



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Facultad de Administración y Dirección de Empresas

Resolución de un problema real de optimización dentro del
ámbito de ciudad saludable mediante técnicas de
investigación operativa

Trabajo Fin de Grado

Grado en Administración y Dirección de Empresas

AUTOR/A: Pan Jiang, Wanzhen Ana

Tutor/a: Vallada Regalado, Eva

Cotutor/a: Villa Juliá, María Fulgencia

Director/a Experimental: KARPOVA KRYLOVA, YULIA

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, agradezco a mis tutoras, Ful, Yulia y Eva, personas de gran sabiduría quienes me han apoyado en todo momento. Nunca he tenido la oportunidad de tenerlas como profesora de clase, pero me alegro mucho de haberlas conocido, y sobre todo que me hayan acompañado durante la etapa del TFG. Gracias a ellas, he podido elaborar una tesis en la que me he divertido, y plantearme futuros proyectos relacionados con la IO.

Gracias a mi familia por la insistencia diaria y el apoyo moral. En especial a mi hermana y mi novio que me han estado animando constantemente.

Gracias a mi manager del trabajo actual por ser tan comprensivo y al apoyo inmenso que he recibido. Ha sido como un hermano mayor para mí.

RESUMEN

La importancia de una ciudad más sostenible está surgiendo en muchos países del mundo, no sólo para luchar contra el calentamiento global, sino también para crear un estilo de vida más saludable para los ciudadanos. Por ello, disponer de espacios verdes en las zonas urbanas es esencial para proporcionar relajación psicológica, estimular la cohesión social y apoyar la actividad física, que a su vez reduce la saturación en los hospitales e, incluso, la tasa de mortalidad.

El término de ciudad sostenible procede de un concepto más amplio denominado 15-Minute City. 15-Minute City es un concepto de planificación urbana que pretende ofrecer a las comunidades urbanas el acceso a la mayoría de sus necesidades cotidianas, como la alimentación, la salud, la vivienda, el transporte y el entretenimiento, a poca distancia a pie o en bicicleta. También se le puede considerar como una vuelta al estilo de vida local ya que contribuye a mejorar los barrios, a acercar a la gente, a aumentar el tiempo y el espacio para hacer ejercicio y evitar la contaminación. Se trata de un modo de vida con menos emisiones de carbono y que conecta a las personas con sus barrios.

El objetivo de este trabajo es, acotando el concepto de 15 minutos y centrándose en la salud, proponer (o desarrollar) herramientas cuya utilización podría empujar a Valencia a ser una ciudad más saludable, asegurando que cada barrio tenga en una distancia de 5 minutos a pie el espacio verde recomendado por la OMS. Para ello, se utilizará la programación matemática y un software llamado *QGIS* para ayudar a identificar los distritos que carecen de espacios verdes y proponer posibles localizaciones para ubicar zonas verdes para aquellas personas que no pueden acceder fácilmente a éstas.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	8
1.1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.2. OBJETIVOS	12
1.3. MOTIVACIÓN	13
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....	15
2.1. METODOLOGÍA.....	15
2.2. HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN ESTE TRABAJO	16
2.2.1. <i>Introducción al software QGIS 3.22</i>	16
2.2.2. <i>Introducción a la herramienta VBA OpenSolver</i>	17
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO	19
3.1. SUPERFICIES VERDES URBANAS.....	19
3.1.1. <i>Beneficios de las zonas verdes</i>	21
3.1.2. <i>Elementos que compone una zona verde</i>	26
3.2. EL CONCEPTO DE ISÓCRONAS Y LA DEFINICIÓN DE COBERTURA	28
3.2.1. <i>Isócronas</i>	28
3.2.2. <i>Cobertura</i>	31
3.2.3. <i>Problemas de localización</i>	31
CAPÍTULO IV. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	34
4.1. UBICACIONES DE LAS ZONAS VERDES ACTUALES EN EL ÁREA METROPOLITANA DE VALENCIA	34
4.2. CUBRIMIENTO ACTUAL DE LA CAPITAL DE VALENCIA	38
4.3. ZONAS NO CUBIERTAS POR ESPACIOS VERDES ACTUALES	41
CAPÍTULO V. ESPECIFICACIÓN MATEMÁTICA, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
5.1. MATRIZ DE POBLACIÓN CUBIERTA EN QGIS 3.22	47
5.2. MODELIZACIÓN	51
5.2.1. <i>Parámetros y variables de decisión</i>	51

5.2.2. <i>Modelo matemático 1</i>	52
5.2.3. <i>Modelo matemático 2</i>	54
5.2.4. <i>Modelo matemático 3</i>	60
CAPÍTULO VI. COMPARACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	64
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES	66
7.1. SÍNTESIS	66
7.2. LIMITACIONES	67
7.3. PROPUESTAS DE MEJORA Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS	67
ANEXOS	69
ANEXO I. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE	69
ANEXO II. UBICACIONES ACTUALES DE LAS ZONAS VERDES (ELABORACIÓN PROPIA A TRAVÉS DE LA INFORMACIÓN DE GEOPORTAL)	72
ANEXO III. PROCEDIMIENTO DE LA OBTENCIÓN DE LAS ISÓCRONAS EN QGIS 3.22	75
ANEXO IV. POSIBLES LOCALIZACIONES POR DISTRITO	80
ANEXO V. INFORMACIÓN DE LAS 20 POSIBLES LOCALIZACIONES PARA UBICAR ZONAS VERDES	81
ANEXO VI. MATRIZ DE LA POBLACIÓN CUBIERTA	82
ANEXO VII. PROCEDIMIENTO DE LA INSTALACIÓN Y USO DEL OPENSOLVER	83
BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CIUDADES GANADORAS DE EUROPEAN GREEN CAPITAL AWARD	9
FIGURA 2. LA CIUDAD DE 15 MINUTOS DE PARÍS.....	11
FIGURA 3. INDICADORES DE LA AGENDA 2030 DEL ODS 11	13
FIGURA 4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN OPERATIVA.....	15
FIGURA 5. SUPERFICIE VERDE POR HABITANTE EN VALENCIA.....	20
FIGURA 6. GREEN AREA DE CÁDIZ, ESPAÑA.....	21
FIGURA 7. GREEN AREA DE PAREDES, PORTUGAL.....	22
FIGURA 8. CONCENTRACIONES DE NO ₂ EN ZONAS ABIERTAS Y BAJO EL DOSEL ARBÓREO EN BOSQUES PERI-URBANOS	23
FIGURA 9. ANÁLISIS DE LA EFICACIA DE UN SETO COMO BARRERA VEGETAL FRENTE LA DISPERSIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	25
FIGURA 10. CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS A DIFERENTES ALTURAS EN LAS FACHADAS DE LOS EDIFICIOS.....	26
FIGURA 11. EJEMPLO DE ISÓCRONA CALCULADA A PIE CON TIEMPO DE 5 MINUTOS.....	28
FIGURA 12. EJEMPLO DE ISÓCRONAS CALCULADAS A PIE CON TIEMPOS DE 5 Y 10 MINUTOS	29
FIGURA 13. EJEMPLO DE ISÓCRONAS CALCULADAS PARA VARIOS MODOS DE TRANSPORTE CON TIEMPOS DE 5 Y 10 MINUTOS.....	30
FIGURA 14. DIFERENTES PROBLEMAS DE LOCALIZACIÓN.....	32
FIGURA 15. DISTRITOS DE VALENCIA USADOS EN ESTE TRABAJO PARA LAS UBICAR LAS POSIBLES LOCALIZACIONES..	36
FIGURA 16. ZONAS VERDES PINTADAS MANUALMENTE CON LA AYUDA DE GEOPORTAL	37
FIGURA 17. CENTROIDES DE PARQUES GRANDES Y DE BARRIO	38
FIGURA 18. VISUALIZACIÓN MEDIANTE ISÓCRONAS DEL CUBRIMIENTO ACTUAL DE LAS ZONAS VERDES EN LA CAPITAL DE VALENCIA.....	39
FIGURA 19. ZONA CUBIERTA ACTUAL	41
FIGURA 20. ZONA DESCUBIERTA.....	42
FIGURA 21. POSIBLES LOCALIZACIONES EN ZONAS DESCUBIERTAS.....	43
FIGURA 22. POSIBLES LOCALIZACIONES EN LA ZONA DESCUBIERTA DEL ÁREA METROPOLITANA DE VALENCIA	44
FIGURA 23. INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA SUELO URBANO Y URBANIZABLE	45
FIGURA 24. ISÓCRONAS DE LAS POSIBLES LOCALIZACIONES CON SOLAPAMIENTO.....	49
FIGURA 25. ISÓCRONAS DE LAS POSIBLES LOCALIZACIONES SIN SOLAPAMIENTO	49
FIGURA 26. UBICACIONES PARA ZONAS VERDES DE LA SOLUCIÓN MODELO 1.....	53
FIGURA 27. DISTANCIAS EUCLÍDEAS ENTRE LAS POSIBLES LOCALIZACIONES Y ZONAS VERDES ACTUALES	55
FIGURA 28. DISTANCIAS EUCLÍDEAS VERSUS DISTANCIAS REALES	58
FIGURA 29. UBICACIONES PARA ZONAS VERDES DE LA SOLUCIÓN MODELO 2.....	59
FIGURA 30. UBICACIONES PARA ZONAS VERDES DE LA SOLUCIÓN MODELO 3.....	63
FIGURA 31. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS 3 MODELOS.....	64
FIGURA 32. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS 3 MODELOS CON ALPHA 10%	65
FIGURA 33. LOS ODS EN 3 NIVELES.....	69
FIGURA 34. SITUACIÓN ACTUAL DEL OBJETIVO 3 DE LOS ODS	70
FIGURA 35. SITUACIÓN ACTUAL DEL OBJETIVO 11 DE LOS ODS	71
FIGURA 36. CREACIÓN DE LA CAPA VECTORIAL DE LAS 20 POSIBLES LOCALIZACIONES.....	75

FIGURA 37. INSTALACIÓN DEL COMPLEMENTO ORS TOOLS EN QGIS 3.22	76
FIGURA 38. VENTANA DEL COMPLEMENTO ORS TOOLS	76
FIGURA 39. VENTANA DEL COMPLEMENTO ORS TOOLS EN BATCH JOBS	77
FIGURA 40. VENTANA PARA INTRODUCIR CLAVE API	78
FIGURA 41. VENTANA DE CRITERIOS PARA EL CÁLCULO DE LAS ISÓCRONAS DE LAS 20 POSIBLES LOCALIZACIONES ...	79
FIGURA 42. ISÓCRONAS CREADAS Y REPRESENTADAS EN EL MAPA	79
FIGURA 43. MATRIZ DE POBLACIÓN CUBIERTA	82
FIGURA 44. CARPETA ZIP DE OPENSOLVER	83
FIGURA 45. OPENSOLVER INCORPORADO EN EXCEL.....	83
FIGURA 46. VENTANA DE OPENSOLVER MODEL	84

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COMPARACIÓN DE GREEN AREA ENTRE CÁDIZ Y PAREDES	22
TABLA 2. TABLA DE ATRIBUTOS DE LAS ISÓCRONAS DE LOS PARQUES DE BARRIO	40
TABLA 3. TABLA DE ATRIBUTOS DE LAS ISÓCRONAS DE LOS GRANDES PARQUES	40
TABLA 4. MUESTRA DE LA MATRIZ DE LA POBLACIÓN CUBIERTA	47
TABLA 5. EJEMPLO DE UNA TABLA DE ATRIBUTOS DE UNA CAPA VECTORIAL	48
TABLA 6. TABLA DE ATRIBUTOS DE LAS ISÓCRONAS SIN SOLAPAMIENTO.....	50
TABLA 7. PARÁMETROS DEL PROBLEMA.....	51
TABLA 8. VARIABLE DE DECISIÓN	51
TABLA 9. POBLACIÓN CUBIERTA POR DISTRITOS DADA POR MODELO 1	54
TABLA 10. DISTANCIAS EUCLÍDEAS DESDE POSIBLES LOCALIZACIONES A ZONAS VERDES ACTUALES.....	56
TABLA 11. DISTANCIAS REALES DESDE POSIBLES LOCALIZACIONES A ZONAS VERDES ACTUALES.....	57
TABLA 12. UBICACIONES PARA ZONAS VERDES DE LA SOLUCIÓN MODELO 2	59
TABLA 13. MATRIZ DE PAGOS	60
TABLA 14. UBICACIONES PARA ZONAS VERDES DE LA SOLUCIÓN MODELO 3	62
TABLA 15. UBICACIONES ACTUALES DE LAS ZONAS VERDES.....	74
TABLA 16. POSIBLES LOCALIZACIONES POR DISTRITO.....	80
TABLA 17. INFORMACIÓN DE LAS 20 POSIBLES ZONAS VERDES.....	81

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Según las últimas estimaciones de las Naciones Unidas elaboradas por el Worldometer (ONU, 2022), la población mundial actual es de 8.000 millones de personas y una gran parte se concentra en las grandes ciudades. Estas ciudades son las que más contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero¹ (GEI), y sin embargo, al mismo tiempo, ofrecen la mayor esperanza de reducir la huella ecológica a escala global (Iberdrola, 2018).

En las últimas décadas, el mundo ha experimentado una enorme urbanización. Las ciudades albergaban a unos 4.000 millones de personas (el 54% de la población mundial) en 2015, y se espera que esa cifra aumente a unos 5.000 millones en 2030, según las predicciones (Sivaraman, 2020). Esta rápida urbanización trae consigo una serie de problemas, como la expansión de los barrios marginales, la insuficiencia de servicios básicos e infraestructuras y el aumento de la contaminación atmosférica, como muestra el último informe Ciudades y Cambio Climático (Iberdrola, 2018), donde se indica que los asentamientos urbanos son responsables de hasta el 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero, a pesar de ocupar sólo el 2% de la superficie mundial.

Las ciudades son fundamentales en la batalla contra el cambio climático porque pueden liderar la transición hacia una economía baja en carbono basada en la eficiencia y las energías renovables. Por ello, ARCADIS² en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) ha elaborado un informe anual llamado *El Índice de Ciudades Sostenibles*, cuyo objetivo es desarrollar un sistema de clasificación de las 100 ciudades más sostenibles del mundo (Arcadis, 2018). Para la clasificación de las ciudades en este estudio se tienen en cuenta tres pilares:

- El componente social: aspectos de la calidad de vida de los residentes de una ciudad, como la salud, el empleo y la educación.
- El factor medioambiental: factores relacionados con las circunstancias que dan a una ciudad su "etiqueta verde", como los niveles de contaminación, las actividades de reciclaje, la expansión de las zonas verdes, etc.
- El requisito económico: el bienestar económico de los residentes de una ciudad.

¹ Los gases de efecto invernadero retiene el calor del sol, lo que provoca el aumento de la temperatura de la Tierra. El dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los gases fluorados son los más comunes.

² Arcadis es la empresa líder mundial en el suministro de soluciones de diseño, ingeniería y consultoría sostenibles para activos naturales y construidos.

Muchas ciudades se están planteando apoyarse en estos pilares para convertirse en ciudades sostenibles. Europa, por ejemplo, ha apostado por el Green Deal³. En 2010, la Comisión Europea creó el European Green Capital Award para reconocer el importante papel de las ciudades y los gobiernos locales en la preservación del medio ambiente, así como su alto nivel de compromiso con la mejora a largo plazo. Las ciudades con la mayor puntuación obtenida dependiendo del año se muestra en la Figura 1 (Fuente: European Commission 2018):



Figura 1. Ciudades ganadoras de European Green Capital Award

Fuente: (Comisión Europea, 2022)

Es cierto que cada vez más personas están más concienciadas de la importancia de tener una ciudad más verde y social, y a pesar de ello hasta que el brote mundial de COVID-19 no apareció, nadie puso de manifiesto fallos en la planificación urbana que hasta entonces habían pasado desapercibidos y que la eliminación de estos fallos podría mejorar la vida urbana y reducir la huella ecológica (TUMI, 2021). Mientras las ciudades se sometieron a cierres para garantizar niveles adecuados de salud, los problemas generados por la pandemia han impulsado un replanteamiento radical de la ciudad, lo que ha dado lugar al resurgimiento de un concepto ofrecido por primera vez por Carlos Moreno⁴ en 2016: la "Ciudad de 15 minutos". Este concepto ofrece una perspectiva única sobre el

³ Green Deal es un conjunto de iniciativas políticas de la Comisión Europea con el objetivo general de que la Unión Europea sea climáticamente neutra en 2050.

⁴ Carlos Moreno es un científico franco-colombiano y profesor universitario.

cronourbanismo que va en la direcció opuesta al urbanismo moderno. El objetivo de este modelo de planificación urbana es ayudar a combatir la hegemonía del automóvil y crear entornos urbanos más sostenibles, centrados en el ser humano (Moreno, *Introducing the “15-Minute City”*, 2021). La idea es que las ciudades deben diseñarse o rediseñarse para que en la distancia de 15 minutos a pie o en bicicleta, la gente pueda vivir la esencia de lo que constituye la experiencia urbana: acceder al trabajo, la vivienda, la alimentación, la salud, la educación, la cultura y el ocio.

Para diseñar una ciudad de 15 minutos, en primer lugar, hay que saber de qué recursos se dispone y cómo se utilizan. Luego hay que preguntarse qué servicios hay en los alrededores, no sólo en el centro de la ciudad, sino en todos los alrededores. Proveedores de salud, tiendas, artesanos, mercados, deportes, vida cultural, escuelas, parques. Habría que analizar a fondo cómo utilizamos nuestros metros cuadrados. Los cuatro principios rectores que son los elementos clave de la ciudad de 15 minutos son (Moreno, 2020):

- La ecología: para una ciudad verde y sostenible
- La proximidad: para vivir con una distancia reducida a otras actividades
- La solidaridad: para crear vínculos entre las personas
- La participación: implicar activamente a los ciudadanos en la transformación del barrio

La primera ciudad en adoptar el concepto de la Ciudad de 15 minutos ha sido París. La Figura 2 es la planificación urbana implementada por Moreno en París, la cual aborda todas las necesidades principales de las personas en una distancia de 15 minutos: hacer la compra, hacer ejercicio, zonas verdes, educación, etc. Fue un plan ideado junto con la alcaldesa de París, Anne Hidalgo. Su objetivo era desarrollar una ciudad más respetuosa con el medio ambiente y socialmente inclusiva. Las características principales que debía tener son (TUMI, 2021):

1. La ciudad debe seguir el ritmo de las personas, no de los coches.
2. Cada metro cuadrado debe servir para múltiples usos.
3. Los barrios urbanos deben diseñarse de manera que la gente no tenga que desplazarse lejos.

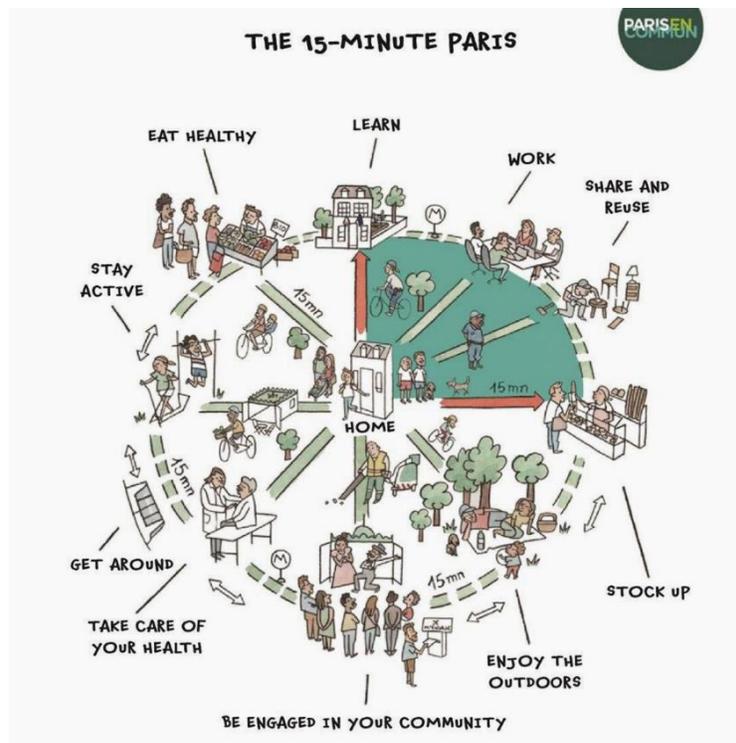


Figura 2. La ciudad de 15 minutos de París

Fuente: (TUMI, 2021)

Cada una de las necesidades observadas en la Figura 2 representa un problema suficientemente amplio y complejo, al que se puede dedicar una rama de estudio independiente. Dado este hecho, en este trabajo nos vamos a centrar en el tema medioambiental. El enfoque del tema medioambiental se trata más sobre el entorno verde de la ciudad, ya que ofrecen oportunidades para la actividad física, el compromiso social y la reducción del estrés. Un número creciente de estudios epidemiológicos demuestra que la conservación de las zonas verdes urbanas tiene una serie de consecuencias favorables, como la mejora de la salud mental y la reducción de la depresión, la mejora de los resultados de los embarazos y la reducción de las tasas de morbilidad y mortalidad cardiovascular, la obesidad y la diabetes (ONU, s.f.).

Para abordar el enfoque medioambiental de este Trabajo Fin de Grado, se va a apoyar en la IO (Investigación Operativa) para resolver el problema, ya que ayuda a la toma de decisiones y a un uso más racional de los recursos, con lo que implica un ahorro en costes. Un mejor aprovechamiento de los recursos incrementa la eficiencia, y en consecuencia una disminución en costes.

En el siguiente apartado se abordarán los detalles y objetivos del trabajo.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es desarrollar una herramienta a través de la Investigación Operativa (IO), que ayude a las personas a tomar decisiones acerca de un problema de cubrimiento, más concretamente las posibles colocaciones de una zona verde en la ciudad de Valencia para mejorar los aspectos medioambientales.

Como objetivos secundarios, se intentará localizar los espacios verdes que hay en la ciudad de Valencia e identificar qué barrios tienen acceso a ellos en una distancia de 5 y 10 minutos a pie. Por lo tanto, se obtendrá un mapa real de aquellos barrios que tienen poca accesibilidad a una zona verde. De esta manera, se podrá construir un modelo matemático en el que se podrá plantear posibles zonas verdes con el fin de mejorar la cobertura de aquellos barrios más alejados. Como resultado, se resolverá un problema real de optimización dentro del Plan Verde⁵ de Valencia. De esta manera, será factible hacer un uso óptimo de los recursos, a la vez que se reducen los tiempos de reacción, lo que mejoraría la eficiencia.

Se han desarrollado una serie de objetivos para dirigir este proyecto con el fin de alcanzar dichos objetivos:

1. Definir los conceptos teóricos: los elementos por los que se define una zona verde, cubrimiento máximo y total, isócronas, distancias euclídeas, entre otros que se explicarán más adelante.
2. Estudiar la literatura y las recomendaciones de las metas para crear una ciudad sostenible.
3. Hacer un análisis previo de las ubicaciones de las zonas verdes actuales para poder resolver el problema, ya que no todos los distritos tienen la misma accesibilidad a una zona verde.
4. En base a los criterios sintetizados del análisis de la literatura, proponer modelos para llegar a las metas de la forma eficiente.

Para llegar a la solución óptima no es sencillo, habría que tener en cuenta muchos criterios como económicos, legislativos, medioambientales, técnicos y muchos más. Por ello, en este trabajo se va a apoyar en la IO para resolver un problema real. La IO ayudará a crear una herramienta donde se podrá resolver los problemas de localización en función de la información aportada y del objetivo deseado.

El modelo sugerido propone como solución las zonas óptimas para los espacios verdes.

⁵ El Plan Verde es un plan estratégico que regirá la gestión de la infraestructura verde municipal, el patrimonio natural y la biodiversidad urbana en las próximas décadas (Plan Verde, 2022).

1.3. Motivación

La consecución de este trabajo viene motivada por las razones que se muestran a continuación:

En primer lugar, responde a un problema real que forma parte de los objetivos de la Agenda 2030⁶ para el desarrollo sostenible. En estos Objetivos de Desarrollo Sostenible⁷ (ODS), se contribuirá más concretamente en el objetivo número 11 “Ciudades y Comunidades sostenibles”. Para más detalles puede consultar el Anexo I sobre la reflexión sobre la relación del TFG con los ODS.

A pesar de que exista ya varios proyectos relacionados con la mejora de la infraestructura verde y el patrimonio natural, sigue habiendo escasez de información. Como bien indica las Naciones Unidas para el objetivo número 11 “Ciudades y Comunidades sostenibles”, “El mundo cada vez está más urbanizado”, y en 2030 se espera que el porcentaje de la población mundial que vive en zonas urbanas “aumente hasta el 60%”. Para luchar contra esto, y no convertir a las ciudades simplemente en edificios, la sub-meta número 7 de la meta número 11 es “De aquí a 2030, proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad” (ONU, s.f.). Según indica el INE, el indicador de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la meta 11.7 que nos enfocamos es (INE, 2021):

- Indicador 11.7.1. Proporción media de la superficie edificada de las ciudades que se dedica a espacios abiertos para el uso público de todos, desglosada por sexo, edad y personas con discapacidad

Meta 11.7. De aquí a 2030, proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad	
Indicador	Estado
Indicador 11.7.1. Proporción media de la superficie edificada de las ciudades que se dedica a espacios abiertos para el uso público de todos, desglosada por sexo, edad y personas con discapacidad	Explorando fuentes de datos

Figura 3. Indicadores de la Agenda 2030 del ODS 11

Fuente: (INE, 2021)

⁶ La Agenda 2030 es un plan estratégico con el objetivo de que se realicen las transformaciones necesarias que lleve a un mundo mejor, más inclusivo, desarrollado, con la protección medioambiental en el 2030 (FIIAPP, 2020)

⁷ Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son un conjunto de 17 objetivos globales que forma parte de la Agenda 2030.

Sin embargo, precisamente falta información este indicador (véase Figura 3), lo cual es una señal de que todavía se está trabajando en ello y no se ha investigado lo suficiente. Y por ello, la elección de “proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros”, ya que se trata de un problema desafiante en el que se sigue trabajando.

Además, hace nada el Ayuntamiento de Valencia ya está empezando por ese camino e intentando gestionar esa cuestión formando parte de varios proyectos como Missions Valencia 2030⁸ y está trabajando en el Plan Verde que fue publicado recientemente, pero todavía no está completo, para convertirse en una ciudad y comunidad más sostenible.

En segundo lugar, es un problema real muy cercano a la vida cotidiana. La escasez de espacios verdes disminuyen el confort térmico de las personas. Según la investigadora Ester Higuera, “Los seres vivos precisan regular la temperatura de su organismo para sobrevivir”. Se trata de una consecuencia derivada de la contaminación de las ciudades, que va en aumento y puede provocar dolencias como trastornos respiratorios (Sanitas, 2018). También puede llegar a causar muertes (según Planelles, 2021, en Europa hay 43.000 personas que fallecen cada año debido a esta escasez. Por lo tanto, renaturalizar la ciudad para alcanzar entornos saludables y sostenibles incentivaría a la gente a llevar un estilo de vida más activo, lo que mejoraría su forma física y la salud mental. Esto llevaría a prevenir enfermedades e incluso muertes (Bupa, 2019), por lo que también ayudaría a disminuir la frecuencia de uso del hospital y la saturación del sistema sanitario.

⁸ Valencia se suma al proyecto para estar entre las ciudades europeas respetuosas con el clima en 2030.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Metodología

Para el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se ha seguido una metodología que se divide en 6 fases en función de su distribución cronológica y de acuerdo con la metodología de la Investigación Operativa. La investigación operativa (IO) es un método analítico de resolución de problemas y toma de decisiones que resulta útil en la gestión de las organizaciones. En la investigación operativa, los problemas se descomponen en sus formas más simples antes de ser analizados matemáticamente y luego resueltos en un conjunto de procesos (González, 2012).

La siguiente secuencia de pasos es la metodología que se ha seguido:

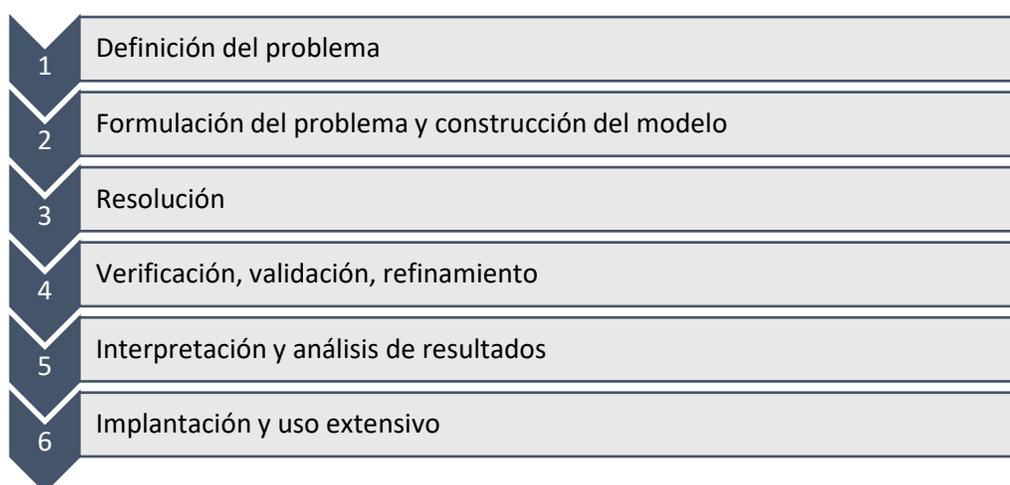


Figura 4. Metodología de la Investigación Operativa

Fuente: Elaboración propia

En una primera fase, se define el problema. Se tendría que identificar los siguientes componentes de la toma de decisiones: objetivos, alternativas posibles y restricciones del sistema.

En segundo lugar, se tendría que expresar el problema como un modelo matemático que facilita la comprensión y el análisis del comportamiento del problema. Además, se tendría que definir los parámetros, las variables de decisión y la función objetivo.

En tercer lugar, se trata de la fase de resolución donde los valores de las variables de decisión se determinan para producir la solución óptima posible dadas las limitaciones. A

menudo, esta respuesta puede alcanzarse mediante diversos algoritmos y métodos de aplicación. El método heurístico⁹ y la simulación¹⁰ son utilizadas por la IO cuando el sistema es demasiado complicado para ser expresado en términos de ecuaciones matemáticas que puedan resolverse analíticamente.

Los objetivos de la cuarta fase de verificación y validación son eliminar las imprecisiones y confirmar en la medida de lo posible que el modelo se adapta a la realidad.

La solidez de la solución óptima descubierta se evalúa a lo largo de la quinta fase de interpretación y análisis realizando un análisis de sensibilidad (¿la solución óptima cambia mucho si se modifican marginalmente las restricciones o algunos de los parámetros del modelo?).

Finalmente, en la última fase de implantación, la solución obtenida se examinaría para asegurarse de que se aborda el problema planteado.

2.2. Herramientas utilizadas en este trabajo

2.2.1. Introducción al software QGIS 3.22

En este apartado se va a explicar para qué empleamos la funcionalidad del software *QGIS 3.22* en este Trabajo Fin de Grado.

QGIS 3.22 es un software de código abierto licenciado bajo *General Public License* y totalmente gratuito que utiliza el Sistema de Información Geográfica (SIG) (*QGIS*, s.f.). Debido a sus múltiples usos y a su fuerte componente visual, este software permite adquirir fácilmente las matrices de población cubiertas por cada isócrona, así como visualizar el resultado, que es lo que se ha hecho con las figuras de los capítulos III y IV. Este software ha permitido elaborar esas figuras con tiempos y transportes diferentes.

Python es el lenguaje de programación utilizado para crear las capas ráster y vectoriales que utiliza *QGIS* para funcionar. Las capas ráster separan el área en celdas regulares, cada una de las cuales representa un único valor, ya que son las imágenes digitales que se representan mediante píxeles. Para representar el mapa actualizado de la provincia de

⁹ El método heurístico se caracteriza por su capacidad de resolver el problema. Aunque descubre soluciones razonablemente cercanas al óptimo, no siempre localiza la mejor respuesta ni asegura que la solución óptima descubierta sea la única.

¹⁰ La simulación se considera el último recurso cuando no se puede modelar matemáticamente el sistema en su conjunto. Se rompe en sus componentes y simula su funcionamiento y la interacción entre sus partes.

Valencia en el trabajo de la manera más realista posible, se ha importado una única capa ráster, que es el mapa del mundo cargado desde *Google Maps*. Sin embargo, en ocasiones también se ha usado *OpenStreetMap* para facilitar la visualización del mapa, ya que éste y *Google Maps* tienen algunas diferencias. Por otro lado, también existen las capas vectoriales, que son las que tienen tanto la geometría de la capa (ya sea un polígono, una línea o un punto) como las características que la acompañan (información sobre la capa: longitud, latitud, área, etc.). Las capas vectoriales tienen una tabla de atributos, que es donde muestra los detalles sobre los componentes de la capa elegida donde la columna indica una información específica sobre el elemento respectivo de cada fila, tanto si ese elemento tiene geometría como si no.

2.2.2. Introducción a la herramienta VBA OpenSolver

En este apartado, se va a introducir una herramienta que se instala dentro de *Microsoft Excel* para poder resolver el modelo matemático propuesto en el capítulo V.

OpenSolver es un complemento VBA de *Excel* que amplía el *Solver*¹¹ incorporado de *Excel* con solucionadores más potentes. Ha sido desarrollado y mantenido por *Andrew Mason*¹² y estudiantes del departamento de Ciencias de la Ingeniería de la *Universidad de Auckland* (Nueva Zelanda).

OpenSolver ofrece las siguientes características (Mason, 2012):

- Buen motor de optimización *COIN-OR CBC*, de código abierto, que puede resolver rápidamente grandes problemas lineales y enteros.
- Compatible con los modelos de *Solver* existentes, por lo que no es necesario cambiar las hojas de cálculo.
- No hay límites artificiales en el tamaño del problema que puede resolver - tenga tantas variables y restricciones como la memoria del ordenador permita (pero los problemas grandes pueden ser lentos de resolver).
- Es un software gratuito y de código abierto.
- Un visualizador de modelos integrado que resalta las variables de decisión, el objetivo y las restricciones del modelo directamente en la hoja de cálculo.

¹¹ Una herramienta que utiliza técnicas de la investigación operativa para encontrar soluciones óptimas para todo tipo de problemas de decisión.

¹² Es un profesor asociado de la Universidad de Auckland. También fue miembro y presidente de la Sociedad de Investigación Operativa de Nueva Zelanda.

- Un algoritmo para construir y actualizar el modelo sólo con la información presente en la hoja.

Excel 2007/2010/2013/2016 (incluidas las versiones de 64 bits) que se ejecutan en *Windows* son compatibles con *OpenSolver*. Para resolver el problema de este trabajo (del capítulo V), se va a usar *Excel 2016* de 32 bits, por lo que no habría ningún problema de compatibilidad.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. Superficies verdes urbanas

En el capítulo anterior se ha comentado que en este trabajo se va a centrar en los aspectos medioambientales de las ciudades, en concreto en las zonas verdes. Esta sugerencia se debe a la importancia de los beneficios para los ciudadanos de tener espacios verdes, que se va a detallar en el apartado 3.1.1.

La recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) es que “las ciudades tengan, al menos, entre 10 y 15 metros cuadrados de área verde por habitante”. Centrándose en Valencia, su área urbana no cumple con el requisito de la OMS, ya que según Raquel de La Vanguardia (Andrés, 2022), Valencia tiene una media de 7,41 metros cuadrados (sin contar los parques naturales fuera de la ciudad como el Parque Natural de la Albufera y Parque Natural de Turia y la Huerta) y “un total de 594 hectáreas de jardines y zonas verdes”.

La Figura 5 muestra que muchas zonas tienen poca superficie verde como indica las zonas en color rojo y naranja que tienen menos de 5 metros cuadrados. La mayor parte de las superficies verdes se ubica en las afueras del área urbana, como indican las zonas en color verde y azul marino que alcanzan a los 10 metros cuadrados. Si se desglosan los datos por barrios, se observa que 24 de los barrios de Valencia tienen más de 10 metros cuadrados de zona verde por habitante. Este es el caso de Campanar, Peña-roja y Trinidad, donde los residentes tienen acceso a más de 15 metros cuadrados de espacio verde por persona debido a su proximidad a grandes parques o jardines (como Viveros o Turia). De este modo, 58 barrios no alcanzan la cantidad necesaria de espacio verde por persona, siendo 14 de ellos con menos de 5 metros cuadrados de espacio verde por residente (algunos distritos, como el corazón de Valencia, son especialmente difíciles de añadir zonas verdes debido a su singular tejido urbano (Andrés, 2022)).

La escasez de suelo urbano libre, disponible para generar nuevos espacios verdes, es un problema importante en las ciudades, que obliga a encontrar nuevas alternativas y soluciones que contribuyan a aumentar la infraestructura verde urbana, creando una nueva capa natural de biodiversidad, esencial para la mejora del bienestar de sus habitantes (ESPORA, s.f.). Por lo tanto, estas nuevas alternativas van más allá que un simple jardín o parque. Hay que cumplir con la recomendación de la OMS, y según dice el vicealcalde y concejal de ecología urbana, Sergi Campillo, “Introducir el verde en balcones, terrazas y otros espacios de oportunidad que no se han tenido en cuenta antes”.

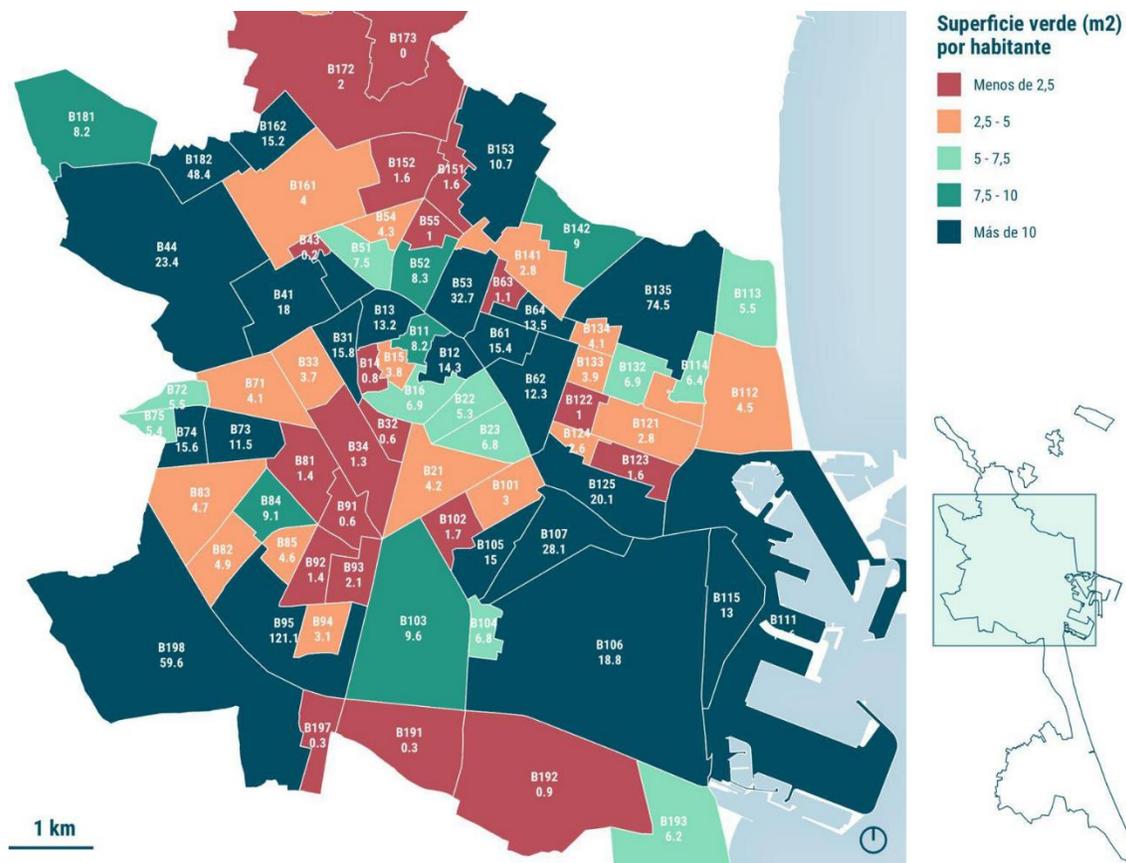


Figura 5. Superficie verde por habitante en Valencia

Fuente: (Plan Verde, 2022)

3.1.1. Beneficios de las zonas verdes

En este apartado se va a explicar los beneficios que aportan las zonas verdes. Por un lado está la mejora del bienestar de los habitantes y por otro la mejora de la calidad del aire.

En primer lugar, se va a centrar en los beneficios para la salud:

A nivel mundial, algunas enfermedades y discapacidades se atribuyen en gran medida a los problemas de salud mental. En la actualidad, se estima que 792 millones de personas viven con un trastorno de salud mental. Esto supone algo más de una de cada diez personas a nivel mundial (10,7%) (Dattani et al., 2021). Por lo tanto, las intervenciones para salvaguardar y mejorar la salud mental son cada vez más necesarias. Los espacios verdes pueden ser cruciales en este sentido, según un creciente número de estudios, ya que estar en la naturaleza se ha relacionado con mejoras considerables en la salud mental (De Keijzer, 2020).

Recientemente se han examinado más de 1.000 ciudades europeas y se ha descubierto que si estas ciudades siguieran las recomendaciones de la OMS sobre la proximidad de las zonas residenciales a los espacios verdes, se podrían evitar hasta 43.000 muertes prematuras al año (ISGLOBAL, 2021). Los datos están publicados en la web oficial del Instituto de *Salud Global* que incluye el ranking del estudio urbanístico saludable en estas 1.000 ciudades europeas. En este ranking muestra que las ciudades con menos espacios verdes tienen mayor tasa de mortalidad. A continuación se comparan dos ciudades europeas: la Figura 6 siendo la ciudad europea con menos espacios verdes urbanos y la Figura 7 siendo la ciudad europea con más espacios verdes.

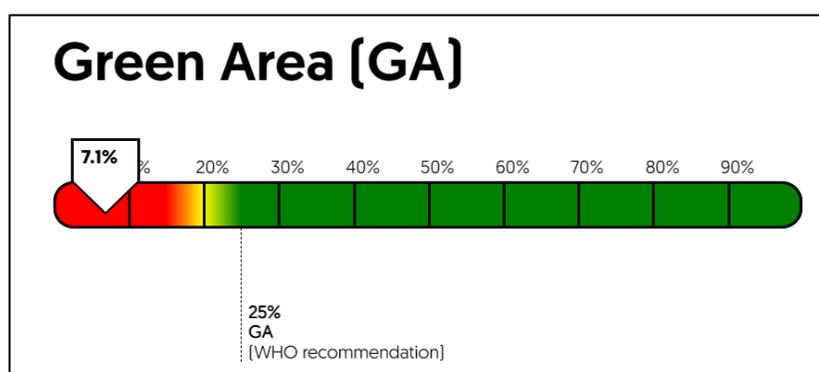


Figura 6. Green Area de Cádiz, España

Fuente: (ISGLOBAL, 2021)

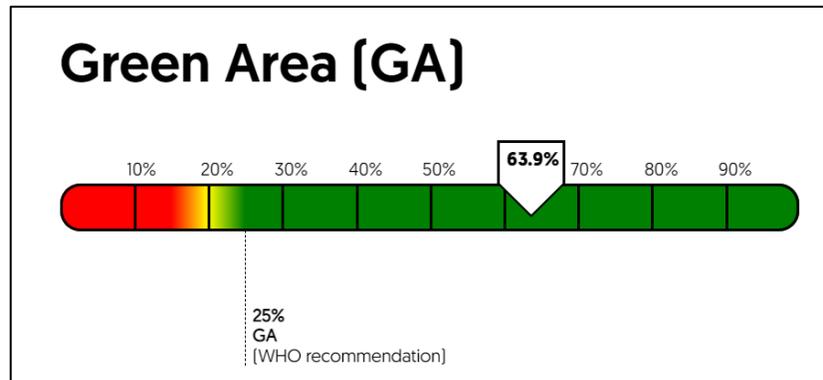


Figura 7. Green Area de Paredes, Portugal

Fuente: (ISGLOBAL, 2021)

En estas dos figuras, se tiene en cuenta el indicador GA – *Green Area* – que mide el porcentaje de una zona declarada oficialmente como espacio verde y sólo tiene en cuenta las zonas verdes públicas. Cádiz, con un 18% por debajo de la recomendación de la OMS está causando 20 muertes (ISGLOBAL, 2021) al año que se podría evitar como muestra en la Tabla 1. En cambio, Paredes con casi 40% por encima de la recomendación de OMS no corre riesgo de muertes.

	Cádiz, España	Paredes, Portugal
% de la población por debajo del 25% GA	100%	4,35%
Muertes que podrían evitarse	20	0

Tabla 1. Comparación de Green Area entre Cádiz y Paredes

Fuente: Elaboración propia

La relación positiva entre la exposición a los espacios verdes y la salud mental en niños y adolescentes ha sido respaldada por un número creciente de estudios epidemiológicos. Según una reciente revisión sistemática de 21 estudios, la mayoría de ellos encontró una relación positiva entre la exposición a los espacios verdes y la salud mental en niños, adolescentes y adultos jóvenes, incluyendo resultados relacionados con dificultades emocionales y de comportamiento, bienestar mental y desarrollo neurocognitivo. La revisión descubrió los vínculos más fuertes entre una mayor exposición a los espacios verdes y una reducción de los problemas de hiperactividad y falta de atención en los niños (Vanaken & Danckaerts, 2018).

En segundo lugar, se va a centrar en los beneficios a la calidad del aire:

La vegetación urbana mejora la calidad del aire de forma indirecta al afectar al microclima, además de hacerlo directamente al eliminar los contaminantes del aire. La vegetación funciona como regulador térmico, bajando la temperatura tanto en las calles como en el interior de los edificios mediante el sombreado de los mismos y la evapotranspiración. De este modo, la vegetación favorece al ahorro de energía en el uso del aire acondicionado, contribuyendo a reducir las emisiones contaminantes. Además, una temperatura ambiente más baja contribuye a frenar las reacciones fotoquímicas atmosféricas que producen contaminantes secundarios como el ozono.

La distribución de la vegetación y su ubicación en relación con las fuentes de emisión de contaminación atmosférica determinan el impacto de la vegetación urbana en la calidad del aire. La vegetación desempeña un claro papel de filtrado y reducción de la contaminación atmosférica en las regiones en las que no hay emisiones en su lugar original, como los jardines, los parques y los bosques periurbanos. Los resultados de los modelos de calidad del aire y de las investigaciones experimentales aportan la mayor parte de las pruebas de este efecto. Un ejemplo es la investigación que se realizó para determinar que el bosque Monte de El Pardo, situado al norte de Madrid, tenía un impacto positivo en la calidad del aire de la ciudad. Como muestra en la Figura 8, según las investigaciones experimentales realizadas en bosques periurbanos cerca de Madrid, Barcelona y Pamplona, las concentraciones de los óxidos de nitrógeno son mucho menores bajo el dosel (barras verdes que representa "Bajo arbolado") de los árboles que en regiones abiertas sin árboles (barras amarillas que representa "Claro") (García-Gomez et al., 2016). Se aprecia que en Barcelona puede llegar a disminuir un 6% en los óxidos de nitrógeno; en Madrid un 13% y Pamplona 41%.

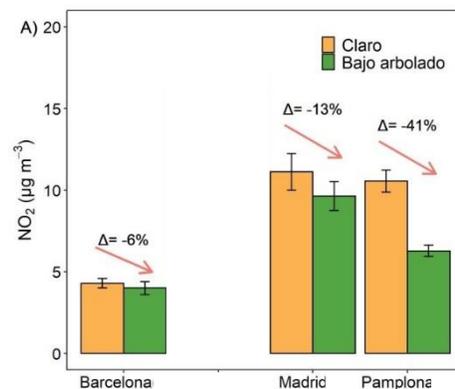


Figura 8. Concentraciones de NO₂ en zonas abiertas y bajo el dosel arbóreo en

Fuente: (Bermejo et al., 2021)

La vegetación urbana también puede utilizarse como barrera para evitar que los contaminantes se extiendan a zonas protegidas. Por ejemplo, puede utilizarse para crear una barrera entre los carriles para bicicletas y la carretera o para salvaguardar espacios

públicos sensibles como zonas de juego para niños, parques y campos deportivos que se encuentran cerca de carreteras con mucho tráfico. Este tipo de soluciones también se han examinado utilizando modelos y estudios experimentales. Según un estudio, estando en el Parque del Retiro de Madrid hace que las concentraciones de partículas PM10¹³ disminuyeran hasta un 50%.

En otras ciudades se ha constatado que las concentraciones de contaminantes atmosféricos son menores en los parques, aunque en estos estudios no está claro si el efecto es atribuible únicamente a la vegetación o también está relacionado con la separación de estas zonas de las calles con tráfico intenso, que sirven de fuentes de emisión. Las campañas experimentales de evaluación de las concentraciones de carbono negro, uno de los principales contaminantes de partículas relacionados con el transporte, a la misma distancia del tráfico con y sin barrera vegetal han aclarado este efecto. Según los resultados como muestra en la Figura 9, una barrera vegetal en forma de seto puede ayudar a reducir las concentraciones de partículas relacionadas con el tráfico hasta un 9% de media. La figura muestra que, estando en la carretera el porcentaje de carbón negro es de un 100%; y si se está a una distancia básica la concentración del carbono negro disminuye a un 75%. En cambio, si se está a una distancia básica con la presencia de un seto como barrera, la inhalación del polvo de carbono negro disminuye hasta un 66% (REDUCTION OF EXPOSURE OF CYCLISTS TO URBAN AIR POLLUTION, 2018).

¹³ PM10 son partículas metálicas de menos de 10 micrómetros de diámetro suponen los mayores problemas, debido a que pueden llegar a la profundidad de los pulmones, y algunas hasta pueden alcanzar el torrente sanguíneo. síntomas respiratorios aumentados, como irritación en las vías respiratorias, tos o dificultad para respirar (EPA, 2022).

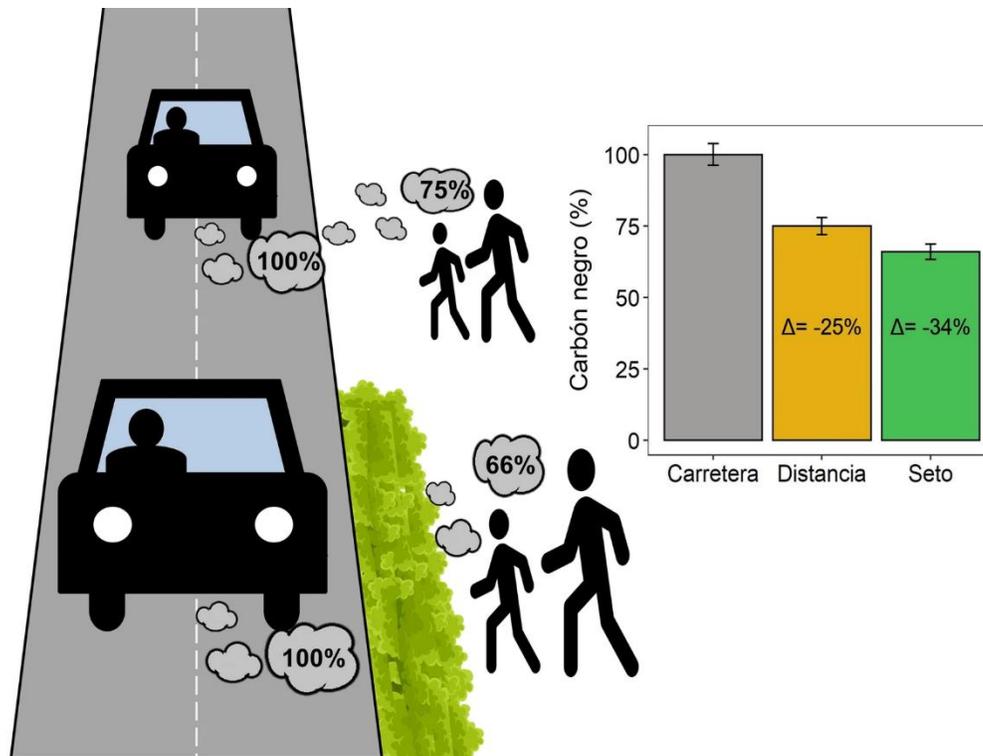


Figura 9. Análisis de la eficacia de un seto como barrera vegetal frente la dispersión de la contaminación atmosférica

Fuente: (Bermejo et al., 2021)

Las barreras arbóreas pueden ser útiles, pero hay que tener en cuenta la altura a la que se producen las emisiones y la exposición de las personas, así como la altura a la que se desarrolla la copa del árbol cuando se utiliza esta forma de vegetación.

En las vías con un tráfico moderado, la vegetación podría presentar una barrera que ralentiza el flujo de aire de la calle, impidiendo la propagación de los contaminantes producidos. Los investigadores junto con colaboración y participación de los vecinos permitieron hacer un estudio que consistía en instalar unos sensores en los alféizares de sus ventanas para medir la concentración de contaminantes atmosféricos a diferentes alturas en las fachadas de los edificios en el reciente proyecto Life+RESPIRA desarrollado en Pamplona (UE, 2017). La Figura 10 muestra los efectos de este experimento. Los resultados demostraron que la presencia de árboles en los bordes de las calles reducía la dispersión vertical de los contaminantes ya que, en presencia de árboles, las concentraciones de carbono negro detectadas a una altura de 10 metros (segundo piso) eran de media un 10%, mientras que este porcentaje aumentaba hasta el 19% en ausencia de vegetación. Al igual que en el primer piso, en presencia de vegetación la concentración del carbono negro alcanzaba hasta un 6%, mientras que en ausencia de ésta, el porcentaje aumentaba hasta un 8% (REDUCTION OF EXPOSURE OF CYCLISTS TO URBAN AIR POLLUTION, 2018).

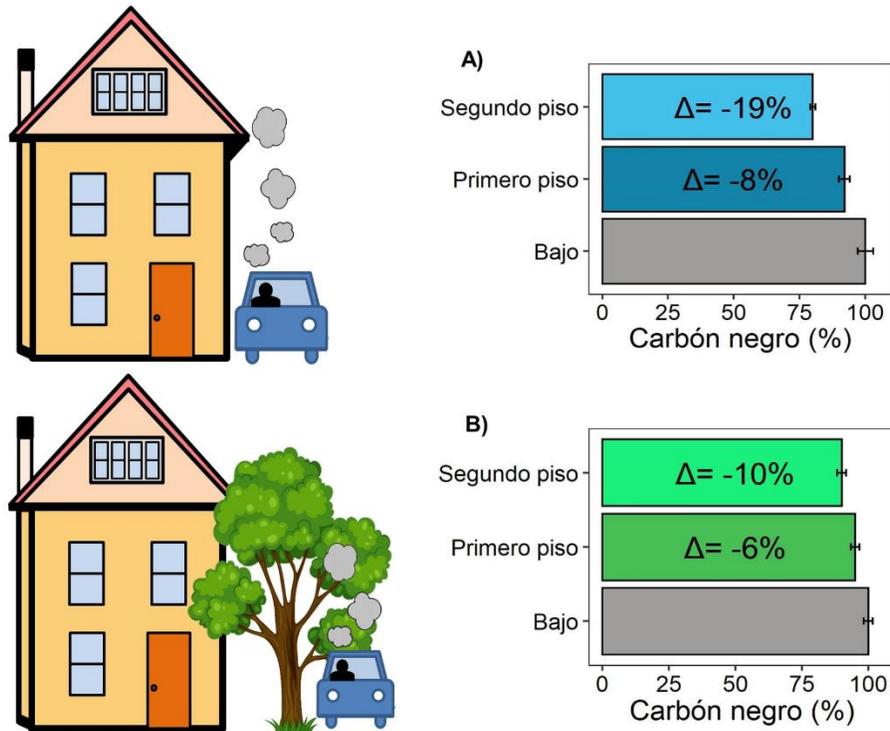


Figura 10. Concentración de contaminantes atmosféricos a diferentes alturas en las fachadas de los edificios

Fuente: (Bermejo et al., 2021)

Los resultados demostraron que los árboles más bajos reducen la concentración a la altura de los peatones porque en esta situación predomina la deposición sobre el efecto aerodinámico de la reducción de la ventilación en calles muy estrechas, mientras que los árboles altos dificultan la dispersión de los contaminantes al disminuir la ventilación de la calle (Santiago et al., 2017). Además, se descubrió que los árboles situados a los lados de la calle pueden funcionar como barrera horizontal, limitando la entrada de contaminantes procedentes de las calles circundantes con tráfico intenso.

Con estos ejemplos, se puede observar que dependiendo de la vegetación que sea, los beneficios son diferentes, por lo que habría que separar las zonas verdes por categorías, ya que cada una tiene su aportación.

3.1.2. Elementos que compone una zona verde

A continuación, se va a explicar la clasificación de superficies verdes urbanas, que se divide en 4 categorías:

Los grandes parques y jardines de ciudad son el primer tipología de zona verde que se encuentra en el territorio urbano. Se trata de áreas que sirven a todos los residentes, independientemente de su lugar de residencia, y que tienen una relevancia que va más allá del ámbito del barrio o distrito. Aunque también puede estar motivada por cuestiones históricas, como en el caso de los jardines de Monforte y del Hospital, esta relevancia suele venir dada lógicamente por la ampliación del espacio verde correspondiente. Se trata de los espacios verdes que, por extensión y complejidad, suministran de forma natural la mayor variedad de servicios ecosistémicos de la ciudad.

Los parques de barrio son de menor tamaño en comparación con los grandes parques y jardines metropolitanos. Además de ofrecer superficies vegetadas y permeables, estos lugares verdes ajardinados cercanos a los vecinos de los numerosos barrios de Valencia también proporcionan otros servicios ecosistémicos de carácter cultural, deportivo, recreativo, etc. La principal distinción entre estos parques de barrio y otras zonas ajardinadas de menor tamaño, además de su superficie, es que estos parques están diseñados para ofrecer estos servicios ecológicos, como áreas de juego infantil, pistas deportivas, aspectos históricos o culturales, etc. (Plan Verde, 2022).

Las zonas verdes y jardines de equipamientos de titularidad pública se incluyen todos los espacios verdes y zonas ajardinadas de diverso tamaño que se sitúan dentro de equipamientos de titularidad pública y que no son accesibles de forma permanente al público en general o, al menos, no son accesibles de forma permanente, como los jardines y zonas verdes de los centros educativos públicos (universidades, institutos y colegios), los equipamientos culturales y sanitarios o los cementerios, entre otros.

Por último, **los bulevares, grandes vías paseos y avenidas ajardinadas** comprende todos los espacios ajardinados que conectan vías de importancia municipal, como bulevares, vías principales, paseos o avenidas con vegetación, y que cumplen los criterios para ser clasificados como zonas verdes. Aunque muchos de estos corredores verdes se descomponen en zonas verdes realmente diminutas, como los alrededores de los árboles o los pequeños parterres, es crucial clasificarlos e identificarlos debido a su importancia como componentes de conexión de la infraestructura verde a escala municipal (Plan Verde, 2022).

En este trabajo se ha excluido las dos últimas tipologías debido a que no son accesibles las 24 horas, sobre todo las zonas verdes de equipamientos de titularidad pública. Además, no es común que en la vida diaria de una persona vaya a pasear en la universidad o el cementerio. Respecto a las avenidas ajardinadas, descomponiéndolas por secciones, la mayoría de ellas acaban teniendo un área muy pequeña, la cual no se puede considerar como zona verde ya que según la OMS se debe tener un mínimo de 10 metros cuadrados.

3.2. El concepto de isócronas y la definición de cobertura

3.2.1. Isócronas

Un mapa de isócronas es un mapa que representa el área accesible desde un punto dentro de un determinado umbral de tiempo. La palabra isócrona es una concatenación de iso y cronos. Los dos términos provienen de Grecia: *isos* que significa “igual” y *chrónos* que significa “tiempo”. La combinación de éstos se define como “una línea dibujada en un mapa que conecta puntos en los que algo ocurre o llega al mismo tiempo” (Desai, 2008). Por lo tanto, los mapas de isócronas muestran líneas de igual tiempo de viaje a través de un área geográfica. En la Figura 11 se puede ver un ejemplo de isócrona caminando desde la Plaza del Ayuntamiento de la ciudad Valencia (punto de origen) en un tiempo de 5 minutos. Las zonas cubiertas por la isócrona de color verde serían las zonas a las que caminando se podría llegar en 5 minutos.

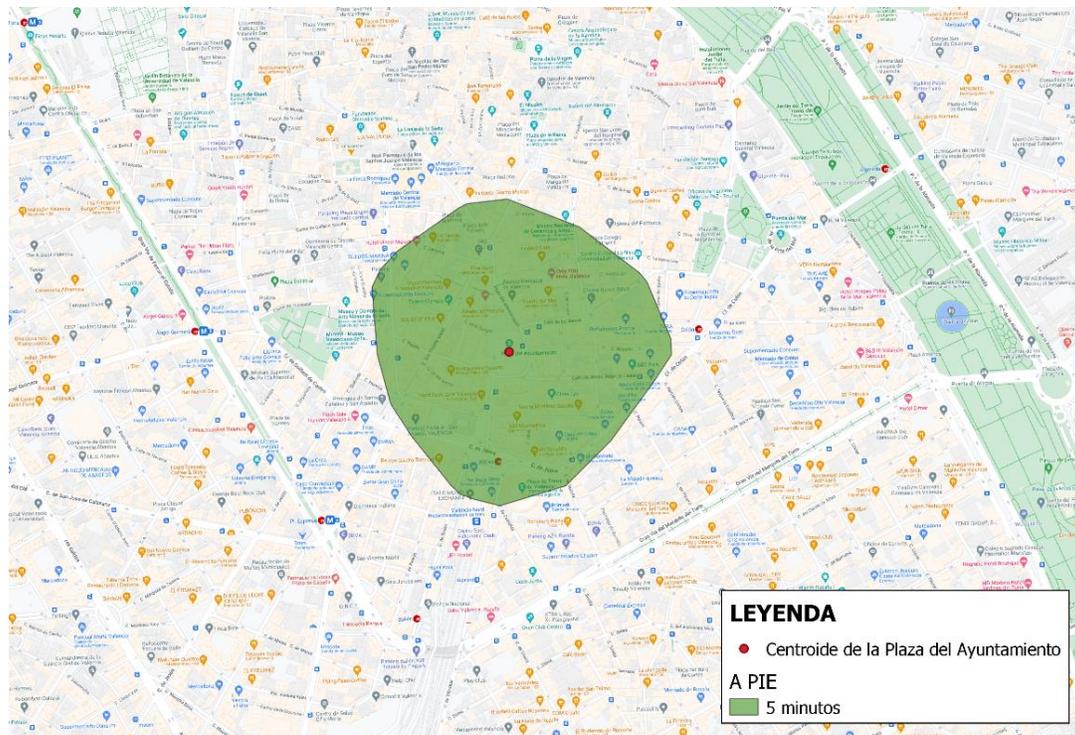


Figura 11. Ejemplo de isócrona calculada a pie con tiempo de 5 minutos

Fuente: Elaboración propia

La Figura 12 representa el mismo escenario que el ejemplo de la Figura 11, pero en este caso se ha añadido una isócrona con un tiempo de 10 minutos, por lo que el polígono llegaría a alcanzar más área. Se observa claramente que la isócrona con un tiempo de 10

minutos (de color verde claro) cubre una zona más amplia que la isócrona con un tiempo de 5 minutos (de color verde oscuro).

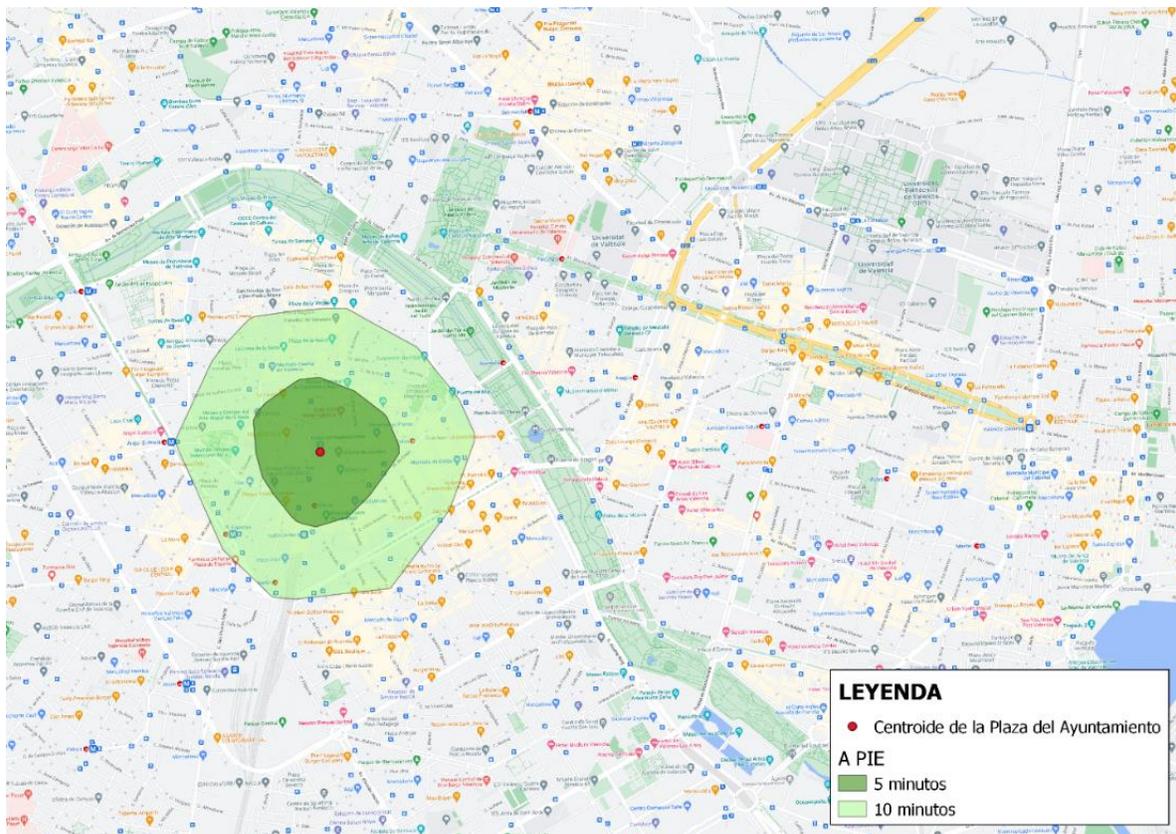


Figura 12. Ejemplo de isócronas calculadas a pie con tiempos de 5 y 10 minutos

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la Figura 13 ilustra un ejemplo de isócrona para tiempos de 5 y 10 minutos utilizando varios modos de transporte: A pie, en bicicleta y en coche. Ninguno de estos modos tienen en cuenta los semáforos, solo la velocidad y el tipo de carretera. Cabe destacar que respecto a la velocidad, a pie y en bicicleta se ha calculado utilizando la velocidad media en la que se desplaza habitualmente, y en coche se ha utilizado la máxima velocidad permitida, es decir, 50km/h. Todas estas isócronas parten desde el punto de origen que es desde la Plaza del Ayuntamiento de la ciudad de Valencia.

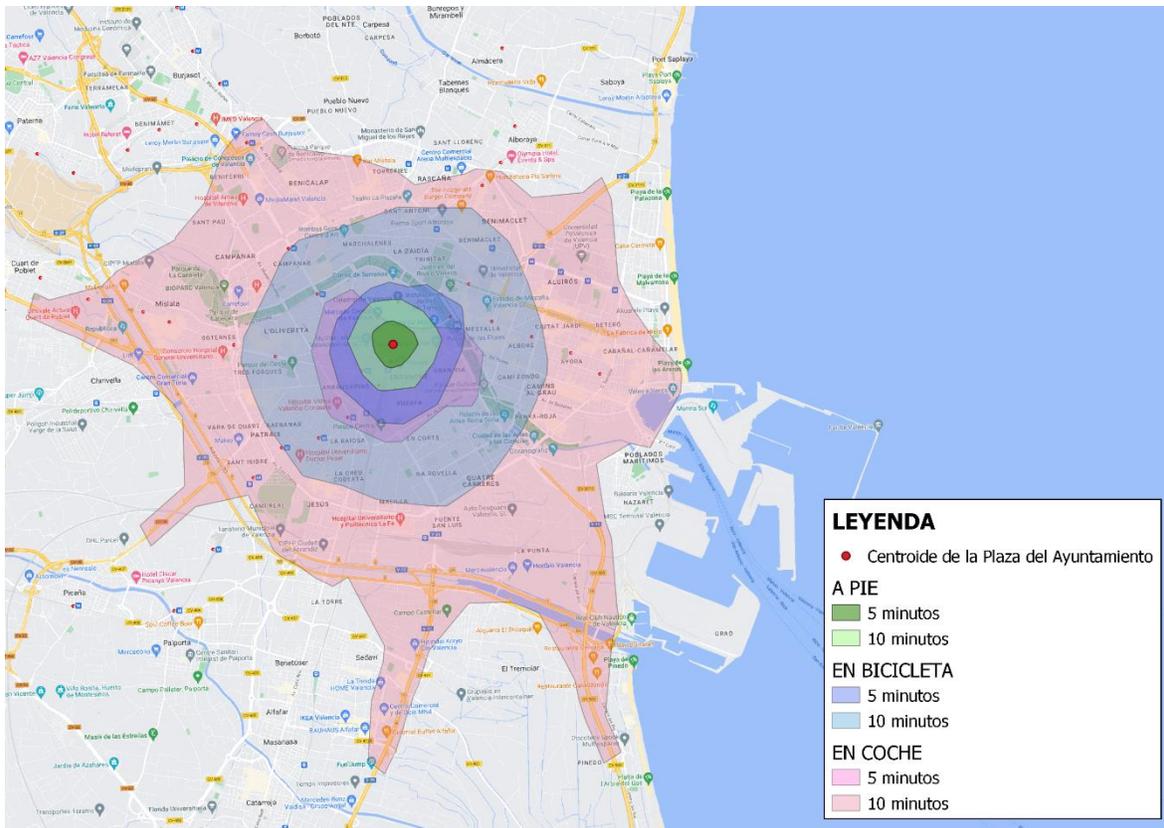


Figura 13. Ejemplo de isócronas calculadas para varios modos de transporte con tiempos de 5 y 10 minutos

Fuente: Elaboración propia

Es evidente que la isócrona del coche es la que cubre la zona más grande, seguida de la isócrona de la bicicleta y, por último, la isócrona de una persona que va a pie. Esto tiene sentido porque la conducción permite cubrir una mayor distancia para la misma cantidad de tiempo y distancia.

El cálculo de las isócronas se realiza utilizando el complemento *ORS Tools* de *QGIS 3.22*, que se instaló previamente desde el mismo software. Este complemento permite crear un mapa de isócronas, que es una forma más fácil de visualizar y medir cuánta zona se cubre. Esta medida de la isócrona depende del tiempo. En el problema de este trabajo, se tiene en cuenta el tiempo que se tarda el cliente que sale desde su origen hasta la zona verde caminando.

3.2.2. Cobertura

Una vez explicado el concepto de isócronas, se puede pasar al concepto de cobertura. Como comentado en el apartado anterior de isócronas, la población cubierta es la que cae dentro de la circunferencia. Esta información sobre la población cubierta se ha usado la capa de densidad poblacional que tiene por defecto el complemento *ORS Tools* de *QGIS 3.22*.

Dado que este complemento no utiliza datos en tiempo real, no tendrá en cuenta las condiciones de tráfico actuales ni cambiará su resultado en función del momento en que calculemos estas isócronas. Este concepto de cobertura es unidireccional, es decir, se puede llegar a un determinado tiempo desde el punto central a un punto que está justo en el borde del área, pero esto no garantiza que ir desde este punto del borde de área hasta el punto central de la isócrona el trayecto va a durar el mismo tiempo. Especialmente para los coches, los desplazamientos en algunas calles solo se pueden hacer en una dirección, pero no en otra. Sin embargo, como el modo de desplazamiento del problema que se aborda es a pie, se verá menos afectado por los problemas de tráfico más frecuentes. Es decir, se asume que si desde el punto A de la isócrona se puede llegar al punto B en 5 minutos, y del punto B al A también se puede llegar en 5 minutos.

3.2.3. Problemas de localización

Los problemas de localización son un conjunto de clientes que están dispersos espacialmente en una zona y buscan un bien o servicio específico. Una o varias instalaciones deben ser capaces de satisfacer la demanda de los clientes. Dependiendo del producto o servicio que necesite el cliente, las instalaciones pueden operar en un entorno cooperativo o competitivo. En el territorio elegido, el proceso de toma de decisiones determina dónde deben ubicarse las instalaciones, teniendo en cuenta las necesidades de los clientes y las limitaciones geográficas. Los problemas de localización pueden desglosarse en tres componentes clave:

- Las instalaciones: un grupo de elementos que se utilizarán para prestar un servicio o un bien.
- Las localizaciones: una lista de posibles ubicaciones para las instalaciones.
- Los clientes: los usuarios de las instalaciones, que necesitan determinados bienes o servicios.

Existen tres tipos diferentes problemas de localización que se puede observar en la Figura 14:

Problemas de cubrimiento

- Ubicar instalaciones que proporcionan algunos servicios requeridos por los clientes.

Problemas de la Mediana

- Objetivo es minimizar la suma (Minisum).
- Ubicar instalaciones para minimizar la suma de distancias.

Problemas del Centro

- Objetivo es minimizar el máximo (Minimax)
- Ubicar instalaciones tal que se minimice la distancia más larga entre un cliente y su instalación más cercana.

Figura 14. Diferentes problemas de localización

Fuente: Elaboración propia

En este trabajo, se está tratando un problema de cubrimiento, ya que lo que se intenta es ubicar las zonas verdes en la ciudad de Valencia para conseguir cubrir al máximo clientes posibles. En el escenario ideal se debería cubrir toda la población de la ciudad, pero con las infraestructuras actuales, como los edificios y las carreteras, no será posible cubrir toda la población. Por ello, como se verá a continuación, se abordará la solución de un problema de cubrimiento mediante un modelo de cubrimiento máximo.

Dado que los modelos de cubrimiento total son el origen de los modelos de cubrimiento máximo, se debe definir los modelos de cubrimiento total primero. Todos los problemas de cubrimiento tiene un conjunto de puntos que deben ser cubiertos y un segundo conjunto que contiene todos los puntos que pueden realizar este cubrimiento. La diferencia entre el modelo de cubrimiento total y el modelo de cubrimiento máximo es que este último es capaz de dejar ciertos puntos sin cubrir sin dejar de lograr la máxima cobertura, mientras que el primero se esfuerza por cubrir todos los puntos. Esto puede ser beneficioso desde el punto de vista económico, ya que en ocasiones hay puntos de demanda que están alejados del conjunto y, para satisfacerlos, hay que utilizar múltiples recursos sobre todo para esos puntos, lo que podría llevar a una optimización de recursos insuficiente. Sin embargo, hay casos en los que estos puntos no son tan cruciales y, sin cubrirlos, se produce una solución óptima al cubrir el mayor conjunto de puntos posible utilizando menos recursos, lo que se traduce en un menor coste para el usuario.

En este trabajo, dado que el objetivo es cubrir la mayoría de la población, el modelo que se va a usar trata de modelos de cubrimiento máximo, y no de cubrimiento total. Un modelo de cubrimiento total no es práctico, ya que hay zonas de Valencia que no permiten zonas verdes por cuestiones de espacio e infraestructura como los edificios y carreteras. Además,

hay zonas urbanas en las que no habita nadie, por lo que no tendría sentido ubicar un espacio verde desaprovechando los recursos. La solución óptima a las posibles localizaciones de este problema no tiene intención de dejar algunos barrios sin cubrir, si no conseguir cubrir lo máximo posible teniendo en cuenta todos los barrios y también el número de personas que habitan en ese barrio.

Para tener una aplicación real del problema de cubrimiento máximo, se extrapolará en el capítulo IV el mapa de isócronas con las posibles localizaciones, donde se verá claramente que no cubre su totalidad.

CAPÍTULO IV. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

Antes de pasar al capítulo V sobre modelización, se necesita preparación previa para obtener la información requerida. A continuación, se divide por pasos el proceso que se ha seguido para la preparación necesaria:

1. Identificar los elementos de las zonas verdes (ya identificados en el capítulo III, apartado 3.1.2).
2. Identificar las ubicaciones de las zonas verdes en el área metropolitana de Valencia.
3. Identificar las zonas cubiertas.
4. Identificar las áreas descubiertas.
5. Acciones preparatorias para aplicar el modelo, es decir, explicar cómo se generan los puntos aleatorios, cuántos y para qué.

4.1. Ubicaciones de las zonas verdes actuales en el área metropolitana de Valencia

Tal como se ha mencionado en el apartado 3.1., la recomendación de la OMS es que “las ciudades tengan, al menos, entre 10 y 15 metros cuadrados de área verde por habitante”. Esta condición indica que no todo tipo de superficies verdes se consideran zonas verdes y en este trabajo vamos a centrarnos en grandes parques y jardines de ciudad y parques de barrio que tengan entre 10 y 15 metros cuadrados.

Dado que el problema de este trabajo es complejo y se podría tratar en diferentes niveles de complejidad, se ha decidido trabajar con el área metropolitana de la ciudad de Valencia. El área metropolitana está compuesta por los siguientes 17 distritos:

- Algirós
- Benicalap
- Benimaclet
- Camins al Grau
- Campanar
- Ciutat Vella
- L'Eixample
- Extramurs
- Jesús
- L'Olivereta
- El Pla del Real
- Patraix
- Poblets Marítims

- Pobles de l'Oest
- Quatre Carreres
- Rascanya
- La Saïdia

Para poder colocar estos distritos en el mapa, se ha cargado una capa ráster, que separa estos 17 distritos, encima de la capa ráster de *Google Maps*. La Figura 15 muestra el mapa de la ciudad de Valencia separado por distritos.

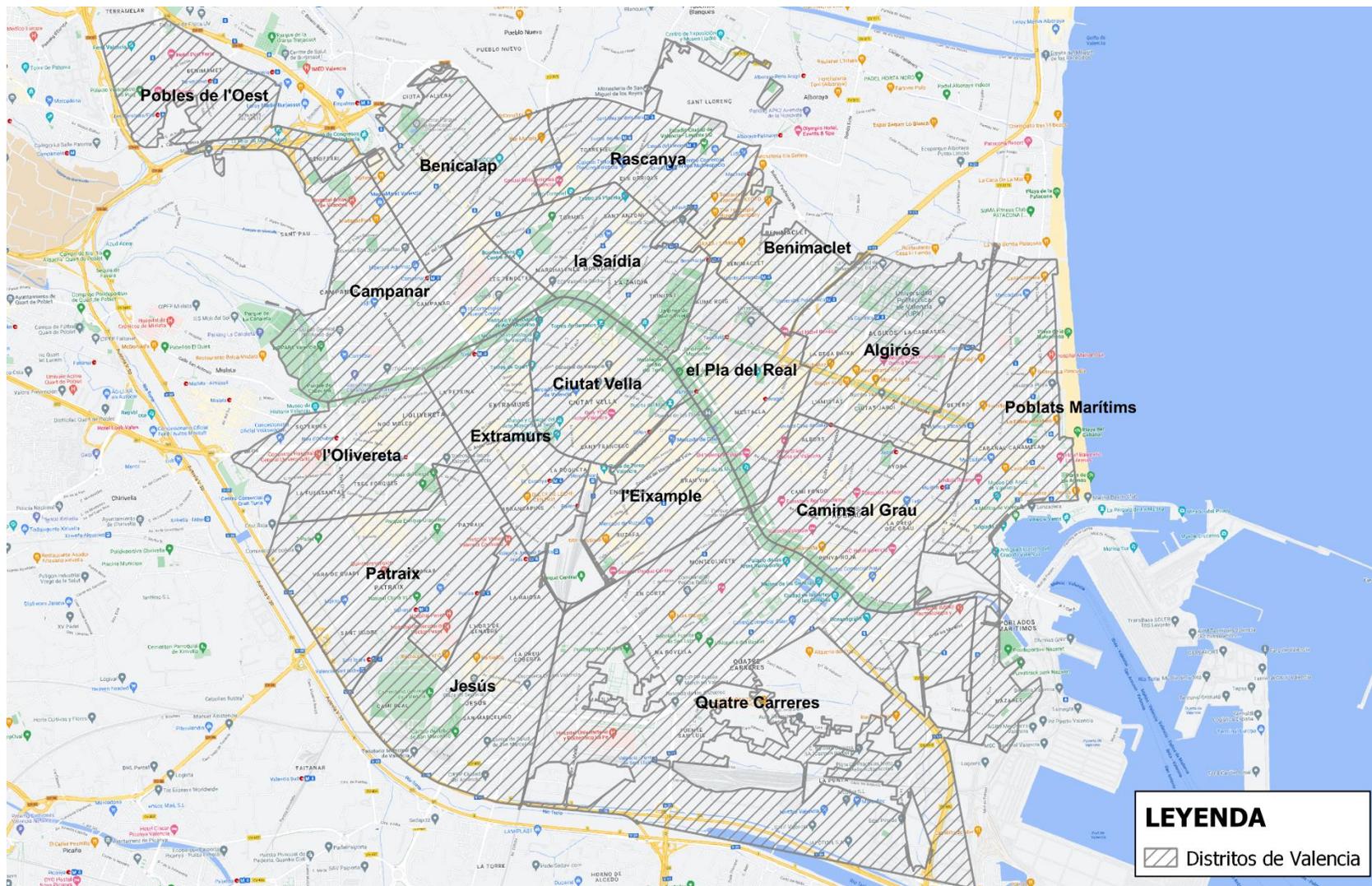


Figura 15. Distritos de Valencia usados en este trabajo para las ubicar las posibles localizaciones

Fuente: Elaboración propia

La Figura 15 que representa los distritos de Valencia usados en este trabajo, a la vez representa el área poblada. Al fijarse, las rayas grises no ocupa todo las zonas del distrito, ya que esas zonas no están habitadas, que puede ser causado por varias razones: hay un terreno baldío, puerto, vías de ferrocarril, almacenes, etc.

Una vez identificados los distritos, se procede a identificar las ubicaciones de las zonas verdes actuales. Para ello, se deben obtener las capas vectoriales. Se ha intentado conseguir las capas vectoriales de las zonas verdes a través del Plan Verde, pero no ha sido posible ya que en su momento el análisis seguía en proceso. Por lo tanto, se ha apoyado en el *GeoPortal*¹⁴ proporcionado por el Ayuntamiento de Valencia para dibujar manualmente cada uno de los polígonos en *QGIS 3.22* con el fin de obtener las capas vectoriales requeridas. En la Figura 16, se puede observar las zonas verdes pintadas por categorías. Se han catalogado 22 grandes parques y jardines de ciudad, 31 parques, plazas y jardines de barrio, 22 zonas verdes de equipamientos de titularidad pública y 52 avenidas ajardinadas. Como mencionado previamente, en este trabajo solo se van a tener en cuenta los grandes parques y jardines de ciudad y parques de barrio, por lo que se quedaría en 22 grandes parques y 31 parques de barrio (puede consultar los nombres de estos parques en el Anexo II).

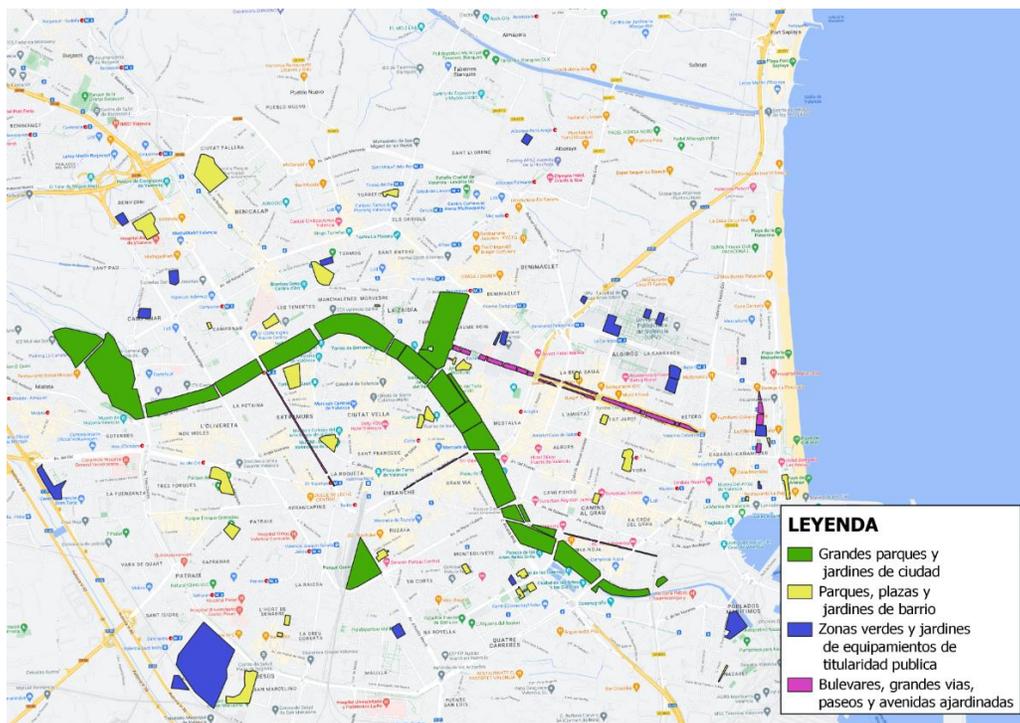


Figura 16. Zonas verdes pintadas manualmente con la ayuda de GeoPortal

Fuente: Elaboración propia

¹⁴ Es un tipo específico de portal web utilizado para buscar y acceder a datos geográficos. En este caso se ha usado esta web: <https://geoportal.valencia.es>

4.2. Cubrimiento actual de la capital de Valencia

Una vez localizadas las zonas verdes (teniendo en cuenta sólo los parques más grandes y los de barrio), se procede a cuantificar la cantidad de población que está cubierta por las zonas verdes actuales. Para ello, se deben calcular las isócronas para tiempos de 5 y 10 minutos para ver en qué medida la solución actual cubre toda la población de la capital. Debido al menor tamaño de los parques de barrios, el tiempo de las isócronas se calculará en 5 minutos, y para los parques más grandes, se podrá aumentar hasta 10 minutos.

Antes de empezar con el cálculo de las isócronas, se debe introducir una capa ráster que muestra las zonas donde la gente habita, donde interesa cubrir. Además, este cálculo se hace por puntos de partida, y no por polígonos (los parques dibujados tienen un área determinada), por lo que se debe calcular el centroide de cada uno de los polígonos antes de proceder. Para ello, existe un algoritmo en QGIS 3.22 que permite buscar el centroide de cualquier polígono. Se observa en la Figura 17 los centroides de todos los polígonos para las capas vectoriales de grandes parques y jardines y parques de barrio.



Figura 17. Centroides de parques grandes y de barrio

Fuente: Elaboración propia

Ahora se puede pasar a calcular las isócronas desde los centroides utilizando el complemento *ORS Tools* de *QGIS 3.22*, que ya se ha mencionado previamente. En el Anexo III puede observar el proceso de la obtención de las isócronas. La Figura 18 muestra las isócronas de todas las zonas verdes actuales usadas en este trabajo.

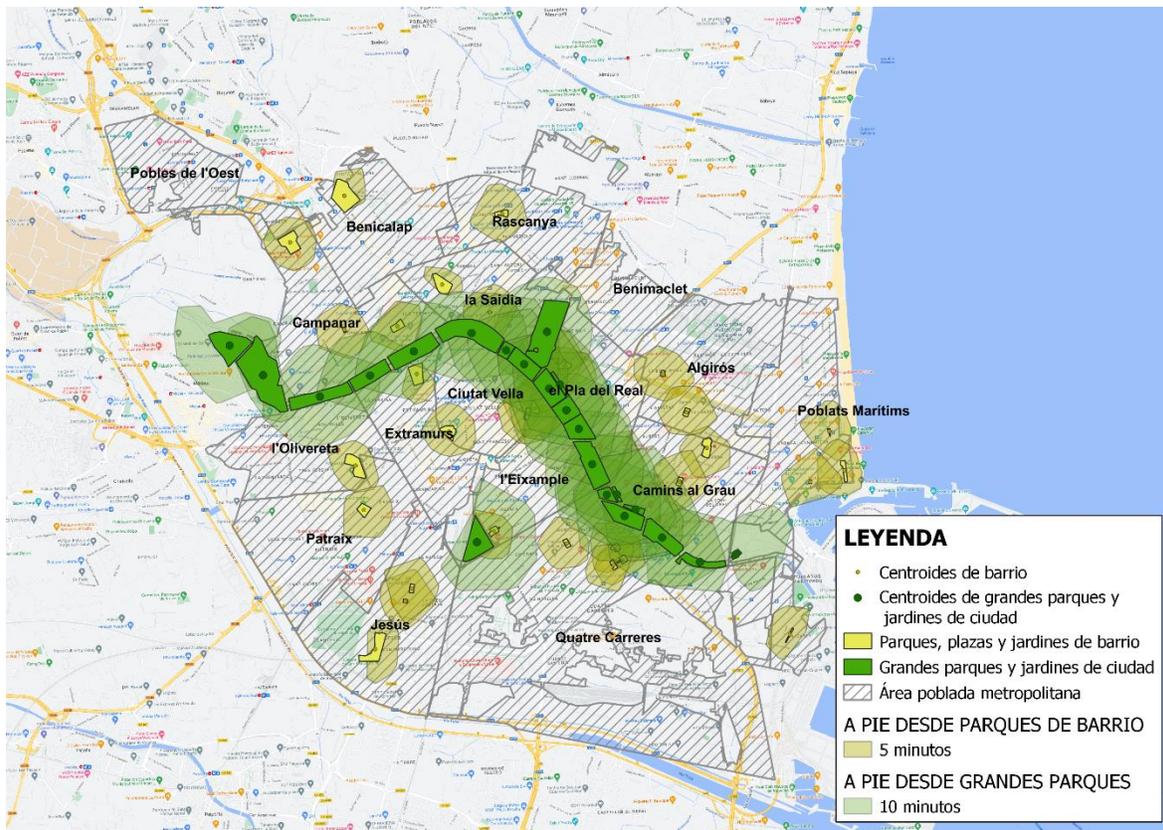


Figura 18. Visualización mediante isócronas del cubrimiento actual de las zonas verdes en la capital de Valencia

Fuente: Elaboración propia

En el cauce del río, donde hay una densidad muy alta de población cubierta, hay un sobre cubrimiento. Debido a su incapacidad para cubrir las zonas más lejanas, la población de estas no estarían beneficiando por esta distribución de espacios verdes. Por ello, el fin de cubrir la mayor parte posible de la población, se va a proponer un modelo donde también se tendrá en cuenta las restricciones.

Las Tablas 2 y 3 son la tabla de atributos de los parques de barrio y grandes parques, respectivamente. Las dos tablas tienen las mismas columnas que a continuación, se explica el significado de cada una de ellas:

- fid: identificación de la zona verde
- AA_MINS: tiempo de la isócrona
- AA_MODE: modo de desplazamiento

- TOTAL_POP: total població coberta per la isòcrons

	fid	AA_MINS	AA_MODE	TOTAL_POP
1	1	5	foot-walking	5289
2	2	5	foot-walking	4846
3	3	5	foot-walking	3224
4	4	5	foot-walking	4780
5	5	5	foot-walking	1492
6	6	5	foot-walking	5403
7	7	5	foot-walking	3231
8	8	5	foot-walking	3217
9	9	5	foot-walking	4025
10	10	5	foot-walking	3962

Tabla 2. Tabla de atributos de las isócronas de los parques de barrio

Fuente: Elaboración propia

	fid	AA_MINS	AA_MODE	TOTAL_POP
1	1	10	foot-walking	12313
2	2	10	foot-walking	17685
3	3	10	foot-walking	15593
4	4	10	foot-walking	18790
5	5	10	foot-walking	18235
6	6	10	foot-walking	18850
7	7	10	foot-walking	18001
8	8	10	foot-walking	18262
9	9	10	foot-walking	7113
10	10	10	foot-walking	19645

Tabla 3. Tabla de atributos de las isócronas de los grandes parques

Fuente: Elaboración propia

Según la capa de la densidad de población del complemento *ORS Tools*, la población total cubierta por los parques de barrio es 120.240, y para grandes parques es 340.475. Sin embargo, existen errores de estimación ya que hay isócronas que se solapan, por lo que se está contando más de una vez la población cubierta. A pesar de esto, no influirá en el problema de este trabajo, ya que lo importante es identificar dónde ya existen zonas verdes para poder identificar dónde faltan, que se va a introducir en el siguiente apartado, 4.3.

4.3. Zonas no cubiertas por espacios verdes actuales

Para facilitar la visualización de la cobertura actual en el área metropolitana de Valencia, se han juntado todas las isócronas calculadas de la Figura 18 del apartado anterior, y se quedaría como la Figura 19.

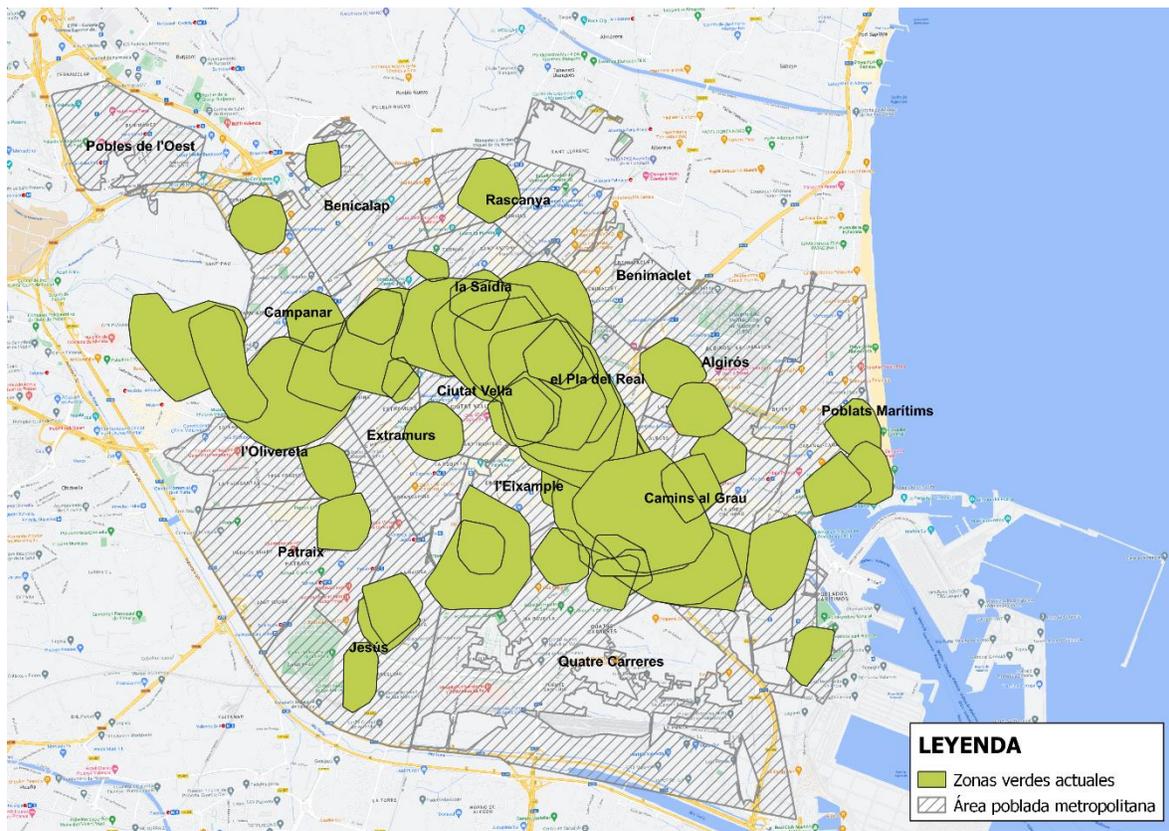


Figura 19. Zona cubierta actual

Fuente: Elaboración propia

De esta forma, es más fácil para sacar las zonas descubiertas ya que hay que utilizar otro algoritmo que haga la inversa. La Figura 20, de color naranja, muestra las zonas que no están cubiertas por los espacios verdes actuales.

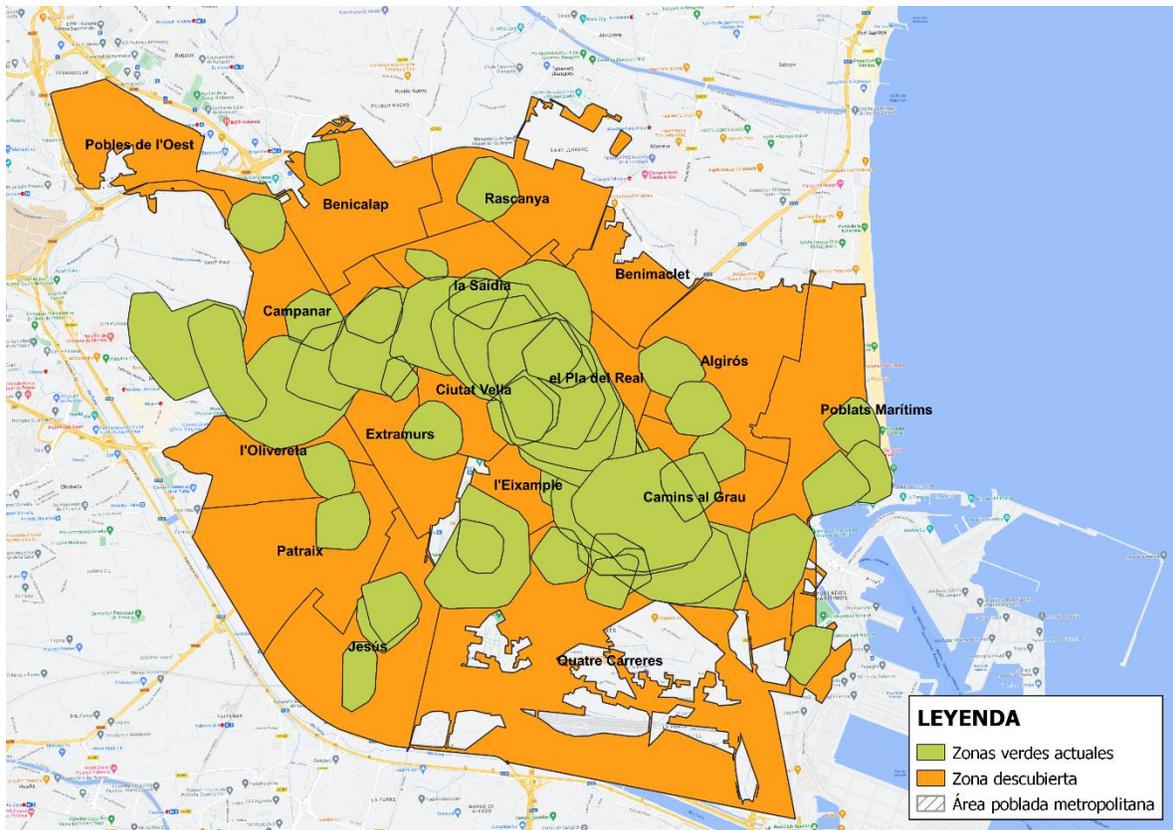


Figura 20. Zona descubierta
Fuente: Elaboración propia

A partir de esta información, se utiliza otro algoritmo de *QGIS* para generar 20 puntos aleatorios en la zona descubierta, y estos serían las posibles localizaciones a ubicar zonas verdes. En la Figura 21 se pueden ver las 20 posibles localizaciones.

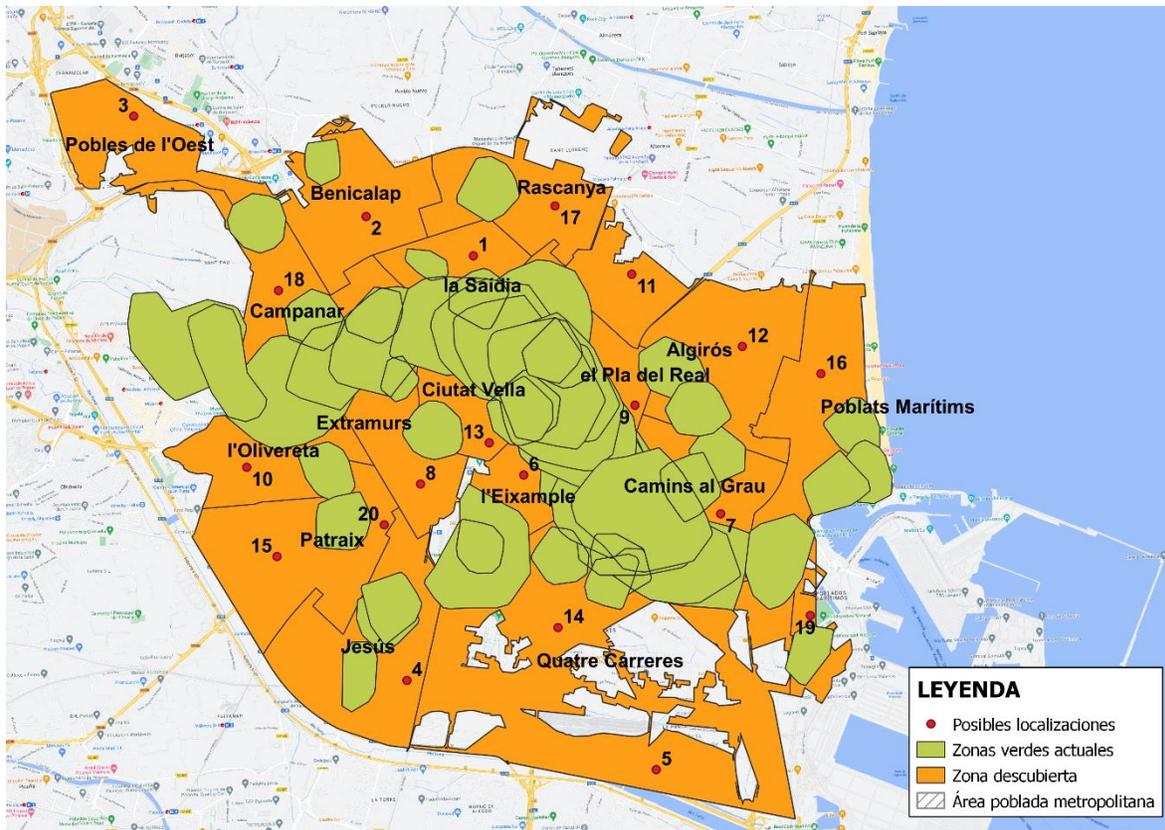


Figura 21. Posibles localizaciones en zonas descubiertas
Fuente: Elaboración propia

Existen un total de 17 distritos y 20 puntos, por lo que habrá 3 distritos que tengan 2 posibles localizaciones. Se observa en la Figura 21 que estos 3 distritos son Quatre Carreres, Patraix y Poblats Marítims, ya que son los distritos más grandes, por área, en el área metropolitana. En caso de que no se observe bien en qué distritos están ubicadas las posibles localizaciones, puede consultar en el Anexo IV.

La decisión de decidir aleatoriamente estas 20 posibles localizaciones en vez de ubicar en una dirección exacta, se debe a que los barrios que faltan zona verde no es posible construir porque un terreno no es urbanizable. La Figura 23 es un visor de cartografía donde representa IVM¹⁵ Suelo Urbano y Urbanizable, proporcionado por el *Instituto Cartográfico de Valencia*. Se puede observar que las zonas en las que están colocadas las posibles localizaciones de la Figura 21, en la Figura 23 no hay posibles suelos urbanos en los que construir. Solamente existe suelos urbanos urbanizables a las afueras de la capital, lo cual no sirve para este Trabajo Fin de Grado. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es

¹⁵ Un acrónimo de Infraestructura Verde Municipal.

solamente proponer dónde sería lo ideal para ubicar las zonas verdes y llevar esta propuesta al Ayuntamiento de Valencia para ver posibles soluciones.

Con el fin de mostrar que este trabajo consiste en un problema de cubrimiento máximo y no de cubrimiento total, que se ha mencionado previamente en el apartado 3.2.3, la Figura 22 ilustra las 20 posibles localizaciones con sus respectivas isócronas calculadas (en tiempo de 5 minutos caminando).

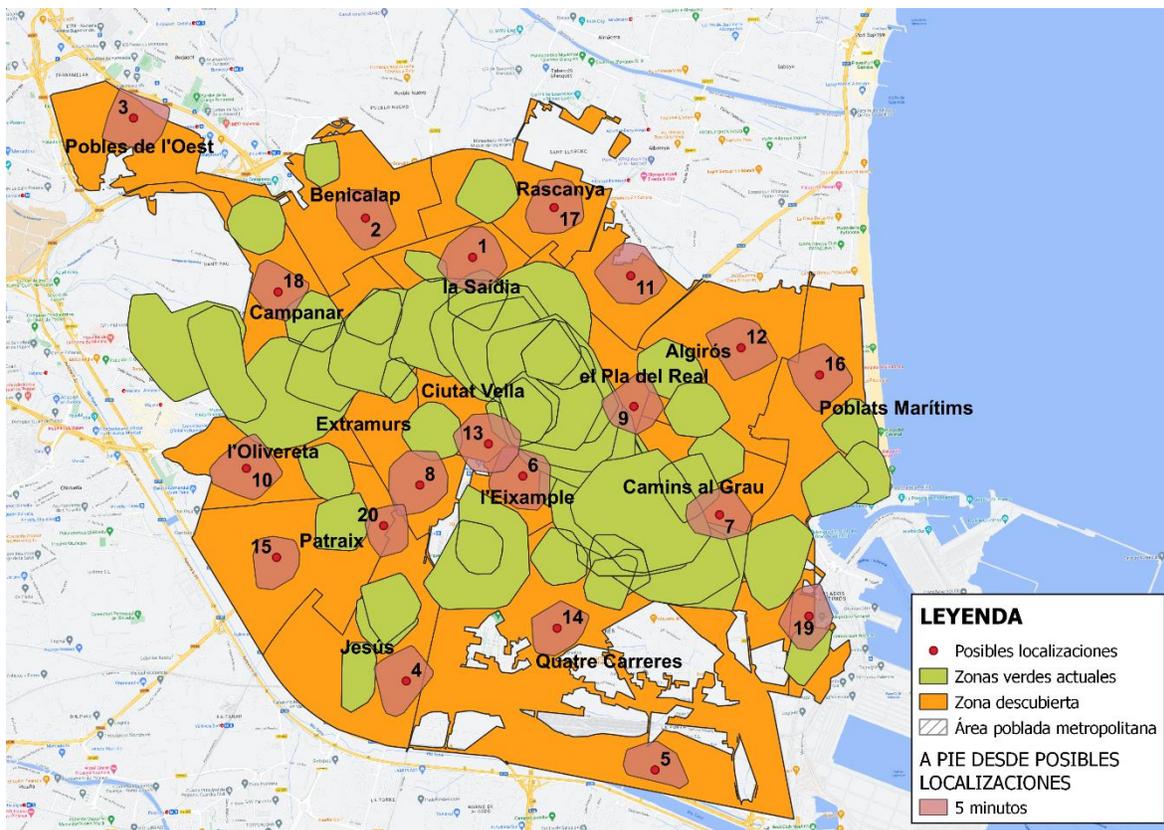


Figura 22. Posibles localizaciones en la zona descubierta del área metropolitana de Valencia

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que en el hipotético caso de ubicar las 20 posibles localizaciones, aún así no se cubriría toda la población. Sin embargo, se intentaría cubrir la máxima población posible, por lo que se trata de un cubrimiento máximo. En el Anexo V puede encontrar dónde están ubicados los 20 puntos en el mapa.

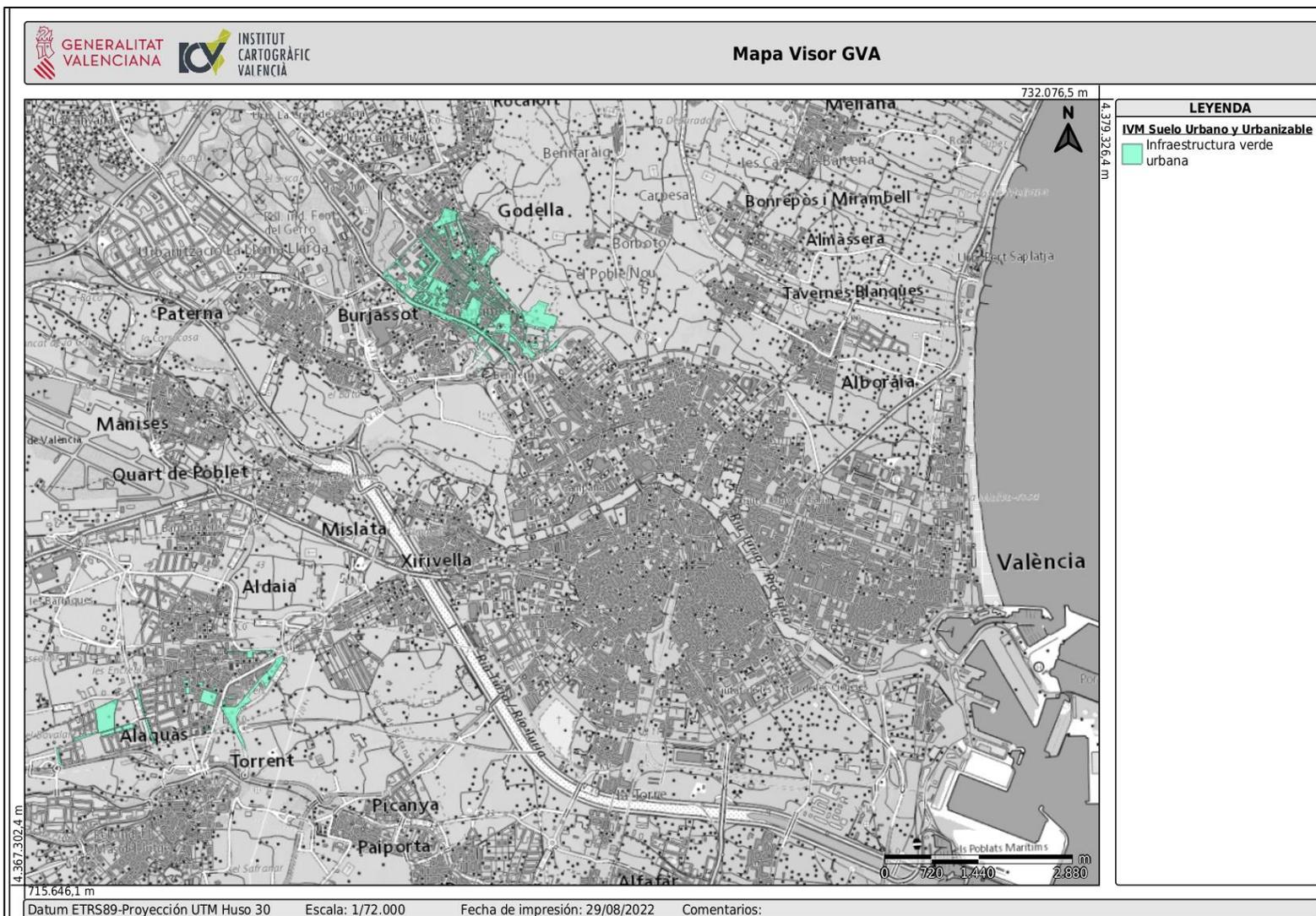


Figura 23. Infraestructura Verde Urbana Suelo Urbano y Urbanizable
 Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V. ESPECIFICACIÓN MATEMÁTICA, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La realidad es que Valencia es una de las ciudades más verdes de Europa. De hecho, anunciado por el Ayuntamiento, Valencia optará a los *European Green Capital Awards 2024* (EGCA) (Ayuntamiento de Valencia, 2022). Este reconocimiento premia los grandes esfuerzos de las ciudades y pueblos por mejorar su entorno en el que viven las personas. Se han basado en los siguientes 12 indicadores medioambientales para elegir a los finalistas (Comisión Europea, 2022):

1. Calidad del aire
2. Ruido
3. Agua
4. Uso sostenible de la tierra y el suelo
5. Residuos y economía circular
6. Naturaleza y biodiversidad
7. Crecimiento verde y eco-innovación
8. Cambio climático: Mitigación
9. Cambio climático: Adaptación
10. Movilidad urbana sostenible
11. Rendimiento energético
12. Gobernanza medioambiental

El problema es que la distribución de las zonas verdes urbanas no es capaz de llegar a toda la población. En el antiguo cauce del río se encuentra la mayoría, y las de tamaño pequeño, las isócronas no son lo suficientemente grandes como para cubrir suficiente población. Para ubicar las zonas verdes de la manera más eficaz, en este capítulo se desarrollará un modelo matemático de cubrimiento máximo. Para ello, se necesitaría la matriz de población cubierta por isócronas con tiempo de 5 minutos a pie, y también se debe definir las variables. Todo esto se puede ver en los siguientes apartados en detalle.

En el último apartado del capítulo IV se ha establecido las 20 posibles localizaciones, cada una con su índice correspondiente. De esta manera, facilita la lectura de los resultados. Y en este capítulo, se establece un máximo 5 localizaciones para ubicar zonas verdes. Esto sirve para evitar el sobre cubrimiento y para poder distribuir lo más esparcido posible.

Los siguientes parámetros son los que se han establecido y usado para los modelos matemáticos:

1. El número máximo de posibles zonas verdes donde ubicar es 20.
2. El tiempo máximo de la isócrona de las posibles zonas verdes es 5 minutos a pie.

3. La matriz de población cubierta para isócronas con tiempos de 5 minutos, donde se puede ver en el Anexo VI.

5.1. Matriz de población cubierta en QGIS 3.22

Antes de empezar a construir el modelo matemático de cubrimiento máximo, habría que obtener la matriz de la población que queda cubierta. Para poder construir esta matriz, hay que obtener las isócronas de 5 minutos de todas las posibles zonas verdes. La obtención de estas isócronas se sigue los mismos pasos que se dio para las isócronas de la solución actual (explicada en el apartado 4.2)¹⁶. Si se coloca una zona verde en cada posible localización, la matriz mostrará la población atendida en cada zona. Se puede ver en la Tabla 4 una muestra de la matriz de la población cubierta.

	Barrio
Ubicación <i>i</i>	Población cubierta del barrio situado en la ubicación <i>i</i>

Tabla 4. Muestra de la matriz de la población cubierta

Fuente: Elaboración propia

La tabla de atributos de cada isócrona se puede consultar una vez calculadas las isócronas para ver los datos que contiene. Las capas vectoriales constan de dos componentes, como ya se ha mencionado previamente: la geometría (en este ejemplo, el polígono de la isócrona) y los atributos relacionados con esa capa (la información generada por la isócrona). En la tabla de atributos de cada capa se muestra la población que abarca, la identificación de la capa, el tiempo de la isócrona con el que se está tratando, el modo de desplazamiento (en el caso de este trabajo es a pie) y la población total cubierta. Todo esto se puede observar en la Tabla 5.

¹⁶ También puede consultar un desglose paso a paso de cómo obtener las isócronas en el Anexo III.

	fid	AA_MINS	AA_MODE	TOTAL_POP
1	1	5	foot-walking	6461
2	2	5	foot-walking	4794
3	3	5	foot-walking	4832
4	4	5	foot-walking	3355
5	5	5	foot-walking	2832
6	6	5	foot-walking	5654
7	7	5	foot-walking	4846
8	8	5	foot-walking	4846
9	9	5	foot-walking	5654
10	10	5	foot-walking	4678
11	11	5	foot-walking	4642
12	12	5	foot-walking	3974
13	13	5	foot-walking	3231

Tabla 5. Ejemplo de una tabla de atributos de una capa vectorial

Fuente: Elaboración propia

Antes de trabajar con estos datos de las isócronas, hay que tener en cuenta el solapamiento de las isócronas de las posibles localizaciones con las zonas verdes actuales. Si se fija en la Figura 24, algunas isócronas ocupan parte del color verde que representa las isócronas de 5 (para los parques de barrio) y 10 (para los grandes parques) minutos a pie de las zonas verdes que existen actualmente en la capital de Valencia, por lo que la información de TOTAL_POP en la tabla de atributos no es correcta. Habría que restar la parte que ya está cubierta, ya que las personas de esa zona ya tienen acceso a un parque. Restando únicamente las partes que solapan con la zona ya cubierta, se quedaría como la Figura 25. Se puede ver que las isócronas ya no cubren la parte donde ya existe una zona verde, con lo cual no se debe contar con la población de esa intersección.

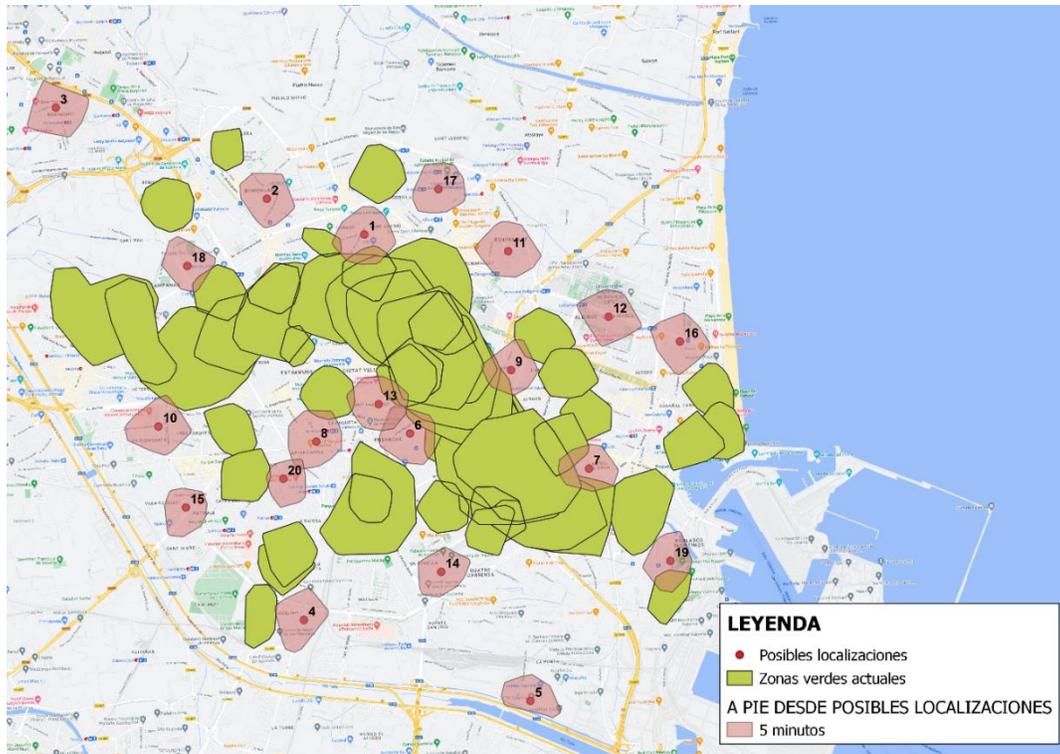


Figura 24. Isócronas de las posibles localizaciones con solapamiento

Fuente: Elaboración propia

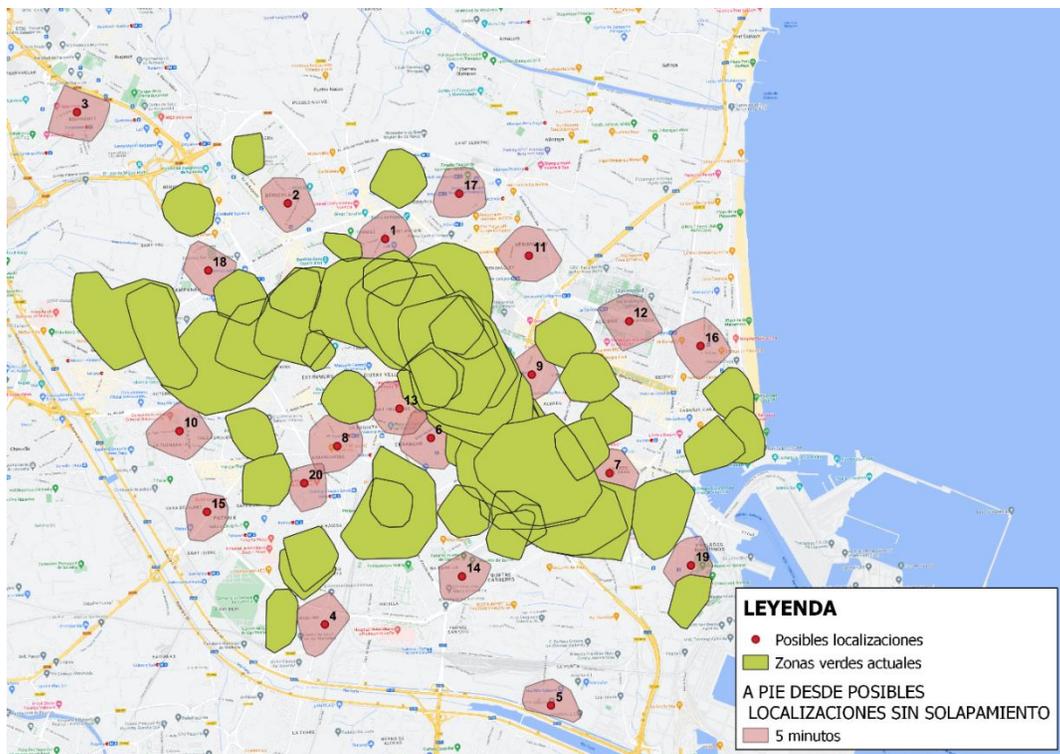


Figura 25. Isócronas de las posibles localizaciones sin solapamiento

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6 es la nueva tabla de atributos de la Figura 25, donde la columna POBLsum es la columna donde se ha restado la población de la zona que solapaba con las zonas verdes actuales de Valencia. TOTAL_POP es la columna previa de las isócronas, contando con toda la población que cae dentro del solapamiento también, por lo que algunas no son correctas. Otras isócronas que no tenían solapamiento como la número 2 y 3, TOTAL_POP y POBLsum deberían ser iguales, y sin embargo tienen una pequeña diferencia como se puede observar en la Tabla 6. Y así ocurre en todas las demás isócronas que no tenían solapamiento. Esto se debe a que las isócronas viene de un servidor del complemento *ORS Tools* que se instaló, y está usando su propia capa ráster de densidad poblacional. En cambio, la capa ráster que se está usando para calcular POBLsum es una que se ha descargado a través de la página web¹⁷ de la Comisión Europea, donde esta capa fue actualizada en el año 2019. Para mantener la firmeza de los números, se va a usar la columna POBLsum, es decir, la capa ráster que proporciona la Comisión Europea.

	fid	AA_MINS	AA_MODE	TOTAL_POP	BARRIO	POBLsum
1	1	5	foot-walking	6461	La Saldia	3878,847184181...
2	2	5	foot-walking	4794	Benicalap	3844,203170299...
3	3	5	foot-walking	4832	Pobles de l'Oest	5411,406363487...
4	4	5	foot-walking	3355	Jesús	3437,393514871...
5	5	5	foot-walking	2832	Quatre Carreres	2674,628029227...
6	6	5	foot-walking	5654	L'Eixample	3878,847184181...
7	7	5	foot-walking	4846	Camins al Grau	2307,924170494...
8	8	5	foot-walking	4846	Extramurs	4688,538866043...
9	9	5	foot-walking	5654	El Pla del Real	2334,173526763...
10	10	5	foot-walking	4678	L'Olivereta	5234,716050863...
11	11	5	foot-walking	4642	Benimaclet	3875,943807363...
12	12	5	foot-walking	3974	Algirós	4510,417359113...
13	13	5	foot-walking	3231	Ciutat Vella	3810,195021629...
14	14	5	foot-walking	3093	Quatre Carreres	2927,289446353...
15	15	5	foot-walking	4032	Patraix	4591,202303171...
16	16	5	foot-walking	5612	Poblats Maritims	5397,516987323...
17	17	5	foot-walking	4003	Rascanya	3837,414217710...
18	18	5	foot-walking	3925	Campanar	2904,647203922...
19	19	5	foot-walking	3938	Poblats Maritims	3035,834988594...
20	20	5	foot-walking	2423	Patraix	3868,860473632...

Tabla 6. Tabla de atributos de las isócronas sin solapamiento

Fuente: Elaboración propia

¹⁷ <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/download.php?ds=pop>

5.2. Modelización

En este apartado de modelización, se va a resolver desde el principio, es decir desde cero, y se añadirán gradualmente las modificaciones. De esta forma se obtendrá un modelo matemático consistente.

5.2.1. Parámetros y variables de decisión

Para poder expresar el modelo matemático con el fin de resolverlo, se introduce la Tabla 7 que representa el significado de cada parámetro:

Parámetro	Significado
$N = \{1, 2, 3, \dots, 20\}$	Conjunto de posibles localizaciones para situar una zona verde
$i \in N$	Índice de posibles localizaciones donde ubicar la zona verde
$P = \{1, 2, 3, 4, 5\}$	Cantidad de zonas verdes máximo a ubicar
Z_i	Matriz de la población cubierta
D_i	Matriz de distancias

Tabla 7. Parámetros del problema

Fuente: Elaboración propia

A continuación, la Tabla 8 muestra la variable de decisión:

Variable de decisión	Significado
X_i	Vale 1 si se localiza una zona verde en la ubicación i ; 0 en caso contrario

Tabla 8. Variable de decisión

Fuente: Elaboración propia

Estos parámetros y la variable de decisión se usarán para construir el modelo en los siguientes epígrafes.

5.2.2. Modelo matemático 1

Utilizando los parámetros de la Tabla 7 y la variable de la Tabla 8, el primer modelo matemático propuesto para abordar el problema de este Trabajo Fin de Grado es el siguiente:

$$\text{Max } F1 = Z_1 * X_1 + Z_2 * X_2 + Z_3 * X_3 + Z_4 * X_4 + Z_5 * X_5 + Z_6 * X_6 + Z_7 * X_7 + Z_8 * X_8 + Z_9 * X_9 + Z_{10} * X_{10} + Z_{11} * X_{11} + Z_{12} * X_{12} + Z_{13} * X_{13} + Z_{14} * X_{14} + Z_{15} * X_{15} + Z_{16} * X_{16} + Z_{17} * X_{17} + Z_{18} * X_{18} + Z_{19} * X_{19} + Z_{20} * X_{20} \quad (1)$$

s.a.

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} \leq P \quad (2)$$

$$X_5 + X_{14} \leq 1 \quad (3)$$

$$X_{15} + X_{20} \leq 1 \quad (4)$$

$$X_{16} + X_{19} \leq 1 \quad (5)$$

$$X_6 + X_{13} \leq 1 \quad (6)$$

$$X_8 + X_{20} \leq 1 \quad (7)$$

$$X_i \in \{0,1\}; \forall i \in N \quad (8)$$

La Función Objetivo (1) maximiza la cantidad de personas que puede llegar en 5 minutos a pie a una zona verde. Z_i representa la cantidad de personas que podrían llegar en 5 minutos si se ubicase un parque en la localización i .

La restricción (2) impone un límite a la totalidad de posibles localizaciones. En este caso, se ha establecido que sean 5 el máximo. Las restricciones (3), (4) y (5) evitan que haya más de una zona verde en los distritos Quatre Carreres, Patraix y Poblats Marítims respectivamente. Solamente se prohíben en estos distritos debido a que hay más de una posible localización (en el Anexo IV puede ver que estos tres distritos aparecen dos veces por ello). La restricción (6) obliga a ubicar o bien la zona verde 6 o 13, pero no ambas. Lo mismo obliga la restricción (7), pero en este caso o zona verde 8 o 20. Estas 2 restricciones se han establecido debido a que estas posibles localizaciones están demasiado juntas y se solapan, por lo que tienen una intersección entre ellas. Se evita con el objetivo de no contar doble la población. La última restricción (8) obliga que la variable de decisión sea binaria.

Cabe destacar que el problema que se está abordando es un problema dinámico, y no estático. Es importante entender esto porque la densidad de población es una información que viene de una capa ráster, extraída en un día concreto, y por tanto es probable que se vaya actualizando ya que puede haber más o menos personas en cada distrito.

Para resolver este modelo, se ha usado *Microsoft Excel for Microsoft 365 MSO (16.0.13127.21210) 32-bit*. Se debe instalar una macro¹⁸ llamada *OpenSolver* (explicada en el apartado 2.2.2), donde en el Anexo VII se puede ver su instalación y el procedimiento de introducir la variable y las restricciones. Después de introducir el modelo en *OpenSolver*, se obtiene como resultado óptimo que la suma de la población cubierta de las localizaciones elegidas es 25.325. Estas localizaciones elegidas cuentan con X_3 , X_8 , X_{10} , X_{15} , y X_{16} que son los distritos Pobles de l'Oest, Extramurs, l'Olivereta, Patraix y Poblat Maritims respectivamente. La Figura 26 se puede ver las isócronas de las zonas verdes actuales en color verde y en color azul las ubicaciones dadas por *OpenSolver*.

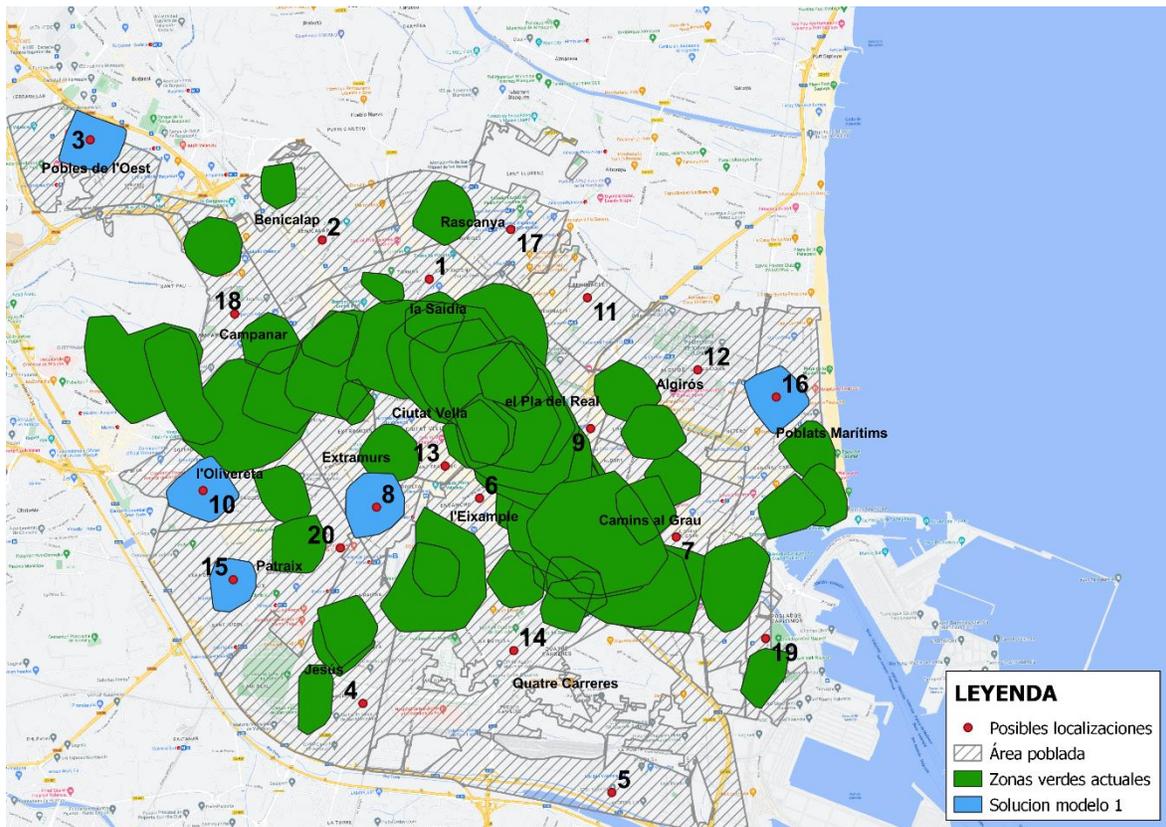


Figura 26. Ubicaciones para zonas verdes de la solución modelo 1

Fuente: Elaboración propia

¹⁸ Una macro es un pequeño programa que se hace en *Excel* y que automatiza tareas.

En la siguiente Tabla 9, es la solución de las 5 ubicaciones óptimas del modelo, la cual muestra la cantidad de población que podría acceder a una zona verde en un tiempo máximo de 5 minutos caminando.

Ubicación	Distrito	Población cubierta
3	Pobles de l'Oest	5.412
8	Extramurs	4.689
10	L'Olivereta	5.235
15	Patraix	4.591
16	Poblats Marítims	5.398
TOTAL		25.325

Tabla 9. Población cubierta por distritos dada por modelo 1

Fuente: Elaboración propia

El modelo matemático propuesto es válido en este caso porque se está asumiendo que el coste de construir cada parque es el mismo. En cambio, en una situación real suele existir restricciones presupuestarias. Es decir, las entidades disponen de una cantidad a invertir que no pueden exceder y la construcción de cada zona verde implica un coste diferente. Si supiésemos el coste de construir cada parque, se podría imponer una restricción de que el coste no excediese de una cantidad de una entidad correspondiente, por lo que la solución podría cambiar.

5.2.3. Modelo matemático 2

En el modelo previo, el objetivo era colocar las zonas verdes en los lugares a los que más población pudiese llegar en un tiempo máximo de 5 minutos. Sin embargo, se observa que distritos que inicialmente estaban muy alejados de una posible zona verde, como el de Quatre Carreres, siguen sin disponer de esa zona. Por ello, en este apartado se plantea un modelo matemático donde el objetivo es ubicar una zona verde donde más se necesite. Es decir, en aquellas localizaciones que estén más alejadas de una zona verde actual. Para que el lector tenga una idea más clara de lo que se está describiendo, la línea rosa de la Figura 27 representa la distancia más corta a una zona verde actual. Estas distancias se han calculado a través de *QGIS 3.22*.

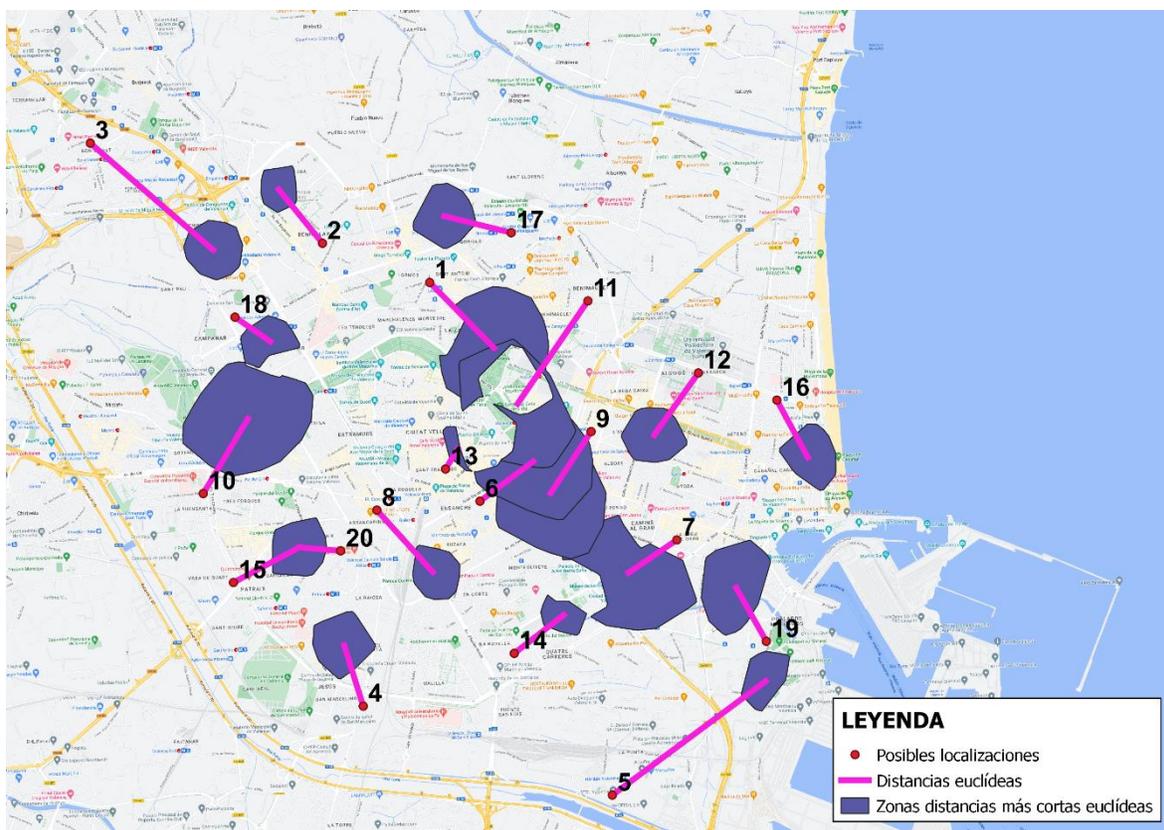


Figura 27. Distancias euclídeas entre las posibles localizaciones y zonas verdes actuales

Fuente: Elaboración propia

Se observa que algunas posibles localizaciones están bastante alejadas de una zona verde actual, como es en este caso Quatre Carreres (número 5) y Pobles de l'Oest (número 3). Para cuantificar estas distancias, en la Tabla 10 se puede ver la tabla de atributos donde la columna *HubDist* representa la distancia en metros caminando desde la posible localización, que es representada por la columna *fid*, hasta la zona verde más cercana, que es representada por *HubName*. Hay que dejar claro que la distancia que aparece en la Tabla 10, es una distancia euclídea. Es decir, una distancia que no es real, ya que no tiene en cuenta las carreteras, si es posible cruzar por esa zona, etc. Por lo tanto, habría que usar el complemento *ORS Tools* de nuevo para calcular las distancias en términos reales.

	fid	HubName	HubDist
1	1	79	1047,637706325...
2	2	101	793,3650719891...
3	3	102	1859,097588122...
4	4	93	729,0919611375...
5	5	116	2181,600072807...
6	6	75	760,3241970316...
7	7	70	665,3387123748...
8	8	90	953,4826439079...
9	9	73	841,5557418471...
10	10	80	995,5649282011...
11	11	88	1422,615461420...
12	12	112	870,9757787103...
13	13	115	267,2072015211...
14	14	105	715,2660324580...
15	15	111	851,4871664126...
16	16	97	743,9437059442...
17	17	113	787,6141575862...
18	18	94	490,0380519517...
19	19	77	702,6286299756...
20	20	111	473,4459173069...

Tabla 10. Distancias euclídeas desde posibles localizaciones a zonas verdes actuales

Fuente: Elaboración propia

La matriz de distancias habría que poner origen la posible localización y como destino las zonas verdes actuales en la capital de Valencia, por lo que la matriz tendría la distancia desde cada posible localización (20 en total) a cada zona verde (118 en total). Se exportaría a *Excel* para una mejor visualización, y después habría que elegir para cada posible localización su zona verde más cercana, por lo que se quedaría como la Tabla 11, después de todo el arreglo.

DESDE_ID	A_ID	DURACI3N_H	DIST_M
1	96	0,061686111	308,44
2	95	0,203397222	1017,01
3	102	0,60575	3028,81
4	99	0,142402778	712,04
5	104	0,534952778	2674,79
6	115	0,180313889	901,58
7	1	0,088530556	442,66
8	92	0,171186111	855,95
9	106	0,157377778	786,91
10	100	0,243866667	1219,35
11	106	0,300155556	1500,8
12	106	0,233738889	1168,71
13	115	0,076075	380,39
14	105	0,188111111	940,56
15	111	0,230983333	1154,93
16	97	0,205341667	1026,73
17	113	0,210072222	1050,38
18	94	0,144308333	721,55
19	116	0,097052778	485,27
20	111	0,159025	795,14

Tabla 11. Distancias reales desde posibles localizaciones a zonas verdes actuales

Fuente: Elaboraci3n propia

DESDE_ID representa la posible localizaci3n y A_ID representa la zona verde m3s cercana. Si se compara con la Tabla 10, se puede ver que el n3mero del destino ID es distinto, con lo cual quiere decir diferentes zonas verdes, ya que las distancias son distintas. Las l3neas verdes de la Figura 28 son las distancias reales versus las l3neas rosas que son las distancias eucl3deas (ya vistas en la Figura 27). Se puede observar que despu3s de calcular la distancia en base a la realidad, la soluci3n cambia. Cogiendo el ejemplo de la posible localizaci3n n3mero 4, usando la distancia eucl3dea la zona verde m3s cercana era de color violeta, en cambio, al calcular las distancias reales, la soluci3n ha cambiado a la zona verde de color verde.

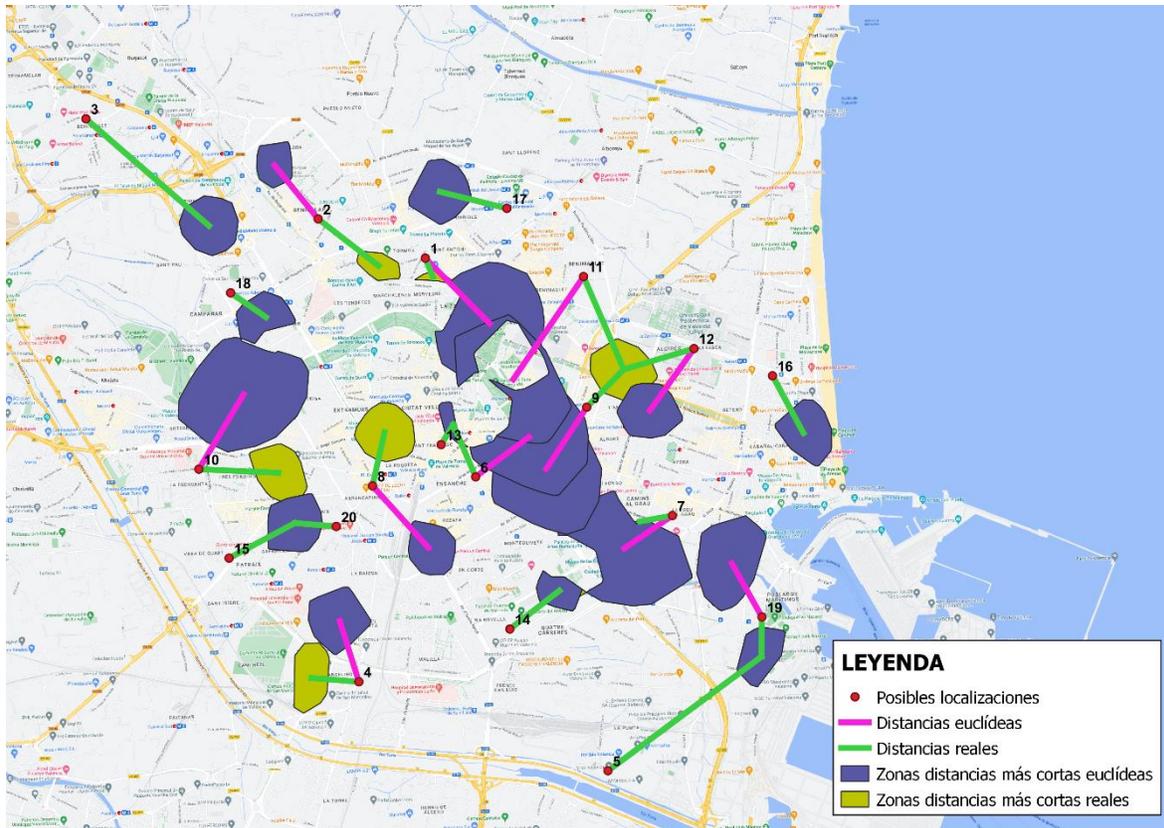


Figura 28. Distancias euclídeas versus distancias reales
Fuente: Elaboración propia

Con el fin de acercarnos lo más posible a la realidad, se va a usar los datos de la Tabla 11 para maximizar las distancias, ya que el objetivo de este modelo matemático 2 es localizar una posible zona verde donde la distancia a una zona verde actual esté más alejada.

Teniendo en cuenta toda la explicación previa y las distancias de la Tabla 11, para construir modelo matemático 2, se va a cambiar la función objetivo, manteniendo las mismas restricciones:

$$\text{Max } F2 = D_1 * X_1 + D_2 * X_2 + D_3 * X_3 + D_4 * X_4 + D_5 * X_5 + D_6 * X_6 + D_7 * X_7 + D_8 * X_8 + D_9 * X_9 + D_{10} * X_{10} + D_{11} * X_{11} + D_{12} * X_{12} + D_{13} * X_{13} + D_{14} * X_{14} + D_{15} * X_{15} + D_{16} * X_{16} + D_{17} * X_{17} + D_{18} * X_{18} + D_{19} * X_{19} + D_{20} * X_{20}$$

La función objetivo maximiza las distancias entre la posible localización y la zona verde actual más cercana.

El resultado óptimo obtenido de la función objetivo es 9.592,46. La Tabla 12 y la Figura 29 muestran la solución para el modelo 2. El resultado que se obtiene en ubicar zonas verdes en las siguientes localizaciones:

Ubicación	Distrito	Distancia_m
3	Pobles de l'Oest	3.028,81
5	Quatre Carreres	2.674,79
10	L'Olivereta	1.219,35
11	Benimaclet	1.500,80
12	Algirós	1.168,71
TOTAL		9.592,46

Tabla 12. Ubicaciones para zonas verdes de la solución modelo 2
Fuente: Elaboración propia a partir de la información de QGIS 3.22

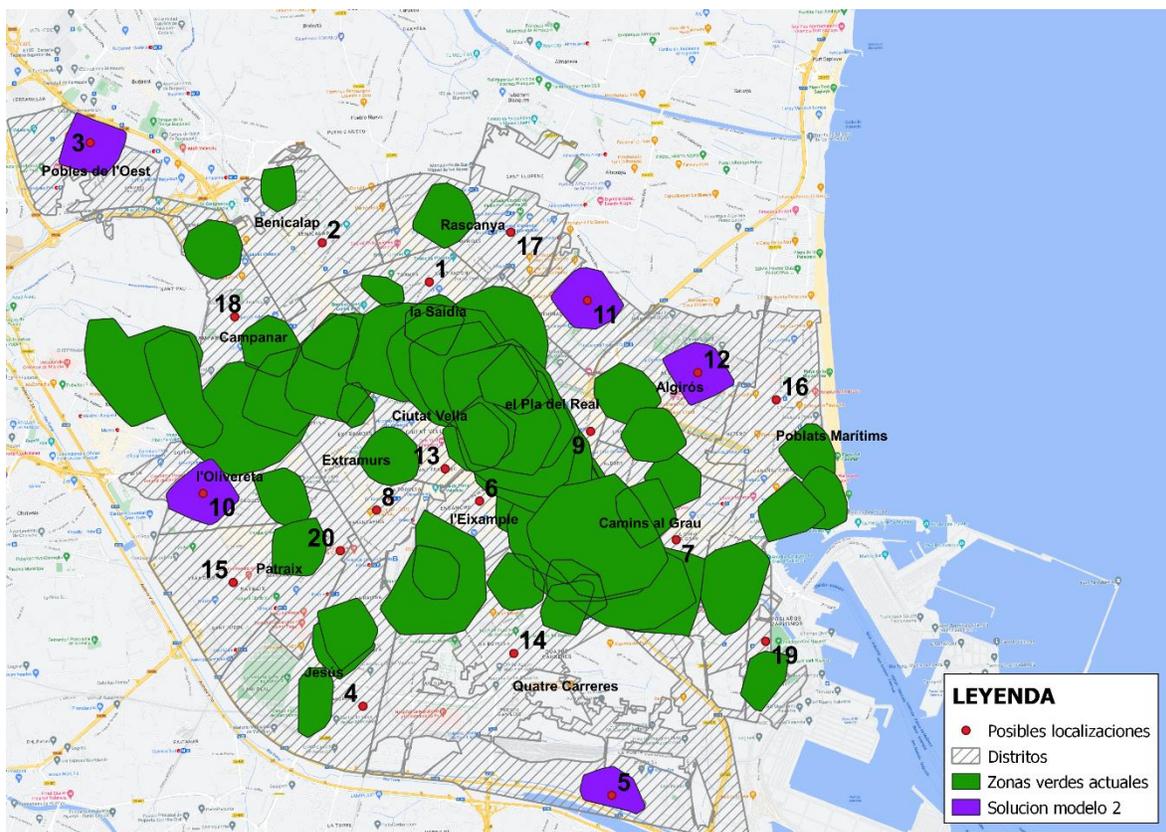


Figura 29. Ubicaciones para zonas verdes de la solución modelo 2
Fuente: Elaboración propia

Las isócronas violetas son las 5 localizaciones dadas como solución. En comparación a la solución del modelo 1, se ve claramente que las zonas verdes están más alejadas entre sí, por lo que asegura un equilibrio de zonas verdes en la capital de Valencia. Se puede ver en la solución del modelo 1, Quatre Carreres y Pobles de l'Oest eran los distritos más necesitados, ya que no se había localizado ninguna zona verde y además son los que más alejados están de las zonas verdes actuales. Sin embargo, aplicando la función objetivo del modelo 2, han sido cubiertos.

5.2.4. Modelo matemático 3

Como se ha visto en el modelo matemático 1 y 2, solamente se ha propuesto como objetivo optimizar un objetivo: maximizar la cantidad de personas o maximizar las distancias. Pero ambos objetivos son conflictivos, por lo que no pueden alcanzarse a la vez. O bien se opta por cubrir la mayoría de la población o colocar las zonas verdes más alejadas de las zonas verdes actuales. Por ello, en este apartado, el tercer modelo matemático que se va a proponer se trata de una modelización multi-objetivo. Es decir, se tendrá en cuenta los dos objetivos (tanto del modelo 1 como del modelo 2). Sin embargo, hay que dejar claro que, cuando existen varios objetivos el concepto de solución óptima ya no es válido. La optimalidad en su sentido clásico, solo es válida en el caso de un único objetivo (como los otros dos modelos). En el caso de multi-objetivo, se está hablando de un resultado satisfactorio en lugar de solución óptima.

Para poder proceder con la modelización multi-objetivo, el primer paso es realizar la matriz de pagos¹⁹, la cual permite cuantificar el nivel de conflicto entre los objetivos. Para hacerse una idea más clara, la Tabla 13 es la matriz de pagos:

	Modelo 1	Modelo 2
Modelo 1	25.325	7.285,77
Modelo 2	21.709	9.592,46

Tabla 13. Matriz de pagos

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de QGIS 3.22

Se observa que la solución ideal es la diagonal principal de la matriz, que justamente coincide con las soluciones óptimas del modelo 1 y del modelo 2. En cambio, en la otra diagonal es la solución anti-ideal.

¹⁹ Es una matriz cuadrada cuyas dimensiones coinciden con el número de objetivos. Cada fila de la matriz se obtiene optimizando cada objetivo de manera separada y calculando los valores para el resto de objetivos en cada solución óptima.

Està clar que los dos mejores valores no se pueden conseguir a la vez y, por eso se plantea una solución intermedia a través de la modelización multi-objetivo. Hay muchas maneras de construir un modelo multi-objetivo, pero en este trabajo se va a optar por el método lexicográfico. En este método, los objetivos se ordenan según las preferencias del decisor. Una vez ordenados, primero se resuelve el modelo optimizando el primero de los objetivos, y seguidamente se optimiza el segundo objetivo sujeto al valor obtenido en el primer objetivo como una restricción. En este método se permite que cada objetivo empeore como mucho en un $\alpha\%$ cuando se optimiza el resto de objetivos. En este caso la orden de preferencia sería el modelo 1 seguido del modelo 2. Es decir, el objetivo sería maximizar las distancias, y maximizar la población cubierta se pondría como restricción permitiendo que empeore el valor óptimo en un $\alpha\%$ para buscar una solución intermedia que cubra una cantidad mínima de población, y a su vez también tenga en cuenta las distancias.

El modelo matemático sería el mismo que el modelo 2, solo se tendría que añadir la función objetivo del modelo 1 como restricción y teniendo en cuenta que el α establecido es de un 5%. Para tener una visión completa del modelo, se ha escrito el modelo completo:

$$\begin{aligned} &Max D_1 * X_1 + D_2 * X_2 + D_3 * X_3 + D_4 * X_4 + D_5 * X_5 + D_6 * X_6 + D_7 * X_7 + D_8 * X_8 + D_9 * X_9 + D_{10} * X_{10} \\ &+ D_{11} * X_{11} + D_{12} * X_{12} + D_{13} * X_{13} + D_{14} * X_{14} + D_{15} * X_{15} + D_{16} * X_{16} + D_{17} * X_{17} + D_{18} * X_{18} + \\ &D_{19} * X_{19} + D_{20} * X_{20} \end{aligned} \quad (1)$$

s.a.

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} \leq P \quad (2)$$

$$X_5 + X_{14} \leq 1 \quad (3)$$

$$X_{15} + X_{20} \leq 1 \quad (4)$$

$$X_{16} + X_{19} \leq 1 \quad (5)$$

$$X_6 + X_{13} \leq 1 \quad (6)$$

$$X_8 + X_{20} \leq 1 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &Z_1 * X_1 + Z_2 * X_2 + Z_3 * X_3 + Z_4 * X_4 + Z_5 * X_5 + Z_6 * X_6 + Z_7 * X_7 + Z_8 * X_8 + Z_9 * X_9 + Z_{10} * X_{10} + \\ &Z_{11} * X_{11} + Z_{12} * X_{12} + Z_{13} * X_{13} + Z_{14} * X_{14} + Z_{15} * X_{15} + Z_{16} * X_{16} + Z_{17} * X_{17} + Z_{18} * X_{18} + Z_{19} * X_{19} + \\ &Z_{20} * X_{20} \geq (1 - \alpha) * 25.325 \end{aligned} \quad (8)$$

$$X_i \in \{0, 1\}; \forall i \in N \quad (9)$$

Todas las restricciones se mantienen igual. Excepto la (8), que es la nueva restricción referente al valor mínimo de la función objetivo del modelo 1. Esta restricción implica maximizar la población cubierta, pero no debe ser menor que 24.058,75 ($0,95 \cdot 25.325$).

La solución de este modelo la muestra en la Tabla 14:

Ubicación	Distrito	Población cubierta	Distancias_m
3	Pobles de l'Oest	5.412	3.028,81
10	L'Olivereta	5.235	1.219,35
11	Benimaclet	3.876	1.500,80
12	Algirós	4.511	1.168,71
16	Poblats Marítims	5.398	1.026,73
TOTAL		24.432	7.944,40

Tabla 14. Ubicaciones para zonas verdes de la solución modelo 3

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de QGIS 3.22

La Tabla 14 muestra las 5 ubicaciones donde colocar las zonas verdes de manera que se satisfacen los 2 objetivos, siendo α el que lo establece el decisor. La población máxima cubierta sería un total de 24.432, teniendo en cuenta que se deben maximizar las distancias también. Las distancias máximas serían un total de 7.944,4, teniendo en cuenta que se deba satisfacer la restricción referente al modelo 1. La Figura 30 es una representación de la solución del modelo 3 elaborado a través de QGIS 3.22.

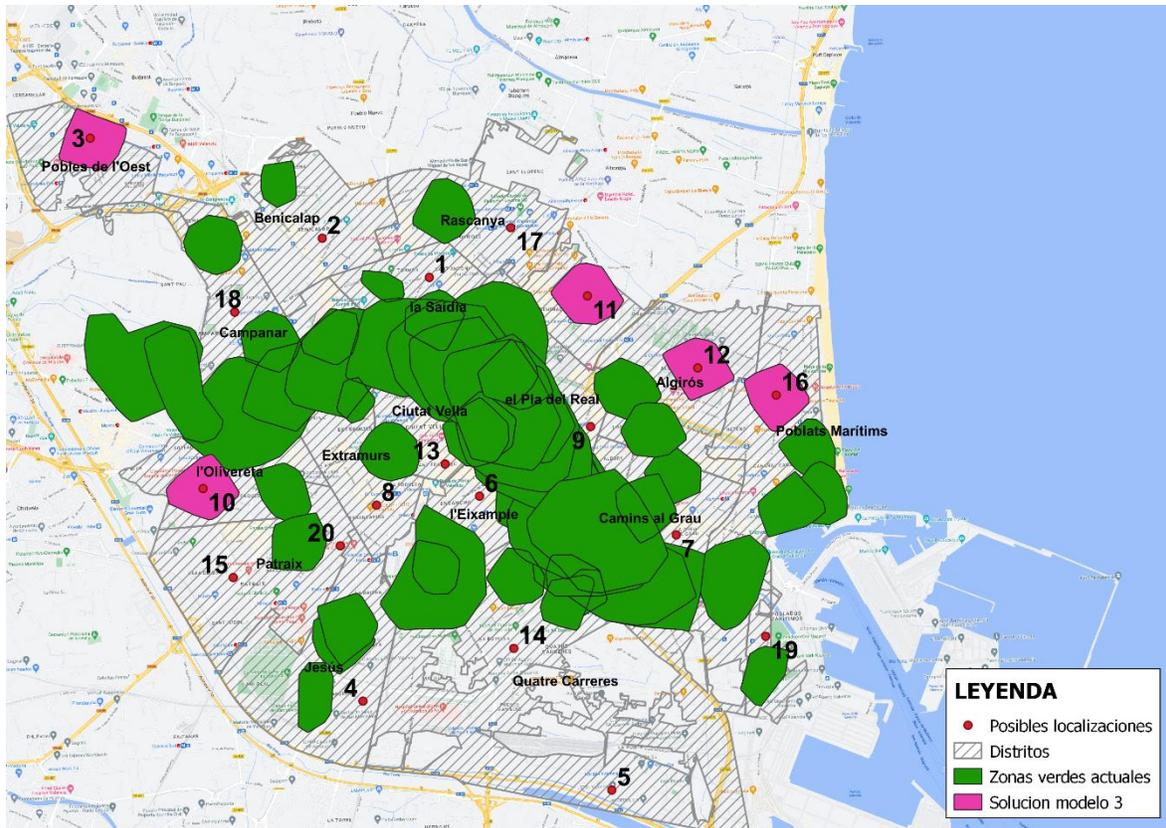


Figura 30. Ubicaciones para zonas verdes de la solución modelo 3

Fuente: Elaboración propia

Los polígonos de color rosa son las zonas que *OpenSolver* ha dado como solución para ubicar las nuevas zonas verdes.

CAPÍTULO VI. COMPARACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo, se va a comparar los tres modelos anteriores del capítulo VI que se han resuelto. Los tres modelos mejoran la situación actual de las ubicaciones de las zonas verdes, ya que cubrirá a más población y a distritos que están más alejados de los espacios verdes actuales.

A continuación, en la Figura 31 los resultados de los modelos 1 y 2 son la matriz de pagos de la Tabla 13. Es decir, cuando el modelo 1 obtiene el resultado óptimo, que sería cubrir la población máxima posible de 25.325, las distancias máximas que pueden llegar es solamente de 7.285,77, y esto es el 76% de su solución óptima ($7.285,77/9.592,46 \cdot 100$). Para el modelo 2, el resultado de maximizar las distancias es un 100% ya que llega a su solución óptima de 9.592,46, y sin embargo, solamente llega a cubrir un 86% de la totalidad de la población de 25.325. En el modelo 3, ninguno llega a un 100%. Eso es porque es un modelo multi-objetivo, y como mencionado previamente, no existe una solución óptima, solamente un resultado satisfactorio. Se observa que la población total cubierta es de un 96%, que anteriormente se había fijado un α de 5%, por lo que no permite que la solución óptima del modelo 1 sea peor que un 95%. Con el fin de satisfacer esta restricción, el resultado de maximizar las distancias se reduce a un 83%. Este porcentaje sigue siendo mejor que el modelo 1. Y por lo tanto, se ha encontrado una solución intermedia.

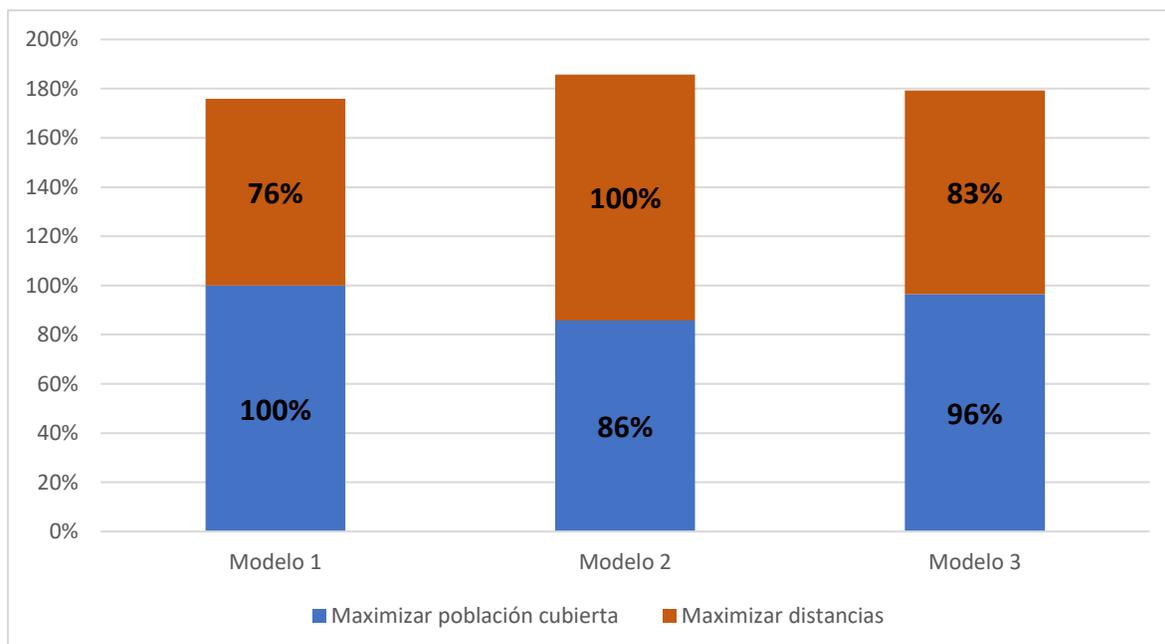


Figura 31. Comparación de resultados entre los 3 modelos

Fuente: Elaboración propia

El resultado del modelo 3 se puede ir modificando dependiendo del valor que establezca el decisor al α . Esto quiere decir que si α aumenta, la población cubierta disminuirá y las distancias aumentarán. La Figura 32 es un ejemplo de la modificación del α al 10%.

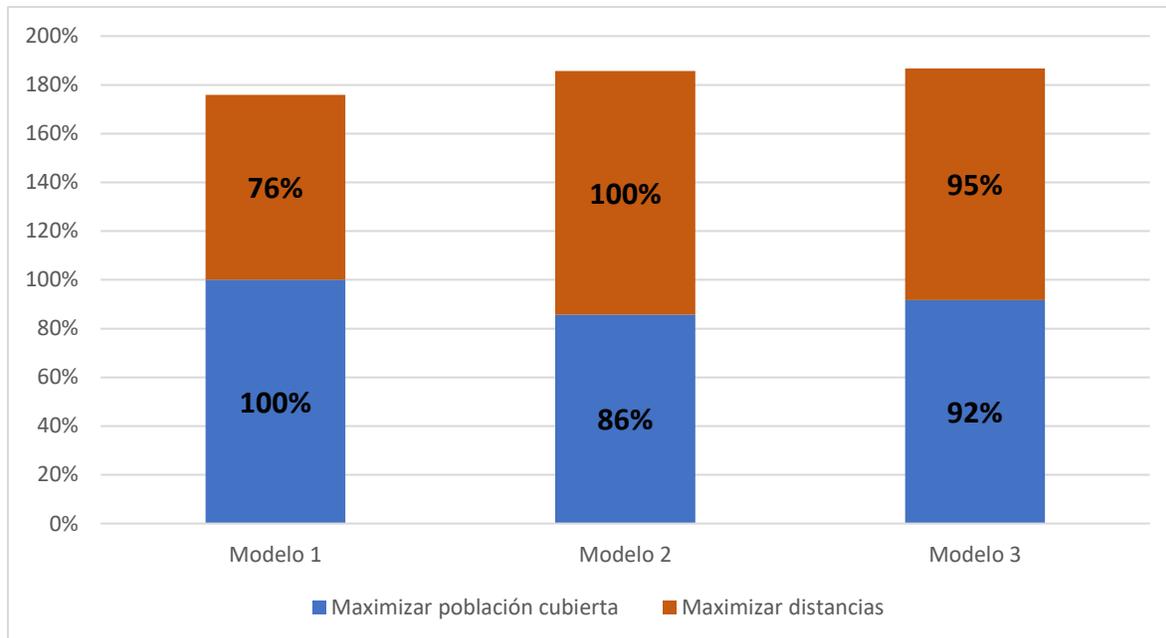


Figura 32. Comparación de resultados entre los 3 modelos con Alpha 10%

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver las distancias maximizadas están más cerca de su solución óptima con un resultado de 9118,39. En cambio, la población cubierta ha disminuido ya que se está permitiendo que pueda empeorar en un rango mayor. Y por tanto, los dos objetivos se van compensando.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

7.1. Síntesis

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es crear una herramienta para distribuir de forma eficiente las zonas verdes urbanas. A pesar de que el enfoque principal es hacia los aspectos medioambientales, al final también se traduce a un beneficio económico, ya que ayuda a facilitar la toma de decisiones. Un proceso de toma de decisiones lógico y sensato analiza los posibles beneficios e inconvenientes para reducir la incertidumbre, los costes y aumenta la productividad.

En primer lugar, se ha introducido el concepto de la Ciudad de 15 minutos y la importancia que muchos países dan al concepto de una ciudad sostenible, ya que están comprometidos a cumplir con los ODS de la Agenda 2030.

En segundo lugar, se ha introducido la Investigación Operativa y la metodología implementada. En este capítulo también se comenta sobre el apoyo en las dos herramientas fundamentales que se han utilizado a lo largo de este trabajo: *QGIS 3.22* y *OpenSolver*. *QGIS 3.22* ha ayudado a realizar simulaciones sobre la cobertura de la población que cubriría al ubicar las posibles localizaciones. Estas simulaciones son posibles gracias a la capacidad del software para dibujar isócronas, una noción que se detalla minuciosamente en el estudio. Se ha podido ver que no es posible cubrir toda la población del área metropolitana de Valencia con isócronas en un tiempo de 5 minutos, por lo que se ha usado el modelo de cubrimiento máximo.

Antes de empezar a construir los modelos, en los capítulos III y IV se han dedicado a introducir los conceptos más detallados en relación al problema. Se explica la aportación del verde a la ciudad, los beneficios proporciona a los habitantes, la cobertura, las isócronas y los tipos de problemas de localización que existen, que en este trabajo se basa en el modelo de cubrimiento máximo.

Una vez explicados todos los conceptos, se procede a introducir los modelos matemáticos. Se han desarrollado 3 en total. El primer modelo tiene como objetivo maximizar la población, el segundo modelo maximiza las distancias, y por último, el tercer modelo es una combinación de los 2. Aquí se ha podido observar que no es posible satisfacer los objetivos del modelo 1 y 2 a la vez, ya que son conflictivos, por lo que se ha propuesto un modelo final de multi-objetivo, que trata de buscar una solución intermedia.

Los 3 modelos han sido resueltos con el complemento de *Excel OpenSolver* con un algoritmo llamado Simplex. Ha podido ofrecer la solución óptima para los primeros dos modelos en un tiempo muy corto. En el caso del modelo 3 se describirá como solución satisfactoria, ya

que depende del α que se le establezca. Tras los resultados, estos han sido visualizados por QGIS 3.22 con el fin de reflejar las ubicaciones de las zonas verdes propuestas.

7.2. Limitaciones

A lo largo de este trabajo se han experimentado varias limitaciones que se van a explicar a continuación:

La primera dificultad ha sido en obtener las capas vectoriales de las zonas verdes actuales. Se ha podido encontrar muchos artículos y documentos que especifican las ubicaciones de las zonas verdes, pero no proporcionan ninguna capa vectorial. Se ha intentado apoyar en el Plan Verde, pero como mencionado previamente, no ha sido posible obtener estas capas ya que el análisis todavía estaba en proceso.

La segunda dificultad ha sido añadir el coste económico. Por falta de información, no ha sido posible añadir estos parámetros al modelo, por lo que le habría dado un toque de realismo a los modelos. A pesar de esto, los 3 modelos propuestos, están preparados para introducir nuevos parámetros y restricciones.

Y en tercer lugar, la dificultad que se ha tenido es ubicar las 20 posibles localizaciones. Actualmente, los 20 puntos generados son aleatorios, por lo que no se acerca tanto a la realidad como saber una localización exacta donde es posible ubicar la zona verde.

7.3. Propuestas de mejora y líneas de trabajo futuras

Debido a las limitaciones que se han experimentado durante el trabajo, a continuación se va a proponer algunas mejoras:

- Añadir el coste económico de construir cada parque para acercarse todavía más a la realidad
- Tener en cuenta las zonas urbanas donde el Ayuntamiento de Valencia permita la presencia de nuevas zonas verdes
- Resolver el problema planteado con otros tipos de modelos o con otras herramientas

La perspectiva de futuro es que sería muy útil desarrollar una aplicación donde los problemas de cubrimiento se pudiesen resolver de una manera rápida. Esta aplicación no solo se podría usar para el problema de este trabajo, si no en muchos otros problemas que puedan pasar en el día a día de cualquier empresa. Por ejemplo, dónde ubicar los almacenes

de manera que no pase de un determinado presupuesto o dónde se concentra la mayoría de la población para ubicar las próximas aperturas de un local.

ANEXOS

Anexo I. Objetivos de Desarrollo Sostenible

En este anexo se va reflexionar sobre la relación de este Trabajo Fin de Grado con los ODS en general y con el/los ODS más relacionados. Pero antes de entrar en esto, se va a explicar brevemente lo que son los Objetivos de Desarrollo Sostenible y qué intentan conseguir.

La Agenda 2030 tiene como propósito cumplir los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030, establecidos por la ONU en 2015 y adoptados por 193 naciones. Los ODS están interconectados, por lo que se puede dividir en 3 niveles, con el medio ambiente como base y la sociedad y la economía como sus dos pilares. En esencia, la sostenibilidad consiste en atender las necesidades humanas respetando los límites ecológicos, y la economía es un método para lograr la sostenibilidad al tiempo que se generan ingresos. La división de los 3 niveles se puede ver a continuación en la Figura 33:

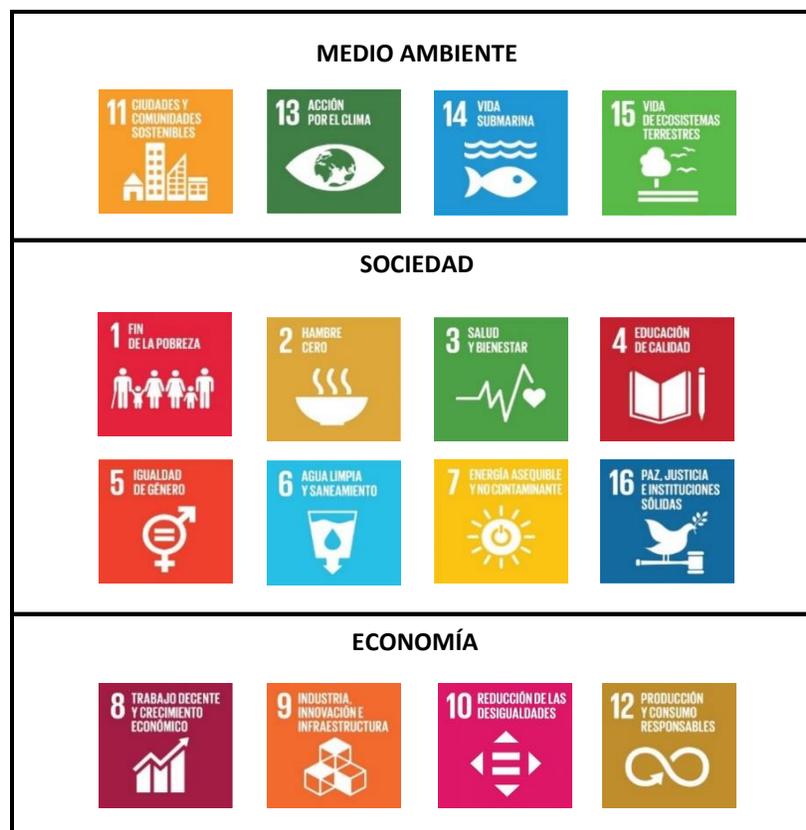


Figura 33. Los ODS en 3 niveles
Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la ONU

La base es el medio ambiente debido a que sin proteger primero los mares, no se puede alcanzar un crecimiento económico decente y sin cuidar primero la Tierra, los bosques y las emisiones de gases de efecto invernadero, no se puede tener a todo el mundo con una salud excelente y eliminar la pobreza. Existen metas e indicadores para cada uno de los 17 objetivos. Hay un total de 232 indicadores y 169 metas. Concretamente, para el objetivo 3, las metas que se están enfocando son aquellas que reducen el número de muertes. Y para el objetivo 11, se está enfocando en “proporcionar acceso universal a zonas verdes”.

Los 2 objetivos más relacionados con este trabajo son el objetivo 3 (salud y bienestar) y el objetivo 11 (ciudades y comunidades sostenibles). Mirando al tablero²⁰ proporcionado por la ONU, la mayoría de los países están cumpliendo con los objetivos. En cambio, si se mira los objetivos separadamente, en concreto los 2 que se están trabajando en este proyecto, aún quedan bastantes retos. La Figura 34 muestra la situación actual del objetivo 3. Se puede observar que sobre todo hay de color naranja y color rojo, que quieren decir que todavía no se está avanzando lo suficiente en este objetivo. Lo mismo se aplica para el objetivo 11 de la Figura 35. Aquí se está más cerca de alcanzar el objetivo, pero todavía existen.

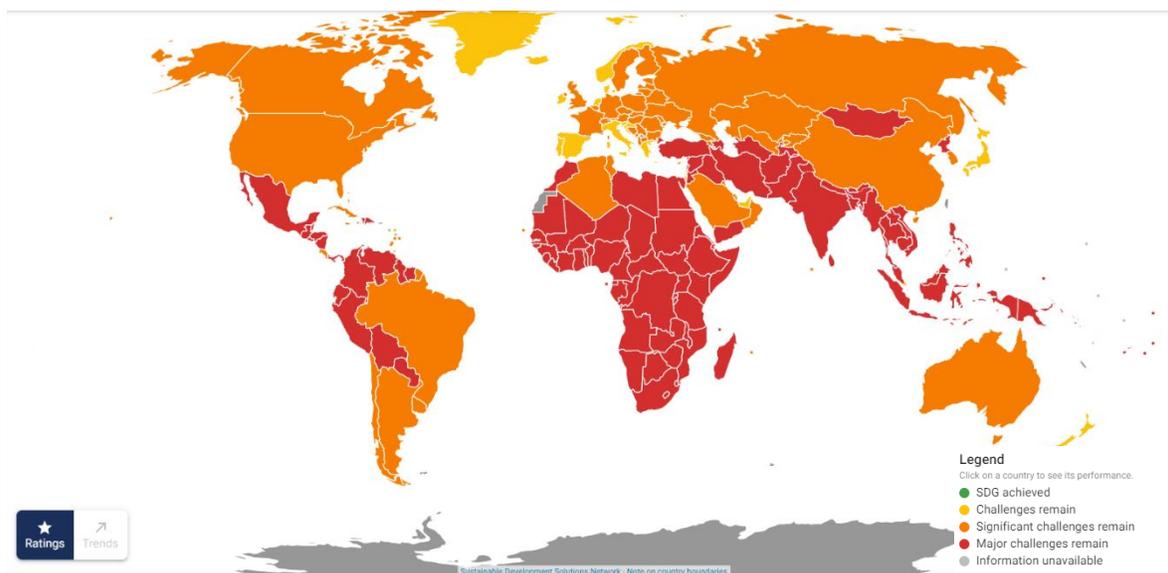


Figura 34. Situación actual del objetivo 3 de los ODS

Fuente: (ONU, 2022)

²⁰ <https://dashboards.sdindex.org/map>

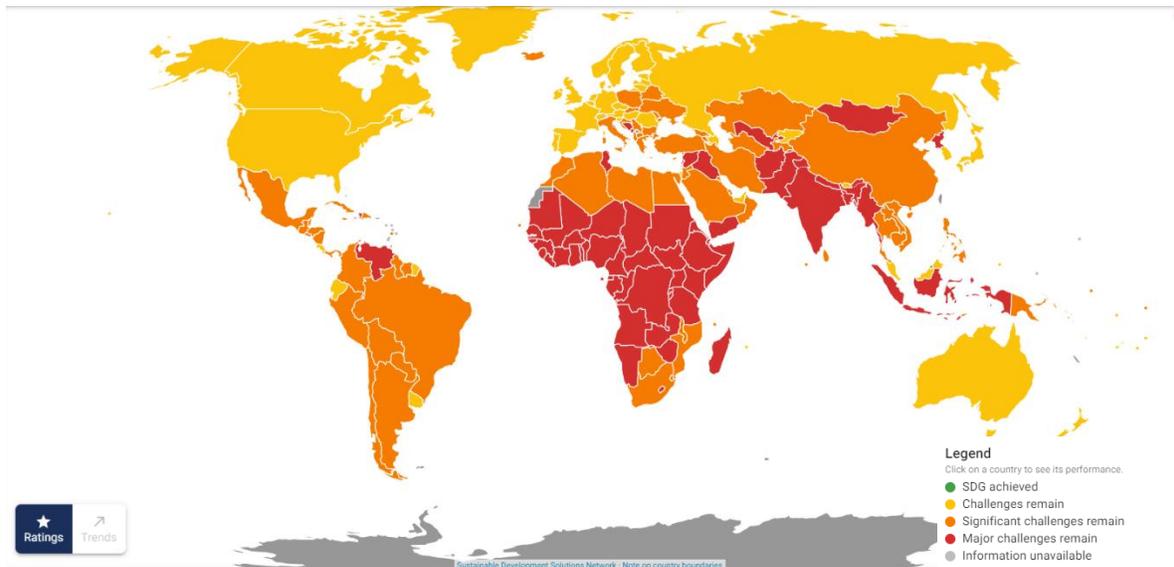


Figura 35. Situación actual del objetivo 11 de los ODS

Fuente: (ONU, 2022)

La propuesta de la localización de las zonas verdes ayudarían a impulsar tanto en la salud y bienestar de la población como la ciudad sostenible, ya que en el apartado 3.1.1 ya se ha explicado qué aportaría estos espacios verdes a la ciudad, y en consecuencia a la salud de los habitantes. Como todos los objetivos están interconectados, si los objetivos 3 y 11 se ven beneficiados, naturalmente afectaría positivamente a los objetivos de la economía ya que ayuda a un mejor uso de los recursos y esto supondría ahorro económico. El ahorro económico ocurriría si se tuviese los coeficientes de lo que costaría construir un parque. De esta forma, se podría añadir al modelo una restricción que impidiese que el coste exceda de un cierto valor.

Anexo II. Ubicaciones actuales de las zonas verdes (elaboración propia a través de la información de GeoPortal)

Tipo	Nombre	Área m2	Distrito
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 1	72472	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 2	301561	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 3	118991	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 4	90255	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 5	131231	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 6	197525	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 7	27283	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 8	83396	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 9	14116	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 10	99826	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 11	79798	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 12	132306	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 13	27737	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 14	93279	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 15	8685	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 16	15720	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 17	103786	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 18	53731	-
Grandes parques	Jardín del Túria - Tramo 19	8049	-

Grandes parques	Parque Viveros	253209	La Saldia
Grandes parques	Parque de La Canaleta	128197	Campanar
Grandes parques	Parque Central	107046	L'Eixample
Parques de barrio	Jardines de la Glorieta	12338	Ciutat Vella
Parques de barrio	Jardines del Antiguo Hospital	22506	Ciutat Vella
Parques de barrio	Plaza del Escultor Frechina	2371	Jesús
Parques de barrio	Plaza Iglesia	2567	Campanar
Parques de barrio	Parque de Marchalenes	37796	La Saldia
Parques de barrio	Parque Nino Bravo	960	La Saldia
Parques de barrio	Plaza de los Hombres del Mar	1855	Poblats Marítims
Parques de barrio	Parque Antonio Llombart	15326	La Saldia
Parques de barrio	Parque de la Rambleta	54402	Jesús
Parques de barrio	Parque del Oeste	42279	L'Olivereta
Parques de barrio	Parque Benicalap	86131	Benicalap
Parques de barrio	Jardín de Polífilo	46118	Campanar
Parques de barrio	Parque de las Cuerdas	7950	Quatre Carreres
Parques de barrio	Plaza Miguel Asins Arbo	7987	Quatre Carreres
Parques de barrio	Plaza del Mestre Vicent Ballester Fandos	6053	Quatre Carreres
Parques de barrio	Plaza del Xuquer	3859	Algirós

Parques de barrio	Jardins de Neptu	12354	Poblats Marítims
Parques de barrio	Plaza Armada Española	1529	Poblats Marítims
Parques de barrio	Jardin de Ayora	23204	Algirós
Parques de barrio	Plaza Santa Apolonia	6827	Camins al Grau
Parques de barrio	Plaza de Manuel Granero	9996	L'Eixample
Parques de barrio	Parque Enrique Granados	17366	L'Olivereta
Parques de barrio	Plaza Cedre	6480	Algirós
Parques de barrio	Plaza Salvador Allende	10613	Rascanya
Parques de barrio	Parque de la Valvanera	5930	Jesús
Parques de barrio	Plaza Alfonso el Magnanimo	8541	Ciutat Vella
Parques de barrio	Jardines de Monforte	12962	El Pla del Real
Parques de barrio	Plaza Legion Espanola	2789	El Pla del Real
Parques de barrio	Parque de Nazaret	2981	Poblats Marítims
Parques de barrio	Plaza Pedagogo Pestalozzi	6262	L'Eixample
Parques de barrio	Jardin de Hesperides	37924	Extramurs

Tabla 15. Ubicaciones actuales de las zonas verdes

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de GeoPortal

Anexo III. Procedimiento de la obtención de las isócronas en QGIS 3.22

En primer lugar, antes de calcular las isócronas, se debe crear una capa vectorial de las posibles localizaciones para ubicar zonas verdes como muestra en la Figura 36. En este caso, como ya mencionado previamente, son 20 posibles puntos generados aleatoriamente.

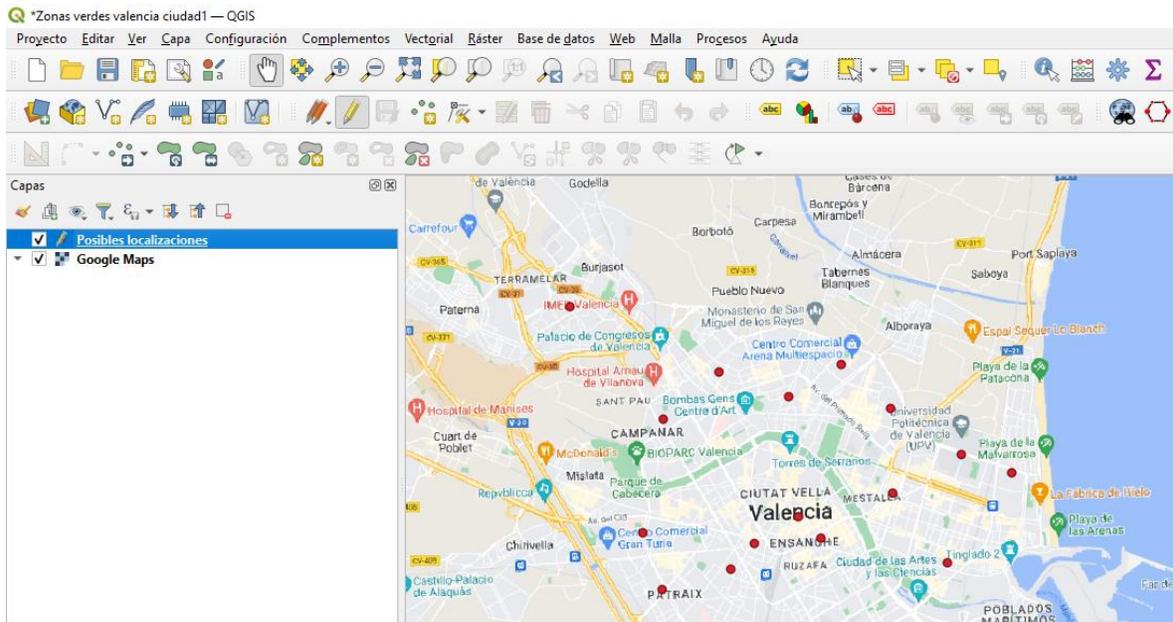


Figura 36. Creación de la capa vectorial de las 20 posibles localizaciones

Fuente: QGIS 3.22

Una vez obtenida, se procede a instalar el complemento *ORS Tools*. Para ello, se va a *Complementos* en la barra de herramientas -> *Administrar e instalar complementos*. Aquí se busca *ORS Tools* como muestra en la Figura 37, para instalar complemento.



Figura 37. Instalación del complemento ORS Tools en QGIS 3.22

Fuente: QGIS 3.22

Una vez instalado, se abre el complemento. La Figura 38 es la ventana que debe aparecer. En esta ventana se decide qué tipo de cálculos se hace con *ORS Tools*. En el caso de este trabajo se desea calcular las isócronas, por lo tanto se clicar en *Batch Jobs*.

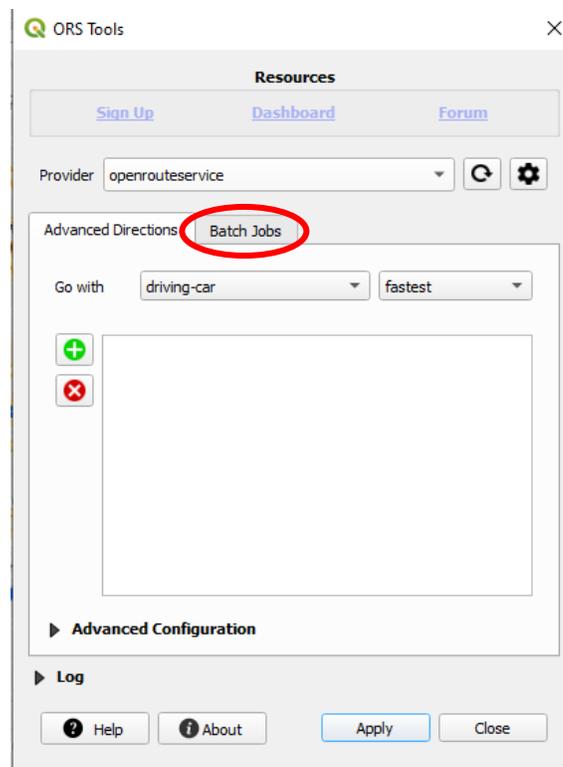


Figura 38. Ventana del complemento ORS Tools

Fuente: QGIS 3.22

Después se cambia a la ventana de la Figura 39, donde se usa *Isochrones from Layer*.

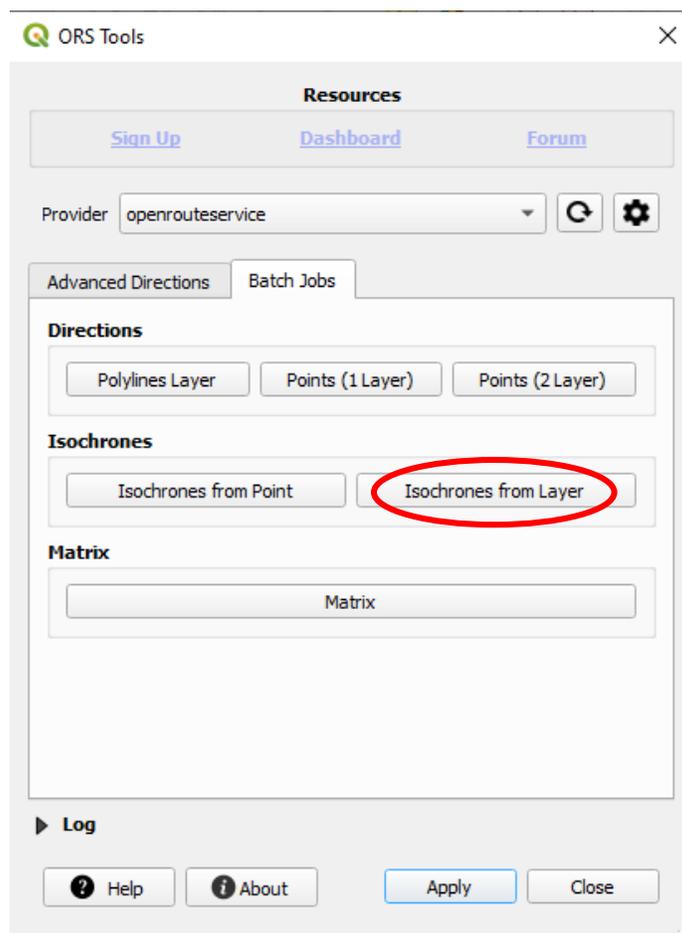


Figura 39. Ventana del complemento ORS Tools en Batch Jobs
Fuente: QGIS 3.22

Antes de seguir con los pasos para calcular las isócronas, *ORS Tools* requiere una clave *API*²¹ para poder interactuar con su servidor. Por lo tanto, se debe entrar en su página web <https://openrouteservice.org/> y crear una cuenta. Una vez creada, se solicita la clave y se genera automáticamente. Esta clave se debe introducir en *QGIS 3.22*. Para ello, se va a *Web* de la barra de herramientas -> *ORS Tools* -> *Provider Settings*. Aparece una ventana de la Figura 40, donde se copia la clave proporcionada en *API Key*.

²¹ API es el acrónimo de *Application Programming Interface*. Es una llave utilizada para identificar y autenticar una aplicación o un usuario.

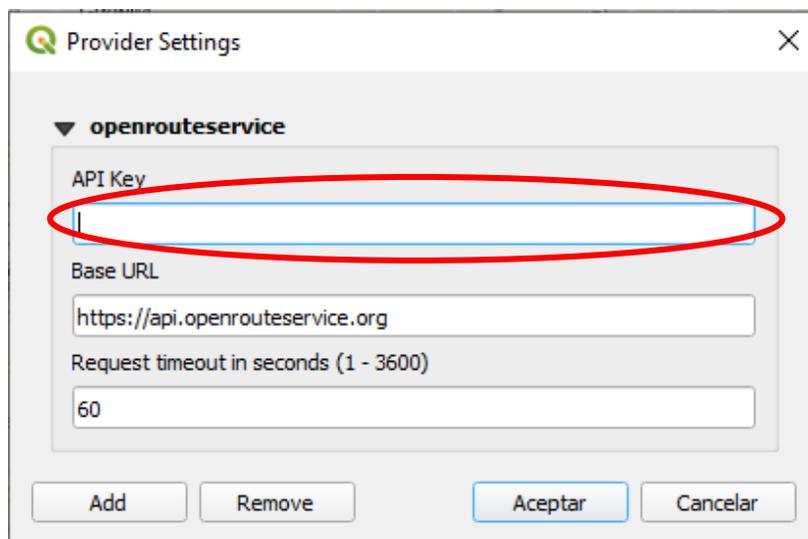


Figura 40. Ventana para introducir clave API

Fuente: QGIS 3.22

Una vez introducida la llave, ya se puede proceder a calcular las isócronas. Después de clicar *Isochrones from Layer* de la Figura 39, cambia la ventana a la Figura 41 donde se definen los criterios para los cálculos. A continuación, son los pasos a seguir para definir los criterios que se han usado para calcular las isócronas con tiempo de 5 minutos para las posibles localizaciones:

1. Introducir la clave *API* (que ya se ha realizado en la Figura 40).
2. Elegir el modo de desplazamiento correspondiente. En este caso *foot-walking*. Es decir, a pie.
3. La capa donde se desea crear las isócronas. En este caso es desde las 20 posibles localizaciones.
4. El tiempo deseado de la isócrona. En este caso 5 minutos.
5. Proceder a la ejecución.

Todos estos pasos están enumerados en la Figura 41.

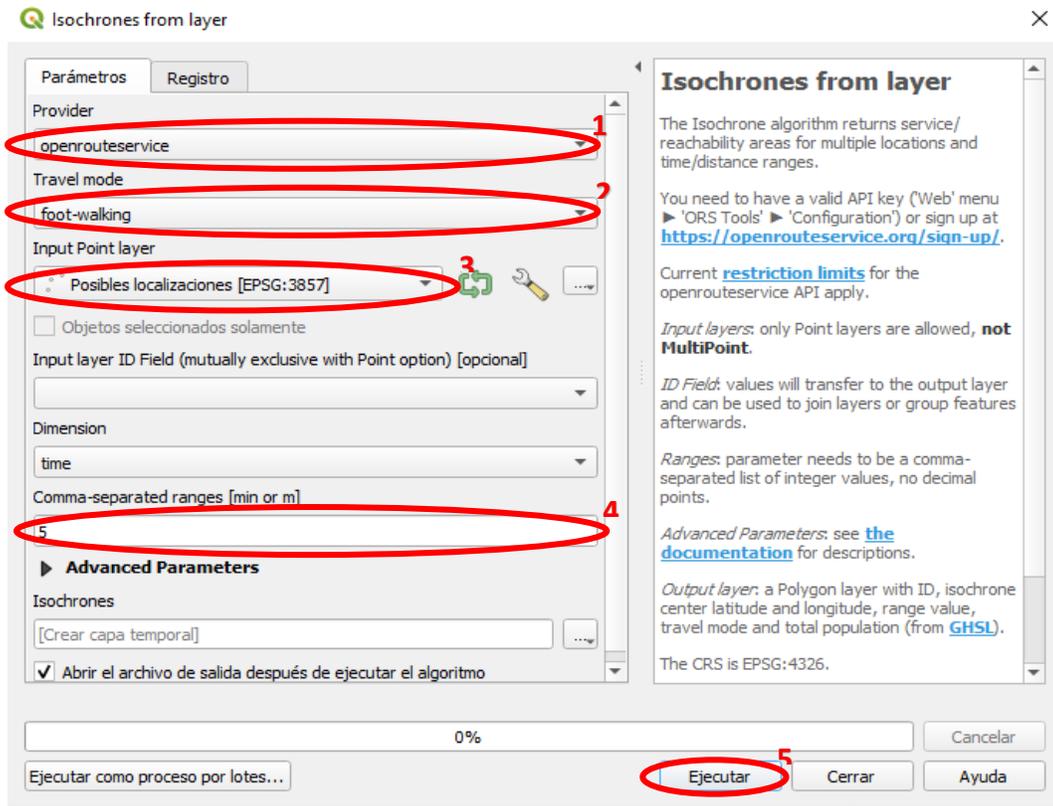


Figura 41. Ventana de criterios para el cálculo de las isócronas de las 20 posibles localizaciones
Fuente: QGIS 3.22

Finalmente, la imagen del mapa que se queda sería como la Figura 42. Se puede ver la circunferencia alrededor de cada uno de los puntos, lo que representa la población cubierta.

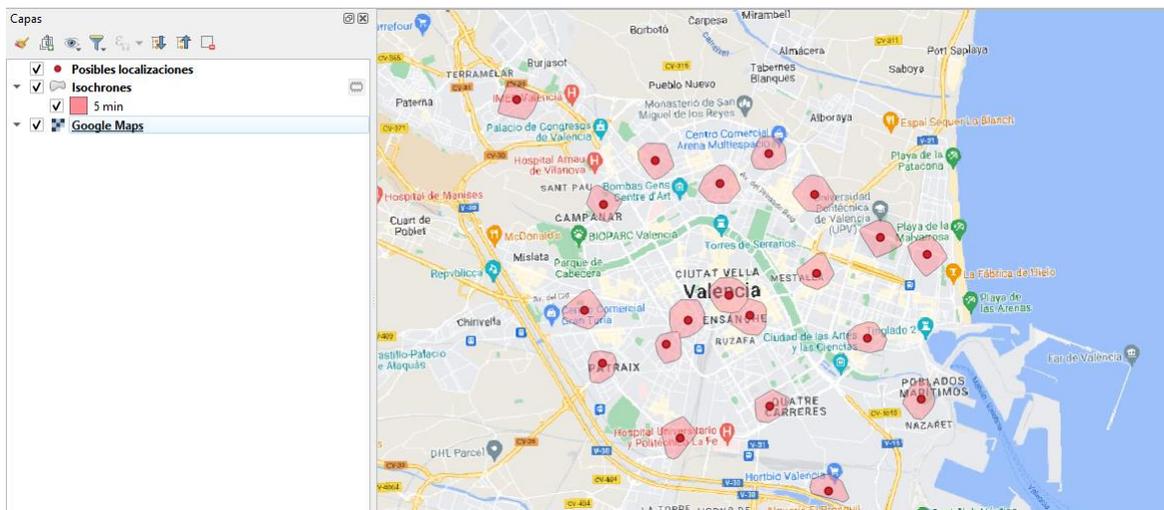


Figura 42. Isócronas creadas y representadas en el mapa

Fuente: QGIS 3.22

Anexo IV. Posibles localizaciones por distrito

	fid	▲	BARRIO
1	1		La Saldia
2	2		Benicalap
3	3		Pobles de l'Oest
4	4		Jesús
5	5		Quatre Carreres
6	6		L'Eixample
7	7		Camins al Grau
8	8		Extramurs
9	9		El Pla del Real
10	10		L'Olivereta
11	11		Benimaclet
12	12		Algirós
13	13		Ciutat Vella
14	14		Quatre Carreres
15	15		Patraix
16	16		Poblats Maritims
17	17		Rascanya
18	18		Campanar
19	19		Poblats Maritims
20	20		Patraix

Tabla 16. Posibles localizaciones por distrito

Fuente: Elaboración propia

Anexo V. Información de las 20 posibles localizaciones para ubicar zonas verdes

Distrito	Dirección
Pobles de l'Oest	Calle de Fortaleny, Valencia, 46035, España
Benicalap	Calle El Álamo, Valencia, 46025, España
La Saldia	Calle de Maximiliano Thous, 46009, España
Rascanya	Calle Santiago Rusiñol, 46019, España
Benimaclet	Carrer de la Murta, Valencia, 46020, Spain
Algirós	Avenida de Vicente Blasco Ibáñez, Valencia, 46021, España
Poblats Maritims	Carrer de les Tramoyeres, Valencia, 46011, España
El Pla del Real	Carrer de Polo y Peyrolón, Valencia, 46021, España
Camins al Grau	Carrer de Carolina Álvarez, Valencia, 46023, España
Poblats Maritims	Carrer de Moraira, Valencia, 46024, España
L'Eixample	Carrer del Taquígraf Mart, Valencia, 46004, España
Ciutat Vella	Carrer de Roger de Lauria, Valencia, 46002, España
Extramurs	Calle Jesús, Valencia, 46007, España
Patraix	Plaça de Jesús, Valencia, 46007, España
Patraix	Camí Nou de Picanya, Valencia, 46014, España
L'Olivereta	Calle Padre Esteban Pernet, Valencia, 46014, España
Campanar	Calle de la Reina Violante, Valencia, 46015, España
Jesus	Calle Behring, Valencia, 46017, España
Quatre Carreres	Calle del Pintor Gassent, Valencia, 46026, España
Quatre Carreres	V-30, Valencia, 46013, España

Tabla 17. Información de las 20 posibles zonas verdes

Fuente: Elaboración propia

Para obtener las direcciones de estas localizaciones, se ha descargado un complemento llamado *GeoCode* dentro del programa *QGIS 3.22*. Por defecto, *GeoCode* convierte una dirección introducida en coordenadas geográficas. Estas coordenadas pueden utilizarse desde trazar puntos en el mapa, construir mapas sencillos hasta calcular direcciones y distancias entre ellos. Sin embargo, en el caso de este problema, se necesitaría lo contrario. En primer lugar, se ha generado los puntos aleatoriamente, y luego se necesita obtener la dirección de estos. Para ello, *GeoCode* tiene una función llamada *GeoReverse* donde permite revertir la función que tiene por defecto. Es decir, es simplemente el proceso por el cual las coordenadas geográficas se convierten en una dirección física.

Anexo VI. Matriz de la poblaci3n cubierta

POBLACION CUBIERTA ZONAS VERDES	Algimos	Benicalap	Benimaclet	amins al Gra	Campanar	Ciutat Vella	L'Eixample	Extramurs	Jesus	L'Olivereta	El Pla del Rea	Patraix	oblat	Maritirbles de l'Oeuatre Carrer	Rascanya	La Saldia	
X1																	3879
X2		3845															
X3														5412			
X4									3438								
X5																2675	
X6							3879										
X7				2308													
X8								4689									
X9											2335						
X10										5235							
X11			3876														
X12	4511																
X13						3811											
X14																2928	
X15												4591					
X16													5398				
X17																3838	
X18					2905												
X19													3036				
X20												3869					

Figura 43. Matriz de poblaci3n cubierta

Fuente: Elaboraci3n propia

Anexo VII. Procedimiento de la instalación y uso del OpenSolver

Para la instalación de la aplicación *OpenSolver*, se descarga a través de su página web <https://opensolver.org/>. Lo que se instala es una carpeta ZIP como en la Figura 44, y se abre el fichero XLAM²².

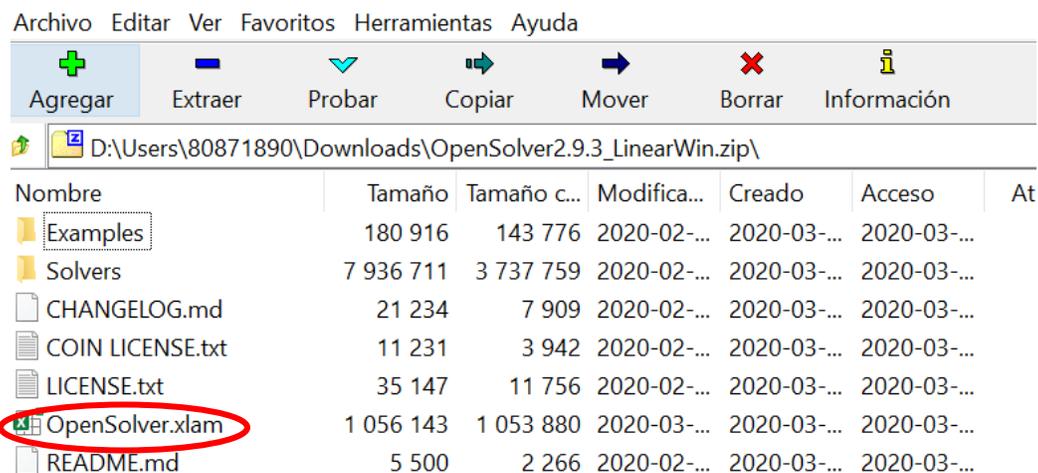


Figura 44. Carpeta ZIP de OpenSolver

Fuente: (OpenSolver, 2022)

Una vez abierto, se abre el *Excel* automáticamente y aparece una ventana donde se debe *Habilitar Macro*, y ya aparece en la barra de Datos de *Excel* la nueva macro incorporada (véase Figura 45).

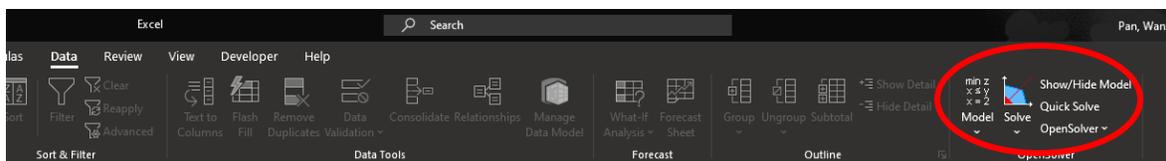


Figura 45. OpenSolver incorporado en Excel

Fuente: Microsoft Excel

Una vez incorporado, ya se puede introducir la función objetivo, los parámetros y la variable del problema abordado. La Figura 46 representa la ventana que aparece cuando se clica *Model* de la Figura 45. Aquí es donde se especifica todo lo mencionado previamente más las restricciones.

²² Un archivo XLAM es un complemento habilitado para macros utilizado por *Microsoft Excel*, una aplicación de hoja de cálculo incluida en el paquete de Microsoft Office.

OpenSolver - Model ✕

What is AutoModel? AutoModel

AutoModel is a feature of OpenSolver that tries to automatically determine the problem you are trying to optimise by observing the structure of the spreadsheet. It will turn its best guess into a Solver model, which you can then edit in this window.

Objective Cell: maximise minimise target value:

Variable Cells:

Constraints:

<Add new constraint>

- Xj bin
- \$B\$52 <= \$D\$52
- \$B\$54 <= 1
- \$B\$55 <= 1
- \$B\$56 <= 1
- \$B\$57 <= 1
- \$B\$58 <= 1
- \$B\$59 <= 1
- \$B\$60 <= 1
- \$B\$61 <= 1
- \$B\$62 <= 1
- \$B\$63 <= 1
- \$B\$64 <= 1

=

>

Add constraint
Cancel

Delete selected constraint

Make unconstrained variable cells non-negative
 Show named ranges in constraint list

Sensitivity Analysis List sensitivity analysis on the same sheet with top left cell:

Output sensitivity analysis: updating any previous output sheet on a new sheet

Solver Engine: Current Solver Engine: CBC Solver Engine...

Show model after saving

Clear Model
Options...
Save Model
Cancel

Figura 46. Ventana de OpenSolver Model

Fuente: Microsoft Excel

La Figura 46 es una representación del modelo matemático 1 del apartado 5.2.2. *Objective Cell* indica la celda donde pertenece la función objetivo. *Variable Cells* indica donde deben mostrar las variables. Finalmente, *Constraints* son las restricciones que tiene el problema a resolver.

Para resolver, se tiene que guardar el modelo y cerrar la ventana de la Figura 46. Finalmente, en la Figura 45, se debe clicar "Solve".

BIBLIOGRAFÍA

- (2018). En J. Santamaria-Ulecia et al., *REDUCTION OF EXPOSURE OF CYCLISTS TO URBAN AIR POLLUTION*. Programa LIFE13 ENV/ES/000417 [Consultado el día 6 de junio de 2022]
- Andrés, R. (19 de abril de 2022). Obtenido de València tiene 594 hectáreas de zonas verdes urbanas: <https://www.lavanguardia.com/local/valencia/20220419/8207568/valencia-594-hectareas-zonas-verdes-urbanas.html> [Consultado el día 24 de mayo de 2022]
- Arcadis. (2018). *EL Índice de Ciudades Sostenibles*. Obtenido de https://www.arcadis.com/campaigns/citizencentriccities/images/%7B1d5ae7e2-a348-4b6e-b1d7-6d94fa7d7567%7Dsustainable_cities_index_2018_arcadis.pdf [Consultado el día 17 de junio de 2022]
- Ayunyamiento de Valencia. (2022). *València se postula como Capital Verde Europea 2024 con el apoyo mayoritario del Pleno*. Obtenido de <https://www.valencia.es/es/-/pleno.-capital-verde-europea> [Consultado el día 15 de agosto de 2022]
- Bermejo et al., V. (6 de mayo de 2021). Obtenido de ¿Puede la Vegetación Urbana Ayudar a Mejorar la Calidad del Aire en las Ciudades?: <https://www.respiramadrid.org/post/vegetacion-urbana> [Consultado el día 6 de junio de 2022]
- Bupa. (2019). *Beneficios de hacer ejercicio*. Obtenido de <https://www.bupasalud.com/salud/beneficios-ejercicio> [Consultado el día 8 de junio de 2022]
- Comisión Europea. (2022). *European Green Capital Award - Applying for EU Green Capital*. Obtenido de https://environment.ec.europa.eu/topics/urban-environment/european-green-capital-award/applying-eu-green-capital_en#evaluation-process [Consultado el día 15 de junio de 2022]
- Dattani et al., S. (agosto de 2021). Obtenido de <https://ourworldindata.org/mental-health> [Consultado el día 8 de junio de 2022]
- De Keijzer, C. (8 de enero de 2020). Obtenido de <https://www.isglobal.org/en/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/espacios-verdes-un-recurso-para-la-salud-mental/6113078/0> [Consultado el día 20 de junio de 2022]
- Desai, K. (17 de octubre de 2008). *Isochrones: Analysis of*. Obtenido de https://www.mayerbrown.com/files/Publication/7633e871-05b8-428f-bbcd-cf6d9163bab8/Presentation/PublicationAttachment/c7b45b1f-d4f4-413c-b5aa-b0579c87049f/Isochrones-Desai_Iss2_1108.pdf [Consultado el día 20 de agosto de 2022]
- EPA. (23 de mayo de 2022). Obtenido de <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente> [Consultado el día 15 de junio de 2022]

- ESFORA. (s.f.). Obtenido de http://www.urbanespora.com/wp-content/uploads/5_ideas_para_la_creacion_de_espacios_verdes_en_ciudades.pdf [Consultado el día 16 de junio de 2022]
- FIIAPP. (2020). *¿Qué es... la Agenda 2030?* Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=g1hsjtIOlc0> [Consultado el día 15 de abril de 2022]
- García-Gomez et al. (septiembre de 2016). Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27344084/> [Consultado el día 24 de mayo de 2022]
- González, B. (2012). Obtenido de ¿Qué es la investigación operativa y para qué: http://espacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:500665/n7.11_Qu___es_la_investigaci__n_operativa.pdf [Consultado el día 10 de agosto de 2022]
- Iberdrola. (2018). *Sustainable Cities*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sustainability/sustainable-cities#:~:text=These%20cities%20contribute%20the%20most,to%20fight%20against%20climate%20change.> [Consultado el día 15 de mayo de 2022]
- INE. (marzo de 2021). *Indicadores de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.ine.es/dyngs/ODS/es/objetivo.htm?id=4907> [Consultado el día 15 de abril de 2022]
- ISGLOBAL. (2021). *Ranking of Cities*. Obtenido de <https://isglobalranking.org/> [Consultado el día 25 de mayo de 2022]
- ISGLOBAL. (28 de octubre de 2021). *Why More Green Space Is Essential for Cities*. Obtenido de <https://www.isglobal.org/en/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/why-more-green-space-is-essential-for-cities/4735173/0> [Consultado el día 1 de junio de 2022]
- Mason, A. (2012). *About OpenSolver*. Obtenido de <https://opensolver.org/> [Consultado el día 25 de agosto de 2022]
- Moreno, C. (octubre de 2020). *Carlos Moreno: The 15-minute city*. Obtenido de https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Carlos-Moreno-The-15-minute-city?language=en_US [Consultado el día 14 de abril de 2022]
- Moreno, C. (8 de enero de 2021). *Introducing the “15-Minute City”*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2624-6511/4/1/6/htm> [Consultado el día 14 de abril de 2022]
- ONU. (2022). Obtenido de <https://dashboards.sdgindex.org/map> [Consultado el día 1 de septiembre de 2022]
- ONU. (junio de 2022). Obtenido de [https://www.worldometers.info/world-population/#:~:text=The%20current%20world%20population%20is,currently%20living\)%20of%20the%20world](https://www.worldometers.info/world-population/#:~:text=The%20current%20world%20population%20is,currently%20living)%20of%20the%20world) [Consultado el día 20 de junio de 2022]
- ONU. (s.f.). Obtenido de Los espacios verdes: un recurso indispensable para lograr una salud sostenible en las zonas urbanas: <https://www.un.org/es/chronicle/article/los-espacios->

verdes-un-recurso-indispensable-para-lograr-una-salud-sostenible-en-las-zonas-urbanas
[Consultado el día 20 de junio de 2022]

- ONU. (s.f.). *Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
[Consultado el día 15 de abril de 2022]
- OpenSolver. (2022). Obtenido de <https://opensolver.org/> [Consultado el día 25 de agosto de 2022]
- Plan Verde. (2022). *Plan Verde y de la Biodiversidad de València*. Obtenido de <https://plaverdvalencia.com/es/inicio/> [Consultado el día 30 de abril de 2022]
- QGIS. (s.f.). Obtenido de <https://qgis.org/es/site/about/index.html> [Consultado el día 15 de junio de 2022]
- Sanitas. (14 de septiembre de 2018). *LAS ZONAS VERDES CONTRIBUYEN A MEJORAR LA SALUD DE LOS CIUDADANOS*. Obtenido de <https://sanitasdatasalud.es/las-zonas-verdes-contribuyen-mejorar-la-salud-los-ciudadanos/> [Consultado el día 6 de junio de 2022]
- Santiago et al. (2017). *On Dry Deposition Modelling of Atmospheric Pollutants on Vegetation at the Microscale: Application to the Impact of Street Vegetation on Air Quality*. [Consultado el día 6 de junio de 2022]
- Sivaraman. (20 de abril de 2020). *Urban Development*. Obtenido de <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview#1> [Consultado el día 15 de mayo de 2022]
- TUMI. (junio de 2021). *The 15-Minute City*. Obtenido de https://www.transformative-mobility.org/assets/publications/TUMI_The-15-Minute-City_2021-07.pdf [Consultado el día 30 de abril de 2022]
- UE. (2017). Obtenido de <https://www.liferespira.eu> [Consultado el día 9 de junio de 2022]
- Vanaken, G., & Danckaerts, M. (2018). *Impact of Green Space Exposure on Children's and Adolescents' Mental Health: A Systematic Review*. [Consultado el día 10 de junio de 2022]