle entre dos laderas como se aprecia en la Figura 22, como se muestra a continuación:

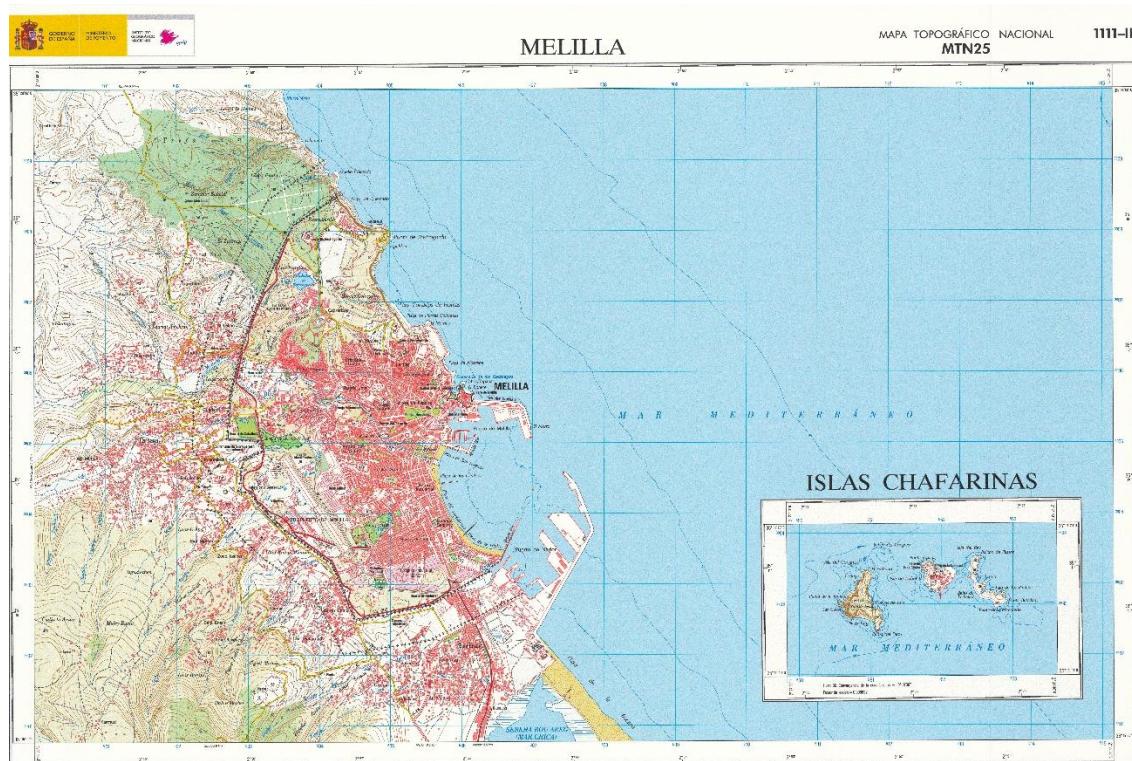


Figura 22. Mapa topográfico de la ciudad autónoma de Melilla¹⁰⁴

Esto podría llevar a que el Reino de Marruecos pudiera intentar invadir empleando otra entrado que no fuera el paso fronterizo de Beni-Enzar, sin embargo, para el estudio presente se procederá con el mencionado paso.

Una vez establecidos los potenciales puntos de ataque, se deberán de fijar los puntos de evacuación hacia los que habrá que dirigir la población.

¹⁰⁴ Instituto Geográfico Nacional, (2018)

2. ESTUDIO DE LOS LUGARES SEGUROS PARA LA EVACUACIÓN

Como segundo paso del plan de evacuación se debe establecer los puntos seguros de evacuación, que serán zonas geográficas en el mapa hacia las que se guiará la población con la finalidad de ponerse a salvo.

Se debe mencionar que el plan de evacuación no termina hasta que la población está verdaderamente fuera de peligro, y si bien se han llamado lugares seguros, el término más adecuado sería puntos de extracción ya que al tratarse de una invasión militar de las ciudades autónomas la intención es la invasión y control total de las mismas.

En este sentido algunos de los estudios previamente vistos en el marco teórico lo tenían mucho más sencillo pues saliendo de la zona de buffer¹⁰⁵ se abandonaba el peligro por completo. Y eso es viable cuando hay mucho terreno disponible y el desastre se limita a una zona concreta de la ciudad, sin embargo, en el caso de este trabajo la zona de buffer ocuparía de manera completa las dos ciudades autónomas.

Y, por lo tanto, solo se puede considerar como auténtico lugar seguro el abandono de las ciudades autónomas y la puesta de rumbo a la España peninsular.

Se comienza por ubicar las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla en un contexto geográfico mucho más amplio, por ello se presenta la Figura 23, en la que se muestra la ubicación de ambas ciudades respecto a los Reinos de España y Marruecos.

¹⁰⁵ Wei et al, (2008)



Figura 23. Mapa con las ubicaciones de Ceuta y Melilla respecto a España y Marruecos¹⁰⁶

En la Figura 23 se puede apreciar como Ceuta se encuentra significativamente más cerca de la España peninsular que Melilla, por lo que en caso de ataque la ayuda y todo el despliegue de la evacuación sería mucho más rápida en la primera ciudad.

Desde el puerto de Ceuta hasta el de Algeciras (Cádiz) hay aproximadamente 14 Km (unas 7,5 millas náuticas), por lo que un ferry estándar tardaría unos 20 minutos en hacer ese recorrido (solo ida). Ceuta no cuenta con aeropuerto, pero si con helipuerto desde el que se podría partir hacia el helipuerto de Algeciras, completando este recorrido en 7 minutos, sin embargo, la capacidad de transporte sería muy limitada.

Por otro lado, desde Melilla se podría llegar hasta el puerto de Motril (Granada) ubicado a 176 Km (unas 95 millas náuticas), travesía en la que un ferry podría tardar más de 3 horas en realizar (solo ida). Melilla sí que cuenta con aeropuerto desde el que se podría despegar y dirigirse hacia el de Málaga a 208 Km, tardando algo menos de una hora en recorrer esta trayectoria.

¹⁰⁶ Antolínez I., & Jorge E.. (2021)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Habiendo explicado esto se procede a estudiar el punto extracción en cada una de las ciudades, comenzando nuevamente con Ceuta.

Observando el mapa de Ceuta en la Figura 17, se aprecia que la ciudad autónoma de Ceuta no cuenta con un aeropuerto lo cual dificulta mucho la posibilidad de extracción por medio aéreo. Aun así, se estudia la posibilidad de improvisar una pista de aterrizaje y despegue para habilitar la evacuación mediante aeronave, y rápidamente se llega a la conclusión de que la orografía del terreno ceutí impide el desarrollo improvisado de dicha pista, por lo que habría que recurrir a una obra de por lo menos 1.000 millones de euros para construir un aeropuerto.

Algo que parece muy excesivo si su única finalidad es optimizar el plan de evacuación, ya que Ceuta se encuentra a 14km de la península, y no es muy razonable la construcción de un aeropuerto si se puede emplear un ferri con una infraestructura ya existente.

Por otro lado, Ceuta cuenta con algunos helipuertos que sí podrían usarse en una potencial evacuación, sin embargo, la capacidad de carga de los helicópteros es muy baja de apenas 6 personas para helicópteros privados hasta unas 30 para los Chinook militares frente a los cientos o miles que permiten cargar los ferris. Como apoyo al plan principal pueden ser de utilidad, pero no pueden ser el principal medio de evacuación.

El principal método de evacuación de la ciudad autónoma de Ceuta debe ser el transporte marítimo a través del puerto. Y habrá que tratar de dirigir a toda la población hacia esa ubicación. Inicialmente se asumirá que el transporte de la población se hará de manera total y completa mediante turismos hasta el puerto. Si bien es cierto que esto puede ocasionar grandes retenciones esa será la hipótesis de partida, aunque según se vaya desarrollando el modelo numérico es posible que se recomiende a las zonas más cercanas al puerto una evacuación a pie con la finalidad de optimizar los tiempos de evacuación en la ciudad de Ceuta.

Sin embargo, y dado que el plan de evacuación va a producirse mediante una evacuación vial, como ya se mencionado, se ha de tener en cuenta el efecto que puede producir la aglutinación de la población de Ceuta (y sus respectivos coches en la zona portuaria).

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Estudiando los datos que proporciona la Dirección General de Tráfico (DGT) sobre la cantidad de vehículos matriculados¹⁰⁷ por provincia en el año 2023, se puede apreciar que Ceuta cuenta un total 63.367 vehículos, de los cuales algo más de 40.000 son turismos y cerca de 15.000 son motocicletas.

No obstante, y esto ha de establecerse de manera cristalina a toda la población evacuada, en una evacuación de emergencia lo importante es salvar la vida, no el vehículo, es por ello que las autoridades deberán pedir a la población que las familias se agrupen en el menor número de vehículos posibles, y pongan rumbo al punto de extracción.

Atendiendo a datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), la población censada¹⁰⁸ en Ceuta en 2024 es de 83.229 personas. Actualmente una familia promedio en España está compuesta por unos 2,5 miembros, por lo tanto, si las familias se agrupasen por vehículos, en promedio se tendría que en Ceuta la evacuación supondría la movilización de 33.292 vehículos.

Ahora bien, ¿está el puerto de Ceuta preparado para absorber tal cantidad de coches en su zona portuaria y aledaños?

Pues asumiendo que un coche tiene una longitud promedio de 4,5 metros y un ancho de 1,8 metros, la superficie que ocupará un vehículo estándar será de 8,1 m², si se tiene en cuenta la totalidad de los vehículos, la superficie requerida aumenta hasta 269.665 m².

Y esto no contabiliza los huecos entre vehículos o el espacio necesario para circular por la zona de aparcamiento, que podría suponer un aumento del 100% del espacio requerido, subiendo la cifra de la superficie a 540.000 m².

A priori se podría pensar que los vehículos podrían ir dentro de los ferries y así ir evacuando a la población civil con sus respectivos vehículos, no obstante, la capacidad de un ferry puede ser de un par de cientos de vehículos (esto haría que se requiriesen cerca de doscientos de viajes para poder evacuar a toda la población, con la lentitud que supone embarcar vehículos).

¹⁰⁷ Dirección General de Tráfico, (2023)

¹⁰⁸ Instituto Nacional de Estadística, (2024)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Sin embargo, existe la posibilidad de que la superficie se reduzca de manera considerable ya que no se trata de un parking al uso, si no de un parking en el que los coches no necesitan salir en cualquier momento, por lo que se podría llenar hasta arriba como se muestra en la Figura 24, mostrada a continuación.

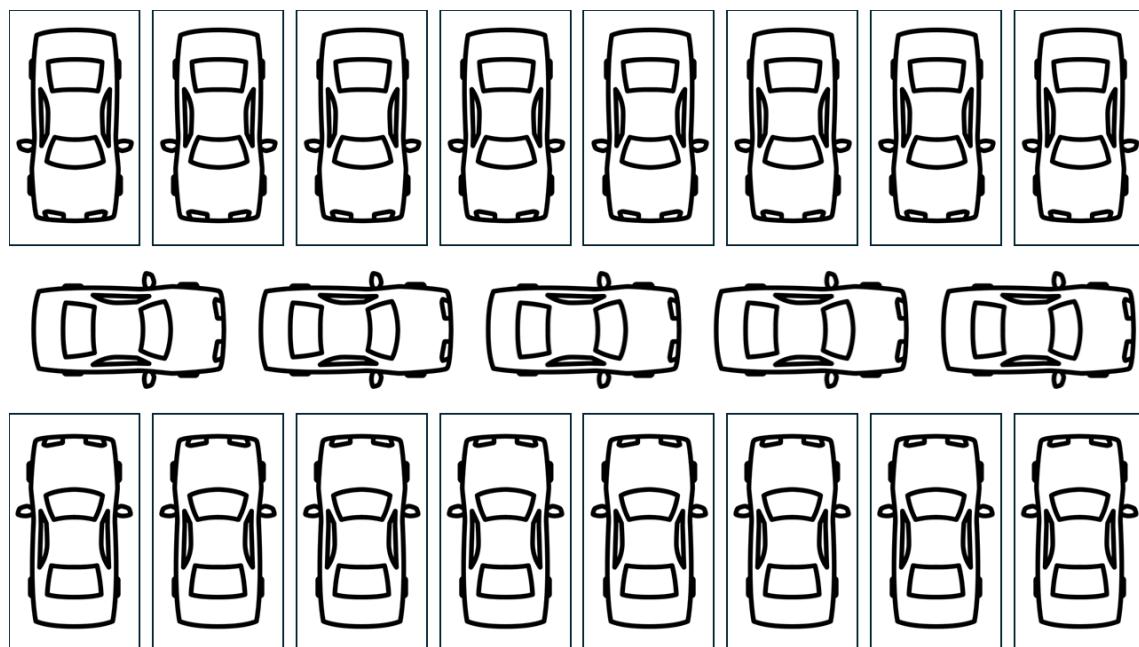


Figura 24. Modelo de parking optimizado para minimizar el espacio requerido¹⁰⁹

Huelga decir que una vez iniciado el plan de evacuación se requerirá de personal que esté distribuyendo de manera óptima todos los coches que van llegando a la zona de aparcamiento.

Asumiendo que con este tipo de estacionamiento se lograse reducir la superficie requerida a 350.000 m², ¿se dispone del espacio necesario para dar cabida a todos los vehículos que transportan a la población evacuada?

A continuación, se presenta un recorte de pantalla de Google Maps en el que se muestra el puerto de Ceuta, como se aprecia en la Figura 25.

¹⁰⁹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

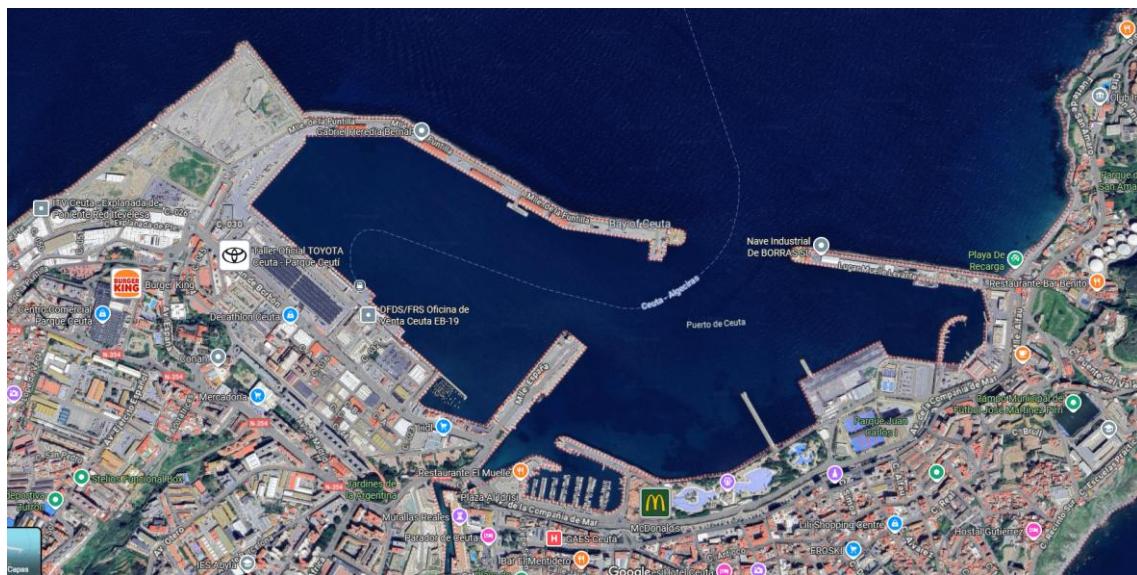


Figura 25. Vista del puerto de Ceuta. Fuente: (Google Maps, 2025)

En la imagen se aprecia que la esquina noroeste del puerto parece haber algo de espacio libre donde poder ubicar todos los vehículos que huyen de la hipotética invasión.

Empleando la herramienta de medición de distancias y recreando el área en el que se habría de ubicar a todos los vehículos se obtiene como resultado el mostrado en la Figura 26, que se presenta adjunta.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

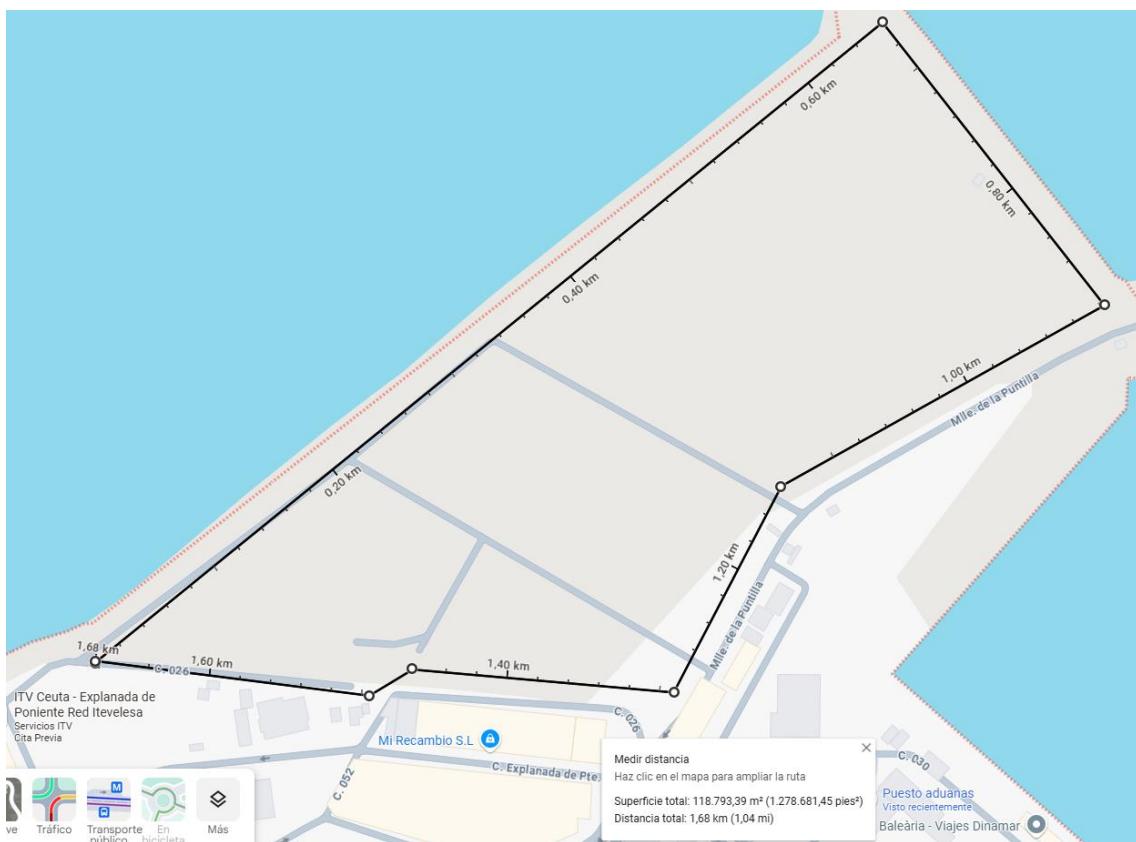


Figura 26. Potencial superficie de estacionamiento para los vehículos en evacuación¹¹⁰

Habiendo creado el área previamente mencionada se puede apreciar como la superficie disponible sería de 118.793,39 m², cifra muy alejada de los 350.000 m² estimados como necesarios. Es relevante saber que si actualmente se ejecutase el plan de evacuación no se podría dar cabida a todos los vehículos estimados, y las conclusiones deberán reflejar esta idea, así como la recomendación de construir un parking en altura para aumentar la capacidad o una expansión en superficie del pantalán.

Si bien es cierto que la situación no es positiva, se ha de tener en consideración que el escenario teorizado parte de unas hipótesis desfavorables en las que no se considera que la población pueda usar otros vehículos de transporte como motocicletas o autobuses públicos, cuyo consumo de metros cuadrados de parking por ciudadano son menores que los de un turismo.

Así mismo, también se estudió la posibilidad de localizar el parking de estacionamiento en otras ubicaciones, pero la escarpada orografía de la ciudad y la falta de espacio cercano

¹¹⁰ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

al puerto hacen que la ubicación propuesta sea la óptima en base a las condiciones actualmente existentes.

Se procede ahora a estudiar la ubicación del punto óptimo de extracción para la ciudad autónoma de Melilla.

El caso de la ciudad de Melilla es ligeramente más complicado que el de Ceuta, no solo por la lejanía de la ciudad respecto al resto de España peninsular, si no que además sus dos grandes opciones de evacuación, tanto el puerto como el aeropuerto se encuentran en la zona sur de la isla, este y oeste respectivamente.

Dado que la simulación va a recrear un ataque desde el paso fronterizo de Beni-Enzar (ubicado al sur de la isla), no es recomendable dirigir a la población hacia la zona en conflicto, como se marca en la Figura 27.



Figura 27. Vista de la zona sur de Melilla, marcados el aeropuerto, el puerto y el paso de Beni-Enzar¹¹¹

Si se estudia la posibilidad de realizar una evacuación por avión, se asume que la única aerolínea comercial que viaja desde y hacia Melilla es Iberia, y lo hace con un total de 5

¹¹¹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

vuelos al día desde las 7:30 hasta las 19:30, por lo que lo más normal será que haya 1 avión en tierra (con suerte), que se puede emplear para evacuar a unas 80 personas pues el avión que cubre esa ruta es un ATR 72.

Pero una vez estalle el conflicto las aerolíneas dejarán de volar sobre una zona bajo ataque militar. Aquí es donde entran en juego las aeronaves militares. España cuenta con unos 17 aviones Airbus A400M, con capacidad para unas 400 personas si se dedicaren exclusivamente a transporte de pasajeros y un Airbus A330 MRTT que permite llevar a más de 300 pasajeros.

La gran desventaja del aeropuerto es que está muy cerca de la frontera de Beni-Enzar, pero más todavía de la frontera oeste, lo cual hace que sea muy probable que sea uno de los sitios que primero se vea afectado por la invasión. Lógicamente toda la evacuación que pueda venir por esta vía es bienvenida, pero no debería ser la principal vía de escape de Melilla.

En este sentido la evacuación por barco es más segura y difícil de interrumpir por parte de la potencia atacante. Aunque, como ya se mencionó previamente, el puerto está muy cerca también de la frontera de Beni-Enzar (aunque no tanto como el aeropuerto).

Y ni siquiera se ha hecho un estudio de la superficie disponible para estacionar todos los vehículos empleados en la evacuación, pero a simple vista no parece que hubiera hueco en ninguno de los dos escenarios.

Es por ello que se propone una evacuación hacia la zona norte, concretamente hacia la parte de Rostrogordo. La explanada de Rostrogordo constituye un lugar ideal para poder estacionar todos los vehículos empleados en la evacuación pues un descampado enorme como se muestra en la Figura 28.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

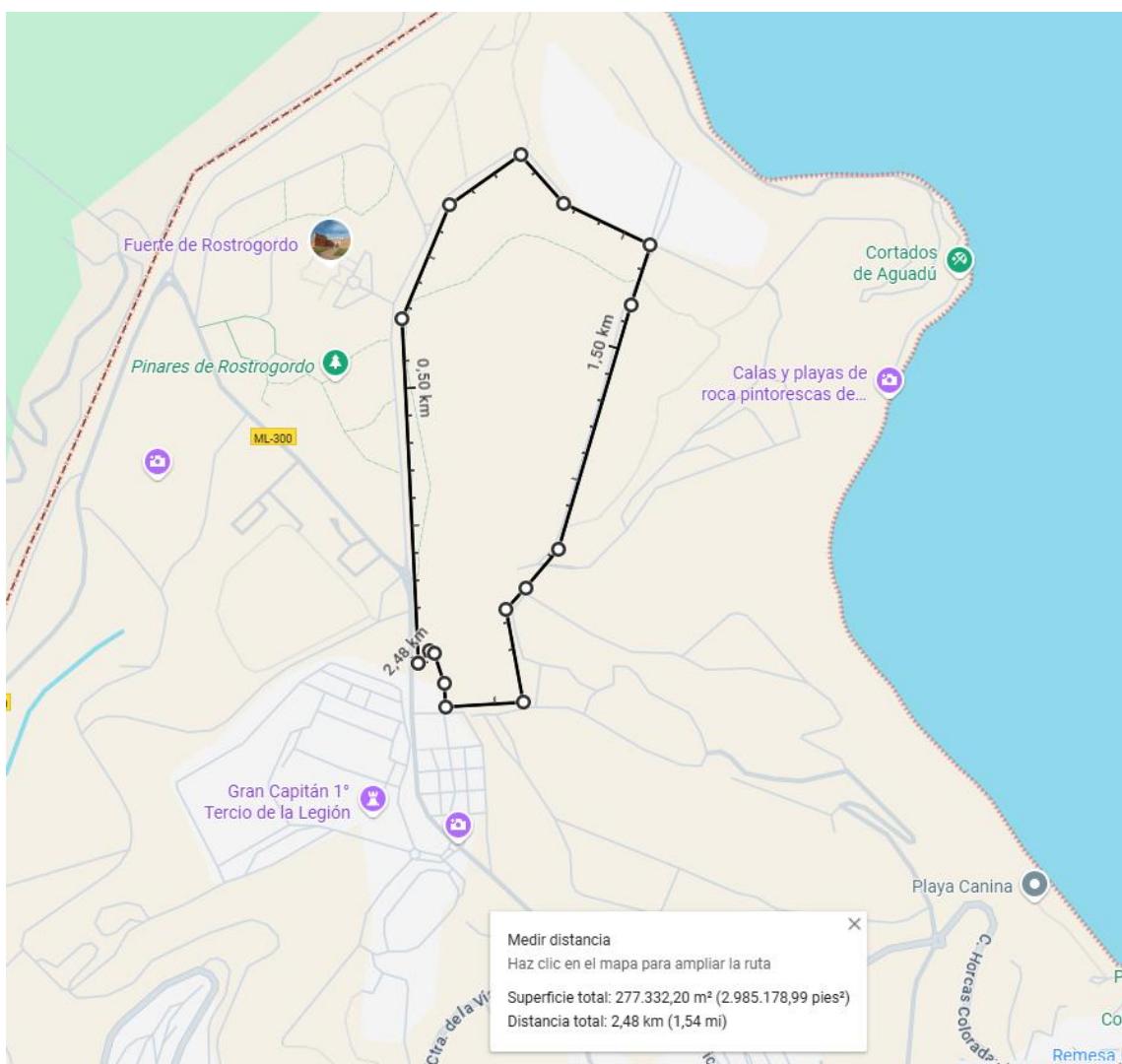


Figura 28. Potencial superficie de estacionamiento de vehículos en Rostrogordo¹¹²

Además, limitando con esta enorme explanada se ubica el acuartelamiento “Capitán Arenas”, lo cual garantiza una ayuda y protección por parte de militares que ya se encuentran in situ para ejecutar la evacuación.

Y pese a que no existe una zona portuaria como tal, se puede ir descendiendo a pie gracias a las carreteras existentes, y a la hora de ejecutar la evacuación habrá que colocar una plataforma flotante que permita a los evacuados ir desde los Cortados de Aguadú hasta el barco que vaya a evacuar

¹¹² Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

De igual manera que se hizo con Ceuta, se habrá de estudiar si hay suficiente espacio para poder estacionar todos los vehículos que la población civil dejará atrás durante la evacuación de la ciudad de Melilla.

En base al informe proporcionado por la Dirección General de Tráfico sobre los vehículos matriculados¹¹³ en la ciudad autónoma de Melilla en el año 2023, se aprecia como hay un total de 69.630 vehículos matriculados, de los cuales algo más de 47.000 son turismo y cerca de 10.000 son motocicletas.

Sin embargo, empleando la misma metodología que ya se usó con Ceuta, se estimará el número de vehículos usados en la evacuación en base a la población residente¹¹⁴ en Melilla, que en base a los datos del Instituto Nacional de Estadística para el censo de 2024 es de 85.811 personas, muy similar a la de Ceuta.

Asumiendo un total de 2,5 personas por familia, se llega a la conclusión de que en promedio se movilizarán 34.324 vehículos para poder evacuar a toda la población melillense. Dado que el promedio de los turismos es de 4,5 metros de largo y 1,8 metros de ancho se espera que la superficie ocupada por el total de los vehículos en la evacuación de Melilla sea de 278.027 m².

Dado que no todo el espacio de parking es útil, se puede asumir un incremento del espacio del 30% para llegar a 361.436 m². Si bien el espacio inicial es de 277.332 m², se podría contar con otros 100.000 m² que hay para usos de entrenamiento militar por la zona, así que se puede afirmar que la evacuación de Melilla mediante los Cortados de Aguadú no tendrá limitación de espacio para estacionar todos los vehículos empleados en la ejecución de la evacuación.

¹¹³ Dirección General de Tráfico, (2023)

¹¹⁴ Instituto Nacional de Estadística, (2024)

3. REDES DE TRANSPORTE PARA LAS CIUDADES DE CEUTA Y MELILLA

Habiendo ya establecido las ubicaciones del peligro y de los puntos de extracción para cada una de las ciudades autónomas se procede a establecer las redes de transporte vial que permiten llevar a cabo la evacuación.

Repasando lo previamente mencionado en el marco teórico, la red de transporte es un conjunto de arcos que son las carreteras por las que los vehículos habrán de circular, y los nodos que son las uniones de las mencionadas carreteras. Así mismo, las carreteras o arcos por los que circularán los vehículos poseen una capacidad máxima en función del número de carriles disponibles, y que deberá ser especificado para todos los arcos de ambas ciudades.

Si bien ya existen modelos genéricos como es el caso de Nguyen-Dupuis¹¹⁵ o el de Sioux Falls¹¹⁶ estos no son de aplicación en este trabajo ya que son modelos imaginarios que siempre presentan la misma configuración y en ningún caso serían capaces de representar la situación de una evacuación en Ceuta o Melilla.

No obstante, sí que existe una propuesta de red de transporte vial para la ciudad de Ceuta, se trata de la elaborada por Milagros Cabellos para el plan de evacuación de Ceuta¹¹⁷ al simular un ataque por la frontera de Benzú.

A continuación, se presenta la Figura 29 en la que se muestra la red de transporte vial propuesta por Milagros para Ceuta.

¹¹⁵ Nguyen, S. & Dupuis, C., (1984)

¹¹⁶ Morlok et al, (1973)

¹¹⁷ Cabellos, M., (2024)

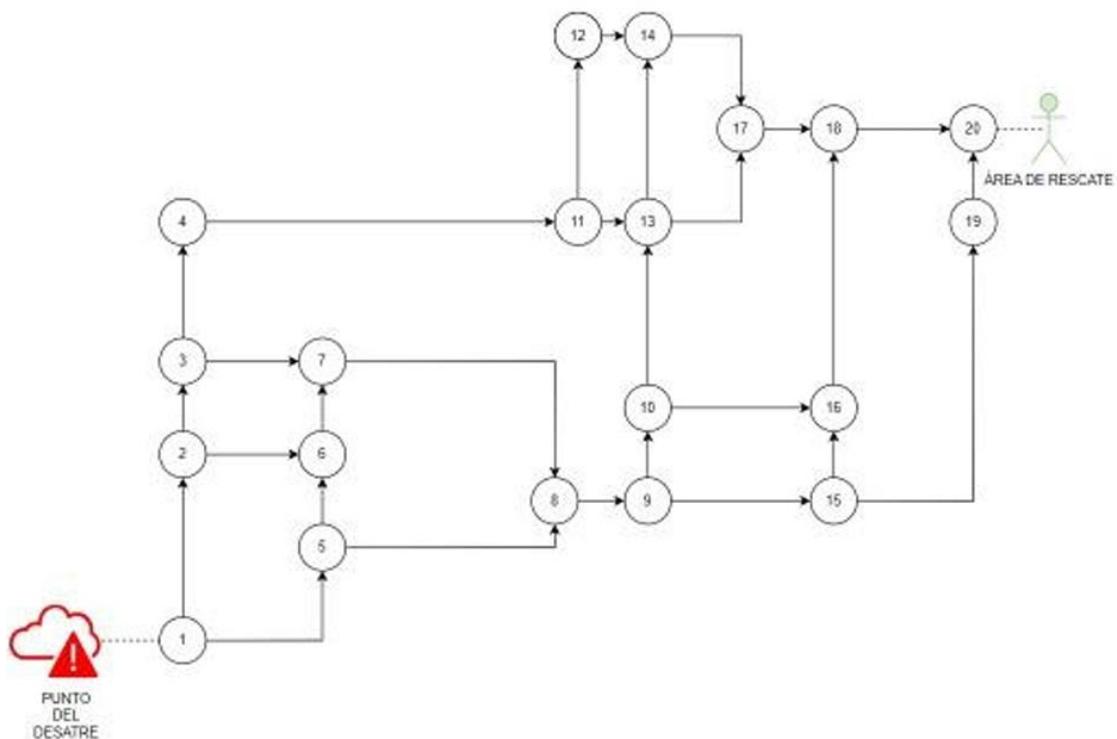


Figura 29. Red de transporte vial Cabellos Cortés para Ceuta¹¹⁸

Si bien en el trabajo original se refiere a la red como modelo de Nguyen-Dupuis lo cierto es que es una red de generación propia y que nada tiene que ver con el modelo de Nguyen-Dupuis, es por ello que en adelante se referirá a esta red de transporte vial como “Red de Cabellos Cortés”.

Sin embargo, y pese a que el modelo de esta red es de gran interés, se ha de tener en cuenta que este modelado se hizo partiendo de la hipótesis de un ataque proveniente de la frontera norte, más concretamente del paso fronterizo de Benzú. Y dado que en este trabajo el ataque se asumirá que proviene desde la frontera sur, habrá que construir una red vial nueva y diferente a la mencionada.

Cómo se puede apreciar esta red dista mucho de la red real de tráfico que posee la ciudad de Ceuta, y esto se debe a que se trata de un modelo simplificado. No es necesario que la red vial simule todas y cada una de las carreteras presentes en las ciudades autónomas pues eso complicaría en exceso el trabajo y no se obtendría una gran mejoría en los resultados.

¹¹⁸ Cabellos, M., (2024)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Sin embargo, y a modo testimonial, se ha decidido graficar las redes viales de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla usando los datos de OpenStreetMap y empleando el lenguaje de programación Python se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 30 y 31.

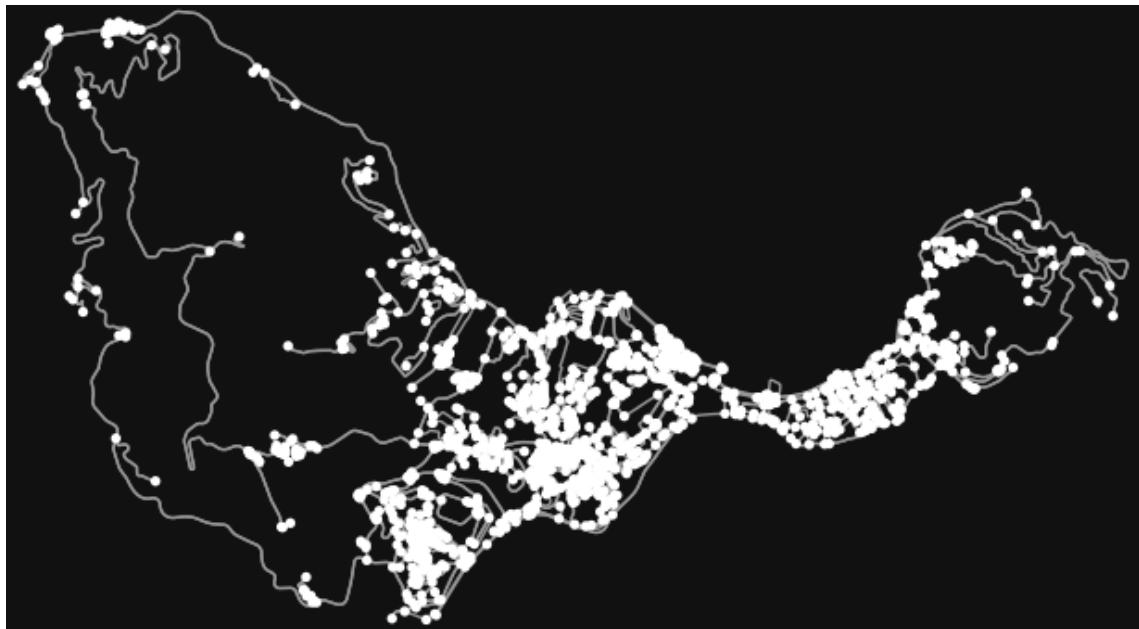


Figura 30. Red de transporte vial de Ceuta con datos de OpenStreetMap¹¹⁹

¹¹⁹ Elaboración propia, (2025)



Figura 31. Red de transporte vial de Melilla con datos de OpenStreetMap¹²⁰

Como se aprecia en ambas figuras la red más fidedigna posible en ambos casos sería extremadamente compleja para los objetivos de este trabajo. Es por ello que la red propuesta debe contar con la suficiente cantidad de nodos y arcos para seguir reflejando la estructura principal de las ciudades, pero sin llegar a complicarlo tanto como en los casos de las figuras anteriores.

¹²⁰ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Se procede ahora a establecer la red vial de transporte de evacuación de la ciudad de Ceuta para el caso de ataque desde el paso fronterizo de El Tarajal. Es imprescindible que la red vial, a parte de conectar el punto del desastre y el punto de evacuación sea capaz de también englobar a toda la población de la ciudad y dirigirla al puerto marítimo de Ceuta.

En este sentido se presenta la Figura 32, que muestra todos los núcleos poblacionales presentes en la ciudad autónoma de Ceuta.



Figura 32. Mapa de Ceuta mostrando todos los núcleos poblacionales¹²¹

Cómo se puede apreciar, la mayor parte de la población se concentra en el entorno cercano del puerto, tanto en la parte izquierda (Puente del quemadero, La Sanidad...) como en la parte derecha (Ceuta y la península de Santa Catalina). Así que las rutas deberán cubrir ambos lados del puerto.

En base a la información de la Figura anterior se propone ubicar los puntos de desastre y de extracción en el mapa, así como las principales carreteras de la ciudad que deben de estar incluidas en la red de transporte vial, todo ello mostrado en la Figura 33, que se presenta a continuación.

¹²¹ Geo-Ref.net, (2023)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

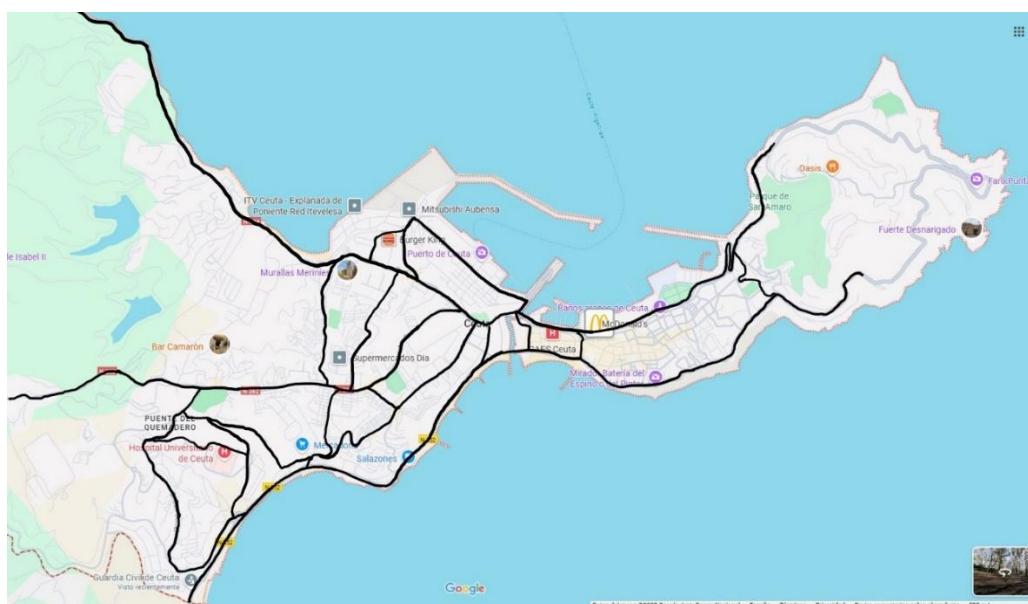


Figura 33. Red de transporte vial propuesta para la evacuación de Ceuta¹²²

La red trata de capturar toda la población mostrada en la figura 32 a través de esta propuesta de carreteras en forma de malla. La red emplea 3 principales carreteras como eje, las carreteras nacionales N-354, N-362 y N-352 y a partir de ahí se consideran numerosas interconexiones a través de carreteras como la avenida de Lisboa, avenida Otero o avenida de África... Si se añaden los nodos se obtiene la Figura 34.

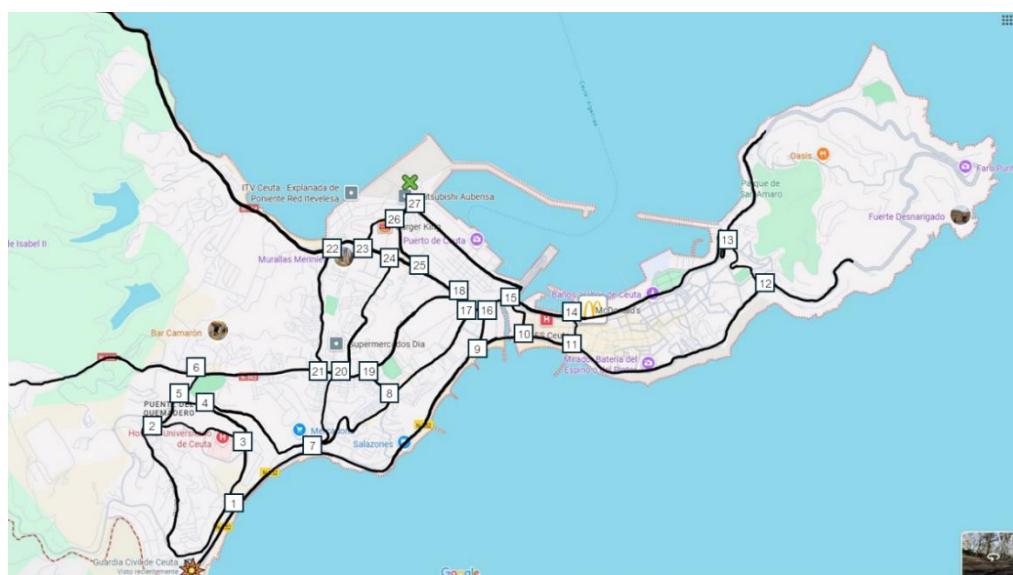


Figura 34. Red de transporte vial propuesta para la evacuación de Ceuta con nodos¹²³

¹²² Elaboración propia, (2025)

¹²³ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Como se puede observar en la Figura 34, la red de transporte vial está compuesta por un total de 27 nodos y 40 arcos, la gran mayoría de estas carreteras se han elegido con la intención de que tuvieran doble sentido con la finalidad de permitir que pudiera existir el contraflujo y así optimizar la evacuación.

Sin embargo, no todas lo tienen y esto deberá ser tenido en cuenta en de cara a la ejecución del modelo. En cuanto a la capacidad de los arcos, se puede asumir que las carreteras son capaces de transportar un total de 1.800 vehículos/h/carril¹²⁴, de modo que a n número de carriles habrá n veces 1.800 vehículos/h de capacidad.

Pero se ha de ser realista en que la mayoría de los arcos solamente posee un carril, haciendo que la mayor parte de la red vial se encuentre limitada a 1.800 vehículos/h.

Finalmente, se presenta la figura 35, en la que muestra la red de transporte vial propuesta para Ceuta, pero tras ser convertida a formato clásico de nodos y arcos.

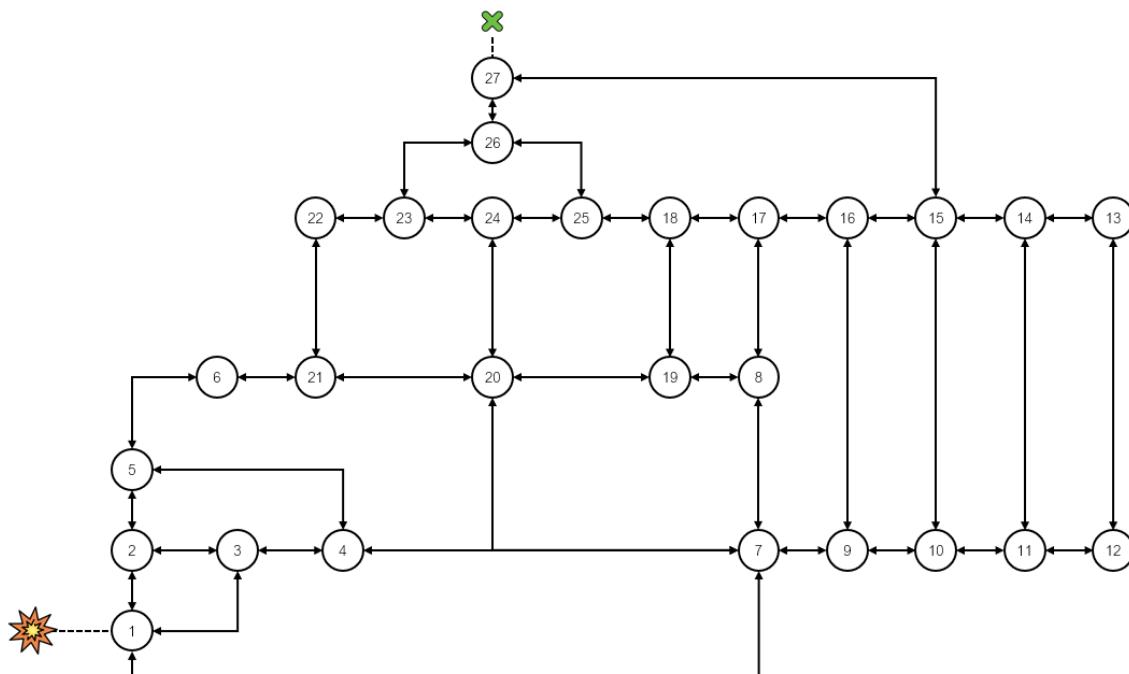


Figura 35. Red de transporte vial para Ceuta presentado en formato clásico de nodos y arcos¹²⁵

Tanto el nodo 26 como el nodo 27 tienen salida al parking donde quedarán estacionados los vehículos empleados en la evacuación, por lo tanto, serán nodos receptores o

¹²⁴ Transportation Research Board, (2022)

¹²⁵ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

sumideros, mientras que la gran mayoría de los nodos son nodos con demanda entrante o fuentes, puesto que de ellos saldrán coches.

Habiendo hecho este ejercicio para la ciudad de Ceuta se propone replicar la misma idea para la ciudad autónoma de Melilla. Primeramente, se muestra en la Figura 36 el mapa de los núcleos poblacionales de la ciudad de Melilla.



Figura 36. Mapa de Melilla mostrando todos los núcleos poblacionales¹²⁶

¹²⁶ Geo-Ref.net, (2023)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

En el caso de Melilla, hay dos grandes núcleos poblacionales, uno en la zona sur de la ciudad cercano al paso fronterizo de Beni-Enzar (por donde se produciría el ataque), y otro núcleo en la zona media de la ciudad.

A continuación, se presenta en la Figura 37 un mapa de la ciudad de Melilla donde se ubican tanto el paso fronterizo por el cual se iniciará el ataque como el punto de evacuación y las carreteras que interconectan ambos.

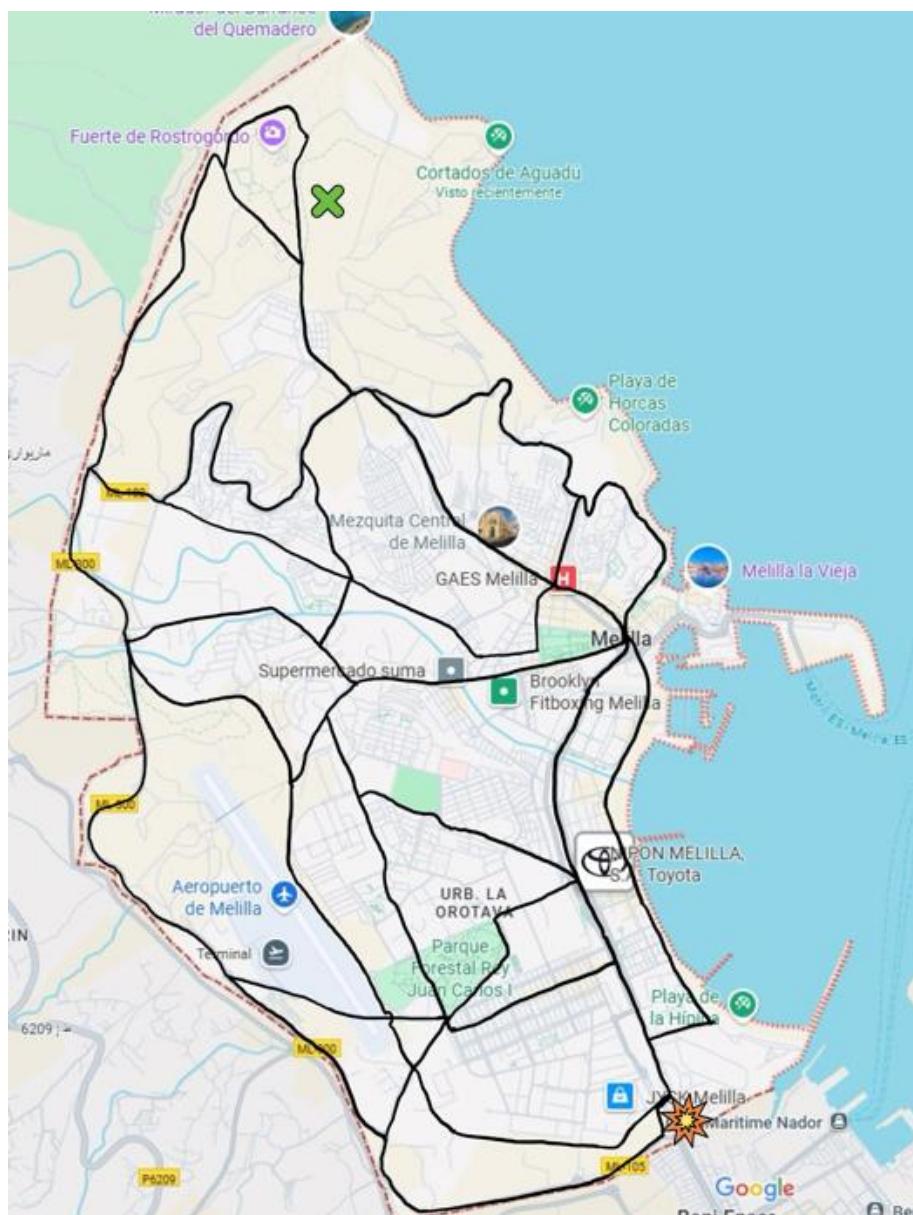


Figura 37. Red transporte vial propuesta para la evacuación de Melilla¹²⁷

¹²⁷ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

La distribución vial que tiene Melilla es mucho más mallada que la que presenta Ceuta, y esto en un principio debería jugar a favor de Melilla a la hora de ejecutar la evacuación.

Se presenta ahora la Figura 38, que muestra el mapa completo de la red de transporte vial propuesta para Melilla con los nodos numerados.

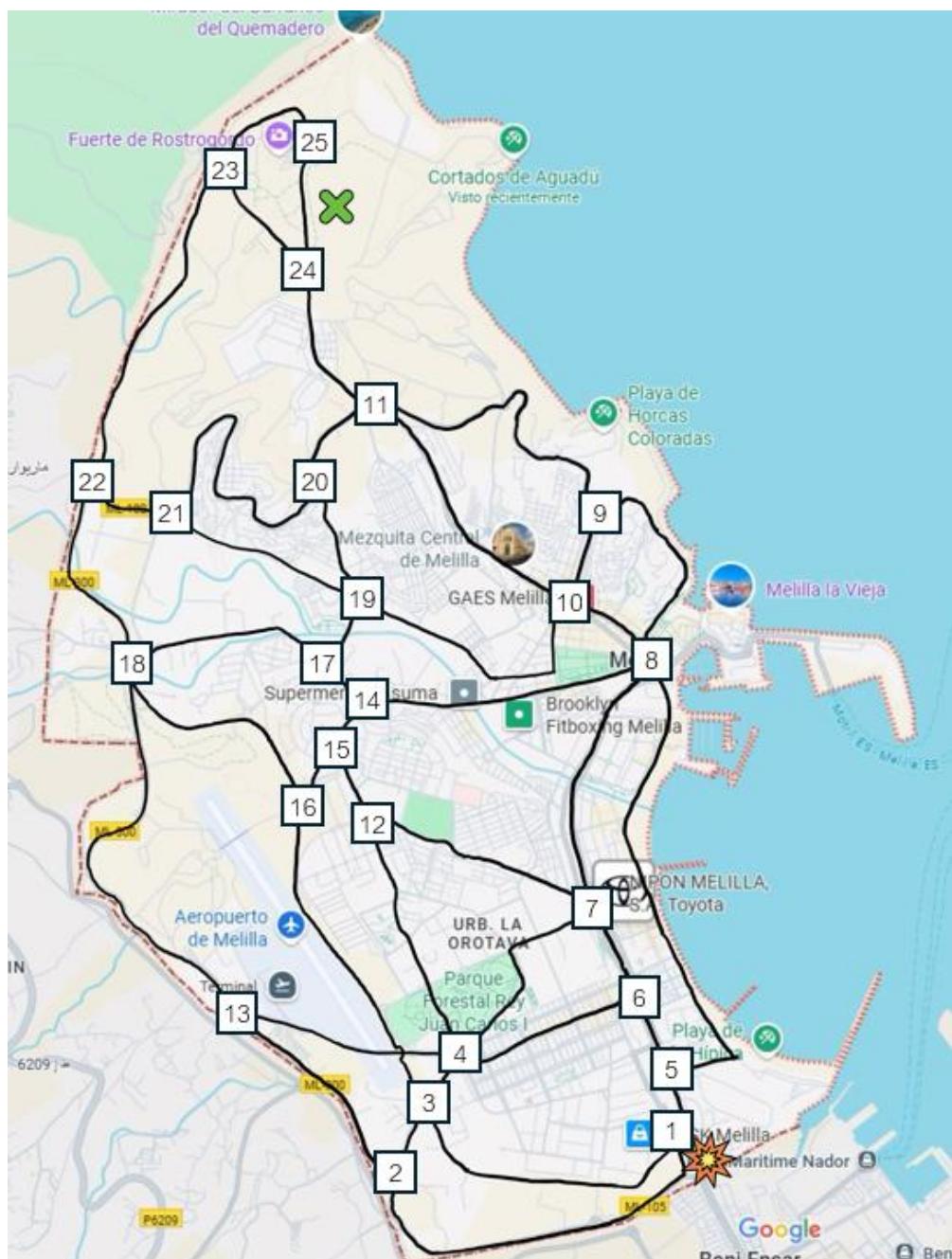


Figura 38. Red de transporte vial propuesta para la evacuación de Melilla con nodos¹²⁸

¹²⁸ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

La red cuenta con un total de 25 nodos y 42 arcos, y como sucedía con el caso anterior en la medida de lo posible se ha tratado de buscar carretas con varios carriles para que la capacidad límite no sea solamente de 1.800 vehículos hora y que fueran de doble sentido para permitir la existencia del contraflujo de cara a optimizar la evacuación

Igual que se hizo con el esquema de Ceuta, a continuación, se presenta la red de transporte vial propuesta para la Ciudad de Melilla, pero mostrada con el formato clásico de nodos y arcos, como se aprecia en la Figura 39.

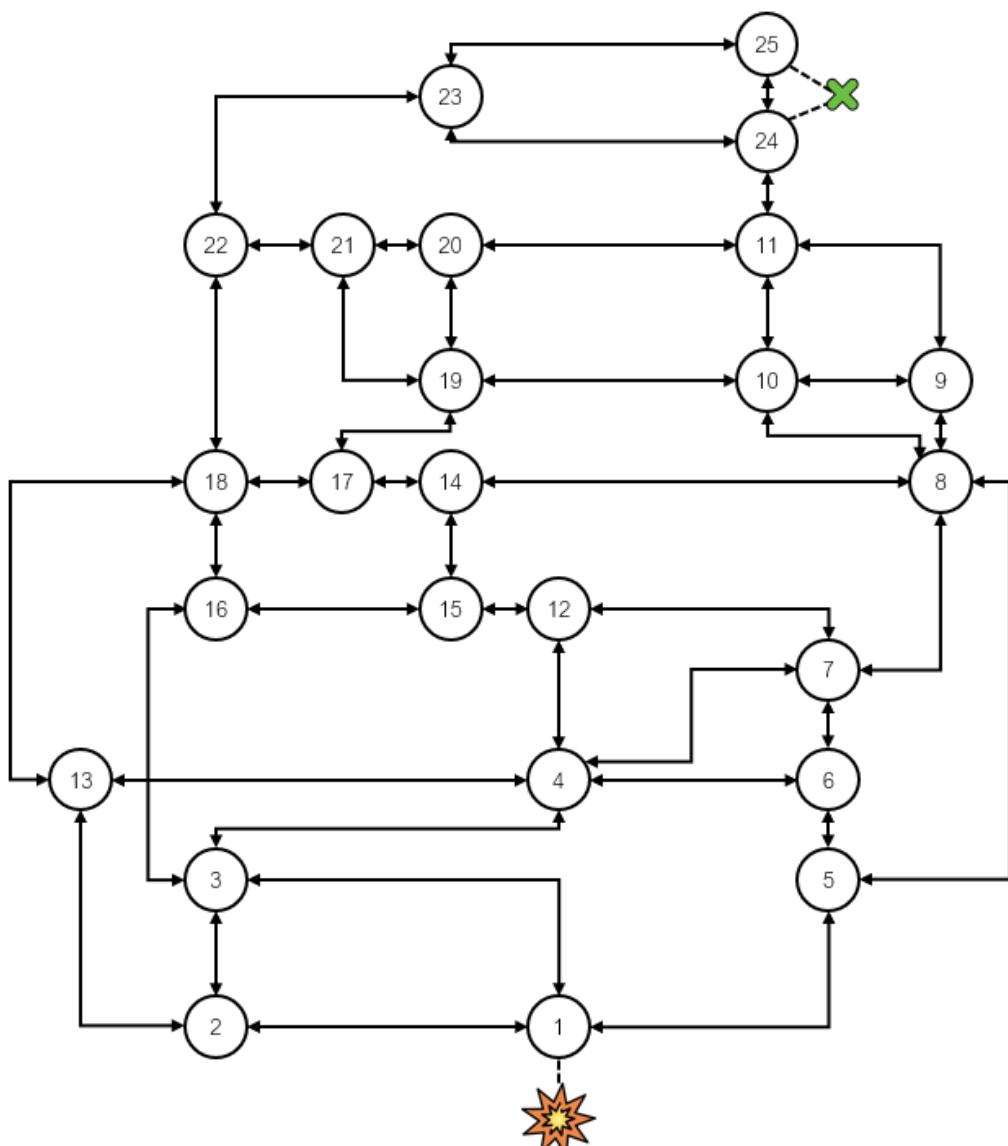


Figura 39. Red de transporte vial para Melilla presentado en formato clásico de nodos y arcos¹²⁹

¹²⁹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Se debe mencionar que, al igual que sucedía en Ceuta, el mapa cuenta con 2 accesos al parking que son los nodos 24 y 25, que actúan como sumideros de toda la demanda, y mientras que el resto de los nodos son, en su gran mayoría, nodos generadores de los cuales saldrán los coches que serán usados en el plan de evacuación.

Como se puede apreciar en la Figura 39, la configuración es más caótica que la presentada en Ceuta por el hecho de que se mallada, sin embargo, esta misma estructura será la que otorgue a la ciudad de unas mejores condiciones para poder ejecutar el plan de evacuación.

4. MATRIZ ORIGEN DESTINO (OD)

Si bien la formulación como tal de la matriz origen destino no se llevará a cabo en este capítulo, si no en el siguiente, titulado aplicación numérica del plan de evacuación, sí que es conveniente explicar en qué consiste la matriz origen destino y cómo se plantea formularla.

La matriz origen destino es una matriz que tiene en filas y columnas todos los nodos presentes en la red vial establecida, en el caso de este estudio habrá una matriz para cada una de las dos redes viales, y por tanto para cada una de las ciudades.

Lo relevante de esta matriz es que los valores de cruce entre filas y columnas reflejan los viajes que hay de un nodo a otro. Lógicamente no todos los nodos están conectados entre ellos y por ello no siempre habrá viajes de un nodo a otro, e incluso estando conectados puede ser que no haya viajes. Un ejemplo de una matriz OD se muestra en la siguiente Figura 40.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

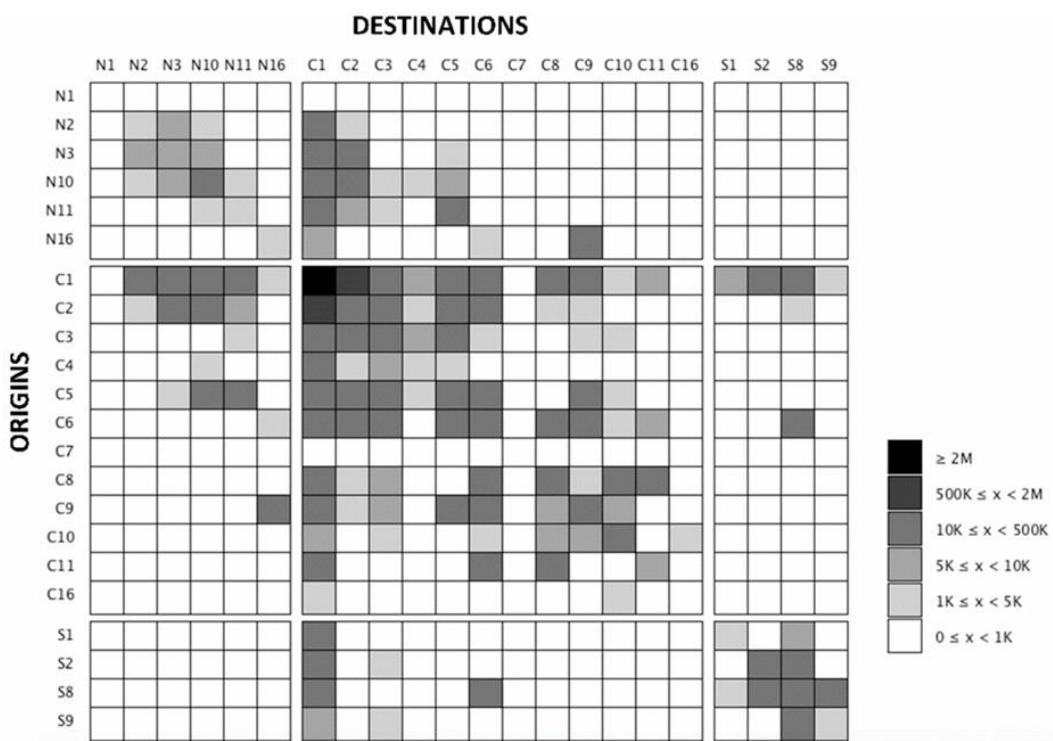


Figura 40. Matriz OD para un estudio de viajes entre zonas de la región de Oporto¹³⁰

De cara a establecer los viajes entre nodos los óptimo sería obtener datos a través de datos GPS o apps móviles como Google Maps, dado que eso no será posible se ha optado por estimar el número de viajes mediante obtención sintética de viajes.

Una de las maneras más comunes de hacerlo es mediante el modelo gravitacional:

$$T_{ij} = K * \frac{P_i * A_j}{c_{ij}^2} \quad (1)$$

En el que:

T_{ij} es el número de viajes entre los nodos ij

P_i es la producción en origen

A_j es la atracción en destino

c_{ij}^2 es la distancia entre ambos nodos

¹³⁰ Hora et al, (2017)

Sin embargo, no es el único, de hecho, en situaciones como una evacuación de emergencia es muy común suponer que con determinado número población haya un asociado número de viajes huyendo de la catástrofe.

5. MODELOS MATEMÁTICOS A EMPLEAR EN LA SIMULACIÓN

Al igual que sucedía en el apartado anterior se introducirá este apartado para tener un buen entendimiento de los modelos matemáticos que se emplearán durante la simulación, sin embargo, todo el trabajo numérico derivado de los mismos se presentará en el siguiente capítulo del trabajo.

Habiendo ya establecido las ubicaciones de las zonas de peligro y de extracción, así como las redes de transporte que conformarán el mapa en base al cual se evacuará la población y las características de las vías que transitarán los vehículos para llevar a cabo dicha evacuación, ahora queda conocer en base a qué modelos de optimización se va a realizar la asignación de rutas

De cara a la selección del modelo se ha optado por emplear el conocido modelo de Frank-Wolfe¹³¹, el cual se englobaba dentro de los equilibrios de usuario siguiendo la clasificación de Wardrop¹³², ya que supone que los usuarios cambian su ruta en base a su propia minimización de tiempos, sin priorizar el conjunto global del sistema.

No obstante, el modelo de Frank-Wolfe tiene una variante que permite adaptarlo al segundo principio de Wardrop en el que se prioriza la minimización del tiempo general del sistema y no el de cada individuo, es por ello que se ejecutarán ambos modelos con la intención de apreciar las diferencias entre dichos modelos.

Retomando el modelo original de Frank-Wolfe, se describe la función objetivo de este algoritmo como:

¹³¹ Frank, M. & Wolfe, P. (1956)

¹³² Wardrop, J. (1952)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

$$\min Z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw \quad (2)$$

Donde:

A es el conjunto de los arcos que conforman la red

$t_a(x_a)$ es el tiempo de viaje en el arco a que depende del flujo x_a

A su vez, la función del tiempo se suele calcular como una función BPR¹³³:

$$t_a(x_a) = t_{0a} * \left[1 + \alpha * \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

En lo que:

t_{0a} representa el tiempo sin colapso

α y β son parámetros que tradicionalmente poseen valores de 0,15 y 4 respectivamente

C_a es la capacidad del arco

Así mismo el algoritmo también posee un par de restricciones básicas, a las cuales se le pueden sumar muchas otras en función de la complejidad del modelado que se quiera recrear.

La primera de ellas es relativa a la conservación de flujo:

$$\sum_{p \in P_{ij}} f_p = q_{ij} \quad \forall (i, j) \quad (4)$$

Donde:

P_{ij} es el conjunto de las rutas entre i y j

F_p es el flujo en la ruta p

q_{ij} son los viajes en la matriz OD entre i y j

La otra restricción importante es la no negatividad de los flujos, representada en la siguiente ecuación:

¹³³ United States Bureau of Public Roads, (1964)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

$$x_a \geq 0 \quad \forall a \quad (5)$$

El algoritmo de Frank-Wolfe ejecuta los siguientes pasos para llegar a una solución óptima: Primeramente, inicializa el algoritmo calculando los tiempos libres, es decir, lo que los vehículos tardarían en recorrer los arcos sin que hubiera tráfico, t_{0a} . Del cual se deriva un flujo inicial $x^{(0)}$.

Acto seguido se calculan los tiempos que se tardarán en base al flujo inicialmente propuesto, $t_a(x_a)$. Y con estos tiempos se resuelve un problema lineal en el cual se asigna la ruta más corta para cada par OD, obteniendo como resultado un nuevo flujo $y^{(k)}$.

Tras esto, se procede a encontrar el tamaño de paso óptimo λ , que puede tomar cualquier valor desde 0 a 1, resolviendo la ecuación 6:

$$\lambda^* = \min_{\lambda \in [0,1]} Z(x^{(k)} + \lambda(y^{(k)} - x^{(k)})) \quad (6)$$

Habiendo calculado el paso óptimo λ^* se procede a actualizar los flujos para el momento siguiente tal y como se presenta en la ecuación 7:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \lambda^*(y^{(k)} - x^{(k)}) \quad (7)$$

Sin embargo, y para detectar si se ha llegado al punto óptimo de verdad se realiza un análisis de convergencia mediante una fórmula de Relative Gap, mostrada en la ecuación siguiente, numerada como 8:

$$RG = \frac{\sum_{(i,j) \in K} q_{ij} * (t_{ij} - t_{ij}^*)}{\sum_{(i,j) \in K} q_{ij} * (t_{ij}^*)} \quad (8)$$

Dónde:

t_{ij} es el tiempo entre las rutas i y j

t_{ij}^* es el tiempo de la ruta más corta entre i y j

Si el resultado del Relative Gap es menor que 10^{-4} se puede considerar que la asignación de rutas es la óptima de lo contrario se volverá a comenzar por el paso 1 y así hasta cuantas veces sea necesario.

De cara a emplear el algoritmo de Frank-Wolfe modificado para que siga los criterios del segundo principio de Wardrop hay que modificar un par de cosas respecto al algoritmo original.

En lugar de usar la previamente explicada función objetivo se emplea esta otra:

$$\min Z(x) = \sum_{a \in A} x_a * t_a(x_a) \quad (9)$$

Se aprecia que se trata de minimizar el producto del flujo por el tiempo de todos y cada uno de los arcos y, por ende, de todos los vehículos involucrados en la evacuación.

Así mismo, en lugar de emplear el tiempo en función del flujo como coste obtenido en la función BPR, se empleará el tiempo más la derivada de este, dando como resultado del coste a emplear la siguiente fórmula, introducida como 10:

$$Coste_a = t_a(x_a) + x_a * t'_a(x_a) \quad (10)$$

No obstante, el resto del proceso del algoritmo se mantiene inalterado, lógicamente los resultados serán muy probablemente diferentes, aunque esto se apreciará en el siguiente capítulo como ya se ha mencionado.

6. CONCLUSIONES OBTENIDAS DEL DESARROLLO DEL PLAN DE EVACUACIÓN

Este apartado en el cual se ha desarrollado la parte teórica del plan de evacuación ha permite establecer los puntos de peligro por los cuales hipotéticamente el Reino de Marruecos podría invadir las ciudades autónomas siendo estos el paso fronterizo de El Tarajal para Ceuta y el paso fronterizo de Beni-Enzar para Melilla.

Por otra parte, también se ha llevado a cabo un estudio que ha permitido localizar los puntos de extracción hacia los cuales ha de dirigirse la población en caso de tener que evacuar Ceuta y Melilla. En el caso de Ceuta se trataría del puerto de la ciudad, del cual ya se ha establecido que las capacidades actuales no serían suficientes para albergar a todos los vehículos que se esperan que sean usados en la evacuación. Para Melilla se ha optado por los Cortados de Aguadú, empleando la zona de Rostrogordo para dejar todos los vehículos pertinentes.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

También se han desarrollado las redes viales para las ciudades autónomas, dando como resultados las Figuras 35 y 39. La red de transporte de Ceuta está construida por 27 nodos y 40 arcos, en una configuración eminentemente de lazos. Sin embargo, la red de transporte de Melilla la componen 25 nodos y 42 arcos y se trata de un esquema de tipo mallado, por lo que se espera, a priori, que la evacuación en Melilla sea más optimizable que en Ceuta.

Así mismo se ha clarificado el concepto y la función de la matriz de origen-destino (OD), así como del algoritmo de Frank-Wolf, el cual se empleará para resolver el problema de asignación de rutas de manera óptima. Con la finalidad de ver la diferencia se empleará tanto el algoritmo original (como modelo avaricioso) y el algoritmo modificado para que optimice los tiempos generales del sistema y no solo los de cada individuo.

A continuación, se procederá al análisis numérico de dicho plan comenzando por el cálculo de la matriz OD, y posteriormente ejecutando los códigos del algoritmo Frank-Wolfe mediante el uso del lenguaje de programación Python.

IV. APLICACIÓN NUMÉRICA DEL PLAN DE EVACUACIÓN

Una vez se sentado una base sólida sobre la que desarrollar el plan de evacuación, se propone ahora cuantificar numéricamente el plan de evacuación para lograr de esta manera hacer que esté lo más optimizado posible.

Con el fin de lograr dicho objetivo se deberá primero realizar una caracterización completa de los arcos de las redes de transporte vial de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Esta caracterización es crucial para que el algoritmo tenga los parámetros adecuados de las redes de transporte. Se deberá obtener la direccionalidad de los arcos, una longitud aproximada, una velocidad libre (sin congestión) de carretera, y la capacidad de la vía, que ya se mencionó en el anterior apartado que variará en función del número de carriles.

Tras esto, y como ya se anticipó también en el capítulo anterior, se procederá a la construcción de la matriz OD. Dicha matriz es de capital relevancia para establecer los flujos poblacionales en los planes de evacuación. Se intentará hacer una estimación lo más certera y realista posible en base a los datos que se puedan recopilar.

Finalmente, pero no menos importante, se deberá crear un código en el lenguaje de programación Python para poder recrear el modelo de Frank-Wolfe, y el modelo de Frank-Wolfe modificado. Dichos códigos se alimentarán de los datos previamente establecidos en la red de transporte vial y en la matriz OD, y esto permitirá a los modelos proponer una asignación de rutas lo más eficiente y rápido posible, tanto para Ceuta como para Melilla.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

1. CARACTERIZACIÓN DE LAS REDES DE TRANSPORTE VIAL EN CEUTA Y MELILLA

De cara a poder obtener toda la información se empleará la famosa aplicación Google Maps, en ella se tratará de obtener las direccionalidades de los arcos propuestos, las longitudes de los arcos, la velocidad libre de arcos y la capacidad máxima por el arco.

A continuación, se presenta la Tabla 1, en la que se muestran todas las características para los arcos de la red de transporte vial de Ceuta.

Arco	Longitud	Vel. Libre	Capacidad	Sentido
(1,2)	1700 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(1,3)	400 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(1,7)	600 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(2,3)	800 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(2,5)	250 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(3,4)	400 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(4,5)	300 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(4,7)	850 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(5,6)	350 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(6,21)	900 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(7,8)	950 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(7,9)	1700 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(7,20)	1000 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(8,17)	850 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(8,19)	250 m	50 km/h	3600 veh/h	19 ➔ 8
(9,10)	400 m	50 km/h	3600 veh/h	9 ➔ 10
(9,16)	300 m	50 km/h	5400 veh/h	16 ➔ 9
(10,11)	300 m	50 km/h	3600 veh/h	10 ➔ 11
(10,15)	350 m	50 km/h	1800 veh/h	10 ➔ 15
(11,12)	1800 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(11,14)	300 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Longitud	Vel. Libre	Capacidad	Sentido
(12,13)	600 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(13,14)	1800 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(14,15)	400 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(15,16)	200 m	50 km/h	5400 veh/h	15 ➔ 16
(15,27)	1100 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(16,17)	100 m	50 km/h	3600 veh/h	16 ➔ 17
(17,18)	150 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(18,19)	900 m	50 km/h	1800 veh/h	18 ➔ 19
(18,25)	350 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(19,20)	100 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(20,21)	150 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(20,24)	1000 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(21,22)	1000 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(22,23)	300 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(23,24)	200 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(23,26)	400 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(24,25)	350 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(25,26)	400 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(26,27)	100 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble

Tabla 1. Características de los arcos de la red de transporte vial de Ceuta¹³⁴

Como ya se anticipó en el capítulo anterior, se aprecia que la mayor parte de las carreteras en la ciudad de Melilla poseen 1 solo carril, aunque existen algunos tramos con 2 o incluso tres carriles, pero no son habituales.

Prueba de esto es que la mayoría de las carreteras se han limitado a una capacidad de 1800 veh/h, mientras que pocas cuentan con 3600 o 5400 veh/h como capacidad de arco disponible.

También se trató de elegir carreteras que fueran relevantes para la evacuación, pero que permitieran sentido de ida y de vuelta para que de esta manera se pueda permitir el

¹³⁴ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

contraflujo. La mayor parte de arcos cumplen con este criterio, pero 8 de ellos solo permiten flujo en un sentido, esto se deberá de reflejar en la ejecución del algoritmo.

Finalmente, se ha establecido como velocidad libre 50 km/h para todas las carreteras, si bien en ciudad la velocidad límite es de 30 km/h y 40 km/h para vías de 1 y 2 carriles respectivamente. La realidad es que muchos conductores circulan a 50 km/h si no hay radares en la zona, y a sabiendas de que este trabajo simula una situación de emergencia parece razonable asumir 50 km/h como velocidad libre de carretera.

A continuación, se procede a realizar el mismo tratamiento para la ciudad autónoma de Melilla, presentándose los resultados en la Tabla 2, mostrada a continuación.

Arco	Longitud	Vel. Libre	Capacidad	Sentido
(1,2)	2000 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(1,3)	1600 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(1,5)	350 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(2,3)	300 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(2,13)	1100 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(3,4)	250 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(3,16)	1600 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(4,6)	1000 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(4,7)	1000 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(4,12)	1300 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(4,13)	1100 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(5,6)	400 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(5,8)	2400 m	50 km/h	1800 veh/h	5 → 8
(6,7)	450 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(7,8)	1200 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(7,12)	1200 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(8,9)	1300 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(8,10)	400 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(8,14)	1300 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(9,10)	400 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Longitud	Vel. Libre	Capacidad	Sentido
(9,11)	1700 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(10,11)	1500 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(10,19)	1400 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(11,20)	450 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(11,24)	750 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(12,15)	400 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(13,18)	2100 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(14,15)	200 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(14,17)	200 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(15,16)	350 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(16,18)	1300 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(17,18)	1100 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(17,19)	300 m	50 km/h	3600 veh/h	Doble
(18,22)	950 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(19,20)	600 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(19,21)	1000 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(20,21)	1800 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(21,22)	350 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(22,23)	1700 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(23,24)	700 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(23,25)	750 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble
(24,25)	600 m	50 km/h	1800 veh/h	Doble

Tabla 2. Características de los arcos de la red de transporte vial de Melilla¹³⁵

El caso de Melilla es muy similar al de Ceuta, la mayoría de los arcos permite doble sentido de circulación a excepción del arco 5-8, y en la gran mayoría de los casos solo hay un carril por el que circular salvo algunas que poseen 2 aumentando la capacidad de arco hasta los 3600 veh/h en algunos puntos de la ciudad. Por otro lado, la velocidad libre de congestión se ha asumido que también sería de 50 km/h.

¹³⁵ Elaboración propia, (2025)

2. CREACIÓN DE LA MATRIZ ORIGEN DESTINO (MATRIZ OD)

Antes de ejecutar el modelo de asignación de rutas, y como se comentó en el capítulo anterior, hay que generar una matriz origen destino. Dicha matriz expresará todos los viajes que se habrán de realizar desde los nodos de generación (los nodos desde los que parte la población evacuada, que son la gran mayoría de ellos) hacia los nodos de evacuación (que son los nodos en los que se recibe a la población para evacuarla de las ciudades).

Los viajes deberán expresarse en el número total de vehículos que vayan a emplearse en el plan de evacuación desde cada nodo. Lógicamente en una situación de evacuación real no funcionaría así, no obstante, la aproximación empleada es aceptablemente buena como para recrear dicho escenario.

Para calcular el total de vehículos empleados en la evacuación se buscó información sobre el número de vehículos en función de los diferentes barrios de las ciudades autónomas, sin mucho éxito. Más tarde se probó a buscar información sobre la población de las mencionadas ciudades en función de los barrios, pero nuevamente se obtuvo un resultado negativo. Así que para calcular los viajes primero se estimará la población mediante la densidad de población y la superficie encerrada en cada lazo, y con esta población se hará una estimación sobre el número de vehículos empleados.

Un “lazo” es un ciclo cerrado que está delimitado por los diferentes arcos que interconectan los nodos. Por ejemplo, a continuación, se presenta la Figura 41, en la cual se muestra el esquema de red de transporte vial de Ceuta con el conteo de los diferentes lazos presentes en la red.

Estos “lazos” representan la superficie encerrada por al menos 3 nodos y que se calculará gracias a la ayuda de la aplicación MapChecking¹³⁶.

¹³⁶ Catel, A., (2020)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

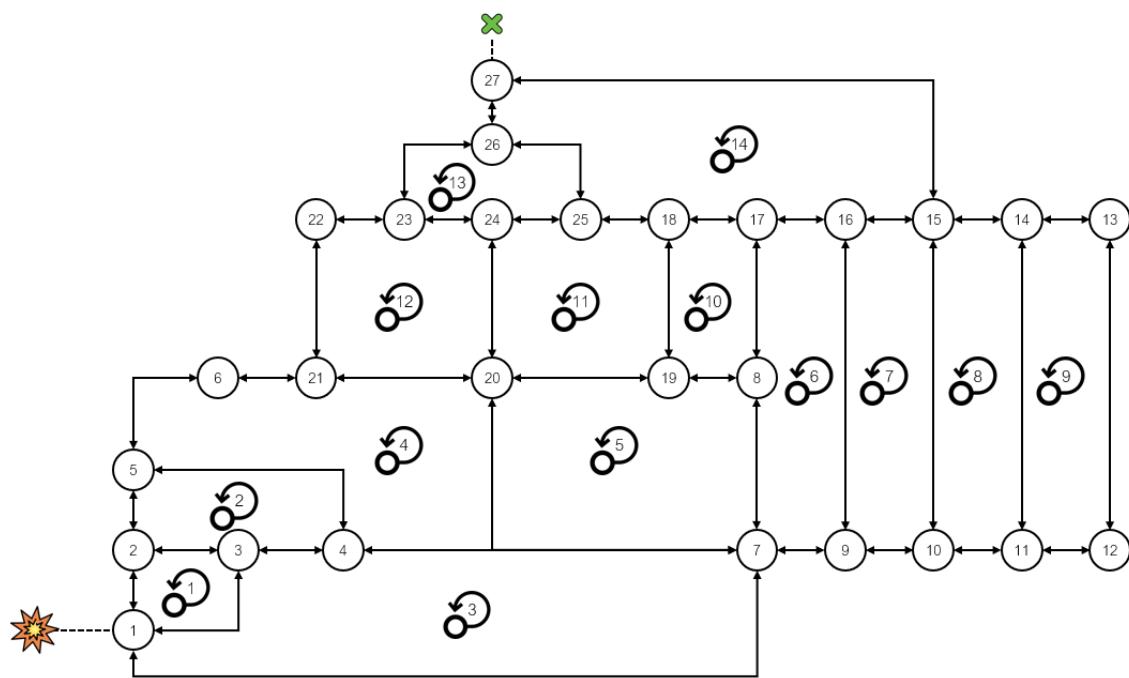


Figura 41. Red de transporte vial de Ceuta con el conteo de lazos incluido¹³⁷

A continuación, se muestra la Figura 42, en la que se presenta el lazo 1 empleando la herramienta de MapChecking.

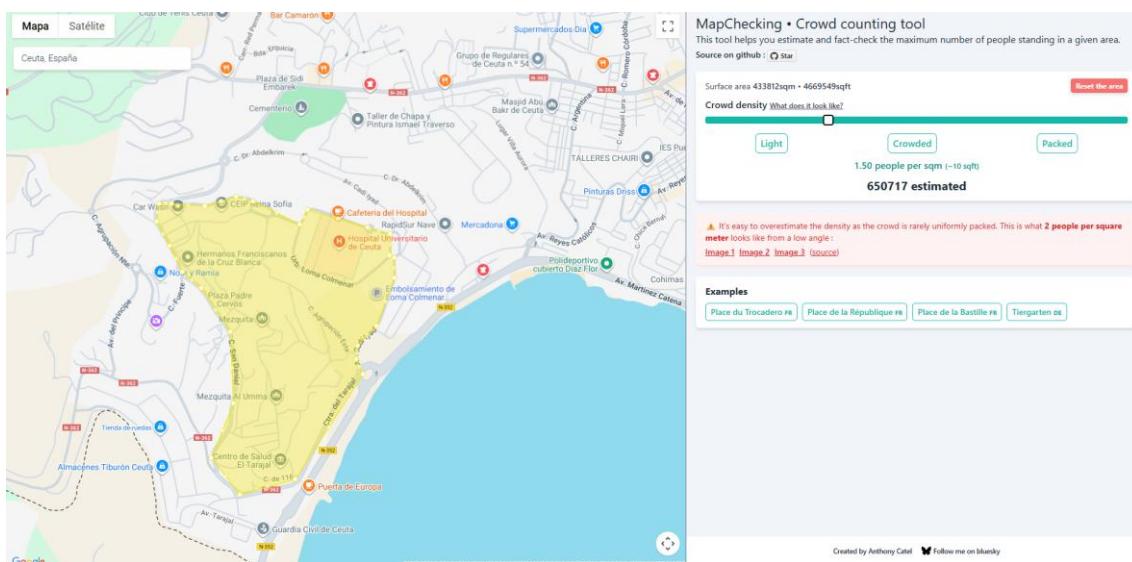


Figura 42. Superficie cubierta por el lazo 1 en la herramienta MapChecking¹³⁸

¹³⁷ Elaboración propia, (2025)

¹³⁸ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Con la finalidad de no perder el tiempo del lector se repetirá el proceso con todos los lazos de la ciudad de Ceuta y se presentará en la Tabla 3 los resultados de manera agregada.

Nº de Lazo	Nodos	Superficie	Población	Vehículos
1	1,2,3	433.812 m ²	10.239	2.560
2	2,3,4,5	84.469 m ²	1.994	498
3	1,3,4,7	127.609 m ²	3.012	753
4	4,5,6,7,20,21	396.025 m ²	9.347	2.337
5	7,8,19,20	154.605 m ²	3.649	912
6	7,8,9,16,17	386.085 m ²	9.112	2.278
7	9,10,15,16	93.505 m ²	2.207	552
8	10,11,14,15	52.328 m ²	1.235	309
9	11,12,13,14	634.454 m ²	14.974	3.743
10	8,17,18,19	249.762 m ²	5.895	1.474
11	18,19,20,24,25	273.797 m ²	6.462	1.615
12	20,21,22,23,24	316.397 m ²	7.467	1.867
13	23,24,25,26	61.851 m ²	1.460	365
14	15,16,17,18,25,26,27	261.764 m ²	6.178	1.544

Tabla 3. Superficie, población civil y vehículos que se encuentran dentro de cada lazo para la red de Ceuta¹³⁹

Si bien la densidad de población de Ceuta es de algo más de 4.000 hab/Km², una parte sustancial del territorio se encuentra deshabitada, y si se utilizase esa densidad de población con la superficie medida, el resultado sería de una población mucho menor.

Es por ello que se calculará una nueva densidad de población, pero con el total de la superficie medida, siendo el resultado de 3.526.463 m² de superficie para una población total de 83.229 personas, por lo tanto, la cuenta es de 0,024 habitantes por metro cuadrado o 23.600 hab/km².

Con esta densidad, se multiplicará las superficies de cada uno de los lazos para obtener la población que reside en dicho lazo, obteniéndose los resultados ya mostrados en la Tabla 3.

¹³⁹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Finalmente, para obtener el número de vehículos que se emplearán en el plan de evacuación se supondrá que los vehículos (turismos) irán, en promedio, con un total de cuatro pasajeros por vehículo, y eso dará los resultados de los vehículos mostrados en la ya presentada Tabla 3.

Si bien ahora ya se cuenta con una primera estimación para el número de vehículos, esta es insuficiente. Los vehículos, si bien se encuentran dentro de las viviendas (y por ende dentro de los lazos), de cara al modelo los vehículos deben partir de los nodos.

Con la intención de hacerlo de una manera equitativa se propone dividir el número de vehículos asignados al nodo entre el número de nodos participantes en el lazo, y luego sumar todas las participaciones del nodo en los distintos lazos. Con el fin de presentar esta idea se presenta a continuación la Tabla 4.

Nº de Nodo	Pertenece a lazos	Vehículos en el nodo
1	1,3	1041
2	1,2	978
3	1,2,3	1166
4	2,3,4	702
5	2,4	514
6	4	389
7	3,4,5,6	1261
8	5,6,10	1052
9	6,7	594
10	7,8	215
11	8,9	1013
12	9	936
13	9	936
14	8,9	1013
15	7,8,14	436
16	6,7,14	814
17	6,10,14	1045
18	10,11,14	912

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Nº de Nodo	Pertenece a lazos	Vehículos en el nodo
19	5,10,11	920
20	4,5,11,12	1314
21	4,12	763
22	12	373
23	12,13	465
24	11,12,13	788
25	11,13,14	635
26	13,14	312
27	14	221

Tabla 4. Vehículos asignados a cada nodo para el plan de evacuación en Ceuta¹⁴⁰

Ahora sí que se tienen los vehículos que saldrán desde cada nodo, con la finalidad de llegar a los nodos de extracción (26,27). Cabe destacar que en el caso de los nodos 26 y 27 no saldrá ningún vehículo, si no que se asumir que esa parte de población ya ha “llegado” y no se tendrán en cuenta esos 533 vehículos para el modelo.

Sin embargo, ahora surge una nueva pregunta, a sabiendas de conocer los vehículos que deben de salir hacia los nodos, ¿cómo deben de asignarse los vehículos a los dos nodos de evacuación existentes (26 y 27)?

Hay diversos modelos para poder llevar a cabo esta operación, como por ejemplo la asignación por “impedancia probabilística” que relaciona la asignación de los nodos a la función del coste de transporte, aunque hay otros estudios que lo realizan por la saturación de capacidad del refugio, aunque en este caso no aplica pues se asume que ese no sería el problema.

Sin embargo, en este caso se hará de una manera mucho más sencilla y lógica, se repartirá en 2 los nodos existentes en función de la cercanía a cada uno de los nodos de extracción, quedando de la siguiente manera la división, presentada en la Figura 43.

¹⁴⁰ Elaboración Propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

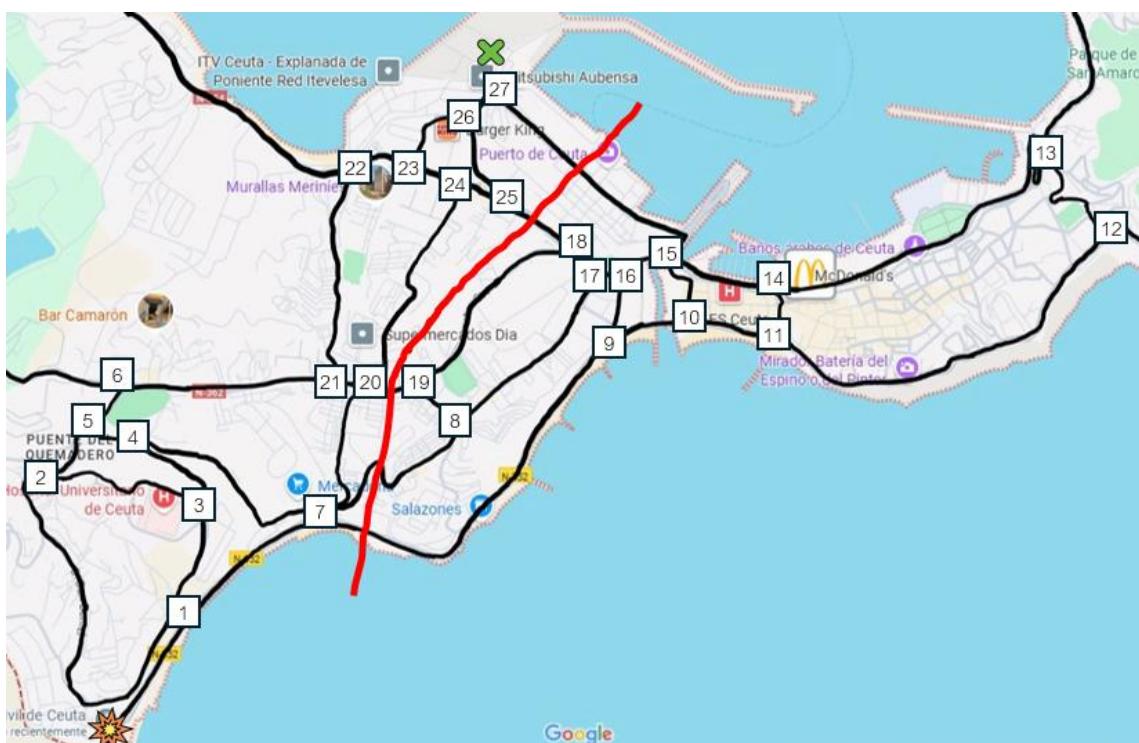


Figura 43. División de la asignación de nodos en Ceuta¹⁴¹

Por lo tanto, la repartición se hará de la siguiente manera: Los nodos a la izquierda de la línea roja, es decir, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 20, 21, 22, 23, 24 y 25 quedarán asignados inicialmente al nodo 26, mientras que aquellos a la derecha de la línea roja, siendo estos, 8, 9, 10, 11, ,12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19, estarán asignados al nodo 27 en el plan de evacuación.

Esto lleva como resultado a la siguiente matriz de origen destino mostrada en la Figura 44, tal y como se muestra a continuación.

¹⁴¹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

ORIGEN	DESTINO																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1																										1041	
2																										978	
3																										1166	
4																										702	
5																										514	
6																										389	
7																										1261	
8																										1052	
9																										534	
10																										215	
11																										1013	
12																										936	
13																										936	
14																										1013	
15																										436	
16																										814	
17																										1045	
18																										912	
19																										920	
20																										1314	
21																										763	
22																										373	
23																										465	
24																										788	
25																										635	
26																										-10390	
27																										-9885	

Figura 44. Matriz origen-destino para la ciudad de Ceuta¹⁴²

Habiendo finalizado la creación de la matriz origen destino de Ceuta se procede a hacer lo propio con la de Melilla.

Primero se presenta el esquema con el conteo de los lazos de la ciudad de Melilla en la Figura 45, como se muestra a continuación.

¹⁴² Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

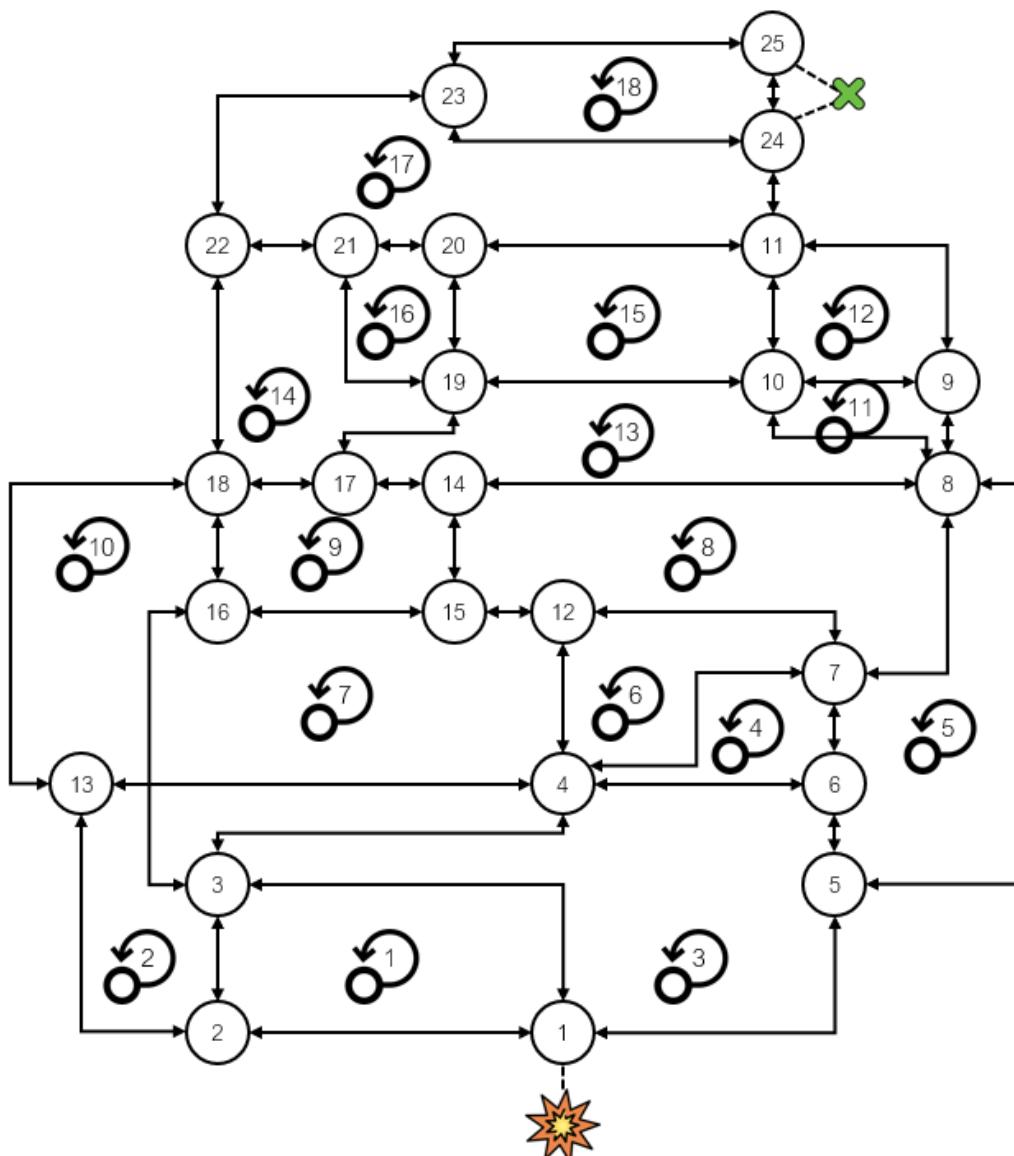


Figura 45. Red de transporte vial de Melilla con el conteo de lazos incluido¹⁴³

Con la red de Melilla se llega a un total de 18 lazos compuesto por los 25 nodos y 42 arcos. Como ya se mencionó se trata de una red más mallada que la de Ceuta.

Aplicando el mismo método de contabilización de superficie a través de MapChecking, se presenta la Tabla 5, en la cual se muestran los nodos, la superficie, la población y el número de vehículos estimados para cada lazo de esta configuración.

¹⁴³ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Nº de Lazo	Nodos	Superficie	Población	Vehículos
1	1,2,3	433.517 m ²	4380	1095
2	2,3,4,13	0 m ²	0	0
3	1,3,4,5,6	715.044 m ²	7225	1806
4	4,6,7	269.956 m ²	2728	682
5	5,6,7,8	561.169 m ²	5670	1418
6	4,7,12	547.131 m ²	5528	1382
7	3,4,12,15,16	551.176 m ²	5569	1392
8	7,8,12,14,15	887.377 m ²	8966	2242
9	14,15,16,17,18	473.246 m ²	4782	1195
10	2,3,13,16,18	0 m ²	0	0
11	8,9,10	245.504 m ²	2481	620
12	9,10,11	481.550 m ²	4866	1216
13	8,10,14,17,19	413.349 m ²	4177	1044
14	17,18,19,21,22	640.559 m ²	6472	1618
15	10,11,19,20	802.716 m ²	8111	2028
16	19,20,21	248.766 m ²	2514	628
17	11,20,21,22,23,24	1.221.518 m ²	12343	3086
18	23,24,25	0 m ²	0	0

Tabla 5. Superficie, población civil y vehículos que se encuentran dentro de cada lazo para la red de Melilla¹⁴⁴

Similar a como se hizo con Ceuta, se ha sumado la superficie total obteniendo un resultado final de 8.492.578, dado que la población de la ciudad autónoma de Melilla es de 85.811, la densidad de población de este estudio será de 0,01 hab/m², o de 10.104 hab/km².

Al multiplicar dicha densidad por la superficie de cada lazo se obtiene la población asignada a cada lazo, y finalmente al dividir la población entre 4 personas por turismo (misma hipótesis que se asumió para Ceuta), se obtiene el resultado final de los vehículos asignados a cada lazo.

¹⁴⁴ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Nótese que los lazos 2,10 y 18 no tienen superficie, eso se debe a que observando el mapa se aprecia que no hay casa dicha superficie. Los lazos 2 y 10 se deben a que ambos cubren la totalidad de la superficie sobre la que se asienta el aeropuerto, y en el caso del lazo 18, se debe a que coincide con el bosque de Rostrogordo.

Y, al igual que sucedió con Ceuta, es necesario que los vehículos estén asignados a cada nodo, no a cada lazo, por ello se propone la misma estrategia de dividir los vehículos de cada lazo entre el número de nodos de ese lazo, y posteriormente sumar todos los vehículos de cada nodo. Con esta finalidad se presenta la Tabla 5, mostrando los vehículos por nodo, presentada a continuación.

Nº de Nodo	Pertenece a lazos	Vehículos en el nodo
1	1,3	726
2	1,2,10	365
3	1,2,7,10	1005
4	3,4,6,7,10	1328
5	3,5	716
6	3,4,5	943
7	4,5,6,8	1491
8	5,8,11,13	1218
9	11,12	612
10	11,12,13,15	1328
11	12,15,17	1427
12	6,7,8	1187
13	2,10	0
14	8,9,13	896
15	7,8,9	966
16	7,9,10	518
17	9,13,14	772
18	9,10,14	563
19	13,14,15,16	1249
20	15,16,17	1231
21	14,16,17	1047

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Nº de Nodo	Pertenece a lazos	Vehículos en el nodo
22	14,17	838
23	17,18	514
24	17,18	514
25	18	0

Tabla 6. Vehículos asignados a cada nodo para el plan de evacuación en Melilla¹⁴⁵

Habiendo definido los vehículos salientes de cada nodo, se procede a asignar los nodos de extracción, que en este caso son el 24 y 25.

Se decide aplicar el criterio de que aquellos nodos que se encuentren en la parte derecha de la ciudad (zona este de Melilla) se asignarán al nodo 24, y aquellos en la parte izquierda (zona oeste de Melilla) serán asignados al nodo 25.

Esto deja a los nodos 1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14 y 19 asignados al nodo 24, mientras que los nodos 2, 3, 4, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22 y 23 se han asignado al nodo 25, esto muestra en la Figura 46 presentada a continuación

¹⁴⁵ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

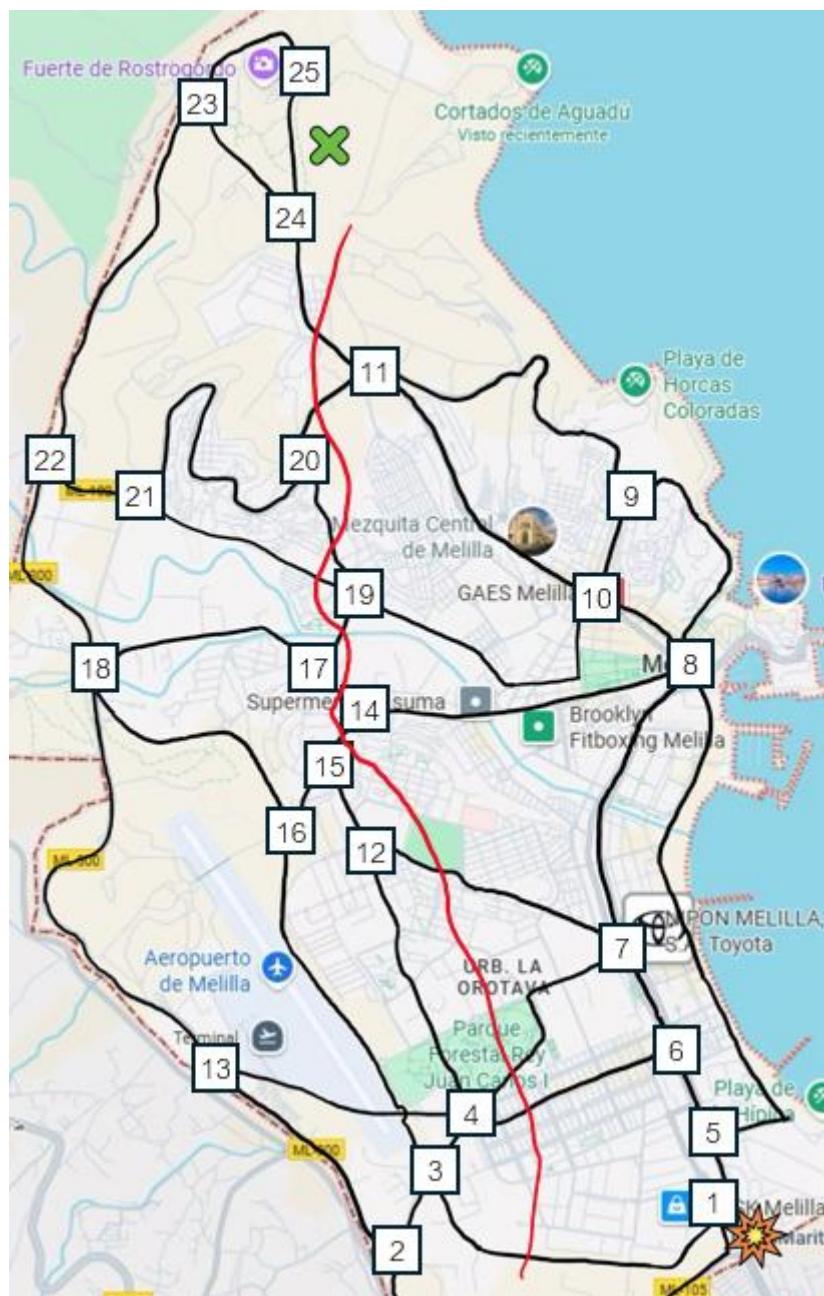


Figura 46. División de la asignación de nodos en Melilla¹⁴⁶

Así que con esto presentado se procede a crear la matriz origen destino para la ciudad autónoma de Melilla, presentada en la Figura 47, como se muestra a continuación.

¹⁴⁶ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

ORIGEN	DESTINO														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1															726
2															365
3															1005
4															1328
5															716
6															943
7															1491
8															1218
9															612
10															1328
11															1427
12															1187
13															0
14															896
15															966
16															518
17															772
18															563
19															1243
20															1231
21															1047
22															838
23															514
24															-10606
25															-10333

Figura 47. Matriz origen-destino para la ciudad de Melilla¹⁴⁷

3. MODELO DE FRANK-WOLFE PARA LA EVACUACIÓN

Como ya se mencionó en el capítulo anterior el modelo de Frank-Wolfe es un algoritmo de convergencia muy usado en asignación de rutas, y esto hace que sea particularmente interesante de cara a poder asignar rutas en el plan de evacuación de las ciudades autónomas que se encuentran bajo estudio.

También se mencionó que el modelo de Frank-Wolfe tradicional sigue el primer principio de Wardrop, esto significa que los conductores tratarán de priorizar la minimización de sus tiempos y no tendrán en consideración los tiempos de evacuación del sistema. Sin embargo, con un pequeño cambio se puede conseguir adaptar el algoritmo al segundo principio de Wardrop en el que se trata de minimizar el tiempo del sistema, aunque eso suponga mayores distancias recorridas por parte de los vehículos.

Con la finalidad de evitar hacer de este apartado excesivamente largo, se presentan los códigos empleados para el modelo de User-Equilibrium (1er principio de Wardrop) y System Optimization (2do principio de Wardrop) en la sección de anexos, como se muestra más adelante en el trabajo.

¹⁴⁷ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Aun así, es interesante mencionar brevemente el funcionamiento de ambos códigos. En la función principal del código (main), se hace llamada a 3 funciones, la primera función permite construir la red de transporte vial a través de un archivo Excel, en él se especifican todas las características necesarias de la red (velocidad libre, capacidad, dirección de los flujos...).

La segunda función es empleada para leer los viajes de la matriz origen destino a través de otro fichero Excel.

Finalmente, el resto código del main se usa para presentar los resultados numéricos (obtenidos en otro fichero Excel), así como las diferentes gráficas e histogramas que se mostrarán a continuación. Todos estos resultados son obtenidos a partir de la tercera función que se llama en el main, la función de Frank-Wolfe.

Para más detalle se recomienda ver la Figura 48, en la que se muestra el diagrama de flujo que sigue el código.

Dentro de la función de Frank-Wolfe, se inicia un bucle iterativo en el que primero se calculan los tiempos de circular por los arcos en base a la ecuación BPR, ya introducida en este trabajo como ecuación (3). De ahí se obtendrán los tiempos de arcos, mostrados como t en el diagrama.

Con estos nuevos tiempos se llama a la función todo o nada para calcular las rutas alternativas en base a los mencionados tiempos, obteniendo como resultado y, flujos alternativos por los arcos.

Acto seguido se calcula, mediante la función de convergencia, ecuación (8) de este trabajo, la convergencia relativa del código. Esta convergencia mide el grado de mejora esperado de una iteración a otra. Su resultado es C en el diagrama.

Terminada esta función se calcula el resultado de la función objetivo, Z , a través de la ecuación (2) de este trabajo.

Posteriormente el código realiza 2 comprobaciones por si debiera terminar el bucle. ¿Es la convergencia menor que un determinado umbral ϵ ? De ser afirmativa la respuesta se finalizará el código con los resultados vigentes.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

La segunda verificación es sobre el número máximo de iteraciones. Una vez alcanzado este límite se finaliza el código con los últimos resultados tras las 200 iteraciones.

Si no se diera el caso de dichas condiciones, se continuará en el bucle. Y el siguiente paso será obtener el valor óptimo de lambda, para ello se sigue una búsqueda lineal, previamente mencionada en el trabajo como ecuación (6).

Con la nueva lambda, se procederá a la función de cálculo de nuevos flujos, actualizando los nuevos valores de flujos por arco, con los valores anteriores, los flujos alternativos y, y el parámetro λ . Más información sobre este paso se muestra en la ecuación (7) del trabajo.

Y nuevamente se volvería a comenzar el ciclo calculando los tiempos por arco con los flujos recién actualizados.

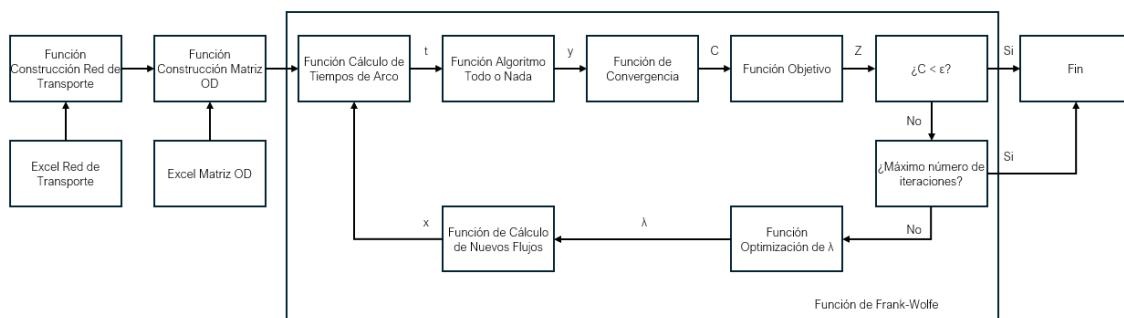


Figura 48. Diagrama de flujo del código empleado¹⁴⁸

Como ya se ha mencionado, todo esto se puede apreciar en los códigos presentados en anexos, sin embargo, se procede ahora a presentar los resultados obtenidos en el código de Equilibrio de Usuario para la ciudad de Ceuta siguiendo el primer principio de Wardrop.

A continuación, se presenta la Tabla 7, en la que se muestra los resultados de los flujos y los tiempos por arcos.

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(1,2)	0	1800	2,0	0
(1,3)	0	1800	0,5	0

¹⁴⁸ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(1,7)	2131	1800	0,9	29
(2,1)	0	1800	2,0	0
(2,3)	0	1800	1,0	0
(2,5)	978	1800	0,3	1
(3,1)	1090	1800	0,5	2
(3,2)	0	1800	1,0	0
(3,4)	76	1800	0,5	0
(7,1)	0	1800	0,7	0
(7,4)	0	1800	1,0	0
(7,8)	2454	1800	1,7	52
(7,9)	3929	1800	9,0	341
(7,20)	1542	1800	1,3	8
(5,2)	0	1800	0,3	0
(5,4)	151	1800	0,4	0
(5,6)	1666	1800	0,5	11
(4,3)	0	1800	0,5	0
(4,5)	325	1800	0,4	0
(4,7)	604	1800	1,0	0
(6,5)	0	1800	0,4	0
(6,21)	2055	1800	1,4	25
(21,6)	0	1800	1,1	0
(21,20)	655	1800	0,2	0
(21,22)	2214	1800	1,6	34
(8,7)	2103	1800	1,5	28
(8,17)	3473	3600	1,2	13
(9,7)	0	1800	2,0	0
(9,10)	5337	3600	0,8	72
(20,7)	1826	1800	1,4	16
(20,19)	1019	1800	0,1	2

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(20,21)	51	1800	0,2	0
(20,24)	2441	1800	1,8	51
(17,8)	1051	3600	1,0	0
(17,18)	3578	3600	0,2	15
(19,8)	1019	3600	0,3	0
(19,20)	1826	1800	0,1	16
(10,11)	1725	3600	0,4	1
(10,15)	3827	1800	1,7	306
(16,9)	814	5400	0,4	0
(16,17)	0	3600	0,1	0
(11,12)	0	1800	2,2	0
(11,14)	3674	3600	0,4	16
(15,14)	0	3600	0,5	0
(15,16)	0	5400	0,2	0
(15,27)	9886	3600	12,6	853
(12,11)	936	1800	2,2	1
(12,13)	0	1800	0,7	0
(14,11)	0	3600	0,4	0
(14,13)	0	1800	2,2	0
(14,15)	5623	3600	0,9	89
(13,12)	0	1800	0,7	0
(13,14)	936	1800	2,2	1
(27,15)	0	3600	1,3	0
(18,17)	112	3600	0,2	0
(18,19)	906	1800	1,1	1
(18,25)	3473	3600	0,5	13
(25,18)	0	3600	0,4	0
(25,24)	0	3600	0,4	0
(25,26)	5183	1800	5,4	1031

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(24,20)	0	1800	1,2	0
(24,23)	2259	3600	0,2	2
(24,25)	1075	3600	0,4	0
(22,21)	0	1800	1,2	0
(22,23)	2587	1800	0,6	64
(23,22)	0	1800	0,4	0
(23,24)	105	3600	0,2	0
(23,26)	5206	1800	5,5	1050
(26,23)	0	1800	0,5	0
(26,25)	0	1800	0,5	0

Tabla 7. Resultados obtenidos para el modelo User-Equilibrium para Ceuta¹⁴⁹

Una de las primeras cosas que se pueden apreciar de estos resultados es que hay una gran cantidad de arcos por los que no hay circulación de vehículos. De los 40 arcos originales finalmente se han obtenido 70 contado también todos aquellos que ofrecen la posibilidad de contraflujo.

Sin embargo, es muy razonable que haya una gran cantidad de arcos por los que no se circule. Analizando la situación, todos los vehículos quieren desplazarse desde los 25 nodos iniciales hasta los nodos 26 y 27. Por ejemplo, sería muy raro, que según los vehículos se acercasen a la zona de evacuación hubiera vehículos saliendo de los mismos, es por eso que los flujos desde los nodos de evacuación (26 y 27) hacia el resto son nulos.

Otra situación que explica los arcos sin flujo es que los vehículos no quieren alejarse de la zona de evacuación, por lo que en los nodos alejados del mismo (1,2...) no tendrán contraflujos, en incluso, en muchos casos, los vehículos solo usarán un arco, aunque tengan varios arcos disponibles pues las rutas para llegar a los puntos de evacuación serían más largas (como por ejemplo el nodo 1, que tiene 3 posibilidades, con los nodos 2, 3 y 7, y todos los vehículos circulan por este último)

¹⁴⁹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Otra cosa que se observa en estos resultados es que la zona más saturada se encuentra en la parte media, y sobre todo final de la red de transporte vial. Es decir, los arcos que llevan a los nodos 26 y 27 ($23 \rightarrow 26$, $25 \rightarrow 26$ y $15 \rightarrow 27$) se encuentran muy congestionados. De hecho, si se observa su flujo, todos estos arcos se encuentran considerablemente por encima de su capacidad, sin embargo, ¿es esto posible?

Sí, una de las peculiaridades que tiene el modelo de Frank-Wolfe es que no limita la capacidad al flujo máximo del arco, si no que en cambio penaliza mucho el circular por él. Y esto se refleja en el incremento porcentual que presentan todos estos arcos (1050%, 1031% y 853%, respectivamente). Esto se presenta de una manera muy clara en la Figura 49, presentada a continuación.

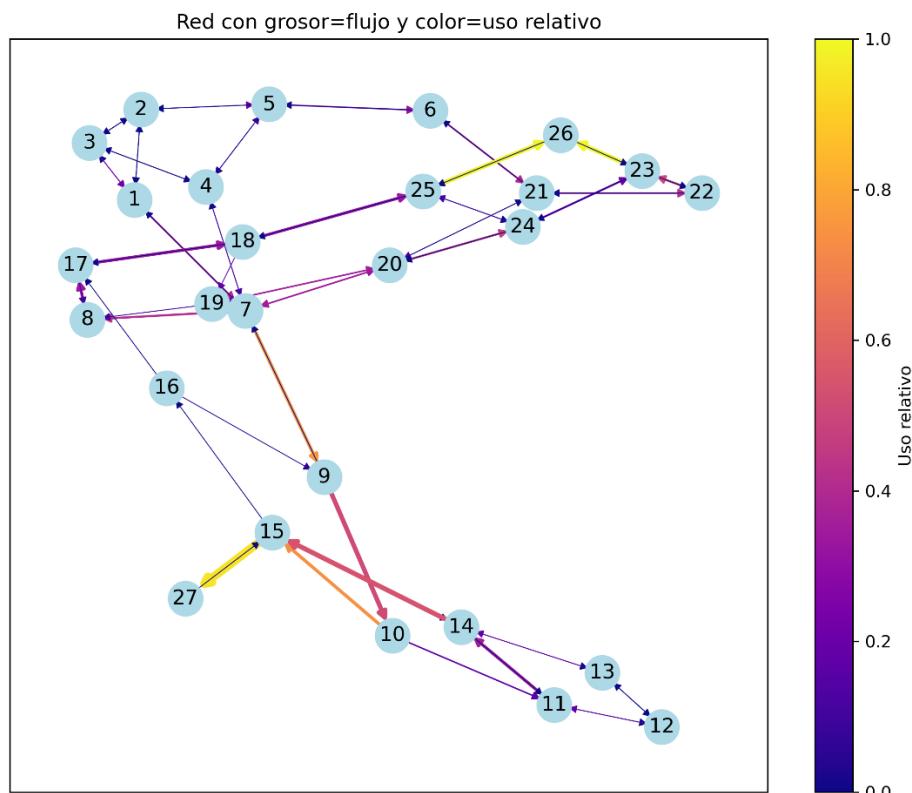


Figura 49. Diagrama de flujos resultante para Ceuta con el modelo UE¹⁵⁰

A parte de los arcos más cercanos a la evacuación, también cabe mencionar que otros arcos que rango medio, como por ejemplo el $14 \rightarrow 15$ o el $9 \rightarrow 10$ también se encuentran considerablemente atascados.

¹⁵⁰ Elaboración propia, (2025)

Con esto ya establecido, se procede a comentar cuales son los resultados finales del código de Frank-Wolfe para equilibrio de usuario en Ceuta. El resultado final de la función objetivo ha sido 1867.52 veh*h, se recuerda que la función objetivo de este modelo se muestra en la ecuación 2 de este trabajo.

Sin embargo, este resultado es poco útil cuando se trata de comparar modelos, pues tal y como se estableció en el capítulo anterior, la función objetivo que se emplea en el modelo de optimización del sistema cambia con respecto a la de equilibrio de usuario. Por ello, se presenta la suma total de tiempo de viaje, que se obtiene de la siguiente fórmula:

$$T_v = \sum_{a \in A} x_a * t_a \quad (11)$$

Que se obtiene haciendo el producto, y la posterior suma de las columnas 2 y 4 presentadas en la Tabla 7. Y el resultado obtenido es de 4.634 veh*h, el cual se comparará con el del modelo de optimización del sistema.

Finalmente, aunque no menos importante, se procede a dar un tiempo aproximado de evacuación. El tiempo de evacuación se calcula con la fórmula 12, que se muestra a continuación:

$$T_e = \frac{\sum_{\forall N} V}{\sum_{a \in E} C_a} + \max(t_a) \quad (12)$$

Es decir, hay un tiempo mínimo de evacuación para esta configuración, que depende del número de vehículos totales (20.275 para este caso), y de la capacidad de absorción de los nodos de evacuación 26 y 27 (3.600 veh/h para el 26 y 3.600 veh/h para el 27, un total de 7.200veh/h).

Esto lleva a un tiempo mínimo de 2,82h, al cual se habrá de sumar el máximo tiempo que haya en cualquiera de los arcos, que en este caso sucede en el arco 15 → 17, con 12,6 min de tiempo en ese arco, lo cual son 0,21h, haciendo que el tiempo total aproximado de evacuación sea de 3,03h.

Se procede ahora a realizar el mismo análisis, pero empleando las variaciones propias del modelo Frank-Wolfe adaptado al segundo principio de Wardrop, y haciendo de este, un modelo de optimización del sistema. Nuevamente, el código del mismo se encuentra

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

adjunto en la sección de anexos de este trabajo. A continuación, se muestra la Tabla 8, en la que se presenta los resultados de los flujos y los tiempos por arco.

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(1,2)	0	1800	2,0	0
(1,3)	0	1800	0,5	0
(1,7)	2006	1800	0,9	23
(2,1)	0	1800	2,0	0
(2,3)	0	1800	1,0	0
(2,5)	978	1800	0,3	1
(3,1)	965	1800	0,5	1
(3,2)	0	1800	1,0	0
(3,4)	201	1800	0,5	0
(7,1)	0	1800	0,7	0
(7,4)	0	1800	1,0	0
(7,8)	2204	1800	1,5	34
(7,9)	3929	1800	9,0	341
(7,20)	1899	1800	1,4	19
(5,2)	0	1800	0,3	0
(5,4)	569	1800	0,4	0
(5,6)	1559	1800	0,5	8
(4,3)	0	1800	0,5	0
(4,5)	636	1800	0,4	0
(4,7)	836	1800	1,0	1
(6,5)	0	1800	0,4	0
(6,21)	1948	1800	1,3	21
(21,6)	0	1800	1,1	0
(21,20)	549	1800	0,2	0
(21,22)	2162	1800	1,6	31
(8,7)	2106	1800	1,5	28
(8,17)	3680	3600	1,2	16

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(9,7)	0	1800	2,0	0
(9,10)	5337	3600	0,8	72
(20,7)	1823	1800	1,4	16
(20,19)	1475	1800	0,1	7
(20,21)	0	1800	0,2	0
(20,24)	2286	1800	1,7	39
(17,8)	1054	3600	1,0	0
(17,18)	4078	3600	0,2	25
(19,8)	1475	3600	0,3	0
(19,20)	1823	1800	0,1	16
(10,11)	2116	3600	0,4	2
(10,15)	3436	1800	1,3	199
(16,9)	814	5400	0,4	0
(16,17)	0	3600	0,1	0
(11,12)	0	1800	2,2	0
(11,14)	4065	3600	0,4	24
(15,14)	0	3600	0,5	0
(15,16)	0	5400	0,2	0
(15,27)	9886	3600	12,6	853
(12,11)	936	1800	2,2	1
(12,13)	0	1800	0,7	0
(14,11)	0	3600	0,4	0
(14,13)	0	1800	2,2	0
(14,15)	6014	3600	1,0	117
(13,12)	0	1800	0,7	0
(13,14)	936	1800	2,2	1
(27,15)	0	3600	1,3	0
(18,17)	407	3600	0,2	0
(18,19)	903	1800	1,1	1

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(18,25)	3680	3600	0,5	16
(25,18)	0	3600	0,4	0
(25,24)	0	3600	0,4	0
(25,26)	5185	1800	5,4	1033
(24,20)	0	1800	1,2	0
(24,23)	2523	3600	0,2	4
(24,25)	870	3600	0,4	0
(22,21)	0	1800	1,2	0
(22,23)	2535	1800	0,6	59
(23,22)	0	1800	0,4	0
(23,24)	319	3600	0,2	0
(23,26)	5204	1800	5,5	1048
(26,23)	0	1800	0,5	0
(26,25)	0	1800	0,5	0

Tabla 8. Resultados obtenidos para el modelo System-Optimization para Ceuta¹⁵¹

Observando la Tabla 8 de resultados del modelo de optimización del sistema se puede apreciar que los resultados son muy similares a los obtenidos con el modelo anterior, pero no iguales.

Como ya se mencionado, este modelo trata de minimizar el tiempo total del sistema, y esto puede suponer que haya más flujo (de hecho, si se suma la segunda columna de la tabla 8 se obtienen 95.407, frente a los 91.921 de la tabla 7), pero este incremento se verá compensado por la disminución de tiempos, ya que algunos arcos no se verán tan congestionados como en el modelo anterior.

A continuación, se presenta la Figura 50, en la cual se muestra el diagrama de la red de transporte de Ceuta con los flujos por arco.

¹⁵¹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

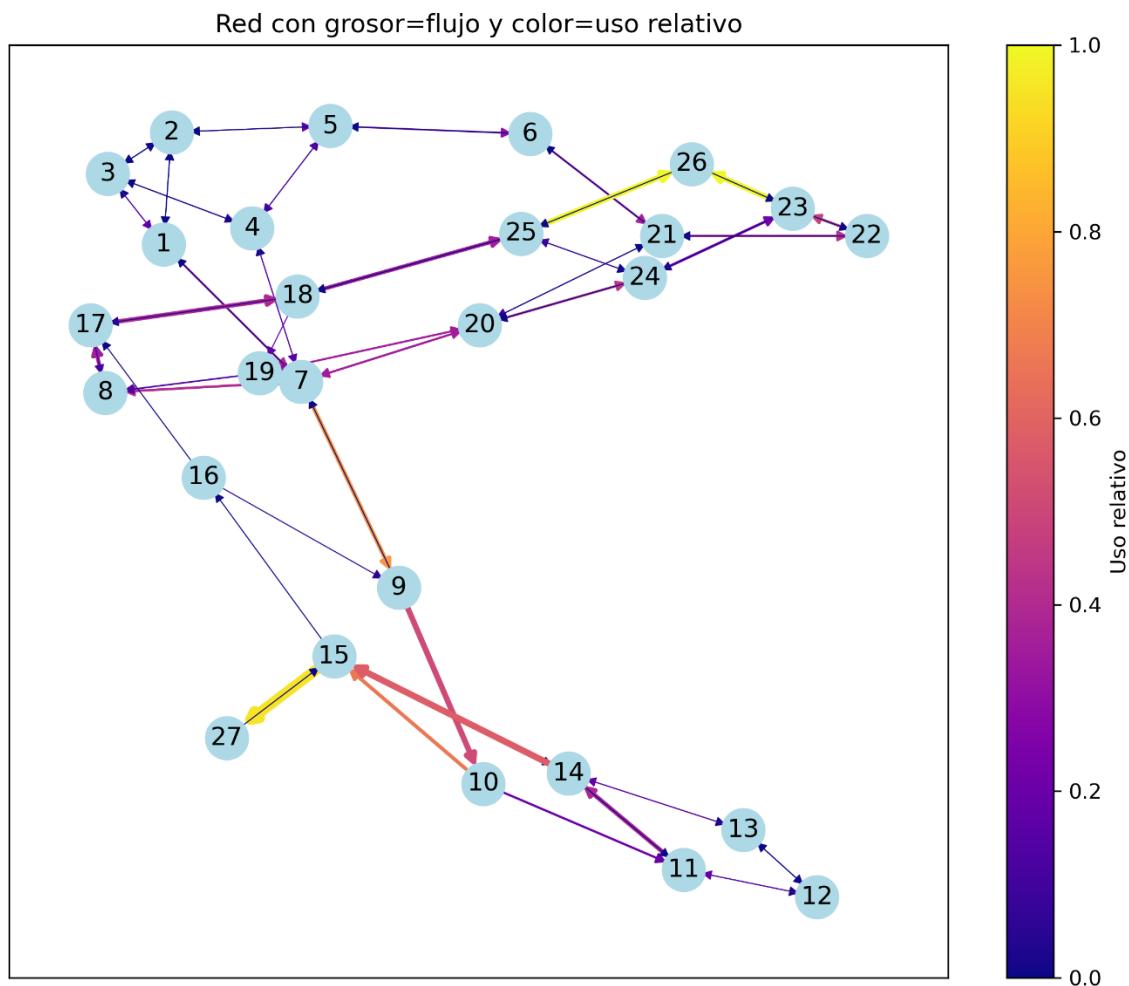


Figura 50. Diagrama de flujos resultante para Ceuta con el modelo SO¹⁵²

En líneas generales el diagrama se muestra casi igual, salvo pequeños incrementos en algunos arcos, como puede ser el caso del $10 \rightarrow 15$ (que aumenta de 3.436 a 3.827). No obstante, las líneas que llevan a nodos de evacuación apenas varían pues se siguen teniendo que evacuar el mismo número de vehículos por dichos nodos.

En este caso, la función objetivo coincide con el tiempo de viaje, convergiendo en un total de 4.622 veh*h, una cifra inferior a los 4.634 veh*h del modelo de UE, por lo que finalmente se trabajará sobre este modelo para optimizar el plan de evacuación.

Y al igual que sucedía con el modelo de User-Equilibrium, el número de vehículos es de 20.275, y la capacidad de evacuación es 7.200 veh/h, por lo que el tiempo mínimo en el plan de evacuación sigue siendo 2,82 horas, y dado que el arco $15 \rightarrow 27$ sigue teniendo el

¹⁵² Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

el mismo número de vehículos, y por ende el mismo tiempo de flujo, esto hace que el tiempo total aproximado del plan de evacuación sea de 3,03 horas.

Sin embargo, se propone mejorar un poco este tiempo a base de realizar una serie de suposiciones. Hasta ahora se había asumido que todos los ciudadanos deberán de evacuar la ciudad empleando su vehículo, sin embargo, esto puede no ser cierto, especialmente para aquellos ciudadanos que se encuentren cerca de la zona portuaria, y a la que podrían acceder andando.

Es por ello que, en la Figura 51 se muestran todos aquellos nodos que se consideran que podrían ir andando.

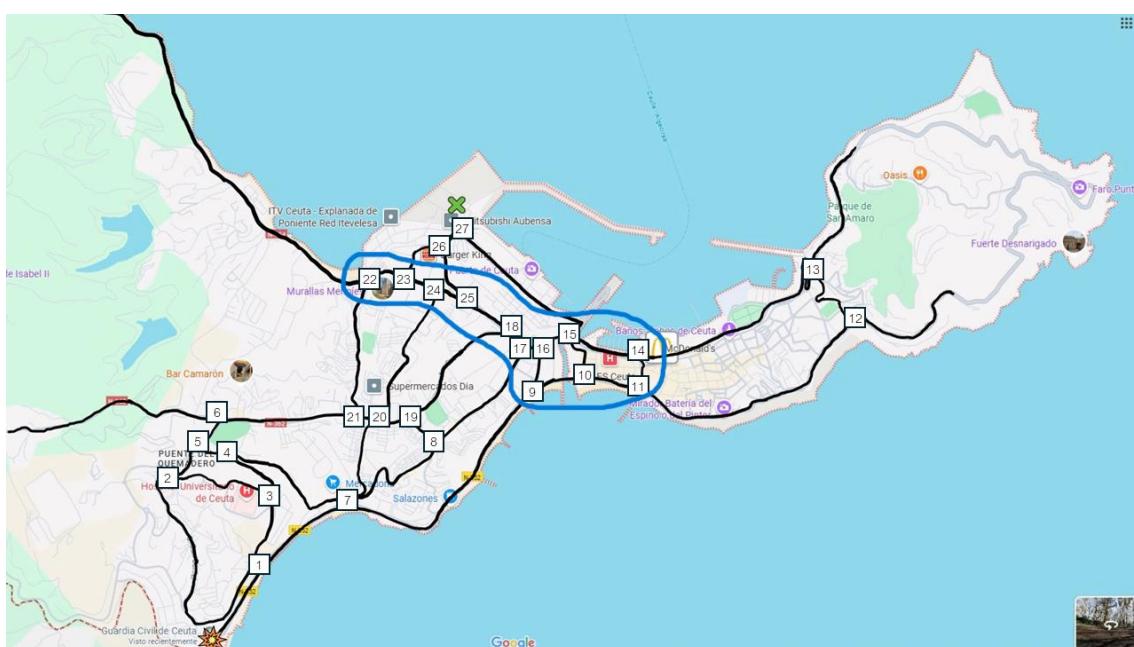


Figura 51. Red de transporte vial de Ceuta con la selección de nodos que podrían ir andando¹⁵³

Desde el nodo 11, el más alejado de la selección hay un total de 27 minutos andando hasta el nodo 27, lo cual hace pensar que asignar a todos los residentes en esta área a andar hasta el puerto puede ser una buena idea de cara a rebajar los tiempos de evacuación. Se ha de tener en cuenta que no se está considerando, por simplicidad del estudio, ningún modelo de congestión para viandantes.

Así mismo, tampoco se está considerando el potencial impacto que pudieran tener los pasos de peatón en bloquear la circulación de los vehículos. De hecho, lo razonable sería

¹⁵³ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

que hubiera algún agente de tráfico alternando el tráfico de personas y el de coches de manera que se pudiera compatibilizar a evacuación.

Con estas nuevas condiciones se vuelve a ejecutar el modelo obteniendo el diagrama presentado en la Figura 52.

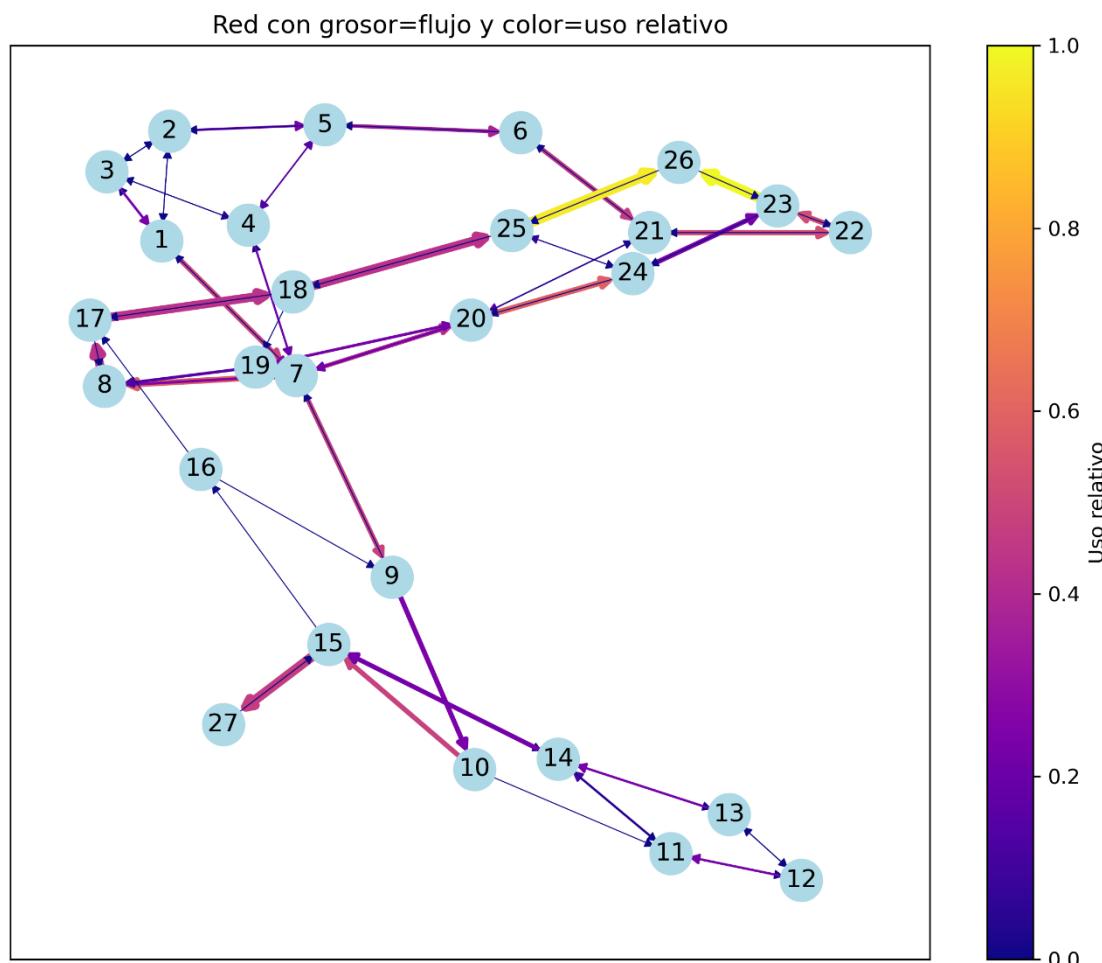


Figura 52. Diagrama de flujos resultante para Ceuta con el modelo SO tras la asignación de viandantes¹⁵⁴

En la Figura anterior se puede apreciar una clara mejoría en el uso relativo de los arcos, particularmente en aquellos que tienen como objetivo llegar a ser evacuados en el nodo 27. Con esta nueva configuración de viajes, la función objetivo y el tiempo de viaje convergen en 1166 veh*h, una mejora significativa (-74,8%), así mismo, el tiempo de evacuación también experimenta una disminución puesto que los vehículos a evacuar

¹⁵⁴ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

ahora son 11.972, dejando el tiempo mínimo en 1,66 horas y el tiempo de evacuación total en 1,70 horas (-43,9%).

Finalmente se estuvo probando a variar ligeramente los nodos de destino de algunos nodos de origen, por ejemplo, cambiando el nodo 1 al 27 en lugar del 26, y tras un largo rato de prueba y error, se obtuvo que cambiando el nodo 7 al 27 y el nodo 8 al 26 se lograba reducir ligeramente el tiempo de viaje a 1080 veh*h manteniendo el tiempo de evacuación máximo aproximado en 1,70 horas, por lo que se considerará esto como el plan de evacuación óptimo para la ciudad de Ceuta.

Además, la cercanía que Ceuta tiene con la España peninsular hace que la existencia de barcos no sea un factor limitante en el plan de evacuación.

A continuación, se procede a realizar los mismos pasos con la ciudad autónoma de Melilla, comenzando por la presentación de resultados de flujos y tiempos para los arcos en el modelo de equilibrio de usuario, mostrados en la Tabla 9.

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(1,2)	0	1800	2,4	0
(1,3)	11	1800	1,9	0
(1,5)	715	3600	0,4	0
(2,1)	0	1800	2,4	0
(2,3)	14	1800	0,4	0
(2,13)	351	1800	1,3	0
(3,1)	0	1800	1,9	0
(3,2)	0	1800	0,4	0
(3,4)	14	1800	0,3	0
(3,16)	1112	1800	2,0	2
(5,1)	0	3600	0,4	0
(5,6)	1431	3600	0,5	0
(5,8)	0	1800	2,9	0
(13,2)	0	1800	1,3	0
(13,4)	0	1800	1,3	0

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(13,18)	1505	1800	2,7	7
(4,3)	96	1800	0,3	0
(4,6)	0	3600	1,2	0
(4,7)	5	1800	1,2	0
(4,12)	87	1800	1,6	0
(4,13)	1154	1800	1,4	3
(16,3)	0	1800	1,9	0
(16,15)	80	1800	0,4	0
(16,18)	1820	1800	1,8	16
(6,4)	1	3600	1,2	0
(6,5)	0	3600	0,5	0
(6,7)	2373	3600	0,6	3
(7,4)	0	1800	1,2	0
(7,6)	0	3600	0,5	0
(7,8)	3069	3600	1,6	8
(7,12)	801	1800	1,4	1
(12,4)	0	1800	1,6	0
(12,7)	1	1800	1,4	0
(12,15)	2074	1800	0,6	26
(8,7)	0	3600	1,4	0
(8,9)	1147	1800	1,6	2
(8,10)	3140	1800	1,1	139
(8,14)	15	1800	1,6	0
(9,8)	0	1800	1,6	0
(9,10)	23	1800	0,5	0
(9,11)	2908	1800	4,1	102
(10,8)	0	1800	0,5	0
(10,9)	1172	1800	0,5	3
(10,11)	3287	1800	4,8	167

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(10,19)	53	1800	1,7	0
(14,8)	16	1800	1,6	0
(14,15)	24	1800	0,2	0
(14,17)	3746	1800	0,9	281
(11,9)	0	1800	2,0	0
(11,10)	0	1800	1,8	0
(11,20)	19	1800	0,5	0
(11,24)	11277	1800	208,9	23106
(19,10)	21	1800	1,7	0
(19,17)	0	3600	0,4	0
(19,20)	2940	1800	1,5	107
(19,21)	2884	1800	2,4	99
(20,11)	3674	1800	1,9	260
(20,19)	30	1800	0,7	0
(20,21)	492	1800	2,2	0
(24,11)	0	1800	0,9	0
(24,23)	944	1800	0,8	1
(15,12)	0	1800	0,5	0
(15,14)	2875	1800	0,5	98
(15,16)	270	1800	0,4	0
(18,13)	0	1800	2,5	0
(18,16)	0	1800	1,6	0
(18,17)	10	1800	1,3	0
(18,22)	3895	1800	4,9	329
(17,14)	0	1800	0,2	0
(17,18)	16	1800	1,3	0
(17,19)	4512	3600	0,5	37
(22,18)	0	1800	1,1	0
(22,21)	2	1800	0,4	0

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(22,23)	9149	1800	206,3	10013
(21,19)	0	1800	1,2	0
(21,20)	6	1800	2,2	0
(21,22)	4419	1800	2,7	545
(23,22)	0	1800	2,0	0
(23,24)	274	1800	0,8	0
(23,25)	10334	1800	147,6	16296
(25,23)	0	1800	0,9	0

Tabla 9. Resultados obtenidos para el modelo User-Equilibrium para Melilla¹⁵⁵

Como ya se anticipó en el capítulo anterior, el hecho de que fuese una red mallada que cuenta con un total de 81 arcos incluyendo ambos sentidos iba a ayudar a que haya un flujo más interconectado y esto se aprecia en que apenas hay arcos que posean incrementos en sus tiempos porcentuales en sus tiempos de flujos.

Sin embargo, aquellos arcos que, si poseen incrementos, sufren unos incrementos porcentuales enormemente grandes, en esta situación se encuentran los arcos 11→24, 22→23 y 23→25, todos ellos se ubican en la parte final del recorrido que actualmente está haciendo de cuello de botella.

En este aspecto resulta muy clarificador ver la Figura 53, en la que se muestra el diagrama de la red de transporte vial de Melilla con los flujos resultantes de ejecutar el modelo de “User-Equilibrium”, tal y como se presenta a continuación.

¹⁵⁵ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

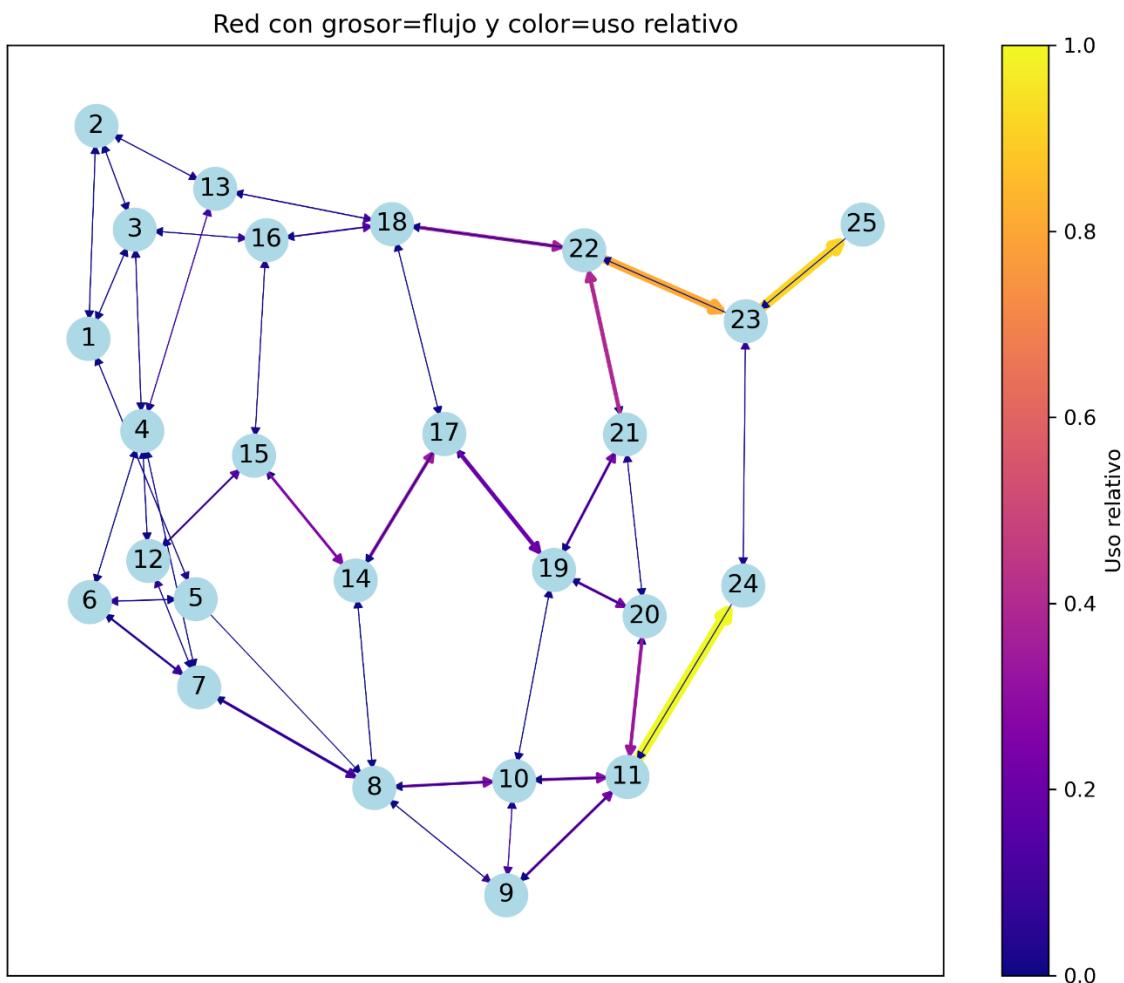


Figura 53. Diagrama de flujos resultante para Melilla con el modelo UE¹⁵⁶

Por otro lado, en cuanto a valores generales se refiere, el modelo de UE para Melilla tiene un valor de función objetivo que converge en 20.848 veh*h, y muestra un tiempo de viaje de 98.227 veh*h.

Este valor no es de extrañar dado que el plan de evacuación asume que para ejecutar la evacuación se debe recorrer casi toda la ciudad autónoma de norte a sur, por lo que las distancias son mucho mayores que en Ceuta.

Este plan supone una evacuación total de 20.940 vehículos (valor muy similar a Ceuta) a través de un flujo de nodos de salida de 5.400 veh/h (pues el nodo 24 tiene 2 arcos de 1.800 y el nodo 25 solamente posee 1 de 1.800).

¹⁵⁶ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Esto lógicamente supone que habrá un aumento del tiempo mínimo del plan de evacuación a 3,88 horas, sin embargo, lo más terrible de esta primera simulación se encuentra en que el tiempo aproximado total para el plan de evacuación es de 7,36 horas, debida a que el tiempo en el arco 22→23 es de 206 minutos.

Y de la misma manera que se hizo con el plan de Ceuta se hace con el plan de Melilla, a continuación, se presenta la Tabla 10 en la que se muestran los resultados de flujos y tiempos para los arcos de la red vial de Melilla tras ejecutar el modelo de optimización del sistema.

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(1,2)	0	1800	2,4	0
(1,3)	108	1800	1,9	0
(1,5)	618	3600	0,4	0
(2,1)	0	1800	2,4	0
(2,3)	141	1800	0,4	0
(2,13)	224	1800	1,3	0
(3,1)	0	1800	1,9	0
(3,2)	0	1800	0,4	0
(3,4)	180	1800	0,3	0
(3,16)	1074	1800	2,0	2
(5,1)	0	3600	0,4	0
(5,6)	1334	3600	0,5	0
(5,8)	0	1800	2,9	0
(13,2)	0	1800	1,3	0
(13,4)	0	1800	1,3	0
(13,18)	1214	1800	2,6	3
(4,3)	0	1800	0,3	0
(4,6)	0	3600	1,2	0
(4,7)	38	1800	1,2	0
(4,12)	496	1800	1,6	0
(4,13)	991	1800	1,3	1

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(16,3)	0	1800	1,9	0
(16,15)	712	1800	0,4	0
(16,18)	2065	1800	2,0	26
(6,4)	17	3600	1,2	0
(6,5)	0	3600	0,5	0
(6,7)	2260	3600	0,6	2
(7,4)	0	1800	1,2	0
(7,6)	0	3600	0,5	0
(7,8)	3154	3600	1,6	9
(7,12)	652	1800	1,4	0
(12,4)	0	1800	1,6	0
(12,7)	17	1800	1,4	0
(12,15)	2318	1800	0,7	41
(8,7)	0	3600	1,4	0
(8,9)	1194	1800	1,6	3
(8,10)	3200	1800	1,2	150
(8,14)	173	1800	1,6	0
(9,8)	0	1800	1,6	0
(9,10)	177	1800	0,5	0
(9,11)	3030	1800	4,5	120
(10,8)	0	1800	0,5	0
(10,9)	1401	1800	0,5	6
(10,11)	3257	1800	4,7	161
(10,19)	309	1800	1,7	0
(14,8)	194	1800	1,6	0
(14,15)	295	1800	0,2	0
(14,17)	3685	1800	0,9	264
(11,9)	0	1800	2,0	0
(11,10)	0	1800	1,8	0

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(11,20)	208	1800	0,5	0
(11,24)	11264	1800	207,9	23002
(19,10)	263	1800	1,7	0
(19,17)	0	3600	0,4	0
(19,20)	3027	1800	1,6	120
(19,21)	3035	1800	2,7	121
(20,11)	3757	1800	2,1	285
(20,19)	371	1800	0,7	0
(20,21)	367	1800	2,2	0
(24,11)	0	1800	0,9	0
(24,23)	2294	1800	1,2	40
(15,12)	0	1800	0,5	0
(15,14)	3106	1800	0,6	133
(15,16)	1185	1800	0,4	3
(18,13)	0	1800	2,5	0
(18,16)	0	1800	1,6	0
(18,17)	87	1800	1,3	0
(18,22)	3904	1800	4,9	332
(17,14)	0	1800	0,2	0
(17,18)	148	1800	1,3	0
(17,19)	4396	3600	0,5	33
(22,18)	0	1800	1,1	0
(22,21)	12	1800	0,4	0
(22,23)	9162	1800	207,4	10069
(21,19)	0	1800	1,2	0
(21,20)	29	1800	2,2	0
(21,22)	4432	1800	2,7	551
(23,22)	0	1800	2,0	0
(23,24)	1636	1800	0,9	10

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Arco	Flujo por arco (veh)	Capacidad (veh/h)	Tiempo por arco (min)	Incremento tiempo (%)
(23,25)	10334	1800	147,6	16296
(25,23)	0	1800	0,9	0

Tabla 10. Resultados obtenidos para el modelo System-Optimization para Melilla¹⁵⁷

La verdad es que se aprecian cambios en los flujos de los arcos, pero ninguno que afecte de manera reseñable a la tónica general de la red, pues se siguen saturando de manera crítica los arcos 11→24, 22→23 y 23→25, como se aprecia en la Figura 54, presentada adjunta.

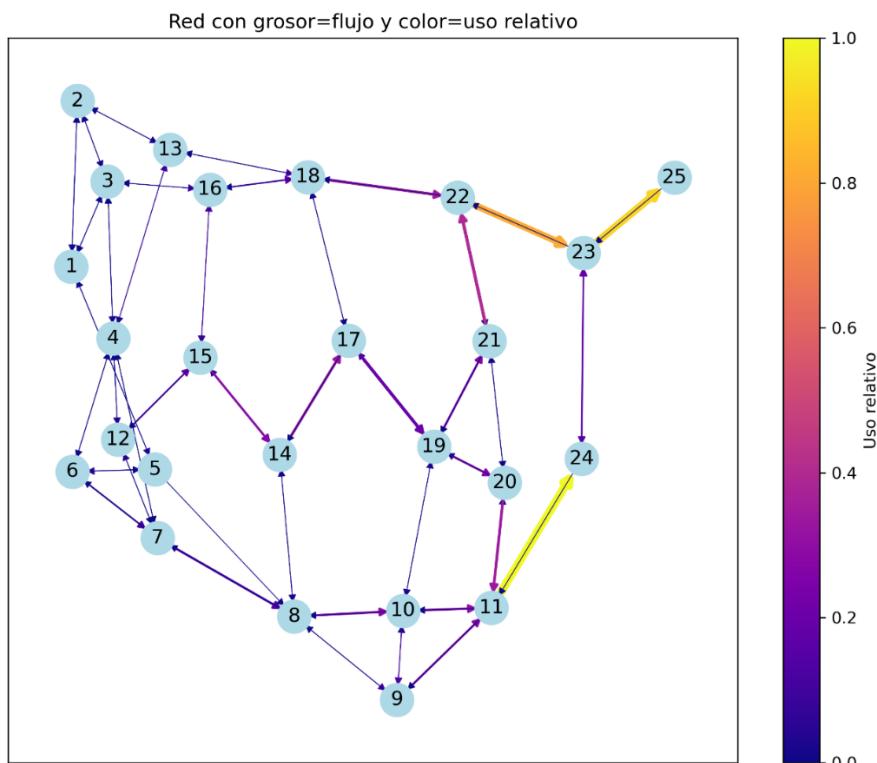


Figura 54. Diagrama de flujos resultante para Melilla con el modelo SO¹⁵⁸

Respecto a los valores del modelo de ejecución, se ha obtenido un resultado minimizado de función objetivo (y de tiempo de viaje) de 98.198 veh*h, menor que el obtenido en el modelo UE. Y respecto al tiempo aproximado de evacuación, se obtiene un resultado ligeramente menor de 7,34 horas.

¹⁵⁷ Elaboración propia, (2025)

¹⁵⁸ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Es por ello que nuevamente se empleará este modelo para tratar de optimizar las horas de evacuación. Huelga decir que un plan de evacuación de 7,34 horas de ejecución es muy largo para una ciudad tan pequeña.

Es por ello que se propone abrir otros dos nuevos puntos de evacuación que inicialmente se habían descartado en el capítulo anterior por ser zonas que pueden correr un cierto peligro a la hora de evacuar, sin embargo, en vista de que la evacuación podría prolongarse tanto que terminaría suponiendo un riesgo a un mayor para la evacuación se propone habilitar el puerto y el aeropuerto como zonas de evacuación.

Por lo tanto, el aeropuerto tendrá en el nodo 13 un nodo de extracción y se le asignarán los nodos colindantes para evacuar a la población por ahí (siendo estos los nodos 2, 3, 4, 12, 15, 16 y 18).

Así mismo, el puerto dispondrá de 3 nodos que están muy cercanos y se considerarán para ir andando hasta ellos (8, 9 y 10) y los nodos 1, 5, 6, 7 y 14 que serán asignados al nodo del puerto (8).

Y el resto de los nodos se mantendrán asignados a los nodos de evacuación, 24 y 25, y por lo tanto se obtiene el siguiente mapa de Melilla, introducido a continuación, en este trabajo como Figura 55.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

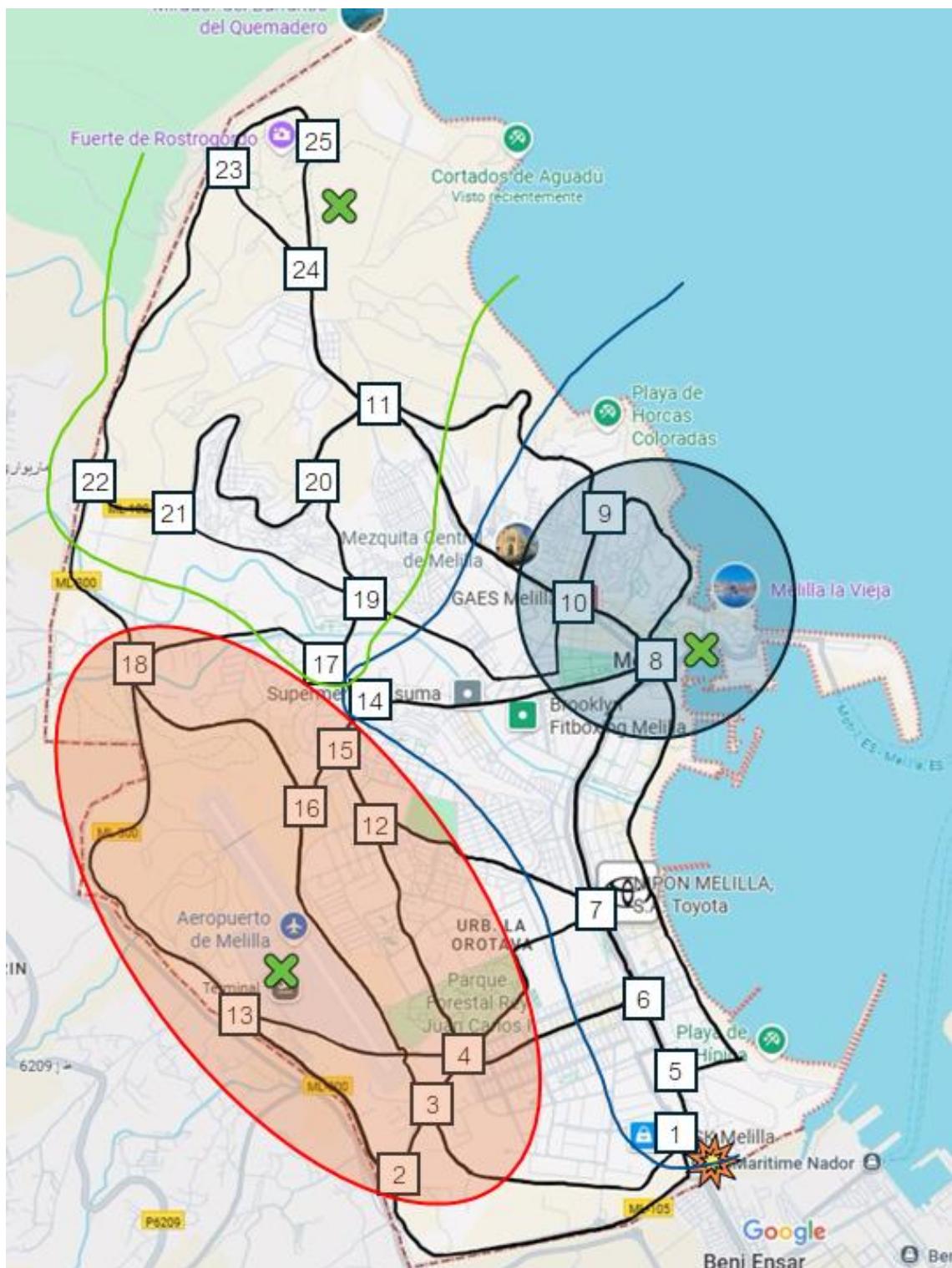


Figura 55. Nuevo reparto de puntos de evacuación en Melilla tras incluir puerto y aeropuerto¹⁵⁹

¹⁵⁹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Con este nuevo esquema se procede a ejecutar el modelo de optimización de sistema esperando unos mejores resultados que en los dos supuestos anteriores. Se presenta en la siguiente Figura 56 los resultados de esta nueva configuración.

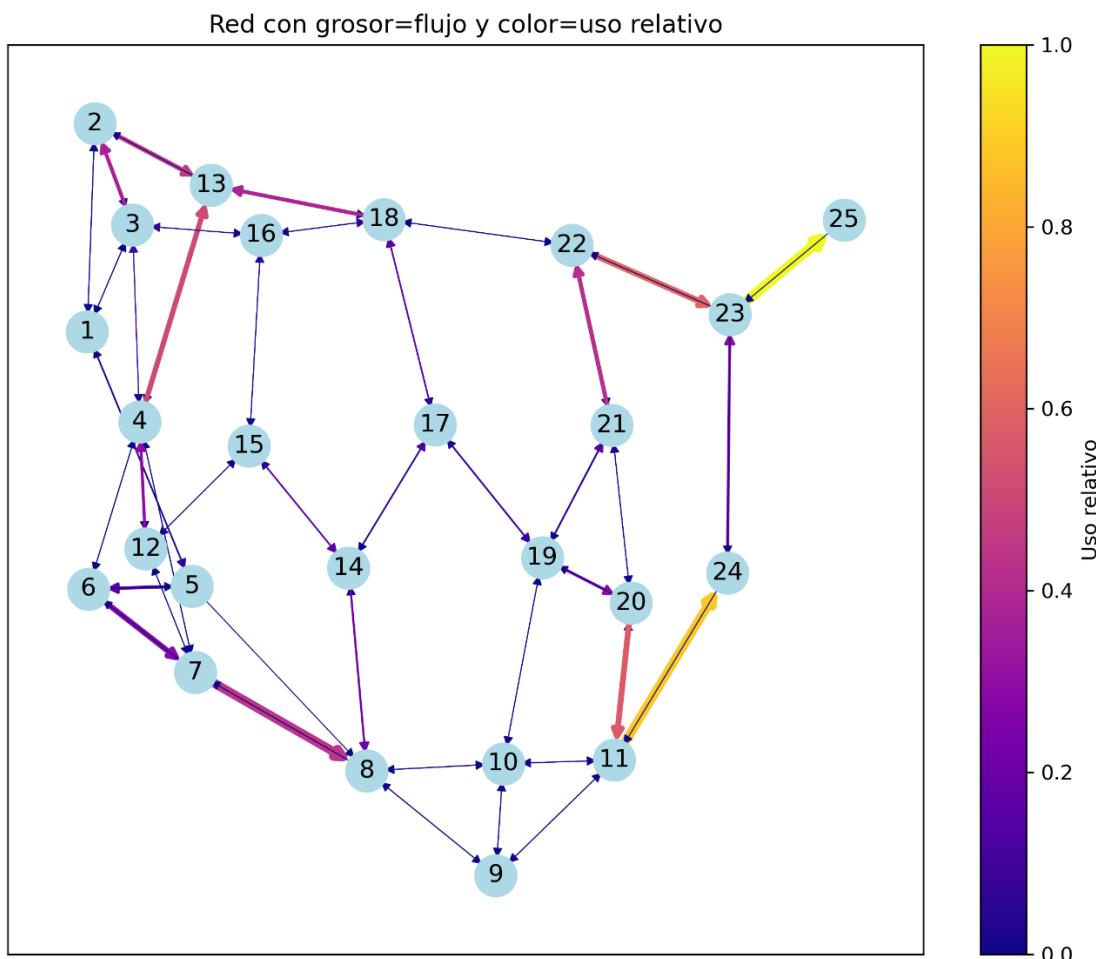


Figura 56. Diagrama de flujos resultante para Melilla con el modelo SO tras la nueva configuración¹⁶⁰

Observando el diagrama se aprecia la notable mejoría al haber liberado carga de congestión en los arcos que se dirigían hacia los puntos de evacuación 24 y 25. De hecho, el arco $11 \rightarrow 24$, que solía estar altamente saturado ahora presenta un uso relativo del orden del 80%.

Y como es lógico, los nodos 8 y 13 ahora presentan arcos con mayor uso entorno a ellos, claros ejemplo de esto son los arcos $4 \rightarrow 13$ y $7 \rightarrow 8$.

¹⁶⁰ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Y esta perceptible mejora se traduce también en unas mejores métricas del modelo, de hecho, la función objetivo (y tiempos de viaje) converge en 1398 veh*h, lo cual supone una mejora del 98,6%.

Si bien esto es muy exagerado se debe al positivo efecto que tiene ubicar los puntos de evacuación en 3 de los 4 puntos cardinales (en el norte está la evacuación por los cortados de Aguadú, al oeste por el aeropuerto y al este por el puerto).

Y a parte de redirigir los viajes hacia los nodos de evacuación más cercanos, lo cual supone distancias de evacuación menores, también se logra descongestionar los arcos saturados inicialmente.

Así mismo, el tiempo de evacuación se ha visto reducido drásticamente a 0,92 horas (0,82 horas de mínimo y 0,10 horas de atasco en arco). Este descenso del 87,5 % se debe a varios factores: El primero de ellos es que se han reducido en 3000 unidades de vehículos, dado que los nodos 8, 9 y 10 van andando. Por otro lado, al haber añadido los nodos 8 y 13, se ha añadido una capacidad de evacuación enorme de evacuación, concretamente en 16.200 vehículos hora gracias a 8 nuevos arcos.

Esto hace que el tiempo mínimo caiga de manera notoria a 0,82 horas, y a este efecto hay que sumarle el impacto de la reducción de congestión, que antes era de 206 minutos y ahora solamente 6 minutos.

Sin duda alguna, y obviando que este es un ejercicio teórico en condiciones ideales, este tiempo de evacuación sería un éxito. No obstante, cabe destacar que Melilla está a 200 km de la España peninsular y esto dificulta en gran medida la capacidad de hacer llegar medios de evacuación aéreos y marítimos.

De hecho, el último modelo propone evacuar de manera aérea los nodos 2, 3, 4, 12, 15, 16 y 18 (un total de 19.000 personas), y mandando los 17 aviones Airbus A400M y el A330 MRTT se podría evacuar unas 7.000 personas por hora si solo hay aviones del ejército.

Esto llevaría algo más de 2 horas y media, lo cual ya superaría el tiempo del plan, haciendo de cuello de botella. Y algo similar podría ocurrir con los barcos, si bien es cierto que hay barcos recreativos en el puerto, no son suficientes como para evacuar a toda la población.

Por lo que habría que recurrir a barcos militares que pueden llegar a tardar varias horas solamente en llegar hasta allí, más toda la ayuda posible de barcos que estuvieran por los alrededores como buques cargueros, cruceros y demás navíos recreativos.

4. CONCLUSIONES OBTENIDAS DE LA APLICACIÓN NUMÉRICA DEL PLAN DE EVACUACIÓN

En este apartado del trabajo, el cual ha versado sobre la aplicación numérica del plan de evacuación, ha permitido caracterizar de manera adecuada las redes de transporte de Ceuta y de Melilla, definiendo velocidad libre de circulación, capacidad, longitud y dirección de los arcos.

También se ha establecido los viajes que se deben realizar para llevar a cabo el plan de evacuación mediante la matriz OD, la cual fue construida en base a hipótesis de distribución poblacional en base a la superficie construida y los nodos que la encerraban.

Y finalmente, se ejecutó el algoritmo de Frank-Wolfe, tanto en su modelo tradicional (Equilibrio de Usuario) como su adaptación (Optimización del Sistema) para las dos ciudades, obteniéndose mejores resultados con el segundo en las dos ocasiones.

Tras esto, se procedió a optimizar todavía más los resultados de dicho modelo. Para Ceuta se asumió que la parte más cercana al puerto podía ir caminando desde allí, descongestionando las carreteras para los ciudadanos más alejados de los puntos de evacuación. Obteniendo un tiempo de viaje total de 1080 veh*h, con un tiempo de evacuación aproximado de 1,70 horas.

Y para Melilla se abrieron dos nuevos puntos de evacuación, el puerto (nodo 8) y el aeropuerto (nodo 13), lo cual redujo significativamente los tiempos de viaje totales, así como el tiempo del plan de evacuación, llevándolos a 1398 veh*h y 0,92 horas, respectivamente.

Sin embargo, se quiere dejar constancia de que la lejanía de Melilla respecto al resto de la península puede suponer una desventaja a la hora de evacuar la población, pese a que toda la población haya sido desplazada a los puntos de evacuación puede que los transportes aéreos y marítimos no estén allí, o puede que no todos los que deberían.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Habiendo finalizado el desarrollo y la ejecución numérica del plan de evacuación se procede ahora a hacer un estudio económico del coste de desarrollar dicho plan.

V. ANÁLISIS ECONÓMICO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Habiendo ya realizado la construcción de la red vial, la matriz origen destino y el código para ejecutar el modelo de asignación de rutas de Frank-Wolfe, tanto en su versión tradicional como la modificada para adaptarse al segundo principio de Wardrop para ambas ciudades autónomas.

Se procede ahora a realizar un estudio pormenorizado y comparativo de los resultados obtenidos en las evacuaciones de las dos ciudades autónomas españolas, incluyendo tiempos de evacuación, tiempos de viaje, nodos de evacuación definitivos...

A parte de este análisis, en este capítulo también se entrará en detalle sobre el coste monetario de poder desarrollar este plan de evacuación, incluyendo un desglose de las principales fuentes de costes, así como cálculo del valor actual neto del mismo.

1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS PLANES DE EVACUACIÓN DE CEUTA Y MELILLA

Lo primero que se debe mencionar en este apartado es que, pese a que se va a hacer un análisis comparativo entre ambos planes de evacuación, no se pueden tratar a ambos planes como si fueran exactamente iguales, y por ende los resultados no son extrapolables de un plan a otro y viceversa.

Examinando las condiciones de partida de ambos planes, se puede apreciar que una de las principales variables de este estudio, la población a evacuar es muy similar en ambas poblaciones, siendo de 83.229 personas en la ciudad de Ceuta y de 85.811 para el caso de Melilla. Esto, sin duda alguna, permite que la magnitud de los planes de evacuación sea similar en ambas situaciones y hace que el análisis comparativo aporte un cierto valor a este trabajo.

No obstante, se ha de tener en cuenta, que el principal condicionante de los planes de evacuación de las ciudades autónomas son las redes de transporte viales que se ha diseñado

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

para cada una de las ciudades autónomas, mostradas nuevamente como las Figuras 57 y 58.



Figura 57. Red de transporte vial de Ceuta con nodos¹⁶¹

¹⁶¹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

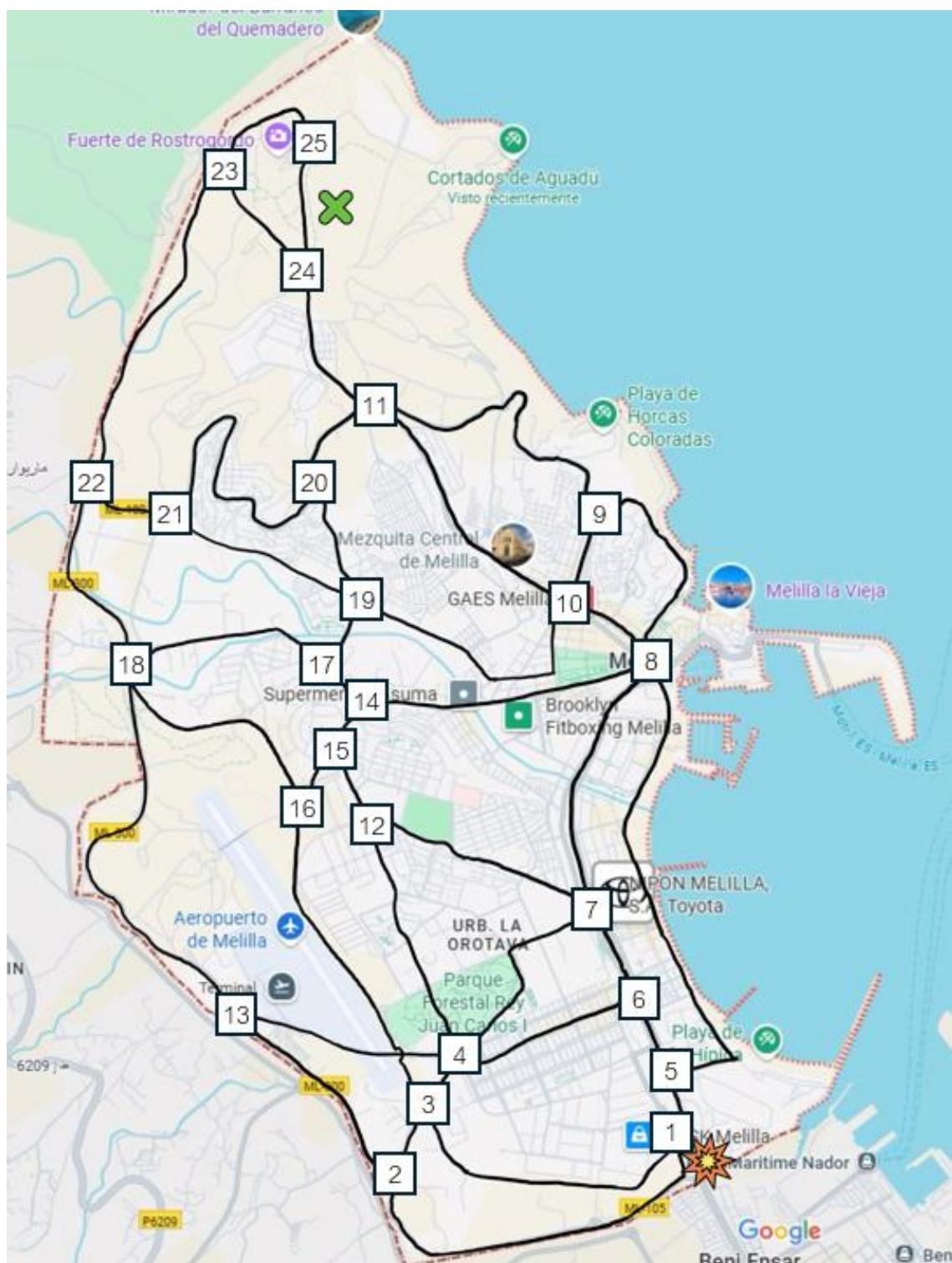


Figura 58. Red de transporte vial de Melilla con nodos¹⁶²

¹⁶² Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Como ya se ha ido mencionando a lo largo del trabajo, Melilla presenta un esquema mallado que, como finalmente se ha corroborado, le ha permitido tener un mejor rendimiento que a Ceuta.

Volviendo a las redes de transporte, Ceuta cuenta 27 nodos y 70 arcos incluyendo aquellos que poseen contraflujo, mientras que la situación de Melilla es mejor, pues cuenta con 25 nodos y 81 arcos. Ese menor número de nodos mientras que posee un mayor número de arcos suele repercutir esa creación de red de malla que es más beneficiosa para la distribución del tráfico. Que de hecho se muestra de manera bastante gráfica en la Figura 59, mostrada a continuación.

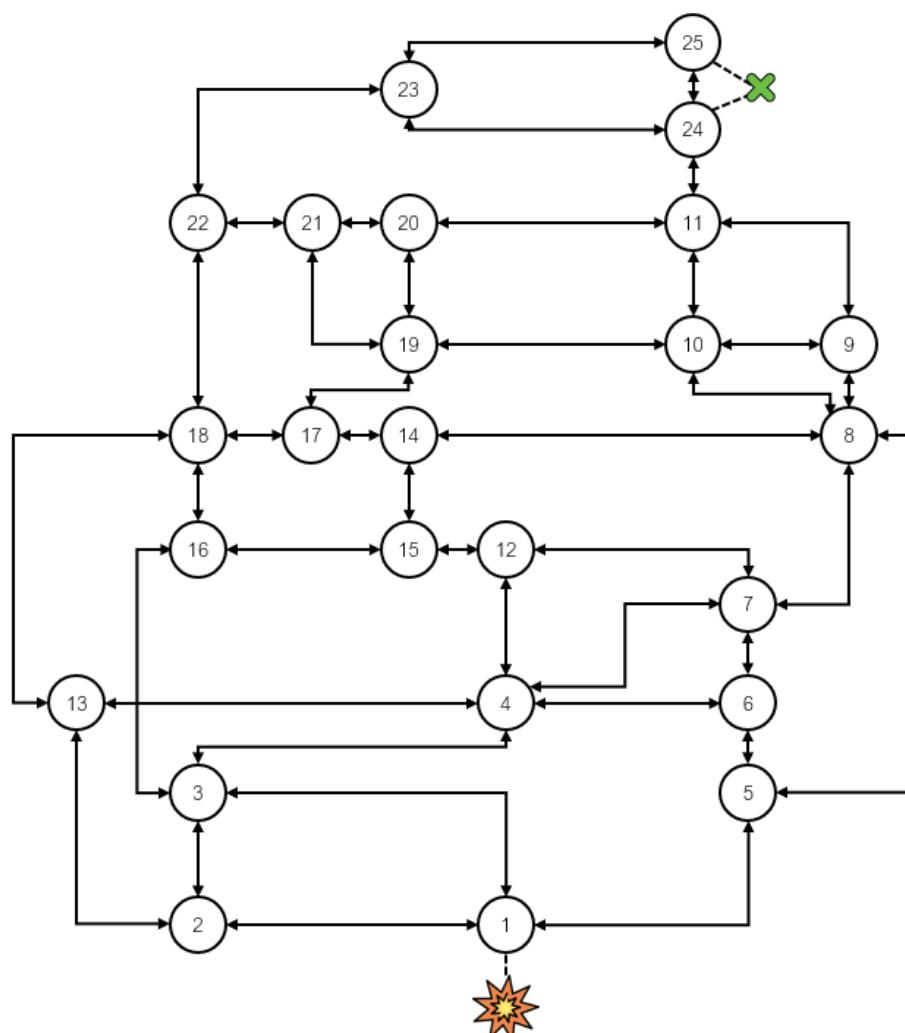


Figura 59. Red de transporte vial de Melilla¹⁶³

¹⁶³ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

En contraposición con la red de Ceuta que posee una distribución de celda cuadriculada, observable en la Figura 60.

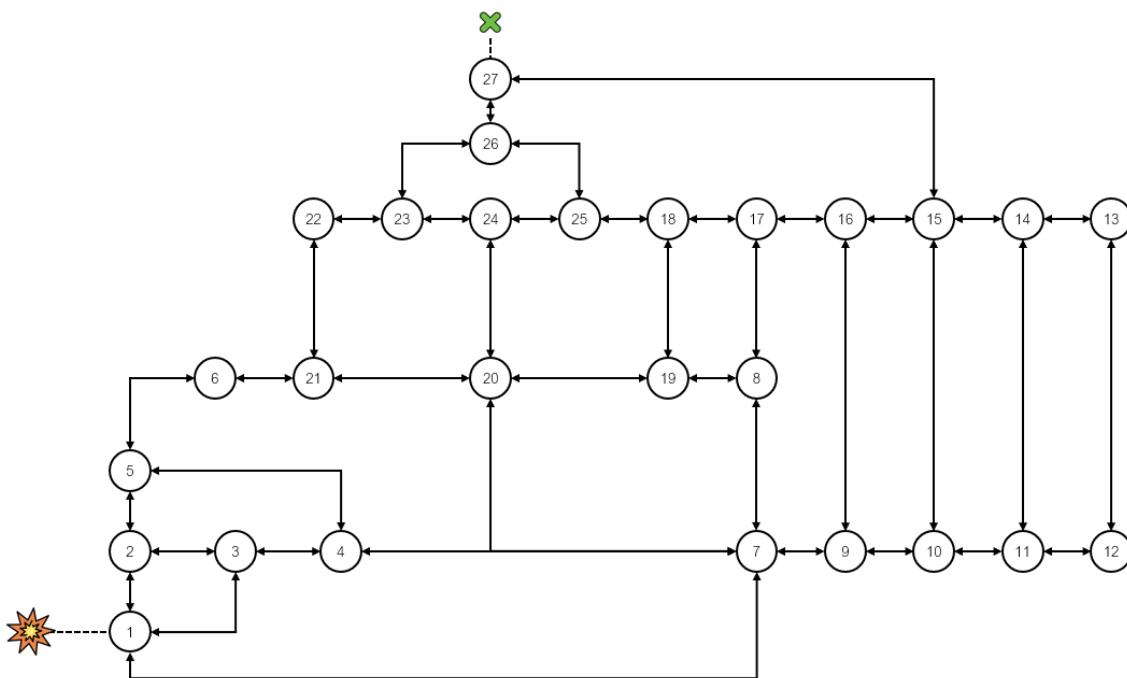


Figura 60. Red de transporte vial de Ceuta¹⁶⁴

Pero si hay algo que compartían ambas redes viales era el modelo de evacuación inicialmente propuesto. Este se trataría de una evacuación mediante vehículo terrestre hasta la zona de evacuación, y a partir de ahí la población sería evacuada en barco.

Inicialmente, la ciudad de Ceuta contaba con una evacuación compuesta por un total de 20.275 vehículos, sin embargo, y como se comentó durante el desarrollo numérico del plan, eso generaba un gran colapso en los arcos cercanos a los nodos de evacuación (26 y 27 de la Figura 60).

Es por ello que se tomó la decisión de cambiar los nodos más cercanos al puerto (9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 24 y 25) de modo de transporte, en lugar de ir en turismo como estaba planeado irán andando hasta el lugar de la evacuación debido a la gran cercanía que tienen al puerto, como se muestra en la Figura 61, mostrada a continuación.

¹⁶⁴ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

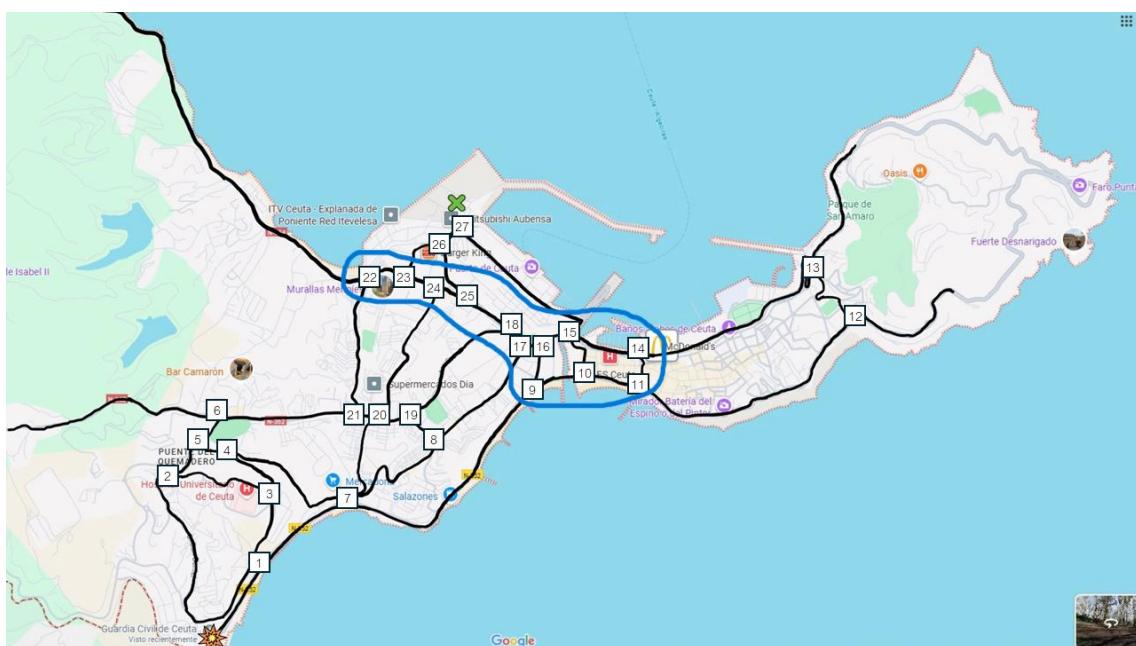


Figura 61. Nodos cambiados de modo de transporte en el plan de Ceuta¹⁶⁵

Esto redujo considerablemente el número de vehículos a evacuar hasta los 11.973. Es decir, 47.890 personas serían evacuadas por vehículo hasta llegar al puerto y 33.209 irían andando hasta la zona de evacuación, y posteriormente todos los habitantes abandonarían la ciudad en barco.

Sin embargo, el enfoque para Melilla fue diferente. Si bien la propuesta inicial trataba de evacuar a toda la población por transporte vial hasta la zona de Rostrogordo, y posteriormente emplear vehículos marítimos para transportarla hasta la península, esto cambió tras ver la saturación que esto generaría.

Por ello, se propuso el fraccionamiento de Melilla en tres zonas. La zona norte (compuesta por los nodos 11, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 25) que seguirá siendo evacuada por turismos hasta la zona de Rostrogordo.

La zona oeste, (que engloba a los nodos 2, 3, 4, 12, 13, 15, 16 y 18), y es donde se ubica el aeropuerto, y será a través del transporte aéreo, previo desplazamiento vehicular hasta el nodo 13 como se evacuará a la población de esta zona.

Y, por último, la zona este (nodos 1, 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 14) será evacuada por barcos en la zona portuaria, y dado el escaso espacio de aparcamiento solo los nodos más alejados del

¹⁶⁵ Elaboración propia. (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

puerto (1, 5, 6, 7 y 14) podrán usar el turismo para acercarse al puerto (nodo 8). Esta nueva distribución se muestra en la Figura 62.

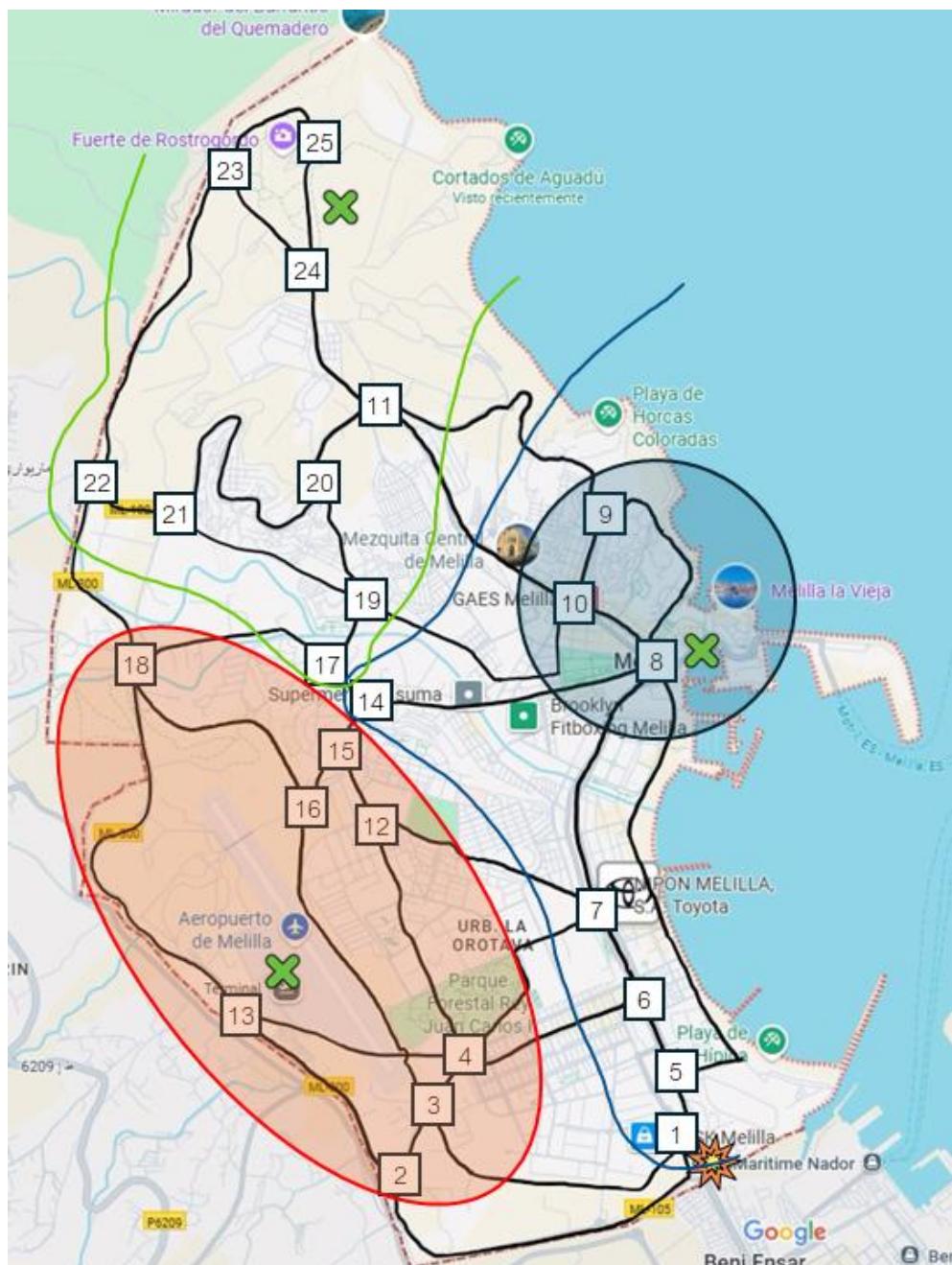


Figura 62. Nuevo reparto de puntos de evacuación en Melilla tras incluir puerto y aeropuerto¹⁶⁶

Con esta nueva distribución, se evacuará 28.309 personas por la zona de Rostrogordo-Cortados de Aguadú, mediante transporte aéreo serían 19.087 personas, y por la zona

¹⁶⁶ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

portuaria se evacuarían 36.358 habitantes, de los cuales 12.634 irían andando hasta su lugar de evacuación.

Y con las nuevas configuraciones se logra obtener los resultados mostrados en las Figuras 63 y 64, presentadas a continuación.

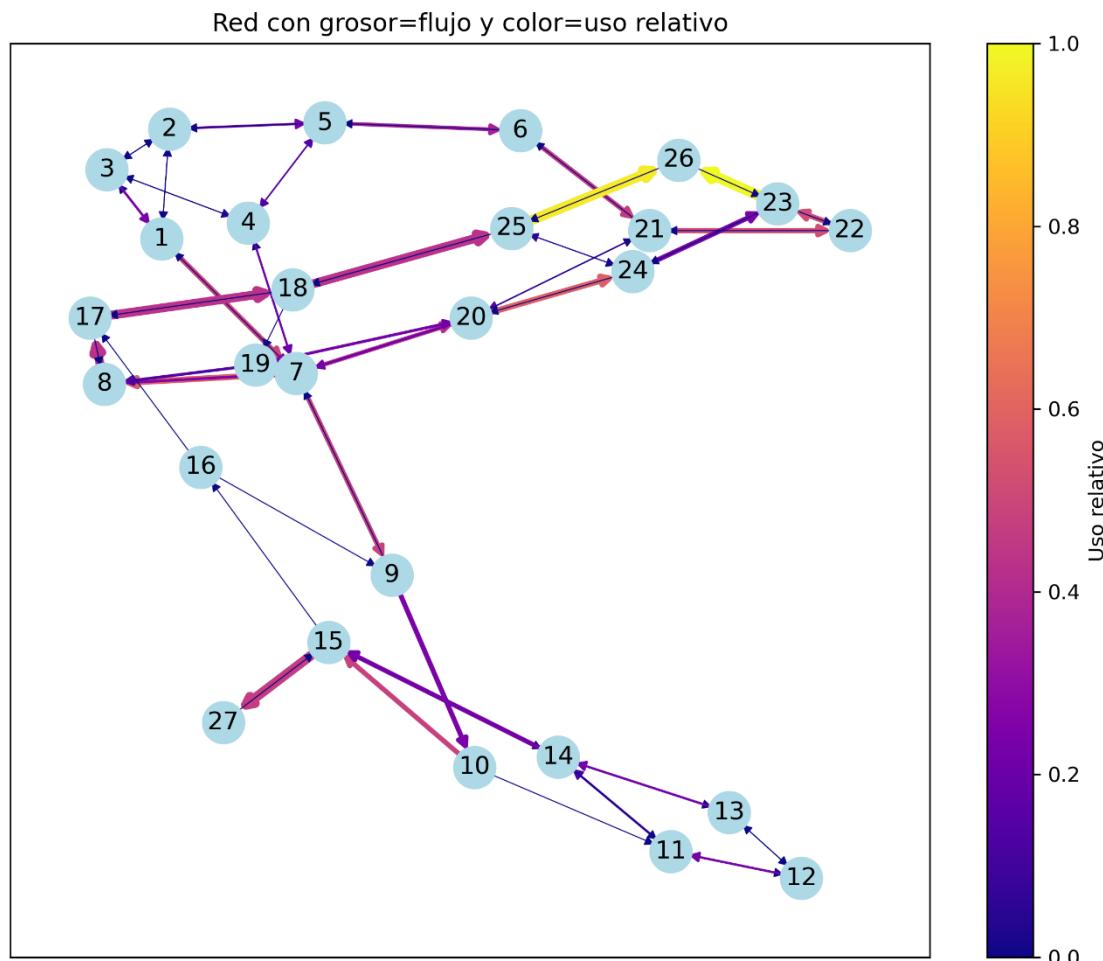


Figura 63. Diagrama de flujo de la red de transporte vial de Ceuta tras la configuración final¹⁶⁷

¹⁶⁷ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

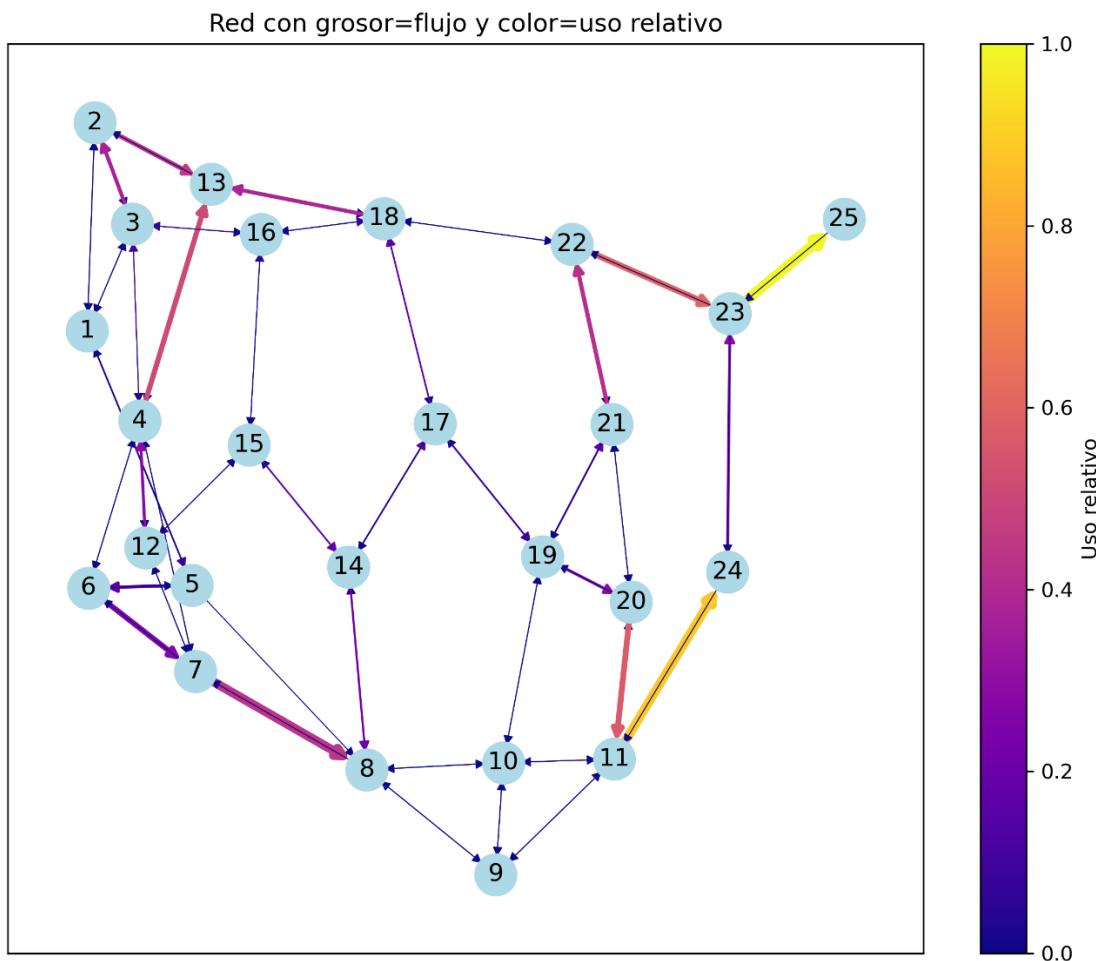


Figura 64. Diagrama de flujo de la red de transporte vial de Melilla tras la configuración final¹⁶⁸

En los diagramas se puede apreciar, como era de esperar, que conforme los vehículos se acercan a los nodos de evacuación los arcos comienzan a saturarse. Esto se aprecia bien en el caso de Melilla para los arcos $23 \rightarrow 25$ y $11 \rightarrow 24$, pero es aún mucho más grave en el caso de Ceuta para los arcos $25 \rightarrow 25$ y $23 \rightarrow 26$.

Y tiene mucho sentido, pues pese a la reducción del número de vehículos gracias a la asignación de evacuados que irán a pie hasta el lugar de evacuación se siguen teniendo que evacuar a más de la mitad de la población con solamente 2 nodos, por lo que la capacidad de absorción de los nodos de evacuación no se ve ampliada.

Contrariamente a esto se encuentra el ejemplo de Melilla, que pese a no haber apenas reducción del número de vehículos (salvo los nodos 8, 9 y 10) ha habido una significativa ampliación de la capacidad de absorción gracias a la apertura de 2 nuevos nodos de

¹⁶⁸ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

evacuación (8 y 13), que encima poseen números arcos (5 arcos van al nodo 8 y 3 arcos van al nodo 13).

Además, ambas gráficas reflejan de manera muy clara la diferencia intrínseca en la estructura de las dos ciudades autónomas. Mientras que Melilla tiene una red mallada con un amplio número de nodos interconectados por arcos, Ceuta tiene una red mucho más restringida en cuanto a interconexiones de arcos se refiere.

Todo ello lleva a que, en la ciudad de Ceuta, el tiempo de viaje, es decir, el número de vehículos que circulan por los arcos multiplicado por el tiempo de cada arco es de 1080 veh*h, mientras que en la ciudad de Melilla esa cifra aumenta a 1.398 veh*h.

Quizá este resultado puede a priori, parecer extraño pues aparentemente el modelo aplicado en Melilla funcionaba mejor, sin embargo, se debe de tener en cuenta que las longitudes de los arcos influyen en el cálculo de los tiempos, y en ese sentido, la red de transporte vial de Melilla es mucho más larga (40.250 metros frente a los 24.250 metros de Ceuta).

Además, se debe de tener en cuenta que en Ceuta se han “eliminado” la mitad de los vehículos previstos en la evacuación inicial, mientras que en Melilla han sido pocos vehículos los que han visto este efecto.

Sin embargo, si se centra la atención en los tiempos de evacuación, se obtiene un resultado mucho más favorable para el plan de Melilla (0,92 horas) frente al de Ceuta (1,70 horas). Esta notoria diferencia procede de añadir nuevos nodos, ya que se incrementa la capacidad de absorción. En el caso de Melilla pasó de 5400 vehículos a la hora a 21.600 vehículos a la hora, mientras que en Ceuta esta capacidad no se vio modificada.

Y a parte del evidente efecto que esto supone, también permite redistribuir mejor a la población, reduciendo considerablemente el máximo tiempo del arco más saturado, que originalmente en Melilla era de 206 minutos, y que con la nueva configuración se redujo a 6 minutos.

Por lo que se puede afirmar que ambos planes están en sus puntos óptimos, pero que Melilla, por la estructura que presenta, permite obtener un mejor tiempo de evacuación, todo este apartado de comparación de resultados puede verse resumido en la siguiente Tabla 11, presentada a continuación:

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Característica	Ceuta	Melilla
Nº de nodos en red	27	25
Nº de arcos en red	71	81
Nº de evacuados andando hasta puerto	33.209	12.634
Nº de evacuados en coche hasta puerto	47.890	23.724
Nº de evacuados en coche hasta aeropuerto	-	19.087
Nº de evacuados en coche hasta otras zonas	-	28.309
Nodos de evacuación	26 y 27	8, 13, 24 y 25
Capacidad de evacuación (veh/h)	7.200	21.600
Tiempo de viaje (veh*h)	1.080	1.398
Tiempo de evacuación (h)	1,70	0,92

Tabla 11. Resumen de las principales características de la comparativa entre ambas ciudades¹⁶⁹

2. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PLAN DE EVACUACIÓN

De cara a poder evaluar si un proyecto como el realizado en este trabajo es viable hay numerosas formas de hacerlo, pero una de las más comunes y empleadas es el valor actual neto (VAN).

El VAN es una métrica ampliamente utilizada en el entorno financiero que permite valorar la rentabilidad y viabilidad de proyectos , así como comparar entre varios proyectos cual es el que mayor valor aporta teniendo en cuenta el efecto del dinero en el tiempo.

El principio que emplea en Valor Actual Neto es sencillo. Se deben llevar todos los capitales a un mismo momento temporal (el presente), y una vez todos flujos monetarios

¹⁶⁹ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

se encuentran en el mismo tiempo, se habrá de sumar todos ellos, y el VAN será el resultado de dicha suma.

La idea es descontar tanto los ingresos como los gastos al presente y sumarlos entonces. Sin embargo, lo verdaderamente interesante y útil de esta metodología es que tiene en cuenta el efecto inflacionario de todas las operaciones.

Por ejemplo, si para el desarrollo de cualquier plan se tuviera que incurrir en un gasto de 1000 € actualmente, y los ingresos fueran 1000 €, pero que serán pagados dentro de diez años, el VAN saldría negativo porque esos 1000 € de dentro de 10 años serían 650 € en valor presente, lo cual supondría que el proyecto un VAN de -350 €.

Esto se aprecia claramente con la fórmula del VAN mostrada a continuación como Fórmula 13:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + k)^t} - I_0 \quad (13)$$

Donde:

F_t son los flujos de caja de cada período T

I_0 representa la inversión inicial realizada

n es el número de períodos que se van a descontar

k es el tipo de interés empleado para el descuento de los flujos

Dado que no se poseen otros proyectos sobre los que invertir, solamente se examinará la rentabilidad de este. Si se obtuviera un VAN mayor que cero quiere decir que los ingresos descontados en el tiempo superan a los gastos descontados en el tiempo y a la inversión inicial, y que por lo tanto el proyecto genera valor.

Si, por el contrario, el VAN fuese menor que cero, el proyecto sería una destrucción de valor, y que por lo tanto no sería interesante realizarlo.

Y si fuese exactamente cero, pues entonces el proyecto ni aporta ni quita valor.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Además, en este último caso en particular, permite conocer lo que se llama en el mundo económico a la Tasa Interna de Retorno (TIR), que es aquel tipo de interés para el que justamente se alcanza el VAN 0.

Esta herramienta es realmente útil, pues te permite suponer escenarios de posibles tipos de interés y ver si eso pondría en riesgo el valor de las operaciones que actualmente se están realizando.

Por ejemplo, si al calcularse la TIR se obtuviera un valor del 4%, y el tipo de interés asumido actualmente es de un 2% se sabe que se estaría en positivo, pero que una subida de los tipos de interés como se ha visto en los años postpandemia podría complicar la rentabilidad de la operación, incluso llegando a destruir valor.

Se procede ahora a realizar un desglose de los costes incurridos en la creación del plan de evacuación. Primeramente, y el coste más relevante para este plan es el salario de ingeniería que supone desarrollar este plan de evacuación durante 100 horas. Para ello se ha asumido un coste por hora de 45 €/h, de acuerdo con los estándares del mercado para un ingeniero junior.

Otro de los costes asociados al estudio de ingeniería se tiene debido a las diferentes software y bases de datos empleados para poder recopilar la información para preparar los modelos, se ha establecido en 100 €.

A parte de esta categoría, también deben de incluirse los costes asociados a la parte de maquetación y producción del trabajo.

Por un lado, se encuentra el coste salarial de la persona encargada de realizar toda la maquetación y producción de los entregables, que se estima un trabajo de 20 horas para 10 copias, a un salario de 10 €/h.

Lógicamente, se habrá de tener en cuenta también el coste que supone emplear el papel para realizar todas las 10 copias suponiendo 200 páginas por entregable.

Como último apartado se considerará una sección de amortización. Por un lado, se considerará una amortización lineal para un ordenador de 3.500 € en 5 años, por lo tanto, será de 700 €/año, dado que el plan se ha desarrollado en 6 meses se imputará la mitad de esa cifra, 350 € a la amortización del ordenador.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Por otro lado, se considerará las licencias de software, como por ejemplo Microsoft Office entre otros, en 100 € al año, de los cuales se imputarán la mitad al proyecto, por lo tanto 50 € se incluirán en la amortización del software.

Y finalmente se añadirá un porcentaje de contingencias del 10% de todo el montante anterior, en total todo ello suma 5.400 €, por lo tanto, se añadirá una recarga de 540 € en concepto de contingencias para el desarrollo del proyecto.

Todo esto se muestra en la Tabla 12 presentada a continuación:

Categorías de coste	Concepto del coste	Cantidad	Coste Unitario	Coste Total
Costes estudio de ingeniería	Salario Ingeniero	100 horas	45 €/h	4500 €
Costes estudio de ingeniería	Software y aplicaciones de investigación	100 €		100 €
Maquetación y producción	Salario copista	20 horas	10 €/h	200 €
Maquetación y producción	Papel empleado	10 * 200 págs	0,10 €/hoja	200 €
Amortizaciones	Ordenador	350 €		350 €
Amortizaciones	Software	50 €		50 €
Contingencias	Contingencias	540 €		540 €
TOTAL				5.940 €

Tabla 12. Desglose de costes incurridos para llevar a cabo el plan de evacuación¹⁷⁰

Todo este montante se puede considerar como inversión inicial, pero también como los únicos costes en los que va a incurrir este proyecto, dado que no posee una parte operativa no hay costes asociados en los años posteriores.

No obstante, se asumirá que este proyecto se venderá a las autoridades competentes en tres ejercicios diferentes, en el primero de ellos se venderá al Ministerio de Defensa por un valor de 3000 € en el año 2026, posteriormente se venderá el proyecto a la ciudad

¹⁷⁰ Elaboración propia, (2025)

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

autónoma de Melilla por 2000 € en el 2027, y por último en 2028 se venderá el proyecto a la ciudad de Ceuta por otros 2000 €.

Por lo que los flujos resultantes quedan mostrados en la tabla 13, también mostrada a continuación:

Concepto	Año	Flujo de Caja
Inversión Inicial	0	-5.940 €
Venta Ministerio de Defensa	1	+3.000 €
Venta a Melilla	2	+2.000 €
Venta a Ceuta	3	+2.000 €

Tabla 13. Flujo de capitales del proyecto por cada año¹⁷¹

Finalmente, solo queda asumir el tipo de interés para el proyecto, el cual será del 2% lo cual parece bastante razonable teniendo en cuenta los últimos reportes del Banco Central Europeo.

Así que, descontando los tres capitales de ingresos, se transforman en +2.941,18 € para la venta al Ministerio de Defensa, en +1.922,34 € por la venta a Melilla y en +1884,64 € por la venta del proyecto a Ceuta.

Sumando todos estos capitales a la inversión inicial el VAN del proyecto sale positivo, concretamente en +808,16 €, lo cual quiere decir que el proyecto está aportando valor.

Como último cálculo de este capítulo se propone calcular la TIR asumiendo que el valor neto actual fuera cero, y se obtiene que el resultado es de 9,41 %, lo cual deja ver que, si bien el proyecto no deja una gran cifra de VAN en valor absoluto, es muy difícil que vaya a destruir valor pues el tipo de interés de los años venideros deberá dispararse por encima del valor presentado.

¹⁷¹ Elaboración propia, (2025)

VI. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Este trabajo final de máster ha permitido estudiar, entender y optimizar los planes de evacuación en situaciones de conflicto bélico debido a una invasión terrestre en general, y más en particular el caso específico de las ciudades autónomas españolas Ceuta y Melilla ante un hipotético potencial ataque militar por parte del Reino de Marruecos.

En este capítulo se presentarán las conclusiones generales del estudio, así como el grado de cumplimiento de los objetivos inicialmente planteados y las implicaciones que estas conclusiones suponen para las ciudades autónomas. Para ello, se hará un recorrido por los diferentes capítulos que conforman este trabajo, empezando por la introducción donde se plantean los diferentes objetivos hasta la comparativa de resultados presentada en el capítulo anterior.

1. CONCLUSIONES

Empezando por la sección de los objetivos de desarrollo sostenible, se mencionó que el trabajo estaba relacionado con el objetivo número 9 que trata sobre industria, innovación e infraestructura. Ha quedado patente que este trabajo claramente supone un avance respecto a la técnica en cuanto a planes de evacuación en las ciudades de Ceuta y Melilla se refiere. Y, sobre todo, ha supuesto un exhaustivo análisis de la infraestructura vial para una hipotética evacuación en caso de ataque.

El otro de los objetivos con los que el trabajo estaba vinculado era el número 16, paz justicia e instituciones sólidas. Este trabajo está pensado para una hipotética situación que ojalá nunca suceda, no obstante, si sucediera permitiría a las instituciones pertinentes estar preparados, haciendo que la credibilidad y la confianza del pueblo en las instituciones aumente.

Habiendo analizado con detenimiento la sección del estado del arte, que se dividió en tres subsecciones, propuesta institucional para la evacuación de Ceuta y Melilla, propuesta metodológica cualitativa por parte de investigadores y propuesta analítica cuantitativa por parte de investigadores.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Hay una extensa bibliografía sobre la parte metodológica cualitativa para planes de evacuación, pero se ha de recalcar lo particularmente influyente que ha sido el plan urbano integrado para evacuaciones causadas por desastres humanos, de donde salen los conceptos de zona de desastre, zona de evacuación, zona buffer...

Más extensa es toda la bibliografía referente a los modelos analíticos para los planes de evacuación, en este caso se optó por el modelo de asignación de rutas de Frank-Wolfe, uno de los más clásicos, si bien podría haber sido otro algoritmo.

Sin embargo, el punto negativo de ese capítulo se aprecia en la parte institucional que no existe ningún tipo de documento que mencione una posible evacuación de las ciudades ante algún desastre natural, y menos aún ante una invasión militar. Lo más cercano que se ha encontrado fueron los planes de protección civil, muy genéricos y poco concretos. Este vacío de información da valor a este trabajo mientras que muestra una imagen de abandono y desamparo preocupante por parte de las instituciones.

Avanzando hacia el capítulo del desarrollo del plan de evacuación, este se puede vincular con el principal y más general objetivo del proyecto, que consiste en la creación de un plan de evacuación para las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Lo cual se logró mediante el uso del modelo de asignación de rutas de Frank-Wolfe, tanto en su versión tradicional de equilibrio de usuario como la versión adaptada para la optimización del sistema, esto permitió mejorar sustancialmente los tiempos de viaje y de evacuación para ambas ciudades.

En este capítulo fue donde se propuso el análisis y localización de las potenciales ubicaciones desde las que Marruecos podría iniciar el ataque militar, que es uno de los objetivos secundarios que se habían marcado para el desarrollo del trabajo. Donde finalmente se estableció que el ataque en Ceuta sucedería en el paso fronterizo de El Tarajal, mientras que para Melilla lo más probable es que se produzca desde el paso fronterizo de Beni-Enzar.

No obstante, se debe mencionar que existe la posibilidad, no contemplada en este estudio, de que Marruecos pudiera atacar abriendo varios frentes al mismo tiempo, aunque en un principio no debería de afectar al plan de evacuación sí que incrementaría la dificultad de la defensa de dichas ciudades.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Otra parte esencial del trabajo, y también otro de los objetivos secundarios de esta investigación, era la ubicación de los puntos de evacuación a los que los ciudadanos deberán dirigirse para ser evacuados de las ciudades.

Se estableció que para Ceuta la posibilidad más factible de evacuación se produciría por el puerto, que es donde se ha ubicado el punto de extracción (y los dos nodos de evacuación del modelo). Cabe destacar que se estudió la posibilidad de emplear otras vías de evacuación como por ejemplo aeronaves, sin embargo, la escarpada orografía de la ciudad no hace que esta opción sea viable. Así mismo, los helicópteros tampoco son una opción debido a la baja carga de pasajeros que pueden transportar.

Es relevante mencionar que de cara a una evacuación en la zona de puerto se deberá disponer de suficiente espacio para estacionar los vehículos que hayan servido de transporte hasta el punto de extracción. En el trabajo ya se hizo una estimación y con la capacidad actual no sería suficiente para dar cabida a todos los vehículos, por ello se recomienda ampliar la zona del puerto, ganando terreno al mar, o construir un edificio que permita estacionar los vehículos en 2 o 3 plantas.

Además, se debe añadir que a la hora estacionar los vehículos estos deberán seguir un concreto orden de llenado que permita optimizar al máximo la superficie de estacionamiento disponible. Lógicamente esto requerirá una coordinación especial por parte de los agentes portuarios y de las autoridades a cargo de evacuar la ciudad.

Por su parte, Melilla poseerá tres zonas de evacuación el puerto en la zona este de la ciudad, el aeropuerto en la zona oeste y los cortados de Aguadú en la zona norte. Cabe destacar que el paso fronterizo de Beni-Enzar se encuentra ubicado al sur de la ciudad, de modo que los otros 3 puntos cardinales están alejados de la zona de desastre.

Otro de los objetivos que se marcaron al principio del proyecto era detectar la infraestructura crítica de ambas ciudades en caso de tener que ejecutar una hipotética evacuación. En ese sentido la creación de las redes de transporte vial que se llevaron a cabo durante el capítulo 3 son la mejor muestra de ello.

La arquitectura vial de la red de Ceuta es peor comparativa que la de Melilla. Para la creación de dichas redes se emplearon las principales carreteras e intersecciones de ambas

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

ciudades, y mientras que Ceuta posee un total de 27 nodos y 42 conexiones, Melilla cuenta con 25 nodos y 40 conexiones.

Este detalle da la idea de que Ceuta posee más sitios desde los que la población debe ser evacuada y con menos rutas para poder hacerlo que Melilla. Esto resulta en una red mucho más mallada para Melilla que para Ceuta, con el consecuente impacto en el plan de evacuación, como ya se ha visto durante el proyecto. Y no siendo eso suficiente, muchas de las conexiones entre nodos solo permiten un sentido de circulación en Ceuta, lo que cual hace mucha más compleja la evacuación, cosa que solo sucede en una conexión en Melilla.

Continuando ahora con el capítulo de la aplicación numérica del modelo Frank-Wolfe, cabe mencionar que el funcionamiento del modelo con la variante de optimización del sistema funciona ligeramente mejor que la de equilibrio de usuario en cuanto a tiempos de viaje y de evacuación. Es por ello que es importante que, en caso de implementar el plan de evacuación, este deberá ser comunicado a la población para que esta actúe conforme al plan de optimización del sistema y no en base a su propio criterio.

Quizá se podría tratar de llegar a algún acuerdo con las aplicaciones GPS como Google Maps para que en caso de darse la mencionada situación que muestre la ruta de evacuación que es óptima para el sistema y no para el individuo, de cualquier manera, esto corresponde al organismo competente de implantar el plan.

Con la intención de que los planes de evacuación de Ceuta y Melilla no colapsasen debido al gran tráfico que generaría tanto desplazamiento de vehículos, se propuso que una parte de la población evacuada fuese andando hasta el lugar de evacuación.

En el caso de Ceuta este efecto fue muy relevante, casi la mitad de la población evacuada podría hacerlo andando ya que se encuentra muy cercana al puerto. En Melilla también se aplicó esta política, pero solo con algunos núcleos de población cercanos al puerto y fue debido a la falta de espacio en la zona portuaria.

Se debe mencionar que el hecho de mezclar vehículos motorizados con viandantes no es una buena idea pues el tráfico aumenta de manera considerable, aunque este efecto no se haya tenido en cuenta en esta investigación.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Lo óptimo sería encontrar rutas que cortasen los menos posible los arcos de evacuación por los que circulan los vehículos, y que en caso de hacerlo siempre haya algún agente del tráfico regulando la intersección para permitir a ambas partes ir avanzando en la evacuación de manera similar.

En cuanto a la criticidad de la infraestructura se refiere, se aprecia que tanto en Ceuta como en Melilla aquellos arcos que están cercanos a los nodos de evacuación tienden a estar mucho más saturados.

Este efecto se aprecia con mucha más claridad en la ciudad de Ceuta que en la de Melilla, pues Ceuta solo cuenta con 1 punto de evacuación con una capacidad de recepción de 7.200 veh/h, mientras que Melilla posee 3 puntos de evacuación con una capacidad combinada 21.600 veh/h.

Así mismo, y como aspecto de mejora para futuros trabajos de investigación en este campo sería la creación de una matriz OD más realista, la cual se podría lograr con datos oficiales del censo de las ciudades autónomas calle por calle, ya que en este trabajo se ha empleado una estimación en base al área encerrada por los lazos que componían los nodos y los arcos.

En cuanto a la comparación de resultados, se puede decir que ha ido en línea de lo pronosticado por el estudio, Melilla con su red mallada de menos nodos y más arcos y 3 puntos de evacuación ha sido capaz de lograr un tiempo de evacuación de 0,92 horas frente a las 1,70 horas obtenidas en Ceuta. Si bien es cierto que el tiempo de viaje en Melilla es superior al Ceuta (1.398 veh*h frente a 1.080 veh*h), pero eso se debe a que la longitud de la red de Melilla es muy superior a la de Ceuta (40.250 metros frente a 24.250 metros).

No obstante, y esto es algo que debe ser recalculado, los tiempos arriba mencionados son una estimación teórica en condiciones ideales en base al modelo propuesto con las hipótesis asumidas, pero en un entorno real el tiempo de evacuación sería considerablemente mayor.

Así mismo, se ha de tener en cuenta que no solo afecta el tiempo de evacuación dentro de las propias ciudades, también lo hacen los tiempos de los medios de transporte que transportan a los ciudadanos fuera hasta la península ibérica. En el caso de Ceuta este

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

tiempo es anecdótico pues se encuentra a 14 Km de la costa de la España peninsular, pero en el caso de Melilla esto supone un grave problema pues se encuentra a 200 Km de distancia.

Es por ello que es muy recomendable, por no decir casi obligatorio, que tanto Ceuta, pero sobre todo Melilla mantengan un alto nivel de militarización en las ciudades para que en caso de un intento de toma de la ciudad por la fuerza sean capaces de resistir el ataque hasta que por lo menos se haya evacuado a toda la población civil.

Y desde una perspectiva económica, este proyecto no deja de ser un proyecto de ingeniería, es por ello que se ha calculado tanto el valor actual neto como la tasa interna de retorno obteniendo 808,16 € de VAN y un 9,41 % de TIR, lo cual demuestran la viabilidad económica de este proyecto desde un punto de vista financiero.

2. DESARROLLOS FUTUROS

Finalmente, se termina este capítulo con una serie de mejoras y desarrollos futuros que podrían ser implementadas en posibles futuros proyectos de investigación en este campo.

La primera de ellas, y ya mencionada anteriormente, es una creación más realista de la matriz origen destino. Si bien la metodología empleada en este modelo no es mala, el contar con unos datos mucho más reales de las ubicaciones de partida de la población a evacuar podría dar unos resultados mucho más fidedignos

Otro aspecto de mejora es la asignación de rutas. En este trabajo se ha hecho en base a la proximidad al nodo de evacuación, sin embargo, en futuros trabajos se podría probar a realizar otros métodos de asignación de nodos de evacuación como el modelo de asignación probabilística según impedancia o asignación en función de la capacidad de absorción de vehículos.

Otra de las limitaciones que se han observado durante el estudio es que el modelo empleado (Frank-Wolfe) es un modelo estático que permite tener una buena lectura a nivel general de cómo va a ir la evacuación. Sin embargo, no permite un análisis tan detallado para cada momento del tiempo, en este sentido los modelos dinámicos permiten

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

observar cómo va evolucionando el tráfico en cada momento del tiempo, cuando se darían las saturaciones y en qué arcos se producirían.

Con todo esto mencionado se puede apreciar que esta investigación ha aportado una mejora en el ámbito de los planes de evacuación y más concretamente en los planes de evacuación para las ciudades autónomas españolas de Ceuta y Melilla ante un hipotético ataque bélico terrestre por parte del Reino de Marruecos, permitiendo que los poderes públicos tengan una base de referencia sobre la que trabajar para poder proteger a sus ciudadanos ante una situación tan terrible como lo es un conflicto bélico

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Nabhan, N., Al-Aboody, N., & Al-Islam, A. (2019). A hybrid IoT-based approach for emergency evacuation. *Computer Networks Volume 155*, 87-97.
- Antolínez Domínguez, I., & Jorge Barbuzano, E. (2021). Challenges to Identify the Vulnerability of Migrant Women on the Southern Border of Europe: Contributions from Biographical Narratives. *Ljetopis socijalnog rada 2021.*, 28 (1), 153-180.
- Beckmann, M., McGuire, C., & Wisten, C. (1956). Studies in the Economics of Transportation. *Yale University Press*.
- Beliën, J., De Boeck, L., Reniers, G., Vermuyten, H., & Wauters, T. (2016). A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems. *Safety Science*, 167-178.
- Bretschneider, S. (2013). Mathematical Models for Evacuation Planning in Urban Areas. *Springer Nature*.
- Cabellos Cortés, M. (2024). Plan de evacuación de Ceuta.
- Castillo, E., Menéndez, J., & Sánchez-Cambronero, S. (2008). Traffic estimation and optimal counting location without path enumeration using Bayesian networks. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23.
- Catel, A. (2020). MapChecking • Crowd counting tool.
- Chan, W., & Costas, A. (2014). 3D Building Evacuation Route Modelling and Visualization. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(2), 221-226.
- Chen, A., Jayakrishnan, R., & Tsai, W. (2002). Faster Frank-Wolfe Traffic Assignment with New Flow Update Scheme. *Journal of Transportation Engineering*, 128.
- Como, G., Lovisari, E., & Savla, K. (2015). Convexity and Robustness of Dynamic Traffic Assignment and Freeway Network Control.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

- De Moor, B., & Maerivoet, S. (2005). *Transportation Planning and Traffic Flow Models*. *Katholieke Universiteit Leuven*.
- Dirección General de Tráfico. (2023). *Anuario Estadístico General . Ministerio del Interior*.
- El-Hamied, S., Saleh, A.-F., & Asem, A. (2012). Survey on Using GIS in Evacuation Planning. *arXiv*.
- European Commission. (2024). Safer Together: Strengthening Europe's civilian and military preparedness and readiness.
- European Commission. (2025). Preparedness Union Strategy.
- Faraldo, J. (2023). El nacionalismo ruso de Putin, ¿un legado soviético? *Política y Sociedad. 60(3), Ediciones Complutense*.
- Ferris, M., Meeraus, A., & Rutherford, T. (1998). Computing Wardropian Equilibria in a Complementarity Framework.
- Ford Jr., L. R., & Fulkerson, D. R. (1956). Maximal Flow Thorough a Network. *Canadian Journal of Mathematics, 8*, 399-404.
- Frank, M., & Wolfe, P. (1956). An algorithm for quadratic programming. *Naval Research Logistics Quarterly, Volume 3*, 95-110.
- Fraser, S., Doyle, E., Wright, K., Potter, S., McClure, J., Johnston, D., . . . Johal, S. (2016). Tsunami response behaviour during and following two local-source earthquakes in Wellington, New Zealand. *International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 16*, 123-133.
- Geo-Ref.net. (2023). Mapa de la estructura administrativa - Densidad de población de Ceuta.
- Geo-Ref.net. (2023). Mapa de la estructura administrativa - Densidad de población de Melilla.
- Google Earth. (2025). *Recorte de pantalla de la frontera de Ceuta a través de Google Earth*.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

- Google Maps. (2020). Foto del puesto de control del paso fronterizo de El Tarajal.
- Google Maps. (2025). Recorte de pantalla de Ceuta en Google Maps.
- Google Maps. (2025). Recorte de pantalla de Melilla en Google Maps.
- Google Maps. (2025). Recorte de pantalla del puerto de Ceuta en Google Maps.
- Hasan, M., & Van Hentenryck, P. (2020). Large-Scale Zone-Based Evacuation Planning: Models, Algorithms, and Evaluation. *Networks an International Journal*, 217-145.
- Hora, J., Dias, T., Camanho, A., & Sobral, T. (2017). Estimation of Origin-Destination matrices under Automatic Fare Collection: the case study of Porto transportation system. *Transportation Research Procedia* 27, 664–671.
- Hung, M.-C., Lin, C.-Y., & Hsiao, G.-K. (2025). Virtual Reality in Building Evacuation: A Review. *Fire*, 8(2), 80.
- Idoudi, H., Ameli, M., Zargayouna, M., Nguyen Van Phu, C., & Rachedi, A. (2022). An Agent-Based Dynamic Framework for Population Evacuation Management. *IEEE Access*, vol. 10, 88606-88620.
- Instituto Geográfico Nacional. (2018). Mapa topográfico de Ceuta. *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*.
- Instituto Geográfico Nacional. (2018). Mapa topográfico de Melilla. *Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana*.
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). Población por municipios: Ceuta. *Ministerio de Economía, Comercio y Empresa*.
- Instituto Nacional de Estadística. (2024). Población por municipios: Melilla. *Ministerio de Economía, Comercio y Empresa*.
- Jabari, S., Lin, D., Liu, H., & Zheng, F. (2018). Traffic state estimation using stochastic Lagrangian dynamics. *Transportation Research Part B: Methodological Volume* 115, 143-165.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

- Jahn, O., Möhring, R., Schulz, A., & Stier-Moses, N. (2004). System-Optimal Routing of Traffic Flows with User Constraints in Networks with Congestion. *Operations Research*, 53.
- Kaddoura, I., Nagel, K., & Ziemke, D. (2019). The MATSim Open Berlin Scenario: A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data. *Technische Universität Berlin*.
- Maturana, A. (2011). Evaluación de Riesgos y Gestión en Desastres. 10 Preguntas para la Década Actual. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 22(5), 545-555.
- Ministerio de Defensa. (2006). Real Decreto 416/2006.
- Ministerio de Defensa. (2011). Real Decreto 1097/2011.
- Ministerio de Defensa. (2017). Simulacro conjunto de emergencias multirriesgo en Melilla.
- Ministerio de Defensa. (2019). Simulacro multirriesgo Melilla 2019.
- Mohamed, R., Kosba, E., Mahar, K., & Mesbah, S. (2012). A GIS-based DSS for evacuation planning. *22nd International Conference on Computer Theory and Applications*.
- Morandi, V. (2021). Bridging the user equilibrium and the system optimum in static traffic assignment: how the cooperation among drivers can solve the congestion problem in city networks.
- Morlok, E., Schofer, J., Pierskalla, W., Marsten, R., Agarwal, S., Stoner, J., & Spacek, D. (1973). Development and Application of a Highway Network Design Model. *Federal Highway Administration*.
- Nguyen, S., & Depuis, C. (1984). An efficient method for computing traffic equilibria in networks with asymmetric transportation costs. *Transportation Science*, 185-202.
- Nogal Macho, M. (2011). Métodos Matemáticos para la Predicción de Tráfico. *Universidad de Cantabria*.
- Pinochet Ugarte, A. (1984). *Geopolítica*. Santiago de Chile.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

Presidencia del Gobierno. (2019). Las obras de modernización y refuerzo de la valla fronteriza en Ceuta y Melilla comenzarán antes de que acabe noviembre. *La Moncloa.*

Protecció Civil de Catalunya. (2022). Pla Territorial de Protecció Civil (PROCICAT).

Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Ceuta. (2008). Plan Territorial de Protección Civil (PLATERCE).

Protección Civil de la Ciudad Autónoma de Melilla. (2014). Plan Territorial de Protección Civil (PLATERME).

Protección Civil de la Comunidad de Madrid. (2018). Plan Territorial de Protección Civil (PLATERCAM).

Rindone, C., & Panuccio, P. (2022). Risk Reduction in Transport System in Emergency Conditions: A Framework for Evacuation Planning. *WIT Transactions on The Built Environment, Vol. 206*, 285-297.

Russo, F., & Rindone, C. (2008). Safety of users in road evacuation: the logical framework approach in evacuation planning. *Urban Transport XIV*, 751-760.

Transportation Research Board. (2022). Highway Capacity Manual (HCM) – 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.*

United States Bureau of Public Roads. (1964). Traffic Assignment Manual for Application with a Large, High Speed Computer. *U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, Office of Planning, Urban Planning Division.*

United States Census Bureau. (2020). 2020 Decennial Census of Population and Housing.

Wardrop, J. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, volume 1*, 325-378.

Wei, H., Zeng, Q.-A., Hu, H., Wang, X., & Kukreti, A. (2008). Integrated Urban Evacuation Planning Framework for Responding to Human-Caused Disasters

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

- over a Surface Transportation Network. *Transportation Research Record*, 2041, 29-37.
- Xu, X., Zhang, L., Sotiriadis, S., Asimakopoulou, E., Li, M., & Bassis, N. (2018). CLOTHO: A Large-Scale Internet of Things-Based Crowd Evacuation Planning System for Disaster Management. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, 3559-3568.
- Zhang, G., Zhu, N., Zhong, S., Ma, S., & Han, S. (2020). A stochastic programming approach for heterogeneous variable message sign location problem for freeway networks. *Transportmetrica A: Transport Science*, 18(1), 99-124.

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

ANEXOS

I. CÓDIGO EMPLEADO PARA LA EJECUCIÓN DEL MODELO DE EQUILIBRIO DE USUARIO

```

# Modelo de Ceuta de asignación de rutas para Ceuta - Frank-Wolfe
# (User Equilibrium)

# Como inputs para el modelo se proponen los siguientes archivos:
# - EDGES_XLSX: empleando las columnas
u,v,long_m,vel_kmh,capacidad,alpha,beta,direccion
# - OD_XLSX: empleando las columnas origen,destino,viajes (viajes =
número absoluto - total a asignar)

# Como outputs se obtendrán:
# - los flujos por cada arco (en las mismas unidades que trips)
# - los tiempos por arista (horas)
# - el tiempo total de viaje en el sistema

# IMPORTACIÓN DE LIBRERÍAS
import math
import numpy as np
import pandas as pd
import networkx as nx
from math import isfinite
import matplotlib.pyplot as plt

# PARÁMETROS Y ARCHIVOS
EDGES_XLSX = "ceuta_edges.xlsx"      # Ruta al archivo excel de los arcos
en ceuta
OD_XLSX = "ceuta_OD_abs.xlsx"        # Ruta al archivo excel de la matriz
OD (origen,destino,viajes)
TOL = 1e-4                           # Criterio de convergencia (relative
gap, previamente mencionado en el capítulo 3)
MAX_ITERS = 200                      # Número máximo de iteraciones
GOLDEN_MAX_ITERS = 60                # Iteraciones para la búsqueda lineal del
lambda óptimo
TIME_HORIZON = 1.0                   # Horas del horizonte del plan por si
se quiere convertir unidades

# Se debe considerar lo siguiente sobre unidades:
# Las capacidades del fichero edges están en veh/h y los trips en OD
son "vehículos totales en T horas",
# entonces se debe convertir capacidad_por_período =
capacidad_por_hora * TIME_HORIZON
# Alternativamente, se puede convertir trips a tasa por hora:
trips_per_hour = trips / TIME_HORIZON.
# Se asume que:
#   - trips en OD = vehículos totales en el horizonte TIME_HORIZON
#   - capacidad en excel está en veh/h -> lo convertimos multiplicando
por TIME_HORIZON
# Si ya se tiene capacidad en unidades por horizonte, basta con poner
TIME_HORIZON=1.0 o ignorar la conversión.

```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
CONVERT_CAPACITY_FROM_PER_H_TO_PERIOD = True # True: multiplicamos  
capacidad_por_h * TIME_HORIZON  
  
# FUNCIONES BPR (BUREAU OF PUBLIC ROADS) E INTEGRALES  
def bpr_time(t0, x, cap, alpha=0.15, beta=4.0):  
    # Función para cálculo del tiempo según función BPR (t0 en horas,  
    x y cap en mismas unidades).  
    if cap <= 0:  
        return float('inf')  
    # Para evitar overflow en potencias con x/cap:  
    ratio = x / cap if cap > 0 else 1e9  
    return t0 * (1.0 + alpha * (ratio ** beta))  
  
def integral_bpr(t0, x, cap, alpha=0.15, beta=4.0):  
    # Proviene de realizar la integral de la función BPR respecto al  
    flujo asignado al arco  
    # Integral int_0^x t(u) du para BPR:  
    #  $\int t0 [1 + \alpha (u/c)^{\beta}] du = t0 * [x + \alpha * x^{(\beta+1)} / ((\beta+1) c^{\beta})]$   
    # Se devuelve el resultado en horas * vehículos (i.e., total  
    vehículos-horas).  
    if cap <= 0:  
        # penalización: Se trata la integral como grande  
        return 1e18  
    term1 = x  
    term2 = 0.0  
    if alpha != 0:  
        term2 = alpha * (x ** (beta + 1)) / ((beta + 1) * (cap **  
        beta))  
    return t0 * (term1 + term2)  
  
# SE CONSTRUYE LA RED DE TRANSPORTE EN BASE AL ARCHIVO EXCEL  
def build_graph_from_excel(edges_xlsx):  
    edges_df = pd.read_excel(edges_xlsx)  
    # Se debe tener el formato de columnas:  
    u,v,long_m,vel_kmh,capacidad,alpha,beta,direccion (directed 0/1)  
    G = nx.DiGraph()  
    for idx, row in edges_df.iterrows():  
        u = int(row['u'])  
        v = int(row['v'])  
        long_m = float(row['long_m'])  
        vel_kmh = float(row['vel_kmh'])  
        capacidad = float(row['capacidad'])  
        alpha = float(row.get('alpha', 0.15))  
        beta = float(row.get('beta', 4.0))  
        direccion = int(row.get('direccion', 1))  
  
        # Se calcula el tiempo libre en horas (tiempo en recorrer un  
        arco si no hay tráfico)  
        t0_h = (long_m / 1000.0) / vel_kmh if vel_kmh > 0 else 1.0  
  
        # Se convierte la capacidad si está en veh/h y se trabaja con  
        horizonte TIME_HORIZON
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
if CONVERT_CAPACITY_FROM_PER_H_TO_PERIOD:
    capacidad = capacidad * TIME_HORIZON

    G.add_edge(u, v, long_m=long_m, vel_kmh=vel_kmh,
capacidad=capacidad,
alpha=alpha, beta=beta, t0_h=t0_h)

        # Si la arista es bidireccional (direccion==0), se añade la
inversa con mismos atributos
        if direccion == 0:
            if not G.has_edge(v, u):
                G.add_edge(v, u, long_m=long_m, vel_kmh=vel_kmh,
capacidad=capacidad,
alpha=alpha, beta=beta, t0_h=t0_h)

return G

# CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ ORIGEN DESTINO MEDIANTE ARCHIVO EXCEL
def read_od(od_xlsx):
    od_df = pd.read_excel(od_xlsx)
    # El archivo de tener las columnas origen,destino,viajes (Nº
absoluto para todo el horizonte)
    od_list = []
    for _, r in od_df.iterrows():
        o = int(r['origen'])
        d = int(r['destino'])
        viajes = float(r['viajes'])
        if viajes > 0:
            od_list.append((o, d, viajes))
    return od_list

# MECANISMO DE ASIGNACIÓN TODO O NADA
def all_or_nothing(G, od_list, time_attr='t_h'):
    # Se realiza una primera asignación Todo o Nada en base a la red
de transporte, los viajes a realizar y los tiempos libres
    # Se obtiene como resultado un vector de flujos por arco en
edge_list

    edge_list = list(G.edges())
    edge_index = {e: idx for idx, e in enumerate(edge_list)}
    y = np.zeros(len(edge_list), dtype=float)

    # Se recorre un bucle for para cada par de rutas origen destino
    for o, d, trips in od_list:
        if o == d or trips <= 0:
            continue
        try:
            path = nx.shortest_path(G, source=o, target=d,
weight=time_attr)
        except nx.NetworkXNoPath:
            # Si no hay camino: saltar
            continue
        # Se suma toda la demanda en cada arco del camino
        for a, b in zip(path[:-1], path[1:]):
            idx = edge_index.get((a, b))
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
        if idx is not None:
            y[idx] += trips
    return y, edge_list

# FUNCIÓN OBJETIVO Z
# El tiempo total de viaje es la suma de la integral sobre los arcos
def objective_Z(flows, G, edge_list):
    Z = 0.0
    for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
        data = G[u][v]
        x = flows[idx]
        Z += integral_bpr(data['t0_h'], x, data['capacidad'],
data['alpha'], data['beta'])
    return Z # en horas de vehículo

# SELECCIÓN ÓPTIMA DE LAMBDA
def line_search_lambda(x, y, G, edge_list):
    # La función minimiza Z(x+lambda*(y-x)), consigiéndose el
    lambda_opt

    phi = (math.sqrt(5) - 1) / 2 # approx 0.618
    a, b = 0.0, 1.0
    # Se inicializan los puntos c y d para partir el intervalo [0,1]
    en varios segmentos
    c = b - phi * (b - a)
    d = a + phi * (b - a)

    # Se define la función Z de lambda, que ejecuta la función
    # objetivo Z, pero con los flujos modificados en función de lambda
    def z_lambda(lmbda):
        f_try = x + lmbda * (y - x)
        return objective_Z(f_try, G, edge_list)

    # Se guardan los valores de Z para los lambdas de c y d
    fc = z_lambda(c)
    fd = z_lambda(d)
    iters = 0
    while (b - a) > 1e-6 and iters < GOLDEN_MAX_ITERS:
        if fc < fd: # Se elimina la parte superior del intervalo (por
        encima de d), y se reubica el intervalo más abajo
            b = d
            d = c
            fd = fc
            c = b - phi * (b - a)
            fc = z_lambda(c)
        else: # Se elimina la parte inferior del intervalo (por debajo
        de c), y reubica el intervalo más arriba
            a = c
            c = d
            fc = fd
            d = a + phi * (b - a)
            fd = z_lambda(d)
        iters += 1
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
# Se itera y así hasta haber reducido el intervalo por debajo
de 10^-6 o llegar al límite de iteraciones

# Se elige mejor entre a,b,c,d. Todos estos valores son los que
quedan tras todas las iteraciones.
cand = [(a, z_lambda(a)), (b, z_lambda(b)), (c, fc), (d, fd)]
lbest = min(cand, key=lambda t: t[1])[0]
return max(0.0, min(1.0, lbest))

# SE APLICA EL CRITERIO DE CONVERGENCIA (RELATIVE GAP)
def relative_gap(x, y, G, edge_list):
    # La fórmula del criterio de convergencia es: GAP = suma t_a(x_a)
    * (y_a - x_a)/suma t_a(x_a) * x_a
    # Se inician numerador y denominador
    num = 0.0
    denom = 0.0
    for idx, (u, v) in enumerate(edge_list): # Bucle recorriendo todos
los arcos
        data = G[u][v]
        ta = bpr_time(data['t0_h'], x[idx], data['capacidad'],
data['alpha'], data['beta'])
        num += ta * (y[idx] - x[idx])
        denom += ta * x[idx]
    denom = max(denom, 1e-9)
    return abs(num / denom)

# EJECUCIÓN PRINCIPAL DEL MODELO FRANK-WOLFE
def frank_wolfe(G, od_list, tol=TOL, max_iters=MAX_ITERS,
verbose=True):
    # Se inicializa el modelo
    edge_list = list(G.edges())
    m = len(edge_list)
    # Para el flujo inicial x0 se ejecuta el algoritmo All-or-Nothing
    con tiempos libres t0_h
    for (u, v) in edge_list: # Tiempos puestos como tiempos libres
        G[u][v]['t_h'] = G[u][v]['t0_h']
    y0, _ = all_or_nothing(G, od_list, time_attr='t_h') # Rutas
    alternativas iniciales en base a los tiempos libres
    x = y0.copy().astype(float) # Se inicia con AoN (opcional;
    también se puede iniciar en 0)

    if verbose:
        print(f"Iniciando Frank-Wolfe: arcos={m}, OD pares
(viajes)={len(od_list)}")

    for k in range(max_iters): # Se entra en bucle de iteración
        # 1) Se actualizan los tiempos en base a las rutas tomadas (x)
        for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
            data = G[u][v]
            data['t_h'] = bpr_time(data['t0_h'], x[idx],
data['capacidad'], data['alpha'], data['beta'])

        # 2) Se ejecuta el mecanismo All-or-Nothing con los tiempos
actuales. Se obtiene los flujos y.
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
y, _ = all_or_nothing(G, od_list, time_attr='t_h')

# 3) Se calcula el relative gap para diagnostico de si
continuar iterando o cerrar el bucle aquí
gap = relative_gap(x, y, G, edge_list)

if verbose:
    # Se calcula el tiempo total de viaje actual
    total_tt = objective_Z(x, G, edge_list) # En horas de
vehiculo
    print(f"Iter {k:3d}: gap={gap:.6e}, Valor Función
Objetivo={total_tt:.3f} veh*h")

if gap < tol:
    if verbose:
        print("Convergencia alcanzada (gap < tol).")
    break

# 4) Se busca la linealmente el lambda óptimo
lam = line_search_lambda(x, y, G, edge_list)

# 5) Se actualizan los flujos reales x en base al factor de
corrección lambda
x = x + lam * (y - x)

# Al finalizar, se devuelven los flujos por arista, tiempos, y
métricas
final_times = []
for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
    data = G[u][v]
    t = bpr_time(data['t0_h'], x[idx], data['capacidad'],
data['alpha'], data['beta'])
    final_times.append(t)

total_travel_time = objective_Z(x, G, edge_list)
return x, edge_list, np.array(final_times), total_travel_time, gap

# PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
def main():
    print("Construyendo grafo...")
    G = build_graph_from_excel(EDGES_XLSX)
    print("Leyendo OD...")
    od_list = read_od(OD_XLSX)

    print("Ejecutando Frank-Wolfe (Equilibrio de Usuario)...")
    flows, edge_list, times, tot_tt, gap = frank_wolfe(G, od_list,
tol=TOL, max_iters=MAX_ITERS, verbose=True)

    # Se guardan los resultados en excel para cada arco. Esto incluye
nodos, flujo total, capacidad, uso relativo, t libre...
    rows = []
    for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
        data = G[u][v]
        flow = flows[idx]
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
cap = data.get('capacidad', np.nan)
t0 = data.get('t0_h', np.nan)
t_eq = times[idx]
uso = flow / cap if cap > 0 else np.nan
delay_factor = t_eq / t0 if t0 > 0 else np.nan

rows.append({
    'u': u,
    'v': v,
    'flow_total': flow,
    'capacidad_total': cap,
    'uso_relativo': uso,
    't0_h': t0,
    't_eq_h': t_eq,
    'incremento_tiempo_%': (delay_factor - 1) * 100,
    'long_m': data.get('long_m', np.nan)
})

res_df = pd.DataFrame(rows)

# Se guardan los resultados detallados
res_df.to_excel("fw_results_UE_ceuta.xlsx", index=False)

print("Resultados guardados en fw_results_UE_ceuta.xlsx")
print(f"Total travel time (veh*h): {tot_tt:.3f}, final gap approx: {gap:.6e}")

# Se grafican diagramas relevantes para el análisis
plt.figure()
plt.hist(res_df['uso_relativo'].dropna(), bins=20, edgecolor='black')
plt.xlabel('Uso relativo (flow/capacidad)')
plt.ylabel('Frecuencia')
plt.title('Distribución de uso relativo')
plt.grid(True)
plt.savefig("hist_uso_relativo.png", dpi=300)

plt.figure()
plt.hist(res_df['incremento_tiempo_%'].dropna(), bins=20, edgecolor='black')
plt.xlabel('Incremento de tiempo (%)')
plt.ylabel('Frecuencia')
plt.title('Distribución del incremento de tiempo')
plt.grid(True)
plt.savefig("hist_incremento_tiempo.png", dpi=300)

# Se calculan las contribuciones por arco (flujo * tiempo real)
contribuciones = []
for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
    data = G[u][v]
    flow = flows[idx]
    if flow <= 0:
        continue
    cap = data['capacidad']
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
t0 = data['t0_h']
alpha = data['alpha']
beta = data['beta']

ratio = flow / cap if cap > 0 else 0
t_real = t0 * (1.0 + alpha * (ratio ** beta))

contrib = flow * t_real
contribuciones.append(contrib)

# Se crea el histograma de contribuciones
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.hist(contribuciones,
          bins=50,
          color='skyblue',
          edgecolor='black',
          range=(0,500))

# Se añade la línea vertical para la media
mean_contrib = np.mean(contribuciones)
plt.axvline(mean_contrib, color='red', linestyle='dashed',
linewidth=2,
            label=f'Media: {mean_contrib:.2f} veh*h')

# Se configuran las etiquetas y el título
plt.xlabel('Contribución al tiempo total (veh*h)', fontsize=12)
plt.ylabel('Frecuencia', fontsize=12)
plt.title('Distribución de Contribución por Arco al Tiempo Total de Viaje', fontsize=14)
plt.grid(axis='y', alpha=0.5)
plt.legend()

# Se guarda y muestra el histograma
plt.savefig("hist_contribucion_por_arco.png", dpi=300,
bbox_inches='tight')
print("Histograma de contribuciones guardado como hist_contribucion_por_arco.png")

# Se grafica el diagrama de flujos
pos = nx.spring_layout(G, seed=42)

edge_colors = [res_df.loc[idx, 'uso_relativo'] for idx in
range(len(edge_list))]
edge_widths = [max(0.5, res_df.loc[idx, 'flow_total'] /
res_df['flow_total'].max() * 5) for idx in range(len(edge_list))]

plt.figure(figsize=(10,8))
nx.draw_networkx_nodes(G, pos, node_size=400,
node_color='lightblue')
nx.draw_networkx_labels(G, pos)
nx.draw_networkx_edges(G, pos, edgelist=edge_list,
width=edge_widths,
edge_color=edge_colors,
edge_cmap=plt.cm.plasma,
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
arrows=True)

plt.colorbar(plt.cm.ScalarMappable(cmap=plt.cm.plasma),
             label='Uso relativo')
plt.title("Red con grosor=flujo y color=uso relativo")
plt.savefig("grafo_flujos.png", dpi=300)

# Se calcula el tiempo total de evacuación
total_veh = sum(v for _, _, v in od_list) # Suma de viajes
absolutos
suma_tiempos = sum(flows[idx]*times[idx] for idx, (u, v) in
enumerate(edge_list))
cap_salida = sum([G[u][v]['capacidad'] for (u,v) in edge_list if v
in [26, 27]])
tiempo_min = total_veh/cap_salida
tiempo_max_ruta = max(times) # Aprox del arco más lento
T_evacuacion = tiempo_min + tiempo_max_ruta

print(f"Total vehículos a evacuar: {total_veh:.0f}")
print(f"Suma total de tiempos: {suma_tiempos:.0f}")
print(f"Capacidad total de salida: {cap_salida:.0f} veh/h")
print(f"Tiempo mínimo teórico (sin congestión): {tiempo_min:.2f}
h")
print(f"\nTiempo aproximado de evacuación: {T_evacuacion:.2f} h")

if __name__ == "__main__":
    main()
```

II. CÓDIGO EMPLEADO PARA LA EJECUCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA

```

# Modelo de Ceuta de asignación de rutas para Ceuta - Frank-Wolfe
# (System Optimization)

# Como inputs para el modelo se proponen los siguientes archivos:
# - EDGES_XLSX: empleando las columnas
u,v,long_m,vel_kmh,capacidad,alpha,beta,direccion
# - OD_XLSX: empleando las columnas origen,destino,viajes (viajes =
número absoluto - total a asignar)

#Como outputs se obtendrán:
# - los flujos por cada arco (en las mismas unidades que trips)
# - los tiempos por arista (horas)
# - el tiempo total de viaje en el sistema

# IMPORTACIÓN DE LIBRERÍAS
import math
import numpy as np
import pandas as pd
import networkx as nx
from math import inf
import matplotlib.pyplot as plt

# PARÁMETROS Y ARCHIVOS
EDGES_XLSX = "ceuta_edges.xlsx"      # Ruta al archivo excel de los arcos
en ceuta
OD_XLSX = "ceuta_OD_abs.xlsx"        # Ruta al archivo excel de la matriz
OD (origen,destino,viajes)
TOL = 1e-4                           # Criterio de convergencia (relative
gap, previamente mencionado en el capítulo 3)
MAX_ITERS = 200                      # Número máximo de iteraciones
GOLDEN_MAX_ITERS = 60                # Iteraciones para golden section en la
búsqueda lineal del lambda óptimo
TIME_HORIZON = 1.0                   # Horas del horizonte del plan por si
se quiere convertir unidades

# Se debe considerar lo siguiente sobre unidades:
# Las capacidades del fichero edges están en veh/h y los trips en OD
son "vehículos totales en T horas",
# entonces se debe convertir capacidad_por_período =
capacidad_por_hora * TIME_HORIZON
# Alternativamente, se puede convertir trips a tasa por hora:
trips_per_hour = trips / TIME_HORIZON.
# Se asume que:
#   - trips en OD = vehículos totales en el horizonte TIME_HORIZON
#   - capacidad en excel está en veh/h -> lo convertimos multiplicando
por TIME_HORIZON
# Si ya se tiene capacidad en unidades por horizonte, basta con poner
TIME_HORIZON=1.0 o ignorar la conversión.

```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
CONVERT_CAPACITY_FROM_PER_H_TO_PERIOD = True # True: multiplicamos  
capacidad_por_h * TIME_HORIZON  
  
# FUNCIONES BPR (BUREAU OF PUBLIC ROADS)  
def bpr_time(t0, x, cap, alpha=0.15, beta=4.0):  
    # Función para cálculo del tiempo según función BPR (t0 en horas,  
    x y cap en mismas unidades).  
    if cap <= 0:  
        return float('inf')  
    # Para evitar overflow en potencias con x/cap:  
    ratio = x / cap if cap > 0 else 1e9  
    ta = t0 * (1.0 + alpha * ratio ** beta)  
    return ta  
  
# SE CONSTRUYE LA RED DE TRANSPORTE EN BASE AL ARCHIVO EXCEL  
def build_graph_from_excel(edges_xlsx):  
    edges_df = pd.read_excel(edges_xlsx)  
    # Se debe tener el formato de columnas:  
    u,v,long_m,vel_kmh,capacidad,alpha,beta,direccion (directed 0/1)  
    G = nx.DiGraph()  
    for idx, row in edges_df.iterrows():  
        u = int(row['u'])  
        v = int(row['v'])  
        long_m = float(row['long_m'])  
        vel_kmh = float(row['vel_kmh'])  
        capacidad = float(row['capacidad'])  
        alpha = float(row.get('alpha', 0.15))  
        beta = float(row.get('beta', 4.0))  
        direccion = int(row.get('direccion', 1))  
  
        # Se calcula el tiempo libre en horas (tiempo en recorrer un  
        arco si no hay tráfico)  
        t0_h = (long_m / 1000.0) / vel_kmh if vel_kmh > 0 else 1.0  
  
        # Se convierte la capacidad si está en veh/h y se trabaja con  
        horizonte TIME_HORIZON  
        if CONVERT_CAPACITY_FROM_PER_H_TO_PERIOD:  
            capacidad = capacidad * TIME_HORIZON  
  
        G.add_edge(u, v, long_m=long_m, vel_kmh=vel_kmh,  
        capacidad=capacidad,  
                    alpha=alpha, beta=beta, t0_h=t0_h)  
  
        # Si la arista es bidireccional (direccion==0), se añade la  
        inversa con mismos atributos  
        if direccion == 0:  
            if not G.has_edge(v, u):  
                G.add_edge(v, u, long_m=long_m, vel_kmh=vel_kmh,  
                capacidad=capacidad,  
                            alpha=alpha, beta=beta, t0_h=t0_h)  
    return G  
  
# CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ ORIGEN DESTINO MEDIANTE ARCHIVO EXCEL  
def read_od(od_xlsx):
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
od_df = pd.read_excel(od_xlsx)
# El archivo de tener las columnas origen,destino,viajes (Nº
absoluto para todo el horizonte)
od_list = []
for _, r in od_df.iterrows():
    o = int(r['origen'])
    d = int(r['destino'])
    viajes = float(r['viajes'])
    if viajes > 0:
        od_list.append((o, d, viajes))
return od_list

# MECANISMO DE ASIGNACIÓN TODO O NADA
def all_or_nothing(G, od_list, time_attr='t_h'):
    # Se realiza una primera asignación Todo o Nada en base a la red
    # de transporte, los viajes a realizar y los tiempos libres
    # Se obtiene como resultado un vector de flujos por arco en
    edge_list

    edge_list = list(G.edges())
    edge_index = {e: idx for idx, e in enumerate(edge_list)}
    y = np.zeros(len(edge_list), dtype=float)

    # Se recorre un bucle for para cada par de rutas origen destino
    for o, d, trips in od_list:
        if o == d or trips <= 0:
            continue
        try:
            path = nx.shortest_path(G, source=o, target=d,
weight=time_attr)
        except nx.NetworkXNoPath:
            # Si no hay camino: saltar
            continue
        # Se suma toda la demanda en cada arco del camino
        for a, b in zip(path[:-1], path[1:]):
            idx = edge_index.get((a, b))
            if idx is not None:
                y[idx] += trips
    return y, edge_list

# FUNCIÓN OBJETIVO Z
# El tiempo total de viaje es la suma de las multiplicaciones de los
# flujos por los tiempos actuales
def objective_z(flows, G, edge_list):
    Z = 0.0
    for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
        data = G[u][v]
        x = flows[idx]
        Z += data['t0_h'] * (x + data['alpha']) * (x ** (data['beta'] +
1.0)) / (data['capacidad'] ** data['beta']))
    return Z # en horas de vehículo

# SELECCIÓN ÓPTIMA DE LAMBDA
def line_search_lambda(x, y, G, edge_list):
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
# La función minimiza Z(x+lambda*(y-x)), consigiendose el
lambda_opt

phi = (math.sqrt(5) - 1) / 2 # approx 0.618
a, b = 0.0, 1.0
# Se inicializan los puntos c y d para partir el intervalo [0,1]
en varios segmentos
c = b - phi * (b - a)
d = a + phi * (b - a)

# Se define la función Z de lambda, que ejecuta la función
objetivo Z, pero con los flujos modificados en función de lambda
def Z_lambda(lmbda):
    f_try = x + lmbda * (y - x)
    return objective_Z(f_try, G, edge_list)

# Se guardan los valores de Z para los lambdas de c y d
fc = Z_lambda(c)
fd = Z_lambda(d)
iters = 0
while (b - a) > 1e-6 and iters < GOLDEN_MAX_ITERS:
    if fc < fd: # Se elimina la parte superior del intervalo (por
encima de d), y se reubica el intervalo más abajo
        b = d
        d = c
        fd = fc
        c = b - phi * (b - a)
        fc = Z_lambda(c)
    else: # Se elimina la parte inferior del intrvalo (por debajo
de c), y reubica el intrvalo más arriba
        a = c
        c = d
        fc = fd
        d = a + phi * (b - a)
        fd = Z_lambda(d)
    iters += 1
    # Se iterá y así hasta haber reducido el intervalo por debajo
    de 10^-6 o llegar al límite de iteraciones

    # Se elige mejor entre a,b,c,d. Todos estos valores son los que
quedan tras todas las iteraciones.
    cand = [(a, Z_lambda(a)), (b, Z_lambda(b)), (c, fc), (d, fd)]
    lbest = min(cand, key=lambda t: t[1])[0]
return max(0.0, min(1.0, lbest))

# SE APLICA EL CRITERIO DE CONVERGENCIA (RELATIVE GAP)
def relative_gap(x, y, G, edge_list):
    # La fórmula del criterio de convergencia es: GAP = suma t_a(x_a)
    * (y_a - x_a)/suma t_a(x_a) * x_a
    # Se inician numerador y denominador
    num = 0.0
    denom = 0.0
    for idx, (u, v) in enumerate(edge_list): # Bucle recorriendo todos
los arcos
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
data = G[u][v]
ta = bpr_time(data['t0_h'], x[idx], data['capacidad'],
data['alpha'], data['beta'])
num += ta * (y[idx] - x[idx])
denom += ta * x[idx]
denom = max(denom, 1e-9)
return abs(num / denom)

# EJECUCIÓN PRINCIPAL DEL MODELO FRANK-WOLFE
def frank_wolfe(G, od_list, tol=TOL, max_iters=MAX_ITERS,
verbose=True):
    # Se inicializa el modelo
    edge_list = list(G.edges())
    m = len(edge_list)
    # Para el flujo inicial x0 se ejecuta el algoritmo All-or-Nothing
    con tiempos libres t0_h
    for (u, v) in edge_list: # Tiempos puestos como tiempos libres
        G[u][v]['t_h'] = G[u][v]['t0_h']
    y0, _ = all_or_nothing(G, od_list, time_attr='t_h') # Rutas
    alternativas iniciales en base a los tiempos libres
    x = y0.copy().astype(float) # Se inicia con AoN (opcional;
    también se puede iniciar en 0)

    if verbose:
        print(f"Iniciando Frank-Wolfe: arcos={m}, OD pares
(viajes)={len(od_list)}")

    for k in range(max_iters): # Se entra en bucle de iteración
        # 1) Se actualizan los tiempos en base a las rutas tomadas (x)
        for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
            data = G[u][v]
            data['t_h'] = bpr_time(data['t0_h'], x[idx],
data['capacidad'], data['alpha'], data['beta'])

        # 2) Se ejecuta el mecanismo All-or-Nothing con los tiempos
        actuales. Se obtiene los flujos y.
        y, _ = all_or_nothing(G, od_list, time_attr='t_h')

        # 3) Se calcula el relative gap para diagnostico de si
        continuar iterando o cerrar el bucle aquí
        gap = relative_gap(x, y, G, edge_list)

        if verbose:
            # Se calcula el tiempo total de viaje actual
            total_tt = objective_Z(x, G, edge_list) # En horas de
            vehiculo
            print(f"Iter {k:3d}: gap={gap:.6e}, Valor Función
Objetivo={total_tt:.3f} veh*h")

        if gap < tol:
            if verbose:
                print("Convergencia alcanzada (gap < tol).")
            break
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
# 4) Se busca la linealmente el lambda óptimo
lam = line_search_lambda(x, y, G, edge_list)

# 5) Se actualizan los flujos reales x en base al factor de
corrección lambda
x = x + lam * (y - x)

# Al finalizar, devolver flujos por arista, tiempos, y métricas
final_times = []
for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
    data = G[u][v]
    t = bpr_time(data['t0_h'], x[idx], data['capacidad'],
data['alpha'], data['beta'])
    final_times.append(t)

total_travel_time = objective_Z(x, G, edge_list)
return x, edge_list, np.array(final_times), total_travel_time, gap

# PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
def main():
    print("Construyendo grafo...")
    G = build_graph_from_excel(EDGES_XLSX)
    print("Leyendo OD...")
    od_list = read_od(OD_XLSX)

    print("Ejecutando Frank-Wolfe (Optimización del sistema)...")
    flows, edge_list, times, tot_tt, gap = frank_wolfe(G, od_list,
tol=TOL, max_iters=MAX_ITERS, verbose=True)

    # Se guardan los resultados en excel para cada arco. Esto incluye
    # nodos, flujo total, capacidad, uso relativo, t libre...
    rows = []
    for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
        data = G[u][v]
        flow = flows[idx]
        cap = data.get('capacidad', np.nan)
        t0 = data.get('t0_h', np.nan)
        t_eq = times[idx]
        uso = flow / cap if cap > 0 else np.nan
        delay_factor = t_eq / t0 if t0 > 0 else np.nan

        rows.append({
            'u': u,
            'v': v,
            'flow_total': flow,
            'capacidad_total': cap,
            'uso_relativo': uso,
            't0_h': t0,
            't_eq_h': t_eq,
            'incremento_tiempo_%': (delay_factor - 1) * 100,
            'long_m': data.get('long_m', np.nan)
        })

res_df = pd.DataFrame(rows)
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
# Se guardan los resultados detallados
res_df.to_excel("fw_results_SO_ceuta.xlsx", index=False)

print("Resultados guardados en fw_results_SO_ceuta.xlsx")
print(f"Total travel time (veh*h): {tot_tt:.3f}, final gap approx:
{gap:.6e}")

# Se grafican diagramas relevantes para el análisis
plt.figure()
plt.hist(res_df['uso_relativo'].dropna(), bins=20,
edgecolor='black')
plt.xlabel('Uso relativo (flow/capacidad)')
plt.ylabel('Frecuencia')
plt.title('Distribución de uso relativo')
plt.grid(True)
plt.savefig("hist_uso_relativo.png", dpi=300)

plt.figure()
plt.hist(res_df['incremento_tiempo_%'].dropna(), bins=20,
edgecolor='black')
plt.xlabel('Incremento de tiempo (%)')
plt.ylabel('Frecuencia')
plt.title('Distribución del incremento de tiempo')
plt.grid(True)
plt.savefig("hist_incremento_tiempo.png", dpi=300)

# Se calculan las contribuciones por arco (flujo * tiempo real)
contribuciones = []
for idx, (u, v) in enumerate(edge_list):
    data = G[u][v]
    flow = flows[idx]
    if flow <= 0:
        continue
    cap = data['capacidad']
    t0 = data['t0_h']
    alpha = data['alpha']
    beta = data['beta']

    ratio = flow / cap if cap > 0 else 0
    t_real = t0 * (1.0 + alpha * (ratio ** beta))

    contrib = flow * t_real
    contribuciones.append(contrib)

# Se crear el histograma de contribuciones
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.hist(contribuciones,
         bins=50,
         color='skyblue',
         edgecolor='black',
         range=(0, 500))

# Se añade la línea vertical para la media
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
mean_contrib = np.mean(contribuciones)
plt.axvline(mean_contrib, color='red', linestyle='dashed',
linewidth=2,
label=f'Media: {mean_contrib:.2f} veh*h')

# Se configuran las etiquetas y el título
plt.xlabel('Contribución al tiempo total (veh*h)', fontsize=12)
plt.ylabel('Frecuencia', fontsize=12)
plt.title('Distribución de Contribución por Arco al Tiempo Total de Viaje', fontsize=14)
plt.grid(axis='y', alpha=0.5)
plt.legend()

# Se guarda y muestra el histograma
plt.savefig("hist_contribucion_por_arco.png", dpi=300,
bbox_inches='tight')
print("Histograma de contribuciones guardado como hist_contribucion_por_arco.png")

# Se grafica el diagrama de flujos
pos = nx.spring_layout(G, seed=42)

edge_colors = [res_df.loc[idx, 'uso_relativo'] for idx in
range(len(edge_list))]
edge_widths = [max(0.5, res_df.loc[idx, 'flow_total'] /
res_df['flow_total'].max() * 5) for idx in range(len(edge_list))]

plt.figure(figsize=(10,8))
nx.draw_networkx_nodes(G, pos, node_size=400,
node_color='lightblue')
nx.draw_networkx_labels(G, pos)
nx.draw_networkx_edges(G, pos, edgelist=edge_list,
width=edge_widths,
edge_color=edge_colors,
edge_cmap=plt.cm.plasma,
arrows=True)

plt.colorbar(plt.cm.ScalarMappable(cmap=plt.cm.plasma),
label='Uso relativo')
plt.title("Red con grosor=flujo y color=uso relativo")
plt.savefig("grafo_flujos.png", dpi=300)

# Se calcula el tiempo total de evacuación
total_veh = sum(v for _, _, v in od_list) # Suma de viajes
absolutos
suma_tiempos = sum(flows[idx]*times[idx] for idx, (u, v) in
enumerate(edge_list))
cap_salida = sum([G[u][v]['capacidad'] for (u,v) in edge_list if v
in [26, 27]])
tiempo_min = total_veh/cap_salida
tiempo_max_ruta = max(times) # aprox del arco más lento
T_evacuacion = tiempo_min + tiempo_max_ruta

print(f"Total vehículos a evacuar: {total_veh:.0f}")
```

PLAN DE EVACUACIÓN Y DEFENSA DE UNA CIUDAD

```
print(f"Suma total de tiempos: {suma_tiempos:.0f}")
print(f"Capacidad total de salida: {cap_salida:.0f} veh/h")
print(f"Tiempo mínimo teórico (sin congestión): {tiempo_min:.2f} h")
print(f"\nTiempo aproximado de evacuación: {T_evacuacion:.2f} h")

if __name__ == "__main__":
    main()
```