



UNIVERSIDAD FINIS TERRAE
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA ENTREGA DE MEDICAMENTOS EN
LA COMUNA DE PEÑALOLÉN MEDIANTE EL USO DE DRONES**

KATHERINE PILAR GUTIÉRREZ MORÁN

Trabajo de título presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Finis Terrae, para
optar al Título de Ingeniera Civil Industrial

Profesor Guía: Alfredo Enrique Candia Véjar

Santiago, Chile

2025

DEDICATORIA

A mi madre, mi hermana y mi padre, quien ahora descansa en el cielo. Este logro no solo representa el fruto de mi esfuerzo, sino también el amor, la compañía constante y el apoyo invaluable que me han brindado a lo largo de este camino. A ustedes les debo mucho de lo que soy y, sobre todo, agradezco a Dios, quien me dio fuerza, esperanza y alegría incluso en los momentos más difíciles.

Gracias por ser mis cimientos, por impulsarme cuando más lo necesité y por enseñarme con su ejemplo que los sueños pueden alcanzarse con dedicación y perseverancia. Su sacrificio y amor han sido la inspiración para cada página de esta memoria.

Con profundo cariño y eterna gratitud, les dedico este trabajo, que también es un reflejo de todo lo que me han dado.

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que han sido parte fundamental en este viaje académico, les expreso mi más profundo agradecimiento.

A mi mamá, por ser mi refugio y mi mayor fuente de fortaleza. Su amor incondicional, paciencia y apoyo constante han sido esenciales para superar cada desafío y continuar avanzando.

A mis amigos, por ser ese pilar que siempre estuvo dispuesto a levantarme el ánimo y recordarme la importancia de encontrar el equilibrio en el camino. Su compañía y aliento fueron vitales para llegar hasta aquí.

A mis queridas mascotas, fieles compañeros que, con su cariño y alegría espontánea, hicieron que los momentos difíciles fueran más llevaderos y que los días estuvieran llenos de sonrisas.

A mi profesor guía, Alfredo Candia, agradezco profundamente su dedicación, experiencia y paciencia, que fueron fundamentales para el desarrollo y perfeccionamiento de este trabajo. Su orientación académica fue clave para que este proyecto tomara forma.

También quiero reconocer y agradecer al Profesor Luis Lino, cuya ayuda y conocimientos fueron esenciales para completar este proyecto. Su orientación y profundo conocimiento han sido fundamentales para la realización de esta memoria.

Con inmensa gratitud, quiero agradecerles a todos ustedes. Cada sonrisa compartida, cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo han sido el motor que me impulsó a alcanzar esta meta. Este triunfo no solo lleva mi esfuerzo, sino también la huella de quienes siempre creyeron en mí y me acompañaron en este camino.

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
Capítulo 1: INTRODUCCION	9
1.1 Descripción de la situación actual.....	9
1.2 Planteamiento del Problema	13
1.3 Solución propuesta.....	14
1.4 Objetivos.....	15
1.5 Alcances y Limitaciones.....	16
Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE	18
Capítulo 3: MARCO TEÓRICO	22
Capítulo 4: METODOLOGÍA	26
4.1 Recopilación de datos y análisis	26
4.2 Aplicación de Drones en Operaciones de Entrega.....	27
4.3 Supuestos operativos.....	27
4.4 Evaluación de la infraestructura y condiciones geográficas	28
4.5 Implementación del Modelo de Asignación de Drones	28
4.6 Evaluación Económica.....	28
Capítulo 5: DESARROLLO	29
5.1 Aplicación de Drones en Operaciones de entrega	29
5.2 Selección de Dron a implementar	33
5.3 Identificación de necesidades	35
5.4 Identificar los puntos claves para la selección del macro sector objetivo.	40
5.5 Evaluar la infraestructura y condiciones geográficas del macro sector.....	44
5.6 Estimación de Población Objetivo de Peñalolén Nuevo.....	47
5.7 Plan de entregas y su realización	48
5.8 Modelo de Optimización Aplicado a la Asignación de Drones.....	57
5.9 Consideración de márgenes de error y simplificaciones del modelo.....	61
5.10 Estudio Económico	62
Capítulo 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
Capítulo 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: “Mapa de la comuna de Peñalolén y sus macro sectores”.....	10
Figura 1.2: “Mapa de los servicios y programas ofrecidos a personas mayores en Peñalolén”	11
Figura 1.3: “Árbol de problemas”.....	14
Figura 5.1: “Dron DJI Matrice 350 RTK”	34
Figura 5.2: “Zona territorial dividida por sectores de la comuna de Peñalolén”	41
Figura 5.3: “Zona Territorial de la comuna de Peñalolén con delimitación por sector”.....	43
Figura 5.4: “Farmacias presentes en cada macro sector de la comuna de Peñalolén”	43
Figura 5.5: “Centros de Salud presentes en cada macro sector de la comuna de Peñalolén”	44
Figura 5.6: “Macro sector Peñalolén Nuevo”	45
Figura 5.7: “Los 32 puntos de entrega con los dos drones”.....	51
Figura 5.8: “Recorrido del PRIMER DRON”	52
Figura 5.9: “Recorrido del SEGUNDO DRON”	52
Figura 5.10: “Recorrido del DRON 1 según el Modelo”.....	57
Figura 5.11: “Recorrido del DRON 2 según el Modelo”.....	59
Figura 5.12: “Recorrido de ambos Drones según el Modelo”	60

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: “Tiempo de vuelo en función de la carga”.	34
Gráfico 5.2: “Los 10 fármacos más consumidos en Chile”.	37

INICE DE TABLAS

Tabla 1.1: “Población total del censo realizado el año 2017 a la comuna de Peñalolén”	11
Tabla 1.2: “Población por grupos de edad de la comuna de Peñalolén”	12
Tabla 4.1: “Supuestos para la implementación del Modelo”	27
Tabla 5.1: “Proyección de consumo por unidad de medicamento en Peñalolén”	40
Tabla 5.2: “Población Real del Macro sector Peñalolén Nuevo”	41
Tabla 5.3: “Tiempo total de entrega con el Dron 1”	53
Tabla 5.4: “Tiempo total de entrega con el Dron 2”	54
Tabla 5.5: “Activos Actuales del Programa”	64
Tabla 5.6: “Costo de los Recursos Humanos del Programa Actual”	64
Tabla 5.7: “Costos de Mantenimiento”	64
Tabla 5.8: “Tiempo total de entrega con el Furgón 1”	65
Tabla 5.9: “Tiempo total de entrega con el Furgón 2”	65
Tabla 5.10: “Consumo del furgón 1 y el furgón 2”	66
Tabla 5.11: “Información de Transporte Terrestre” (Empresa Piamonte)	67
Tabla 5.12: “Información de Transporte con Drones” (Empresa Soludrones)	67
Tabla 5.13: “Tabla Comparativa: Furgones vs Drones para Distribución de Medicamentos”	69
Tabla 5.14: “Costos de los Recursos Humanos del sistema a Implementar”	70
Tabla 5.15: “Inversión Inicial para el Proyecto”	70
Tabla 5.16: “Valor total de la venta de los Furgones”	71
Tabla 5.17: “Análisis de Costos Operacionales para los Furgones”	71
Tabla 5.18: “Análisis de Costos Operacionales para los Drones”	72
Tabla 5.19 “Flujo Incremental proyectado en 5 años”	72

RESUMEN

La relevancia de este estudio radica en la necesidad de garantizar el acceso oportuno a medicamentos para la salud y el bienestar de la población en la comuna de Peñalolén, una zona semiurbana con altos niveles de contaminación ambiental en la Región Metropolitana. La disponibilidad insuficiente o tardía de medicamentos puede generar consecuencias graves, especialmente para pacientes con movilidad limitada, como adultos mayores o personas en situación de discapacidad. Por ello, el objetivo principal de este estudio fue explorar soluciones logísticas que mejoren el acceso a medicamentos, considerando la implementación de drones para superar las restricciones geográficas y los tiempos de entrega del sistema tradicional de transporte terrestre.

La metodología combinó enfoques cualitativos y cuantitativos, incluyendo análisis de datos de salud, evaluación de infraestructura y condiciones geográficas, construcción de un modelo de optimización de rutas de drones mediante Programación Lineal Entera y análisis económico-financiero. Bajo supuestos específicos sobre autonomía de los drones, capacidad de entrega, puntos de aterrizaje y condiciones climáticas favorables, el modelo estima un tiempo mínimo de operación de 56,1 minutos para 32 puntos de entrega con dos drones y una capacidad diaria combinada de 256 entregas, superando la demanda objetivo. Sin embargo, variaciones en clima, demanda o autonomía podrían afectar la eficiencia y la rentabilidad, lo que resalta la importancia de un análisis de sensibilidad y un plan piloto escalonado.

En términos económico-financieros, la evaluación preliminar sugiere un Valor Actual Neto (VAN) de \$16,1 millones y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 29,4 % bajo los supuestos planteados, confirmando que la solución es potencialmente viable, aunque su rentabilidad depende de factores operativos y ambientales específicos. En resumen, el estudio propone un modelo replicable para la distribución de medicamentos mediante drones, identificando riesgos críticos y medidas de mitigación para asegurar eficacia, sostenibilidad y aceptación social.

Palabras claves

Acceso a medicamentos, Drones, soluciones logísticas, desafío geográfico, Peñalolén

ABSTRACT

The relevance of this study lies in the need to ensure timely access to medicines for the health and well-being of the population in the municipality of Peñalolén, a semi-urban area with high levels of environmental pollution in the Metropolitan Region. Insufficient or delayed availability of medicines can have serious consequences, especially for patients with limited mobility, such as older adults or people with disabilities. Therefore, the main objective of this study was to explore logistical solutions that improve access to medicines, considering the implementation of drones to overcome geographical restrictions and delivery times of the traditional ground transportation system.

Methodology: The methodology combined qualitative and quantitative approaches, including health data analysis, assessment of infrastructure and geographical conditions, construction of a drone route optimization model using integer linear programming, and economic and financial analysis. Under specific assumptions about drone autonomy, delivery capacity, landing points, and favorable weather conditions, the model estimates a minimum operating time of 56.1 minutes for 32 delivery points with two drones and a combined daily capacity of 256 deliveries, exceeding the target demand. However, variations in weather, demand, or autonomy could affect efficiency and profitability, highlighting the importance of sensitivity analysis and a phased pilot plan.

In economic and financial terms, the preliminary assessment suggests a Net Present Value (NPV) of \$16.1 million and an Internal Rate of Return (IRR) of 29.4% under the assumptions made, confirming that the solution is potentially viable, although its profitability depends on specific operational and environmental factors. In summary, the study proposes a replicable model for the distribution of medicines by drones, identifying critical risks and mitigation measures to ensure effectiveness, sustainability, and social acceptance.

Keywords

Access to medication, Drones, Logistical solutions, Geographical challenges, Peñalolén

Capítulo 1: INTRODUCCION

1.1 Descripción de la situación actual.

La necesidad de acceder a medicamentos e insumos médicos en Peñalolén, una comuna de la Región Metropolitana de Chile se ve reflejada en el alto porcentaje de la población que consume fármacos diariamente, según la Encuesta Nacional de Medicamentos 2017. Esta encuesta revela que el 58% de los chilenos consume al menos un medicamento al día, y un preocupante 13% presenta polifarmacia (SAP, 2018), consumiendo cinco o más fármacos. Esta alta demanda de medicamentos evidencia la importancia crítica de contar con una distribución eficiente para garantizar el acceso oportuno a los tratamientos necesarios.

En el contexto de Peñalolén, existen barreras en el acceso a medicamentos para ciertos grupos de la población, como personas de bajos recursos, ancianos, personas con movilidad reducida y aquellos que viven en áreas con menor disponibilidad de servicios de salud. Estas barreras dificultan que estos grupos reciban los medicamentos que necesitan de manera oportuna y adecuada.

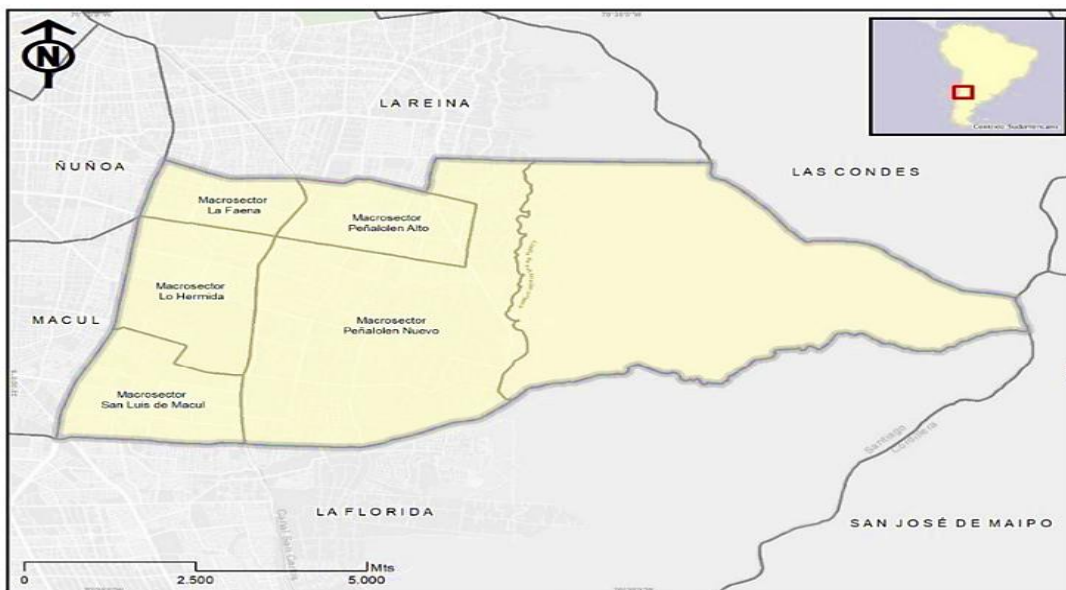
Además, la comuna de Peñalolén enfrenta un serio problema de contaminación ambiental, medida a través de la concentración de material particulado fino (MP2.5), que supera con creces las guías de calidad de aire establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (*El Mostrador*, 2022). Esta situación se ve agravada por una serie de factores interrelacionados que contribuyen al deterioro de la calidad del aire en la comuna. Por un lado, la densidad del tráfico vehicular en Peñalolén es significativa, lo que genera una emisión considerable de gases contaminantes que contribuyen a la acumulación de partículas finas en la atmósfera (*CodeXVerde*, 2022).

Para abordar de manera efectiva la problemática del acceso a medicamentos en Peñalolén, es fundamental identificar claramente los síntomas del problema real, que no es la contaminación ambiental, sino la deficiente distribución y acceso a medicamentos esenciales. Los síntomas de este problema incluyen la dificultad de acceso para grupos vulnerables, la falta de una distribución eficiente que garantice la disponibilidad de medicamentos y las barreras económicas que impiden a las personas de bajos recursos adquirir los fármacos que necesitan.

El objetivo principal de este estudio es explorar soluciones logísticas que permitan mejorar el acceso a medicamentos en Peñalolén, considerando la posibilidad de utilizar drones y otros enfoques innovadores para superar los desafíos geográficos y climáticos. Al abordar este problema, se busca brindar una respuesta efectiva a las necesidades de atención médica de la comuna y, en última instancia, mejorar la calidad de vida de sus residentes.

Para el desarrollo del presente estudio, es necesario **conocer detalladamente la comuna de Peñalolén**, la cual se encuentra ubicada en el sector suroriente de la Región Metropolitana (RM) de Chile, con una extensión aproximada de unos 54 km². Al norte, limita con las comunas de La Reina y Las Condes; al oeste, con las comunas de Ñuñoa y Macul; al este, colinda con la Sierra de Ramón; y al sur, con las comunas de La Florida y San José de Maipo. Peñalolén se compone de once distritos censales, estos distritos están distribuidos en cinco sectores, también llamados macro sectores: Peñalolén Alto, La Faena, Lo Hermida, San Luis y Peñalolén Nuevo, y 31 Unidades Vecinales (UV) según el Decreto 1200 de 2021 (Diagnóstico inicial para la política pública, 2021). El mapa que se muestra en la figura 1.1 ofrece una vista de la distribución territorial de dichos macro sectores en la comuna.

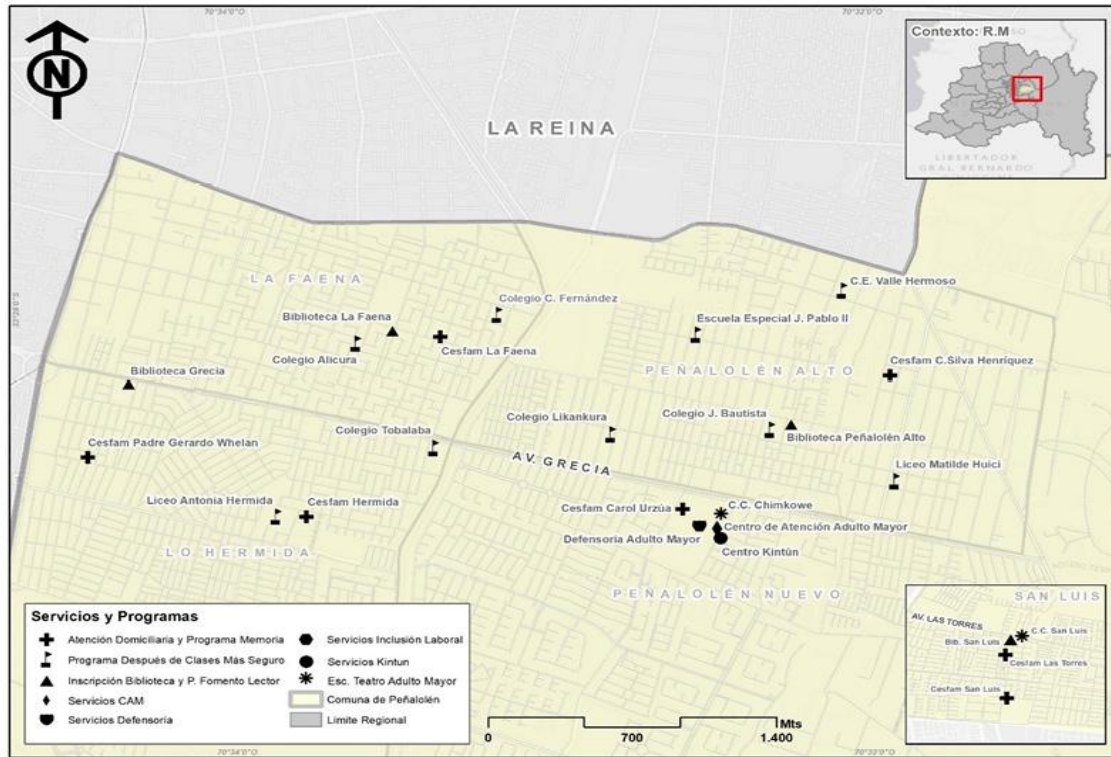
Figura 1.1: “Mapa de la comuna de Peñalolén y sus macro sectores”



Fuente: Elaborado por Paulo Contreras Osses – Año 2020

Además, la comuna de Peñalolén también ofrece servicios y programas a personas mayores en el territorio de Peñalolén, tal y como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 1.2: “Mapa de los servicios y programas ofrecidos a personas mayores en Peñalolén”



Fuente: Elaborado por Paulo Contreras Osses – Año 2020

Los datos presentados en la siguiente figura fueron extraídos del Censo de Población y Vivienda 2017, y de las Proyecciones de Población 2024, generadas por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE). Según la figura, se puede observar que la población en la comuna de Peñalolén ha ido creciendo con una variación del 13%, además se muestra que la proyección de la población para Peñalolén en el año 2024 será de **272.913 habitantes** (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile [BCN], 2023). Lo cual se puede ver reflejado en las tablas 1.1 y 1.2.

Tabla 1.1: “Población total del censo realizado el año 2017 a la comuna de Peñalolén”

1.1 Población total				
Unidad Territorial	Censo 2017	Proyección 2024	Variación (%)	
Comuna de Peñalolén	241.599	272.913	13,0	
Región Metropolitana de Santiago	7.112.808	8.420.729	18,4	
País	17.574.003	20.086.377	14,3	

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2017, Proyecciones de Población 2024, INE

Tabla 1.2: “Población por grupos de edad de la comuna de Peñalolén”

Grupo Edad	Población comunal por grupo de edad (n°)		Porcentaje de la población por grupo etarios Proyección 2024		
	Censo 2017	Proyección 2024	Comuna	Región	País
0 a 14	49.145	52.264	19,2	18,1	18,4
15 a 29	59.027	56.891	20,8	20,8	20,3
30 a 44	48.353	62.648	23,0	25,2	23,3
45 a 64	60.152	67.985	24,9	23,4	24,2
65 o mas	24.922	33.125	12,1	12,5	13,8
Total	241.599	272.913	100,0	100,0	100,0

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2017, Proyecciones de Población 2024, INE

En base a la figura se puede deducir que la proyección de la población de adultos mayores (personas de 65 años o más) para la comuna de Peñalolén en 2024 es de **33.125 personas**. Esto representa aproximadamente el **12,1%** de la población total proyectada de la comuna para ese año.

Como dato e información extra, la razón por la cual se tiene la motivación de evaluar y desarrollar el presente estudio, es que según ENDIDE (Encuesta de discapacidad y dependencia, 2022), en Chile hay un total de 3.291.602 personas con discapacidad, de las cuales 587.709 son niños, niñas y adolescentes (14,7%) y 2.703.893 (17,6%) son adultos/as (a partir de los 18 años). Por lo cual se entiende que existe una gran parte de la población chilena que está pasando por muchas dificultades para acceder a medicamentos e implementos básicos para su salud y bienestar diario (Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2022).

Actualmente, en la comuna de Peñalolén, **se lleva a cabo un programa de distribución de medicamentos a domicilio destinado principalmente a personas postradas o con problemas de movilidad. Según los últimos datos disponibles, más de 250 personas están inscritas en este sistema**, mayoritariamente mujeres de la tercera edad. Este programa, denominado "La Salud hasta tu Casa", forma parte de la Farmacia Comunitaria de Peñalolén, que además ofrece medicamentos a precios accesibles para los vecinos de la comuna (Centro de Prensa, 2016).

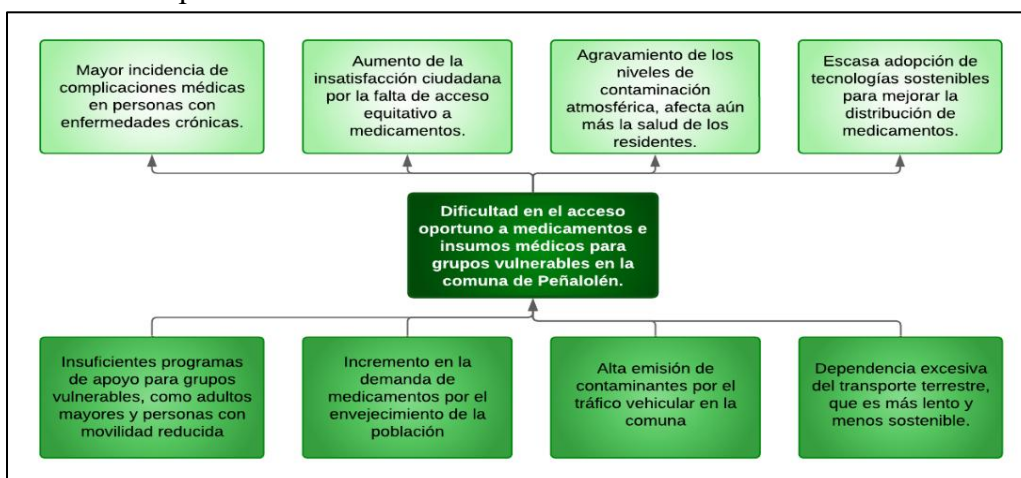
En este contexto, la implementación de soluciones innovadoras, como el uso de drones para la distribución de medicamentos, emerge como una opción potencialmente viable además de representar una opción ambientalmente sostenible. No obstante, es clave dimensionar el problema en Peñalolén, donde la falta de acceso oportuno a medicamentos esenciales afecta la calidad de vida y exige estrategias de distribución más eficaces.

1.2 Planteamiento del Problema

En la comuna de Peñalolén, ubicada en el sector suroriente de la Región Metropolitana de Chile, se enfrenta un serio desafío en el acceso a medicamentos e insumos médicos. Este problema es especialmente grave para ciertos grupos de la población, incluyendo personas de bajos recursos, ancianos, personas con movilidad reducida y aquellos que viven en áreas con menor disponibilidad de servicios de salud. Según la Encuesta Nacional de Medicamentos 2017, el 58% de los chilenos consume al menos un medicamento al día, y un preocupante 13% presenta polifarmacia, consumiendo cinco o más fármacos. Estas cifras evidencian la alta demanda de medicamentos y la necesidad crítica de una distribución eficiente para garantizar el acceso oportuno a los tratamientos necesarios (SAP, 2018). Cabe destacar que, en la comuna de Peñalolén, un 78% de los residentes estaban inscritos en el Fondo Nacional de Salud (FONASA) en 2020, de los cuales el 17% son mayores de 60 años (CORMUP, 2021). Asimismo, el aumento de personas mayores usuarias del sistema público ha crecido con el paso del tiempo, fenómeno que acompaña el envejecimiento poblacional en la comuna, siendo en su mayoría mujeres (Silva Villar, González Torralbo & Nazal Moreno, 2021).

La muestra operacional de este estudio se centra en los usuarios del programa municipal **“La Salud hasta tu Casa”**, que requieren alrededor de 250 entregas diarias, principalmente adultos mayores y personas con movilidad reducida. Bajo este enfoque, el objetivo principal es evaluar la viabilidad del uso de drones como apoyo a la distribución de medicamentos dentro de dicho programa, buscando reducir los tiempos de entrega, mejorar la calidad de vida de los beneficiarios y disminuir las emisiones contaminantes. De este modo, la propuesta se configura como un proyecto social con potencial de implementación municipal, orientado a fortalecer el acceso equitativo a insumos médicos mediante estrategias domiciliarias sostenibles, innovadoras y responsables con el medioambiente (Shi, Lin, Li & Li, 2022).

Figura 1.3: “Árbol de problemas”



Fuente: Elaboración propia – Año 2024

1.3 Solución propuesta

La implementación de una red de distribución de medicamentos mediante drones se presenta como una solución prometedora para abordar los desafíos identificados en el análisis previo, debido a los grandes beneficios que se conocen, además desde los 10 a 15 años que lleva en el mercado, la gran mayoría de sus resultados al usarlo han sido positivos (Federal Aviation Administration [FAA], 2023). Esta solución permitirá mejorar significativamente el acceso de la población de Peñalolén a los medicamentos, especialmente en áreas remotas o de difícil acceso. Además, la optimización de la infraestructura urbana y el desarrollo de campañas de concientización contribuirán a garantizar el éxito y la aceptación de esta iniciativa por parte de la comunidad.

El desarrollo y la comercialización de drones han evolucionado rápidamente en las últimas décadas. Los drones, en el sentido moderno como vehículos aéreos no tripulados para uso civil, empezaron a ganar popularidad y a estar más accesibles al público general a partir de principios de la década de 2000. Uno de los primeros usos significativos de drones civiles comenzó con modelos más simples y pequeños diseñados para la fotografía y el vídeo, que se popularizaron alrededor de 2010 (Federal Aviation Administration [FAA], 2023). Por lo tanto, se podría decir que los drones como productos de consumo masivo han estado en el mercado desde hace aproximadamente 10 a 15 años, aunque la tecnología en sí y su uso en aplicaciones militares, civiles y científicas se remontan a mucho antes.

Desde la perspectiva de la ingeniería, esta iniciativa busca mejorar la eficiencia de la distribución de medicamentos, especialmente en áreas de difícil acceso debido a la topografía y la dispersión de servicios de salud. Además, se destaca el potencial de la NO emisión de contaminantes al disminuir la dependencia del transporte vehicular. Los resultados esperados incluyen una mejora significativa en el acceso a medicamentos para grupos vulnerables, una reducción en los tiempos de entrega y en las emisiones contaminantes, así como una mayor calidad de vida para los residentes de Peñalolén. Esta solución no solo abordará los desafíos identificados, sino que también sentará las bases para un modelo innovador y replicable en otras regiones con problemas similares de acceso a medicamentos e insumos médicos.

El uso de drones para la distribución de medicamentos en Peñalolén podría ofrecer una solución innovadora y eficaz para superar las barreras actuales. Desde la perspectiva de la ingeniería y la logística, la implementación de drones puede mejorar la eficiencia de la distribución de medicamentos, especialmente en zonas urbanas o de difícil acceso, además de la alta contaminación existente en dicha comuna y la dispersión de servicios de salud (Flemons et al., 2022). La ingeniería industrial desempeña un papel fundamental al garantizar que el sistema de entrega de medicamentos a través de drones sea seguro y eficaz, incorporando monitoreo en tiempo real, control de inventarios y atención ante emergencias (Eichleay et al., 2019).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Realizar un estudio técnico-económico para evaluar la viabilidad del uso de drones en la distribución de medicamentos a los beneficiarios efectivos del programa municipal **“La Salud hasta tu Casa”**, compuesto por aproximadamente **250 personas**, principalmente adultos mayores y personas con movilidad reducida, que residen en zonas semiurbanas de la comuna de Peñalolén, Santiago de Chile.

1.4.2 Objetivos Específicos

1. Identificar las necesidades prioritarias de medicamentos de los beneficiarios efectivos del programa, considerando la demanda actual de las aproximadamente 250 entregas diarias.
2. Determinar los puntos de entrega dentro de las zonas atendidas por el programa, evaluando condiciones apropiadas para el aterrizaje de drones y la entrega de medicamentos.
3. Evaluar la infraestructura y condiciones geográficas del macro sector para localizar el centro de operación de los drones y aplicar un modelo de asignación de drones para la entrega óptima de medicamentos.
4. Analizar la factibilidad y los costos financieros del uso de drones en función de la demanda efectiva del programa, considerando la satisfacción de la demanda y los recorridos óptimos planteados.

1.5 Alcances y Limitaciones

1.5.1 Alcances

Los alcances del presente trabajo se centran en la evaluación de la viabilidad del uso de drones para mejorar la distribución de medicamentos a los beneficiarios efectivos del programa municipal “La Salud hasta tu Casa” en el macro sector de Peñalolén Nuevo, que actualmente contempla 250 entregas diarias. Entre los principales alcances destacan:

1. Identificación del acceso a medicamentos para beneficiarios del programa: Se analizará cómo los drones podrían mejorar la entrega de medicamentos a los usuarios inscritos en el programa, considerando tiempos de entrega y continuidad en el suministro. La muestra operacional está limitada a los 250 beneficiarios activos, evitando extrapolaciones a la totalidad de la población de la comuna.
2. Evaluación de tiempos de entrega y eficiencia logística: Se estimarán los tiempos de entrega mediante drones y se compararán con los métodos de transporte

terrestre actualmente utilizados por el programa. Este análisis permitirá determinar posibles mejoras en la eficiencia del servicio.

3. Optimización de la logística de distribución: Se evaluará la infraestructura y rutas disponibles para implementar un sistema de entrega mediante drones en Peñalolén Nuevo, identificando los recorridos más eficientes y seguros dentro del marco operativo del programa municipal.

4. Propuesta de mejoras operativas: Identificar ajustes o recomendaciones para integrar drones en el sistema de distribución existente, considerando factores técnicos, logísticos y de aceptación de los beneficiarios.

1.5.2 Limitaciones

Las principales limitaciones que podrían presentarse en este estudio son:

1. Disponibilidad de información operativa: La precisión del estudio depende de la información proporcionada por el programa municipal, incluyendo registros de entregas, tiempos de distribución y características de los beneficiarios. La falta de datos completos o detallados podría afectar la validez del análisis.
2. Aceptación por parte de la comunidad: La introducción de drones podría generar preocupación entre los usuarios sobre privacidad, seguridad y ruido. Esto podría limitar la efectividad del programa si no se implementan estrategias de sensibilización y comunicación adecuadas.
3. Costos y viabilidad técnica: La implementación de drones implica gastos asociados a adquisición, mantenimiento, infraestructura y capacitación del personal. Además, factores como el clima, la topografía y la densidad urbana podrían limitar la operatividad de los drones en ciertas rutas.
4. El Cumplimiento normativo: El uso de drones para distribución de medicamentos está sujeto a la legislación vigente en materia de seguridad aérea y sanitaria. Restricciones legales o cambios en la normativa podrían limitar o retrasar la implementación del sistema.

Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 Respaldo de la Investigación

El uso de drones para la distribución de medicamentos y suministros médicos ha emergido como una de las innovaciones tecnológicas más prometedoras en el ámbito de la logística en salud. La evidencia internacional respalda su potencial para mejorar la cobertura, reducir los tiempos de entrega y fortalecer la resiliencia de los sistemas sanitarios, especialmente en comunidades con barreras de acceso geográfico o urbano. Sin embargo, su aplicación requiere un análisis integral que considere aspectos normativos, tecnológicos, sociales y económicos.

2.1.1 Marco normativo y técnico internacional

El marco regulatorio constituye uno de los pilares para evaluar la viabilidad de los drones en contextos sanitarios. En Europa, la Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA) ha desarrollado la metodología SORA (Specific Operations Risk Assessment), la cual establece criterios estandarizados para evaluar los riesgos de operaciones con drones en entornos urbanos y rurales (EASA, 2019). Esta herramienta permite clasificar el nivel de riesgo según el espacio aéreo, la densidad poblacional y la criticidad de la misión, lo cual resulta especialmente relevante para aplicaciones médicas.

En Estados Unidos, la Federal Aviation Administration (FAA) regula estas operaciones bajo la Part 107, permitiendo vuelos comerciales de drones con restricciones de peso, altitud y visibilidad. Si bien el transporte de medicamentos aún requiere autorizaciones específicas, varios pilotos han sido aprobados en colaboración con empresas como UPS y Matternet, marcando precedentes regulatorios (FAA, 2020). Asimismo, la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) ha impulsado estándares globales para la integración de sistemas aéreos no tripulados (UAS) en el espacio aéreo, con foco en la seguridad y la interoperabilidad con la aviación tripulada (ICAO, 2020). Complementariamente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha recomendado explorar el uso de drones como una solución innovadora para mejorar la logística de medicamentos y vacunas en contextos de difícil acceso, destacando su utilidad durante emergencias de salud pública (WHO, 2019).

Por otro lado, la normalización técnica también avanza. La ISO/TC 20/SC 16 ha emitido estándares específicos para UAS en materia de calidad, gestión de riesgos y seguridad operacional (ISO, 2021). Estos lineamientos contribuyen a garantizar que los drones empleados en la entrega de medicamentos cumplan requisitos de seguridad y calidad acordes a operaciones críticas.

2.1.2. Avances tecnológicos en drones aplicados a la salud

El progreso tecnológico ha permitido que los drones pasen de ser prototipos experimentales a soluciones logísticas concretas. Se observa un aumento significativo en su autonomía, capacidad de carga útil, estabilidad de vuelo y sistemas de navegación autónoma basados en GPS diferencial y sensores inteligentes (Kellermann et al., 2020).

Los estudios muestran que los drones pueden transportar de manera confiable muestras médicas sin afectar su integridad. (Amukele et al. 2017) demostraron que las muestras de sangre transportadas por drones mantienen sus propiedades bioquímicas intactas, validando su uso en entornos clínicos. Asimismo, (Otto et al. 2018) evidenciaron que el transporte aéreo con drones puede reducir emisiones de CO₂ en hasta un 54 % respecto a vehículos terrestres, contribuyendo a objetivos de sostenibilidad ambiental. Estos avances abren la puerta a la implementación de modelos híbridos de logística en salud, donde drones complementen y optimicen las redes tradicionales de transporte.

2.1.3. Casos internacionales de éxito

Los ejemplos más emblemáticos se encuentran en África, Asia y Europa. Zipline, empresa pionera en Ruanda y Ghana, ha demostrado que los drones pueden reducir de varias horas a menos de 30 minutos la entrega de sangre y vacunas en comunidades rurales, logrando más de un millón de vuelos exitosos (Zipline, 2022).

En Suiza, Matternet ha implementado corredores aéreos certificados para conectar hospitales urbanos, logrando disminuir significativamente los tiempos de transporte de muestras de laboratorio (Matternet, 2020). En las Vanuatu, en alianza con **UNICEF**, drones han permitido el acceso oportuno a vacunas en islas remotas, reduciendo brechas logísticas (UNICEF, 2019). Estos casos confirman que los drones son viables en contextos reales, siempre que exista apoyo normativo, financiamiento sostenido y aceptación comunitaria.

2.1.4. Evidencia científica en desempeño y modelos logísticos

Diversos estudios académicos comparan el desempeño de drones con el transporte terrestre. (Rosser et al. 2018) encontraron que, en entornos urbanos congestionados, los drones pueden reducir hasta un 60 % el tiempo de entrega. Asimismo, (Pasha et al. 2022) desarrollaron modelos de optimización logística que integran drones en cadenas de suministro médico, demostrando beneficios en cobertura y reducción de costos.

Otro aspecto relevante es la aceptación social. (Kellermann et al. 2020) señalan que la confianza de la población en la tecnología depende de factores como la percepción de seguridad, el ruido y la privacidad. Por ello, la implementación debe incluir estrategias de comunicación y sensibilización comunitaria.

2.1.5. Adopción en Latinoamérica

En América Latina, el despliegue de drones en salud aún se encuentra en fase piloto. En Brasil y México se han realizado pruebas de transporte de vacunas y medicamentos en zonas rurales (Pinto et al., 2021). En Colombia, drones han sido utilizados para la distribución de insumos médicos para la esclerosis múltiple, mostrando potencial en regiones con difícil acceso terrestre (Rodríguez, S. 2025).

En Chile, la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) regula el uso de drones mediante la DAN 151, que establece requisitos operativos y restricciones de vuelo. Si bien aún no existen programas masivos de distribución médica mediante drones, la geografía del país y la necesidad de soluciones innovadoras en salud hacen de este un terreno fértil para futuros desarrollos.

2.1.6. Caso local: Peñalolén, Chile

En el contexto chileno, el programa municipal “La Salud hasta tu Casa” constituye una base operativa concreta para evaluar el uso de drones. Este programa realiza alrededor de 250 entregas diarias de medicamentos a domicilio, lo que representa un desafío logístico en términos de tiempos, recursos humanos y costos.

La aplicación de drones en este escenario permitiría:

- Reducir los tiempos de entrega en macro sectores con alta congestión vial.
- Optimizar la asignación de recursos humanos.
- Contribuir a la sostenibilidad mediante menores emisiones contaminantes.

En este sentido, la investigación no busca extrapolar los beneficios a toda la comuna de manera teórica, sino evaluar la factibilidad de los drones en un **caso operativo real**, con base en la demanda efectiva del programa municipal. Esto otorga rigor metodológico y aumenta la aplicabilidad de los resultados.

La literatura existente indica que el uso de drones en la distribución de medicamentos no solo es factible, sino que también ofrece ventajas significativas en términos de rapidez, accesibilidad y sostenibilidad. La adopción de tecnologías limpias en la logística de salud está impulsando investigaciones que buscan mejorar la distribución de medicamentos. En comunas con geografía compleja, como Peñalolén, el uso de drones podría facilitar el acceso a estos insumos.

Capítulo 3: MARCO TEÓRICO

3.1 Aplicaciones de Drones en la Distribución de Medicamentos

En el campo de la salud, los drones han emergido como una solución innovadora para mejorar el acceso a medicamentos, especialmente en áreas donde las barreras geográficas dificultan la distribución eficiente. Estudios previos han demostrado que los drones pueden reducir significativamente los tiempos de entrega y mejorar la accesibilidad, lo cual es crucial en contextos donde los medicamentos deben ser entregados con urgencia (Otto, Bruce, James & Erwin, 2018). La comuna de Peñalolén, con su geografía variada y su población diversa, enfrenta desafíos particulares en la distribución de medicamentos, especialmente para los adultos mayores y aquellos con movilidad reducida. En este contexto, los drones podrían ofrecer una solución efectiva para mejorar la entrega de medicamentos, garantizando que lleguen de manera rápida y segura a quienes más los necesitan.

3.2 Normativa y Regulación de Drones en Chile

La operación de drones en Chile se encuentra regulada principalmente por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) a través de la Norma Aeronáutica DAN 151, que establece los requisitos para la utilización de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS). Esta normativa busca garantizar la seguridad operacional, la protección de la privacidad y la integridad de terceros.

Requisitos clave de la DAN 151 (DGAC, 2015, actualizada 2017)

1. Registro del RPAS:

Todo dron debe estar inscrito en el registro oficial de la DGAC, con identificación visible.

2. Habilitación del piloto:

El operador debe contar con una licencia otorgada por la DGAC, que certifica conocimientos en meteorología, navegación aérea, normativa y seguridad operacional.

3. **Manual de operaciones y seguridad:**

Cada operador debe elaborar un documento oficial aprobado por la DGAC, que detalle procedimientos normales, de emergencia y mitigaciones de riesgo.

4. **Restricciones operativas:**

- Altura máxima: 130 metros AGL (Above Ground Level), salvo autorización especial.
- Operaciones en VLOS (Visual Line of Sight): el piloto debe mantener contacto visual con el dron. Si se requiere ampliar cobertura, deben implementarse observadores aéreos para garantizar continuidad visual.
- Prohibición de vuelos sobre áreas densamente pobladas sin autorización especial.
- Distancia mínima respecto a aeródromos: 2 km.
- Necesidad de coordinación con control de tránsito aéreo (ATC) en caso de operar en espacio aéreo controlado.

5. **Seguros obligatorios:**

Toda operación debe estar respaldada por un seguro de responsabilidad civil que cubra daños a terceros.

6. **Operaciones de interés público:**

En casos como la distribución de medicamentos, que pueden considerarse de interés público, la DGAC exige documentación adicional de mitigaciones de riesgo, planes de contingencia y coordinación con autoridades locales.

• **Checklist normativo operativo (DGAC – DAN 151)**

Requisito	Cumplimiento en el proyecto
Registro del dron en DGAC	- Drones inscriptos con matrícula visible
Licencia de piloto RPAS	- Pilotos habilitados DGAC
Manual de operaciones aprobado	- Documento desarrollado y validado
Altura máxima 130 m AGL	- Rutas diseñadas bajo este límite
VLOS garantizado	- Observadores en puntos estratégicos
Prohibición sobre áreas pobladas	- Rutas planificadas por corredores seguros
Seguro de responsabilidad civil	- Contratado antes de la fase piloto

3.3 Evaluación Técnico-Económica en Proyectos de Drones

Para determinar la viabilidad de un proyecto que involucra el uso de drones, es necesario realizar un análisis técnico-económico. Este análisis debe considerar tanto los aspectos técnicos como económicos del proyecto. Desde un punto de vista técnico, es crucial evaluar la capacidad de los drones para cumplir con los requisitos del proyecto, incluyendo su autonomía, capacidad de carga, sistemas de navegación y seguridad. Económicamente, se debe analizar la rentabilidad del proyecto, utilizando herramientas como el Valor Actual Neto (VAN) para determinar si los beneficios esperados superan los costos. Un proyecto será considerado viable si el VAN es positivo, y si la Tasa interna de retorno (TIR), es mayor que la tasa mínima de retorno requerida, lo que indica que generará ganancias a largo plazo (*Financial glossary. 2025*)

3.4 Consideraciones Técnicas para el Uso de Drones en Peñalolén

Para implementar con éxito un sistema de distribución de medicamentos mediante drones en Peñalolén, es necesario considerar varios aspectos técnicos. Los cuales son los siguientes:

- **Tipo de Dron:**
 - **Multirroto:** Son comunes y utilizados en tareas que requieren precisión, como la fotografía aérea o la vigilancia, además de ser usados en áreas urbanas.
 - **Ala fija:** Parecidos a aviones, son más eficientes en términos de energía y pueden cubrir distancias más largas, lo que los hace ideales para la entrega de suministros o vigilancia en grandes áreas.
 - **Ala inclinada:** Combinan características de multirroto y ala fija, permitiendo despegues verticales y vuelos más largos.
- **Carga Útil:** La carga útil se refiere a la cantidad de peso que un dron puede transportar, incluyendo cámaras, sensores u otros equipos.
- **Autonomía y Tiempo de Vuelo:** Este aspecto depende del tipo de energía que utiliza el dron (baterías eléctricas, etc.). El tiempo de vuelo afecta la capacidad del dron para realizar tareas sin necesidad de recarga o reabastecimiento.
- **Rango de Operación:** Define la distancia máxima que un dron puede recorrer desde su punto de control antes de perder la señal.

- **Sistemas de Control y Navegación:** Los drones pueden ser controlados manualmente por un piloto o funcionar de manera autónoma utilizando GPS, sensores de proximidad, y algoritmos de navegación.
- **Sensores y Cámaras:** La calidad de los sensores y cámaras integrados en el dron influye en su capacidad para realizar tareas específicas.
- **RPAS:** Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia, es una categoría de aeronave no tripulada que comúnmente se conoce como dron.
- **Operador:** Es una persona piloto de drones o piloto de UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado, por sus siglas en inglés), es una persona capacitada y autorizada para volar y controlar drones de manera segura y eficiente.
- **Regulaciones y Restricciones Legales:** Las regulaciones locales sobre el uso de UAVs influyen en el diseño y las capacidades operativas del dron. Esto incluye limitaciones en altura, áreas de vuelo, y requisitos de certificación.

3.5 Percepción Pública y Aceptación Social

La aceptación y percepción pública del uso de drones para la entrega de medicamentos es un factor crítico en la implementación de este tipo de proyectos. Una percepción positiva puede facilitar la adopción y expansión de esta tecnología, mientras que una percepción negativa podría generar resistencia y obstáculos regulatorios adicionales. Es importante involucrar a la comunidad en el proceso de implementación, informando sobre los beneficios y las medidas de seguridad que se han tomado para garantizar operaciones seguras y eficientes.

Capítulo 4: METODOLOGÍA

La metodología empleada es de naturaleza exploratoria y descriptiva con un enfoque mixto, cualitativo y cuantitativo. En una primera etapa, se recopilarán y analizarán datos provenientes de fuentes secundarias y bases oficiales, para luego construir un escenario como simulación y aplicar un modelo de optimización. Este diseño metodológico permitirá pasar de un diagnóstico de necesidades y restricciones a la evaluación y validación del sistema de entrega con drones. Es decir, comprende varios enfoques interrelacionados, los cuales son:

4.1 Recopilación de datos y análisis

Para llevar a cabo este objetivo, se investigará y recopilará información sobre las necesidades de medicamentos dentro de la población de Peñalolén, considerando aspectos relevantes como la frecuencia de uso de ciertos medicamentos y las condiciones de salud prevalentes.

Además, se realizará un exhaustivo análisis de datos de salud pública, incluyendo la revisión de estadísticas sobre los fármacos más utilizados en la comuna. La información se sistematizará en capas GIS, incorporando:

- Registros de entregas del programa municipal (250 beneficiarios, 21 días hábiles/mes).
- Coordenadas de domicilios de beneficiarios (anonimizadas).
- Capas GIS: farmacias, centros de salud, límites de sectores, alturas de edificios, no-fly zones DGAC.
- Condiciones meteorológicas históricas y patrones de viento predominantes.

Este análisis permitirá garantizar la **trazabilidad y calidad de los datos**, así como identificar con precisión las necesidades de medicamentos prioritarios para adultos mayores y personas con movilidad limitada en la población de Peñalolén.

4.2 Aplicación de Drones en Operaciones de Entrega

En esta sección se llevará a cabo un análisis detallado de las regulaciones y restricciones vigentes para la operación de drones en Chile, con especial énfasis en los requisitos y documentos exigidos por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Asimismo, se definirán los criterios y especificaciones mínimas necesarias para la selección de la tecnología adecuada, abordando aspectos como autonomía de vuelo, capacidad de carga, sistemas de navegación y conectividad. Finalmente, se evaluarán las características técnicas de drones específicos, justificando su elección en función de su capacidad para cumplir con los criterios establecidos.

4.3 Supuestos operativos

Antes de aplicar el modelo de optimización, se establecerán supuestos operativos medibles y restringidos:

Tabla 4.1: “Supuestos para la implementación del Modelo”

Supuesto	Valor	Fuente / Justificación
Velocidad constante del dron	64 km/h	Especificación técnica de un Dron comercial
Viento máximo permitido	≤ 30 km/h	Límite operativo DGAC para VLOS
Condiciones meteorológicas	Sin lluvia, neblina ni nieve	Se excluyen días con alerta meteorológica
Tiempo de holgura por entrega	21 s (0,35 min)	Estimación conservadora para descenso,
Disponibilidad de pilotos	8 h/día, 5 días/semana	Basado en jornada municipal estándar
Disponibilidad de baterías	2 baterías por dron, swap inmediato	Sin pérdida por recarga
No se consideran ventanas horarias	Todos los beneficiarios disponibles	Simplificación inicial del modelo

Con base en estos parámetros, se construirá un escenario de demanda y operación que contemple variaciones en:

- Número y ubicación de pacientes.
- Restricciones de espacio aéreo.

El escenario será sometido a validación, contrastando los resultados de la simulación con datos de referencia (literatura técnica y regulaciones DGAC). Esto permitirá asegurar que los supuestos y condiciones reflejen la realidad del territorio y que los resultados del modelo de optimización sean confiables.

4.4 Evaluación de la infraestructura y condiciones geográficas

En esta etapa, se utilizarán imágenes satelitales para determinar los puntos de demanda por medicamentos en macro sectores alejados de farmacias, considerando condiciones apropiadas para el aterrizaje de drones y la entrega de medicamentos. Además, se evaluará la infraestructura y condiciones geográficas del macro sector para localizar el centro de operación de los drones y posteriormente aplicar un modelo de optimización.

4.5 Implementación del Modelo de Asignación de Drones

En esta etapa se aplicará un modelo de asignación de drones para distribuir de manera eficiente las tareas de entrega entre los drones disponibles. El modelo se implementará utilizando el solver CPLEX y el lenguaje de modelación OPL (IBM, 2024), lo que permitirá evaluar los cálculos realizados y garantizar que la planificación de las entregas y la asignación de drones sea la óptima.

Los inputs del modelo incluyen:

- Ubicación de los puntos de entrega (capas GIS).
- Supuestos operativos
- Restricciones de espacio aéreo y rutas seguras.

El modelo generará como outputs rutas óptimas, tiempos de entrega y utilización de drones, verificando que la solución sea eficiente y factible en los distintos escenarios planteados.

4.6 Evaluación Económica

En esta sección se realizará un análisis económico integral para evaluar la viabilidad del sistema de entrega de medicamentos mediante drones. Se calcularán los costos iniciales de adquisición de drones, licencias y equipamiento, así como los gastos operativos recurrentes (energía, personal, mantenimiento). Finalmente, se realizará una comparación con los métodos tradicionales de entrega, evaluando ahorros en tiempo y costos, con el fin de ofrecer una visión completa de la rentabilidad y eficiencia del proyecto.

Capítulo 5: DESARROLLO

5.1 Aplicación de Drones en Operaciones de entrega

5.1.1 Implementación de los Drones

La operación de drones en Chile, conocidos como RPAS (Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia), está sujeta a regulaciones establecidas por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Es crucial cumplir con estas normativas para garantizar operaciones seguras y respetar la privacidad de las personas (DGAC, 2017).

Restricciones para Volar Drones en Chile

- Registro de Drones: Todos los drones deben registrarse en la DGAC. Este proceso se realiza en línea y culmina con la obtención de un certificado de operación.
- Edad Mínima para Operar: Solo personas mayores de 18 años pueden operar drones. Los menores deben estar acompañados por un adulto responsable durante la operación.
- Altura Máxima de Vuelo:
 - En condiciones de visibilidad directa (VLOS), los drones deben operar a no más de 400 pies (130 metros) sobre la superficie y a una distancia visual de 500 metros.
 - En condiciones de vuelo más allá de la visibilidad (BVLOS), la altura no debe superar los 1200 pies (365 metros), manteniendo una distancia de 5 kilómetros del operador.
- Distancia de Seguridad: Se debe mantener una distancia mínima de 1 kilómetro de aeródromos, helipuertos y áreas con tráfico aéreo.
- Zonas Prohibidas: Está prohibido volar drones en áreas sensibles, como instalaciones militares, zonas de desastre y áreas de protección ambiental.

Documentación Necesaria para Operar Drones

Para operar un dron en Chile, se requiere la siguiente documentación:

- Certificado de Operación: Emitido por la DGAC tras el registro del dron.

- Licencia de Operación de Radiofrecuencia: Necesaria si el dron utiliza radiofrecuencia.
- Identificación del Dron: Debe tener una placa con el nombre del operador, número de teléfono y número de registro.
- Seguro de Responsabilidad Civil: Cobertura para daños a terceros en caso de accidentes.
- Autorización Especial: Puede ser requerida en ciertas zonas o condiciones específicas.

Zonas No-Fly establecidas por la DGAC alrededor de Peñalolén

1. Zonas permanentes de exclusión aérea (No-Fly Zone – códigos R-001 a R-005)

Son áreas donde está prohibido volar drones bajo cualquier circunstancia, sin importar la altura ni el peso del dron.

Incluyen:

- Aeropuerto Arturo Merino Benítez (SCEL) y todas sus aproximaciones → radio de 9 km alrededor.
- Helipuerto de Carabineros en La Reina → radio de 1 km.
- Hospital El Carmen (Maipú) y Hospital San José (Independencia) → radio de 500 m cada uno.

1. Zonas de restricción temporal o condicional (Códigos T-101 a T-104)

Son áreas que entran en restricción solo cuando hay operaciones en curso, por ejemplo: Operaciones de Carabineros y vuelos médicos de emergencia (aerovías de helicópteros).

- Altura máxima permitida en esos casos: 400 ft AGL (unos 120 m sobre el suelo).
- Cuando no hay operaciones activas, se pueden usar con las reglas generales de RPAS.

2. Condiciones específicas para Peñalolén

Peñalolén no está dentro de las zonas rojas permanentes, es decir, no tiene prohibición absoluta. Sin embargo, todo su casco urbano queda en un corredor aéreo regulado con las siguientes limitaciones:

- Altura máxima: 120 m AGL (sobre el nivel del suelo).
- Vuelo siempre en línea de visión directa (VLOS).
- No sobrevolar aglomeraciones de personas, carreteras principales o instalaciones críticas sin permiso.
- Respetar la privacidad y la normativa de seguridad de la DGAC.

5.1.2 Requisitos y Especificaciones Mínimas para la Tecnología del Dron

Uno de los aspectos clave a considerar es determinar las especificaciones y características mínimas que debe poseer el dron que se utilizará en el proyecto. Entre las características esenciales se incluyen:

1. Autonomía de Vuelo

El dron debe tener suficiente autonomía para cubrir distancias y entregar medicamentos en áreas rurales. La autonomía se mide en tiempo de vuelo (minutos) y depende de varios factores:

- **Carga del Dron:** Un dron cargado tiene una velocidad reducida. Por ejemplo, puede tardar 1.67 minutos en recorrer 1 km con carga máxima, en comparación con 1.11 minutos sin carga.
- **Tipo y Tamaño de Batería:** La capacidad de la batería determina la autonomía del dron. Drones de menor tamaño generalmente tienen menos autonomía, así que se necesita un dron con una batería grande y liviana.

2. Capacidad de Carga

El dron debe poder transportar medicamentos y suministros médicos necesarios. Basado en un análisis:

- **Peso Promedio de Medicamentos:** Cada adulto mayor puede requerir hasta 5 cajas de medicamentos, sumando un peso promedio de 400 g, más 800 g para otros insumos. Se requiere una capacidad de carga mínima de 1.2 kg.

3. Sistemas de Navegación y Evitación de Obstáculos

El dron necesita contar con sistemas avanzados de navegación para evitar obstáculos durante el vuelo. Se recomienda sensores omni-direccionales con un rango de detección de 20 m.

4. Conectividad Segura

El dron debe tener una conectividad fiable para recibir instrucciones y transmitir datos sobre la entrega de medicamentos. La conectividad debe tener un alcance mínimo de 8 km.

5. Tiempo de Respuesta Rápido

El dron debe ser capaz de despegar y entregar medicamentos rápidamente. Se busca una velocidad de vuelo superior al promedio y una capacidad de carga que no afecte el rendimiento.

6. Resistencia a Condiciones Climáticas Adversas

El dron debe operar de manera segura en diversas condiciones climáticas. Debe soportar lluvia leve y vientos de hasta 30 km/h.

7. Facilidad de Operación

El dron debe ser fácil de operar para el personal encargado de la logística. Se requiere un diseño que no necesite ensamblaje frecuente y que tenga fácil acceso a la batería. Además, debe contar con sistemas de asistencia en vuelo, como GPS, cámaras y sensores de proximidad.

8. Batería Intercambiable

Para garantizar un funcionamiento continuo, es esencial que el dron cuente con baterías que se puedan intercambiar y recargar con rapidez, especialmente si se planean múltiples entregas en un día.

5.2 Selección de Dron a implementar

Los drones multirrotores son generalmente la opción más conveniente para operar en zonas urbanas, debido a su agilidad, alta maniobrabilidad y la capacidad para despegar y aterrizar en espacios reducidos. En este contexto, el **DJI Matrice 350 RTK** se presenta como una excelente opción para la distribución de medicamentos, gracias a sus características y especificaciones avanzadas que aseguran un transporte seguro y eficiente (Optron, 2023). A continuación, se detallan las principales especificaciones de este dron: Las dimensiones del dron **DJI 350 RTK** son las siguientes:

- ✓ Dimensiones:
 - Desplegado (incluyendo hélices y tren de aterrizaje): 720 mm x 720 mm x 430 mm
 - Plegado (excluyendo hélices y tren de aterrizaje): 365 mm x 365 mm x 230 mm
- ✓ Peso: 3,8 kg (sin batería ni carga útil)
- ✓ Peso máximo de despegue: 17,6 kg (dron + carga útil + batería)
- ✓ Velocidad máxima: Modo S: 23 m/s (aproximadamente 83 km/h)
- ✓ Tiempo máximo de vuelo: 55 minutos (sin carga útil)
- ✓ Distancia máxima de transmisión de señal: 20 km (en condiciones ideales)
- ✓ Vida útil del dron: 3 a 7 años (dependiendo del mantenimiento adecuado)
- ✓ Vida útil de las baterías: 400 ciclos de carga (aproximadamente)
- ✓ Alcance de la señal: 20 km en condiciones ideales.
- ✓ Comparte situación en tiempo real en la nube para la coordinación aire-tierra.
- ✓ Sistema de batería mejorado, batería TB65

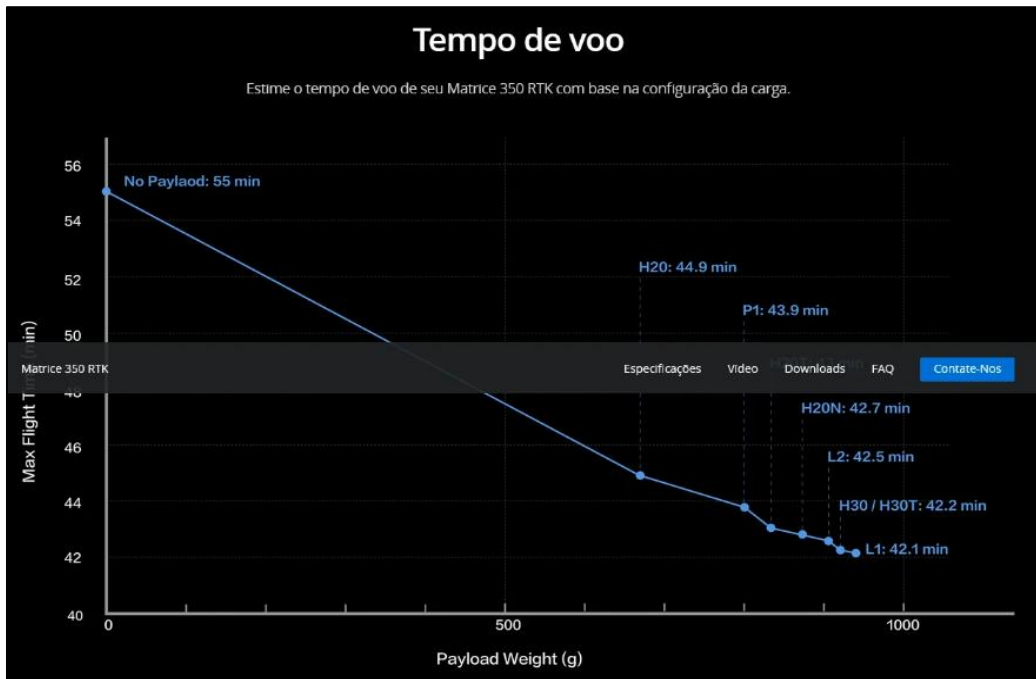
Figura 5.1: “Dron DJI Matrice 350 RTK”



Fuente: Optron - Año 2024

La autonomía del dron varía dependiendo del peso que transporte. En condiciones óptimas, el DJI Matrice 350 RTK ofrece un tiempo máximo de vuelo de 55 minutos sin carga adicional. Sin embargo, considerando que el peso promedio de la carga será de 0.8 kg, según el gráfico de tiempo de vuelo en función de la carga, la autonomía estimada se reduce a 43 minutos (*Specs.* 2024).

Gráfico 5.1: “Tiempo de vuelo en función de la carga”.



Fuente: Specs. – Año 2024

5.3 Identificación de necesidades

En Chile, los medicamentos más consumidos por la población, especialmente en personas con movilidad reducida y adultos mayores, reflejan las necesidades de tratar enfermedades crónicas comunes y aliviar síntomas asociados con el envejecimiento y la inmovilidad (Medicamentos más vendidos Chile, 2021). A continuación, un análisis más detallado sobre los fármacos más consumidos en este grupo:

1. Medicamentos para el dolor y la inflamación

El Paracetamol e Ibuprofeno, están entre los más consumidos no solo por su disponibilidad y bajo costo, sino por su eficacia en aliviar dolores crónicos y agudos. En personas con movilidad reducida, el dolor articular, muscular y la inflamación suelen ser frecuentes debido a la falta de ejercicio o posturas prolongadas.

Paracetamol (500 mg) es un analgésico suave, usado para dolores leves a moderados, como cefaleas o dolores articulares, y es bien tolerado por adultos mayores.

- Peso: 50 g por caja.
- Volumen: 50 cm³ por caja.

Ibuprofeno (600 mg), por otro lado, también actúa como antiinflamatorio, siendo recetado comúnmente para dolores más intensos relacionados con problemas osteomusculares, artritis, o inflamaciones crónicas en personas con limitaciones de movilidad.

- Peso: 60 g por caja.
- Volumen: 55 cm³ por caja.

2. Antihipertensivos

Losartán (50 mg): La hipertensión arterial es una de las afecciones crónicas más prevalentes entre adultos mayores y personas con movilidad reducida. Este medicamento es uno de los antihipertensivos más prescritos debido a su eficacia y perfil de seguridad,

particularmente en aquellos que no pueden realizar actividad física regular. El control de la presión arterial es fundamental para prevenir complicaciones como accidentes cerebrovasculares (ACV) y ataques cardíacos, que tienen una mayor incidencia en personas de edad avanzada o con movilidad reducida.

- Peso: 70 g por caja.
- Volumen: 60 cm³ por caja.

3. Inductores del sueño y ansiolíticos

Zopiclona (7,5 mg): En personas con movilidad reducida, la calidad del sueño puede verse gravemente afectada debido a la falta de actividad física, problemas de circulación, o dolores crónicos. El insomnio es común en esta población, y Zopiclona se ha convertido en una opción muy usada para inducir el sueño.

- Peso: 30 g por caja.
- Volumen: 30 cm³ por caja.

Benzodiazepinas: Aunque no figuran en el listado del ISP, benzodiazepinas como diazepam y alprazolam son de uso frecuente en personas con ansiedad, especialmente con limitaciones físicas o enfermedades crónicas.

- Peso: 70 g por caja.
- Volumen: 60 cm³ por caja.

4. Analgésicos potentes

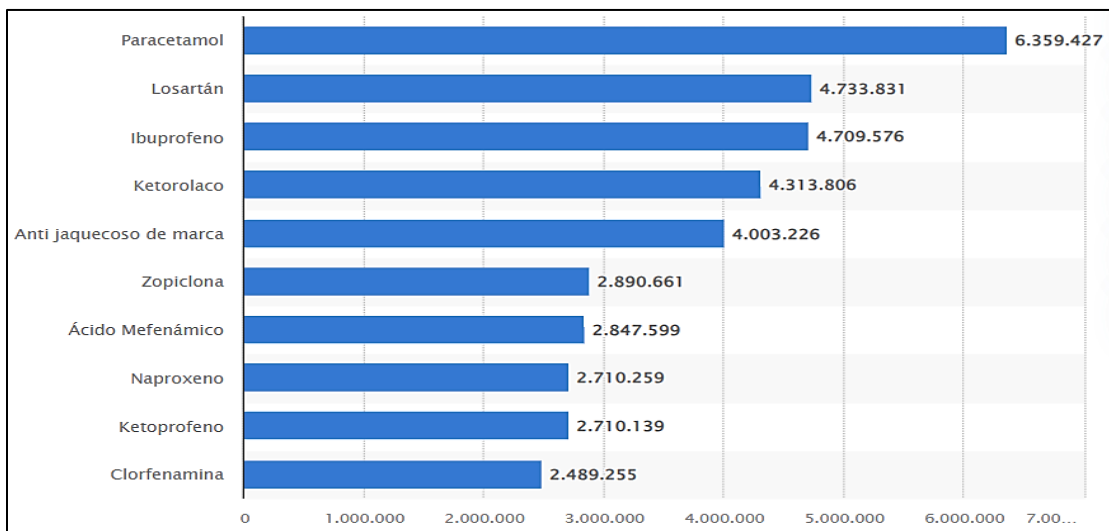
Ketorolaco (10 mg): Este analgésico se utiliza para dolor agudo severo en personas con movilidad reducida, pero su uso debe controlarse por riesgos gastrointestinales como irritación o hemorragias.

- Peso: 40 g por caja.
- Volumen: 35 cm³ por caja.

5.3.1 Impacto en Personas con Movilidad Reducida

Las personas con movilidad reducida enfrentan múltiples desafíos en el manejo de sus enfermedades, que incluyen la falta de actividad física, lo que exacerba condiciones como la hipertensión, problemas cardíacos y musculoesqueléticos. Esto contribuye a un mayor consumo de medicamentos para el manejo del dolor, control de la presión arterial y manejo del insomnio o la ansiedad. La polifarmacia es un desafío común en este grupo, ya que muchos de estos pacientes toman múltiples medicamentos al mismo tiempo, lo que aumenta el riesgo de interacciones farmacológicas y efectos adversos. En este sentido, medicamentos como **Losartán**, **Paracetamol**, y **Zopiclona** son necesarios, pero deben ser manejados con precaución para evitar complicaciones adicionales.

Gráfico 5.2: “Los 10 fármacos más consumidos en Chile”.



Fuente: Statista Research Department, 12 sept 2024

Tal y como se puede observar en la imagen, en el año 2021, el Paracetamol fue el medicamento más consumido en Chile con más de 6,3 millones de unidades vendidas, seguido de Losartán (4,7 millones) e Ibuprofeno (4,7 millones). Otros medicamentos destacados incluyen Ketorolaco (4,3 millones), un anti jaquecoso de marca (4 millones), Zopiclona para el insomnio (2,8 millones), Ácido Mefenámico (2,8 millones), Naproxeno y Ketoprofeno (ambos con 2,7 millones), y Clorfenamina para alergias (2,4 millones). Esto refleja una alta demanda de analgésicos, antihipertensivos, y tratamientos para condiciones crónicas y alérgicas (Medicamentos más vendidos Chile, 2021).

A partir de la información anterior, sobre los medicamentos más consumidos en Chile y el perfil de salud de las personas con movilidad reducida, como adultos mayores y personas con enfermedades crónicas, es posible hacer una proyección aproximada sobre qué medicamentos serían esenciales para entregar a través de drones en la comuna de Peñalolén.

5.3.2 Estimación de Consumo en Peñalolén

Peñalolén tiene una población cercana a los 272.913 habitantes, de los cuales un porcentaje significativo corresponde a adultos mayores y personas con condiciones de movilidad reducida (Ministerio de Salud de Chile [MINSAL], 2020). Considerando que los medicamentos más consumidos a nivel nacional también reflejan la tendencia en las comunas urbanas y semiurbanas como Peñalolén, se pueden destacar los siguientes medicamentos:

1. Paracetamol:

- Consumo nacional: 6,3 millones de unidades.
- Peñalolén representa aproximadamente el 1,4% de la población nacional (272,913 / 19,458,310).
- Proyección de consumo en Peñalolén: 88,000 unidades anuales.

2. Losartán:

- Consumo nacional: 4,7 millones de unidades.
- Proyección de consumo en Peñalolén: 66,000 unidades anuales.

3. Ibuprofeno y Ketorolaco:

- Estimamos que la demanda combinada sigue siendo relevante.
- Proyección de consumo en Peñalolén: 60,000 unidades combinadas anualmente.

4. Zopiclona:

- Especialmente importante para personas mayores con insomnio.
- Proyección de consumo en Peñalolén: 25,000 unidades anuales.

5. Clorfenamina (medicamentos para alergias):

- Estimación ajustada por la estacionalidad.
- Proyección de consumo en Peñalolén: 30,000 unidades anuales.

5.3.3 Medicamento Esencial para Entregar por Drones

Para determinar cuáles son los más adecuados para entrega por drones, es importante considerar no solo la demanda, sino también el peso, volumen, y urgencia de uso en el contexto de la población de Peñalolén:

1. Paracetamol:

- Peso y volumen: Bajo. Tabletas pequeñas y de fácil transporte.
- Demanda alta y es utilizado para el manejo del dolor y fiebre, lo que lo hace prioritario.
- Prioridad alta para entrega por drones, ya que puede cubrir necesidades básicas de salud

2. Losartán:

- Peso y volumen: Similar al Paracetamol. Tabletas pequeñas y fáciles de manejar.
- Demanda alta, especialmente en adultos mayores con movilidad reducida.
- Prioridad alta, ya que es esencial para el control de la hipertensión.

3. Ibuprofeno y Ketorolaco:

- Peso y volumen: Tabletas y cápsulas pequeñas, fáciles de transportar.
- Demanda moderada-alta y es esencial para el manejo del dolor crónico e inflamaciones.
- Prioridad media-alta, útil en casos de dolor o inflamación aguda.

4. Zopiclona:

- Peso y volumen: Bajo, ya que se trata de tabletas. Fácil de transportar.
- Demanda más baja pero importante para adultos mayores con problemas de sueño.
- Prioridad media, ya que, si bien no es de emergencia, es relevante para la calidad de vida de personas con insomnio.

5. Clorfenamina:

- Peso y volumen: Bajo, comprimidos pequeños.
- Demanda estacional, siendo más importante en ciertas épocas del año.
- Prioridad baja, ya que su demanda fluctúa según la estación.

Los medicamentos esenciales para entregar por drones serían **Paracetamol, Losartán, e Ibuprofeno** debido a su alta demanda, bajo peso, volumen, y su importancia en el manejo de dolencias comunes en personas con movilidad reducida y adultos mayores (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2021). Estos medicamentos son de fácil transporte y esenciales para mantener el bienestar de gran parte de la población vulnerable de Peñalolén (Leiva et al., 2020). A continuación, se presenta una tabla con la proyección de consumo, el nivel de prioridad para la entrega mediante drones y las estimaciones de peso y volumen por unidad de cada medicamento en la comuna de Peñalolén.

Tabla 5.1: “Proyección de consumo por unidad de medicamento en Peñalolén”.

Medicamento	Proyección de Consumo Anual (unidades)	Prioridad para Entrega por Drones	Peso por Caja (g)	Volumen por caja (cm ³)
Paracetamol	88.000	Alta	50	50
Losartán	66.000	Alta	70	60
Ibuprofeno	60.000 (combinado)	Media-Alta	60	55
Ketorolaco	60.000 (combinado)	Media-Alta	40	35
Zopiclona	25.000	Medios de comunicación	50	50
Clorfenamina	30.000	Baja	50	50

Fuente: Elaboración propia – Año 2024

5.4 Identificar los puntos claves para la selección del macro sector objetivo.

El análisis de los puntos clave de demanda de medicamentos en el macro sector objetivo de Peñalolén se desarrollará con base en los factores demográficos y de accesibilidad a los servicios de salud. Teniendo en cuenta que la proyección para el año 2024 indica una población de 33.125 adultos mayores, que representan el 12,1% de la población total, este grupo será el foco principal, ya que es uno de los más vulnerables y con mayor demanda de medicamentos esenciales, como Paracetamol, Losartán e Ibuprofeno.

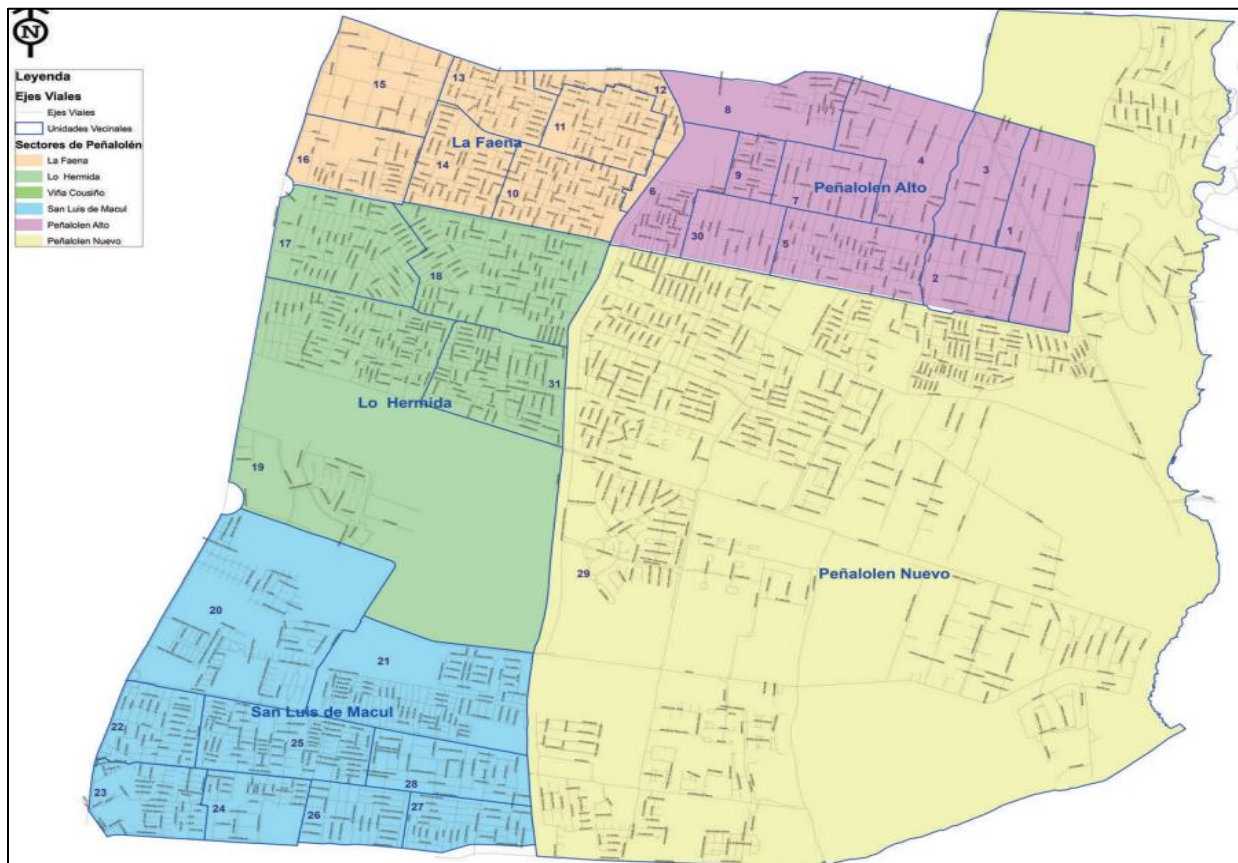
En base a lo anterior, se analizó la distribución poblacional de los macro sectores de Peñalolén. Para ello, se emplearon datos oficiales del **Censo 2024 (INE, 2024)** y la **base territorial del Plan Maestro de Integración Social**, descartando estimaciones indirectas. La información ajustada se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.2: “Población Real del Macro sector Peñalolén Nuevo”

Macrosector	Población estimada	Dato real según fuente	Observaciones clave
Peñalolén Alto	54,583	47,800 (BCN 2024)	Alta densidad, envejecimiento poblacional
La Faena	27,291	21,400 (BCN 2024)	Alta vulnerabilidad socioeconómica
Lo Hermida	68,228	63,100 (BCN 2024)	Alta densidad, déficit de vivienda
San Luis de Macul	81,874	76,500 (BCN 2024)	Alta densidad, acceso limitado a salud
Peñalolén Nuevo	40,937	34,200 (BCN 2024)	Mediana densidad, numerosas familias, capacidad adquisitiva

Fuente: INE-Censo 2024; SINIM-IVE 2024

Figura 5.2: “Zona territorial dividida por sectores de la comuna de Peñalolén”



Fuente: SECPLA

Tal y como se puede observar en la figura del mapa, se identifican cinco macro sectores: Peñalolén Alto, La Faena, Lo Hermida, San Luis de Macul, y Peñalolén Nuevo.

En base a los datos oficiales del Censo 2024 y fuentes complementarias (SINIM-IVE 2024; capa SIG de farmacias y centros de salud, Municipalidad de Peñalolén, licencia CC-BY 4.0), se establece la siguiente información para Peñalolén Nuevo:

- **Población total:** 34,200 habitantes
- **Adultos mayores (≥ 60 años):** 2,890 personas (8,4 %)
- **Índice de Vulnerabilidad Socioeconómica (IVE-SINIM):** 0,54 (rango medio-alto)
- **Distancia media a farmacias:** 1,180 m; el 48 % de la superficie queda a más de 1 km de una farmacia.
- **Acceso a centros de salud:** un CESFAM y un SAPU en el límite norte; el 62 % de la superficie queda fuera del radio de 1 km.

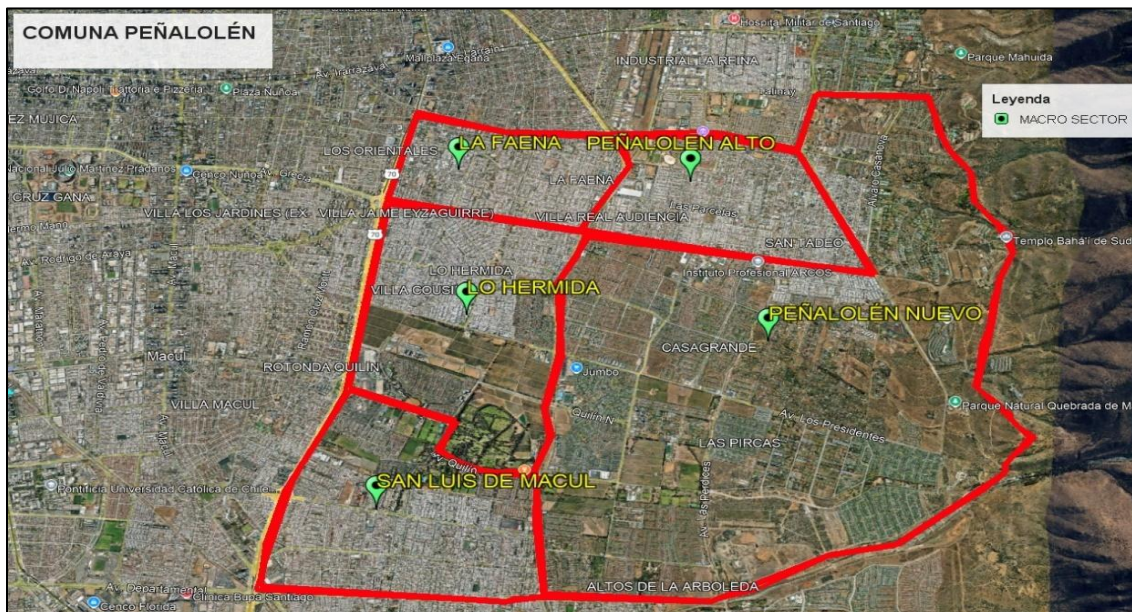
La selección del macro sector Peñalolén Nuevo como área de evaluación se justifica principalmente por su relevancia analítica y operativa, y no únicamente por el tamaño de su superficie. Aunque Lo Hermida y San Luis de Macul presentan valores absolutos superiores de adultos mayores, Peñalolén Nuevo ofrece ventajas que facilitan el desarrollo del estudio:

1. **Gradiente urbano-rural:** presenta la transición más marcada entre tejido consolidado y áreas peri-urbanas, permitiendo modelar la demanda en sectores de baja densidad y alta dependencia del transporte.
2. **Carencias de servicios:** el 48 % de la superficie carece de farmacia en menos de 1 km, cifra superior al promedio comunal (35 %), lo que lo hace relevante para evaluar la accesibilidad a medicamentos.
3. **Reproducibilidad:** su delimitación coincide exactamente con el sector censal, simplificando la replicación del estudio con datos abiertos.

La superficie extensa se menciona como atributo operativo, facilita la instalación de un centro de operaciones y la futura escalabilidad de cualquier intervención piloto, pero no se utiliza como criterio de selección.

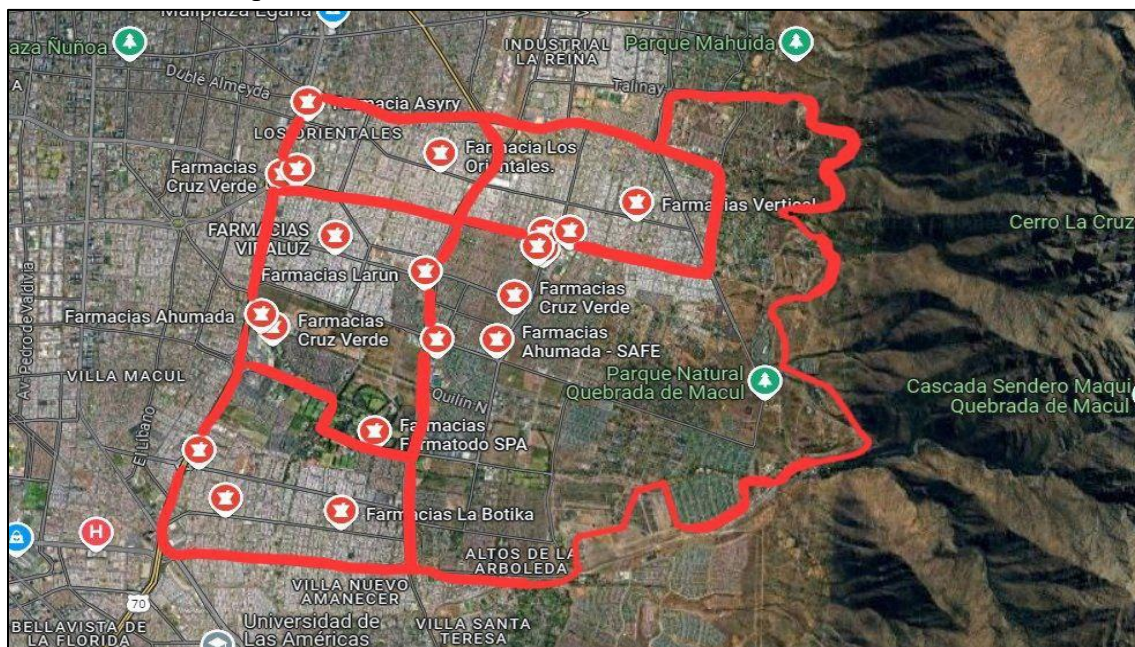
Por consiguiente, es necesario evaluar la geografía de la comuna de **Peñalolén Nuevo** y las áreas más alejadas de las farmacias o centros de salud. Para ello, se examinarán las siguientes figuras.

Figura 5.3: “Zona Territorial de la comuna de Peñalolén con delimitación por sector”



Fuente: Google Earth – 2024

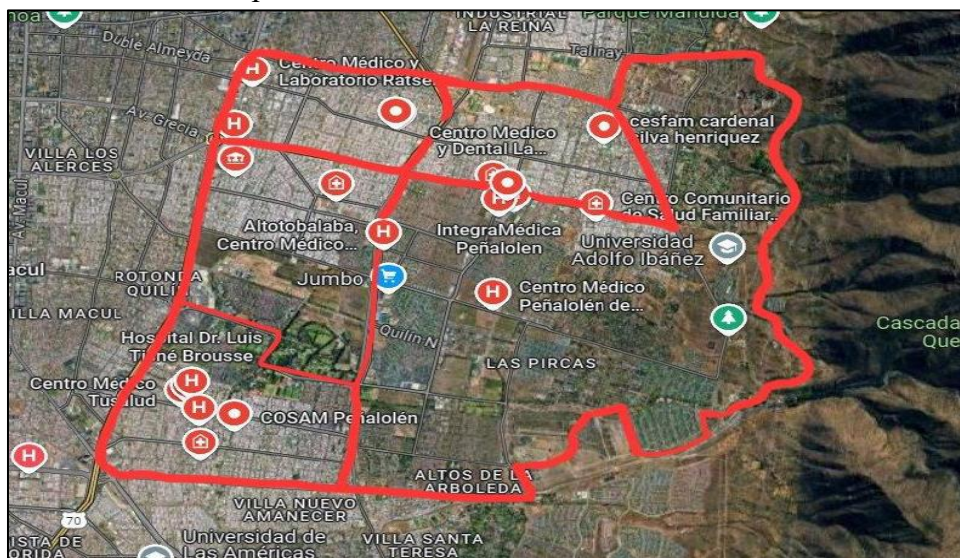
Figura 5.4: “Farmacias presentes en cada macro sector de la comuna de Peñalolén”



Fuente: Google Maps – 2024

En la imagen anterior se observa una escasez de servicios de salud en la zona sureste, lo que sugiere que los residentes de estas áreas enfrentan dificultades para acceder a medicamentos, priorizando a aquellos con enfermedades crónicas y personas con movilidad reducida, quienes dependen del acceso oportuno a tratamientos farmacológicos.

Figura 5.5: “Centros de Salud presentes en cada macro sector de la comuna de Peñalolén”



Fuente: Google Maps - 2024

En base a lo observado en las figuras 5.4 y 5.5, se puede concluir que el sector de Peñalolén Nuevo, que incluye áreas como Las Pircas y Altos de La Arboleda, así como la zona cercana al macro sector Peñalolén Alto, presentan importantes barreras de acceso a servicios de salud. **Esta zona se caracteriza por una mediana urbanización y una considerable distancia a las principales instalaciones de salud**, lo que dificulta el acceso de los residentes a medicamentos y atención médica.

5.5 Evaluar la infraestructura y condiciones geográficas del macro sector

5.5.1 Evaluación preliminar de la zona para la ubicación de un centro de operaciones de drones.

Para evaluar la infraestructura y condiciones geográficas de los puntos del macro sector elegido, es necesario realizar un análisis detallado de las siguientes imágenes satelitales de alta resolución para identificar características topográficas, vegetación y posibles obstáculos.

Figura 5.6: “Macro sector Peñalolén Nuevo”



Fuente: Google Earth Pro – 2024

A partir de la imagen satelital proporcionada por Google Earth Pro, se observa que el sector tiene un conjunto de casas disperso, con ello es posible llevar a cabo una evaluación preliminar de la zona para determinar la idoneidad de dónde ubicar el punto exacto para la instalación del centro de operaciones de drones. Los principales hallazgos son los siguientes:

- Topografía: La zona presenta un relieve predominantemente plano, lo cual favorece las operaciones aéreas.
- Infraestructura: La zona cuenta con una red vial relativamente desarrollada, lo que facilita el acceso al área.

En base a la figura 5.6, se puede observar que la zona delimitada puede ser identificada como una zona prioritaria para la evaluación debido a las siguientes características:

1. Alta proporción de extensión territorial:
 - Esta zona abarca una parte significativa de la comuna, lo que facilita la cobertura de servicios en áreas amplias.
2. Gran cantidad de espacios verdes:
 - La presencia de numerosos parques, áreas despejadas y terrenos abiertos puede ser un factor que complejice el acceso rápido y oportuno a medicamentos y servicios básicos para grupos vulnerables, como:
 - Adultos mayores: La población de personas mayores de 60 años en el macrosector asciende a 2,890 personas
 - Personas con discapacidad: Se estima que aproximadamente 5,780 personas en Peñalolén Nuevo podrían tener algún tipo de discapacidad.
3. Necesidad específica:
 - Estas características hacen de Peñalolén Nuevo un sector ideal para implementar y soluciones logísticas, como la distribución de medicamentos mediante tecnología de drones, para facilitar el acceso a estos recursos en comunidades vulnerables.

Ventajas geográficas y logísticas observadas:

A partir de la delimitación de la zona en la imagen, se destacan las siguientes ventajas para establecer un recorrido operativo en Peñalolén Nuevo:

- Terreno relativamente plano:
 - Este factor facilita tanto las operaciones de despegue y aterrizaje de drones como el diseño de recorridos eficientes.
- Área despejada:
 - La zona seleccionada presenta buena visibilidad y está libre de obstáculos significativos, como edificios altos, torres o infraestructura densa.
- Cercanía a vías de acceso:
 - La ubicación permite una conexión rápida con el centro de operaciones, mejorando los tiempos de respuesta para las entregas.

El punto azul etiquetado como "**PUNTO INTERMEDIO**" se plantea como una opción para la instalación del centro de operaciones de drones, debido a su lugar de ubicación, el cual es el más razonable en cuanto a distancia, para poder llegar al noroeste y suroeste del macro sector de Peñalolén Nuevo, dicho centro estará destinado a la recarga de drones, el almacenamiento de medicamentos y el soporte técnico durante las operaciones.

5.6 Estimación de Población Objetivo de Peñalolén Nuevo

Para estimar cuántas personas adultas mayores y cuántas personas con alguna discapacidad viven en el sector de Peñalolén Nuevo, se utilizan los datos oficiales del Censo 2024 y la proporción de la población con características específicas en la comuna.

1. Datos base de la comuna de Peñalolén

- Población total: 272,913 personas
- Adultos mayores (≥ 60 años): 33,125 personas
- Personas con discapacidad: 46,122 personas

2. Porcentajes en la comuna:

- Porcentaje de adultos mayores: $33,125 / 272,913 * 100 \approx 12,14\%$
- Porcentaje de personas con discapacidad: $46,122 / 272,913 * 100 \approx 16,91\%$

3. Población del macro sector Peñalolén Nuevo

- Población total: 34,200 habitantes
- Adultos mayores: 2,890 personas (**8,4 % del macro sector**)
- Índice de Vulnerabilidad Socioeconómica (IVE-SINIM): 0,54 (rango medio-alto)
- Distancia media a farmacias: 1,180 m; el 48 % de la superficie queda a más de 1 km de una farmacia
- Acceso a centros de salud: un CESFAM y un SAPU en el límite norte; el 62 % de la superficie queda fuera del radio de 1 km.

En el sector de Peñalolén Nuevo, se cuenta con 2,890 adultos mayores (8,4 % del total). Para la población con discapacidad, se aplica la proporción comunal aproximada (16,91 %), lo que permite estimar:

$$***Personas con discapacidad en Peñalolén Nuevo = 34,200 \times 0,1691 \approx 5,777 personas***$$

Por lo tanto, la población objetivo en Peñalolén Nuevo asciende a aproximadamente:

- Adultos mayores: 2,890 personas
- Personas con alguna discapacidad: 5,777 personas
- Total, población objetivo: 8,667 personas

De esta población objetivo, se seleccionará una muestra de 250 personas, quienes están inscritas dentro del programa “*La Salud hasta tu Casa*”, perteneciente a la Farmacia Comunitaria de Peñalolén. Esta muestra corresponde a un grupo representativo de la población más vulnerable del macro sector, considerando adultos mayores y personas con alguna discapacidad. La elección de esta muestra permitirá evaluar la distribución domiciliaria de medicamentos, optimizar recursos y asegurar que los beneficios lleguen a quienes más los necesitan. Asimismo, una muestra controlada facilita la recolección de datos, el seguimiento del impacto y la futura escalabilidad del programa a otros sectores.

5.7 Plan de entregas y su realización

5.7.1 Estudio de capacidad de entregas

Para determinar la capacidad de entregas, se deberán recopilar todos los datos mencionados anteriormente, entre ellos están:

- Velocidad media de entrega del dron: **58 km/h (0,967 km/min)**
- Carga máxima del dron: **2.7 kg**
- Peso promedio por entrega: **0.8 kg**
- Autonomía en min del dron: **43 minutos**
- Distancia Promedio por entrega en Peñalolén Nuevo (con carga, ida y vuelta): **3,0 km**

Ahora para calcular cuánto tardará un dron en realizar una entrega promedio se tiene:

Ecuación 1: Fórmula básica de la cinemática para el cálculo del tiempo.

$$Velocidad = \frac{Distancia}{Tiempo}$$

Despejando de manera correcta el tiempo de la ecuación, se obtiene:

$$Tiempo = \frac{Distancia}{Velocidad}$$

$$Tiempo de Entrega = \frac{3,0 \text{ km}}{58 \text{ km/h}}$$

Para poder resolver de manera adecuada, se deberá realizar la conversión de km/h a km/min, obteniendo el siguiente resultado:

$$Velocidad \text{ en } \frac{\text{km}}{\text{min}} = \frac{58 \text{ km/h}}{60 \text{ min/h}} \text{ velocidad en km/min} = 0,966 \text{ km/min}$$

Finalmente, lo que quedaría como:

$$Tiempo de entrega = \frac{3,0 \text{ km}}{0,967 \text{ km/min}}$$

$$Tiempo de entrega = 3,1 \text{ min}$$

Por lo tanto, cada entrega tardará un promedio de 3.1 minutos. Ahora para poder determinar la cantidad de pedidos o entregas que se podrían realizar con el dron, se tiene:

Ecuación 2: Cálculo de la capacidad Operativa

$$Número \text{ de entregas} = \frac{Autonomía \text{ del dron}}{Tiempo \text{ que tarda en realizar una entrega}}$$

Reemplazando la ecuación con los datos obtenidos anteriormente, se tiene:

$$Número \text{ de entregas} = \frac{43 \text{ min}}{3,1 \text{ min}}$$

$$Número \text{ de entregas} = 14$$

Realizar 14 entregas en un plazo de 60 minutos se considera un resultado bastante positivo, especialmente en un sector como Peñalolén Nuevo según los datos proporcionados por la literatura investigada. Pero en términos reales o en base a una simulación, estos podrían cambiar.

5.7.2 Simulación y análisis de recorridos de drones

Una vez obtenida la capacidad de entregas, en el siguiente apartado se desarrollará un estudio de simulación logística de entrega con drones, específicamente una planificación de recorridos y cálculo del tiempo total de operación considerando el trayecto y las maniobras de operación, con el objetivo de optimizar el proceso de entrega.

En primer lugar, el estudio realizó un cálculo preliminar basado en datos obtenidos de la literatura, con el fin de estimar la capacidad de entregas de un dron bajo condiciones promedio. Posteriormente, se procederá a desarrollar una simulación del escenario específico en cuestión, lo que permitirá refinar los resultados iniciales.

En la simulación se definirán 32 puntos de entrega, porque esta cantidad permitirá representar de mejor manera cómo se distribuye la demanda en el territorio. Cada punto funcionará como una referencia del lugar donde se concentran los usuarios, lo que servirá para planificar las rutas del dron de forma más realista. Con este número se busca reflejar la dispersión geográfica de los destinatarios y, al mismo tiempo, mantener el escenario en una escala manejable. Además, este número facilita dividir la demanda total en subconjuntos manejables, lo que contribuye a comprobar si el dron puede cumplir con el objetivo de alcanzar 16 entregas por hora y, en consecuencia, cubrir de forma eficiente la necesidad de 250 personas.

En las siguientes tablas y figuras se presentan estos cálculos y su respectivo análisis, con el objetivo de verificar y contrastar los resultados obtenidos.

Figura 5.7: “Los 32 puntos de entrega con los dos drones”



Fuente: Google Earth Pro – 2024

Los puntos de entrega presentados en la figura 5.7. son 32, dado que primero se realizará un cálculo manual para poder determinar exactamente cuanto tiempo total de vuelo se demoraría el Dron, suponiendo que son 2 drones los que realizarán los vuelos individuales en simultaneo.

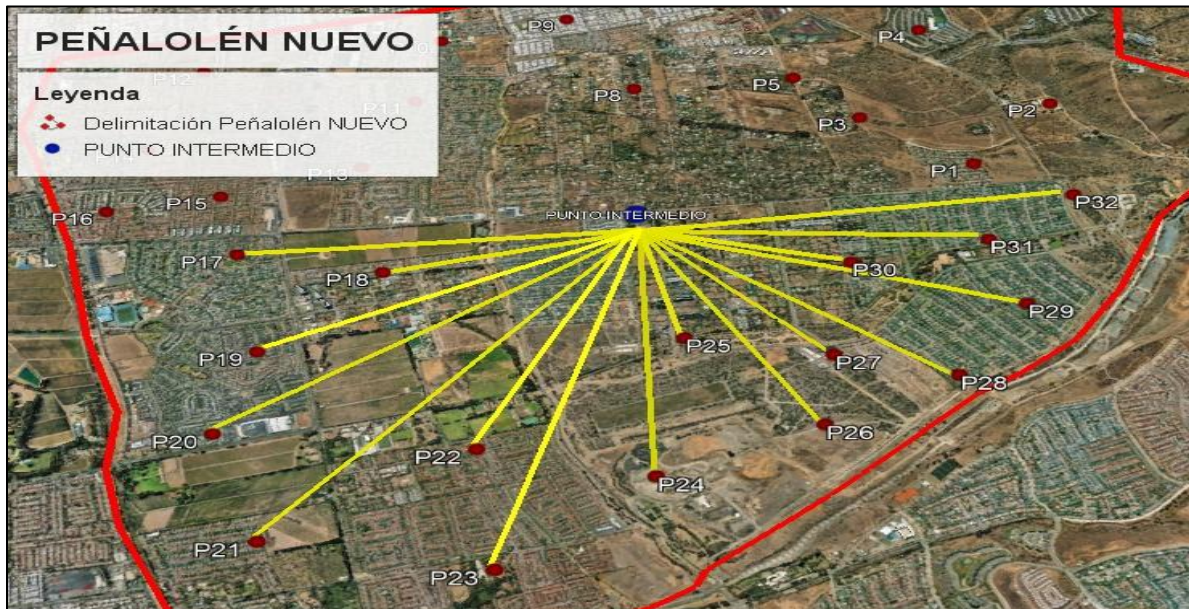
Figura 5.8: “Recorrido del PRIMER DRON”



Fuente: Google Earth Pro – 2024

En cada punto establecido tanto para la figura 5.7 como para la figura 5.8, existe un rango de distancia de por lo menos 500 metros, para que no existan complicaciones a la hora del vuelo.

Figura 5.9: “Recorrido del SEGUNDO DRON”



Fuente: Google Earth Pro – 2024

Tal y como se puede observar en la figura 5.8 y 5.9, existen 32 vuelos individuales, 16 por cada uno de los drones, el cual se puede apreciar de color Amarillo, en total realizarían 32 entregas.

La distancia de 500 m entre puntos se adoptó como criterio operativo inicial para facilitar el cálculo manual y cumplir con la separación mínima VLOS de la DGAC; se reconoce que no refleja la geografía real ni obstáculos específicos, por lo que los tiempos finales se validarán el modelo de optimización del capítulo 5.8.

Se asume, ausencia de lluvia o nieve; factores meteorológicos adversos quedan fuera del alcance de esta simulación.

Luego, se calculó el tiempo recorrido por cada dron, adicionando a cada uno de los recorridos o repartos una **holgura de tiempo de 21 segundos**, los cuales son **0,35 min**, y será donde el dron desciende hasta una altura prudente y hace entrega de estos medicamentos.

Finalmente, se tienen las siguientes tablas:

Tabla 5.3: “Tiempo total de entrega con el Dron 1”

DRON N°1					
PUNTOS / CASAS	Distancia (m)	Distancia Total (m)	Distancia Total (km)	Holgura de tiempo de entrega	Tiempo total de vuelo (min)
1	1588	3176	3,2	0,35	3,6
2	1200	2400	2,4	0,35	2,8
3	1271	2542	2,5	0,35	2,9
4	2400	4800	4,8	0,35	5,3
5	2011	4022	4,0	0,35	4,5
6	955	1910	1,9	0,35	2,3
7	1479	2958	3,0	0,35	3,3
8	1957	3914	3,9	0,35	4,4
9	1574	3148	3,1	0,35	3,6
10	1012	2024	2,0	0,35	2,4
11	1660	3320	3,3	0,35	3,8
12	989	1978	2,0	0,35	2,3
13	1771	3542	3,5	0,35	4,0
14	1985	3970	4,0	0,35	4,4
15	1331	2662	2,7	0,35	3,0
16	2034	4068	4,1	0,35	4,5
TOTAL	25217	50434	50,4	5,600	57,1

Fuente: Elaboración Propia – 2024

En base a los cálculos realizados para el Dron N°1, se puede determinar que el tiempo total de vuelo para el primer Dron sería de 57,1 min.

Tabla 5.4: “Tiempo total de entrega con el Dron 2”

DRON N°2					
PUNTOS/CASAS	Distancia (m)	Total distancia (m)	Distancia Total (km)	Holgura de tiempo de entrega	Tiempo total de vuelo (min)
17	1205	2410	2,4	0,35	2,8
18	1697	3394	3,4	0,35	3,8
19	2104	4208	4,2	0,35	4,7
20	1788	3576	3,6	0,35	4,0
21	2224	4448	4,4	0,35	4,9
22	655	1310	1,3	0,35	1,7
23	1763	3526	3,5	0,35	4,0
24	874	1748	1,7	0,35	2,1
25	660	1320	1,3	0,35	1,7
26	1382	2764	2,8	0,35	3,1
27	1777	3554	3,6	0,35	4,0
28	1941	3882	3,9	0,35	4,3
29	1008	2016	2,0	0,35	2,4
30	1584	3168	3,2	0,35	3,6
31	1867	3734	3,7	0,35	4,2
32	1130	2260	2,3	0,35	2,6
TOTAL	23659	47318	47,3	5,600	53,8

Fuente: Elaboración Propia - 2024

En base a los cálculos realizados para el Dron N° 2, se puede determinar que el tiempo total de vuelo para el segundo dron sería de 53,8 min.

Para estimar la **cantidad de baterías necesarias**, se analizará el tramo más largo identificado en el Dron N° 1, aproximadamente 50 km según se muestra en la Tabla 5.3. Este cálculo considerará la autonomía del DJI Matrice 350 RTK y se ajustará de acuerdo con las características específicas del vuelo, como la carga transportada, la velocidad promedio y las maniobras requeridas durante la operación.

1. Distancia por batería:

- Sin carga adicional, el dron tiene una autonomía de vuelo de 33 km aprox. por batería.
- Con una carga de 0,8 kg, su autonomía se reduce a 25,8 km aproximadamente por batería.

2. Distancia total:

- El tramo es de 55 km.

3. Cálculo del número de baterías:

- Con carga de 0,8 kg:
 $50 \text{ km} \div 25,8 \text{ km por batería} \approx 1,9$ baterías. Redondeando, serán necesarias 2 baterías para completar el tramo de 50 km con carga.

- Sin carga:
 $50 \text{ km} \div 33 \text{ km por batería} \approx 1,5$ baterías. Redondeando, serán necesarias 2 baterías para completar el tramo sin carga.

En resumen, sería lo siguiente:

- Con carga (0,8 kg): 2 baterías.

Según las Tablas 5.3 y 5.4, se estima que utilizar 2 drones para la entrega a 32 beneficiarios en un tiempo máximo de 1 hora (60 min) sería suficiente para cubrir dicha operación. Cada dron requeriría 2 baterías, considerando que el DJI Matrice 350 RTK recorre aproximadamente 25,8 km por batería.

Basándose en estos datos, es posible proyectar la operación a la muestra inicial de 250 personas, suponiendo que cada dron pueda realizar 16 entregas en menos de 60 minutos y que los pilotos trabajen 8 horas diarias.

Supuestos:

- Total, de entregas necesarias: 250 entregas.
- Cantidad de batería por drones disponibles: 2 baterías
- Entregas por dron por día: Cada dron puede realizar 16 entregas dentro de los 60 min.
- Horas de trabajo de los pilotos: 8 horas de trabajo diarias por piloto (5 días x semana).

Cálculos:

Total, de entregas que puede realizar un dron en 8 horas: Si un dron puede hacer 16 entregas en menos de 1 hora, en 8 horas podrá realizar:

$$16 \text{ entregas /h} * 8 \text{ horas} = 128 \text{ entregas por día}$$

Por ende, en total los 2 drones que trabajarían en simultáneo realizarían:

$$128 \text{ entregas por día} * 2 \text{ drones trabajando} = 256 \text{ entregas por día}$$

En base al cálculo realizado, se asume que, si pueden realizar 250 entregas al día, lo que representa el objetivo principal, al cubrir las 250 entregas diarias que actualmente realiza el programa ya instaurado en la comuna, incluso **se lograría un excedente de 6 entregas más**. Esto bajo la condición de que cada dron realice 16 entregas por hora y los pilotos trabajen 8 horas diarias, lo que al mes significa 5.120 entregas de medicamentos.

Sin embargo, si se implementara un sistema con 5 drones, podrían alcanzarse hasta 12.800 entregas en un periodo de 20 días hábiles, lo que permitiría ampliar significativamente la cobertura y eficiencia del programa, cubriendo así finalmente la población objetivo de Peñalolén Nuevo. Esta proyección refuerza la viabilidad del modelo y su escalabilidad en el contexto urbano semidenso, como es el caso de la comuna de Peñalolén.

5.7.3 Supuestos operativos actualizados y validados

Los tiempos de entrega que se presentan a continuación se basan en tres estudios experimentales sobre operaciones de última milla con drones, los cuales permiten validar los supuestos utilizados en este análisis para estimar la duración de cada entrega.

- **López (2024) – Universidad de Zaragoza:** para un dron con carga de 2 kg y velocidad de 55 km/h, se reporta un tiempo de 2,7 minutos para cubrir 3 km ida-vuelta sin considerar carga adicional. Esto valida el supuesto de velocidad de crucero y tiempo de vuelo base por entrega.
- **UNAD Colombia (2023) – Proyecto Shipping Drone:** en trayectos de 3 km a 55 km/h se midió un tiempo de 2,7 minutos de vuelo más 0,35 minutos (~21 s) de holgura para maniobras de descenso y entrega, resultando en un total de 3,05 min por envío. Esto valida el tiempo extra requerido para las maniobras de entrega, aparte del vuelo en línea recta
- **Torabbeigi et al. (2020) – Universidad de Zaragoza:** indica que, para entregas suburbanas con despegue y aterrizaje en puntos pre-autorizados, 21 segundos son suficientes para cubrir el ciclo de “descenso + liberación de carga + ascenso” cuando se utiliza la técnica de entrega desde hover a 5 m de altura. Esto valida el supuesto de que no es necesario un aterrizaje completo para realizar la entrega, reduciendo así el tiempo total por envío.

5.8 Modelo de Optimización Aplicado a la Asignación de Drones

El modelo de asignación de drones es un enfoque utilizado para distribuir de manera eficiente y efectiva un conjunto de drones a tareas específicas dentro de un conjunto determinado de operaciones. En el contexto de este proyecto, se implementará este modelo como parte de la metodología, utilizando el solver CPLEX y el lenguaje de modelación OPL. Esto permitirá analizar los cálculos realizados manualmente, asegurando que las proyecciones de entregas y distribución de drones sean óptimas. Al aplicar este modelo, se espera comprobar la metodología propuesta. Esto también permitirá asegurar que la planificación desarrollada manualmente responde a criterios de eficiencia en el uso de recursos, dentro del contexto del sector de Peñalolén Nuevo.

El modelo descrito es una aproximación racional al problema real de distribución con drones en Peñalolén Nuevo. A fin de mantenerlo tratable, se adoptaron los siguientes supuestos simplificadores:

- Trayectos ida-vuelta directos desde un único depósito; se omite la secuencia óptima entre puntos (VRP) y se trabaja con tiempos t_j agregados.
- Se ignoran factores dinámicos como la lluvia, nieve o variabilidad en la altitud de vuelo.
- Se considera un tiempo de servicio fijo (incluido en t_j) que no distingue entre tipos de terreno ni obstáculos.
- Se asume flota homogénea (misma velocidad, autonomía y capacidad para todos los drones).

En consecuencia, el modelo se desarrolla de la siguiente manera:

Se asume que se tiene un conjunto de drones K , y se denota por N al conjunto de puntos de entrega. El modelo considera un parámetro que son los tiempos de viaje t_j entre el depósito (centro de drones) y cada punto de entrega j , $j \in N$.

Las variables se definen como: $x_{ij} = 1$, si el dron i atiende al punto j y $x_{ij} = 0$ en caso contrario. El modelo siguiente encuentra el **mínimo tiempo total de la operación de entrega** (*Makespan*) sujeto a tres restricciones. La primera es que cada dron debe entregar a lo menos a un

punto, la segunda es que cada punto de entrega debe ser visitado una vez por un dron para todo $j \in N$, y la tercera es la que produce el *makespan*. La otra variable es el *makespan* w .

Modelo de Programación Lineal Entera 0 -1.

Conjuntos y parámetros

- K : conjunto de drones.
- N : conjunto de puntos de entrega.
- t_j : tiempo que toma a un dron atender el punto j (viaje + servicio, ida y vuelta desde el depósito).

$$(1) \sum_{j \in N} x_{ij} \geq 1, \forall i \in K \quad (\text{cada dron atiende al menos un punto})$$

$$(2) \sum_{i \in K} x_{ij} = 1, \forall j \in N \quad (\text{cada punto es atendido exactamente una vez})$$

$$(3) \sum_{j \in N} t_j x_{ij} \leq w, \forall i \in K \quad (\text{definición del makespan})$$

$$w \geq 0, \quad x_{ij} \in \{0,1\}.$$

Aplicando este modelo con los datos de los tiempos de viaje t , considerando dos drones y 32 puntos de entrega, se obtiene que el mínimo tiempo total de la operación de entrega (*makespan*) tiene el valor de **56.1 minutos**.

El modelo también entrega los puntos de entrega de cada dron, que son los siguientes:

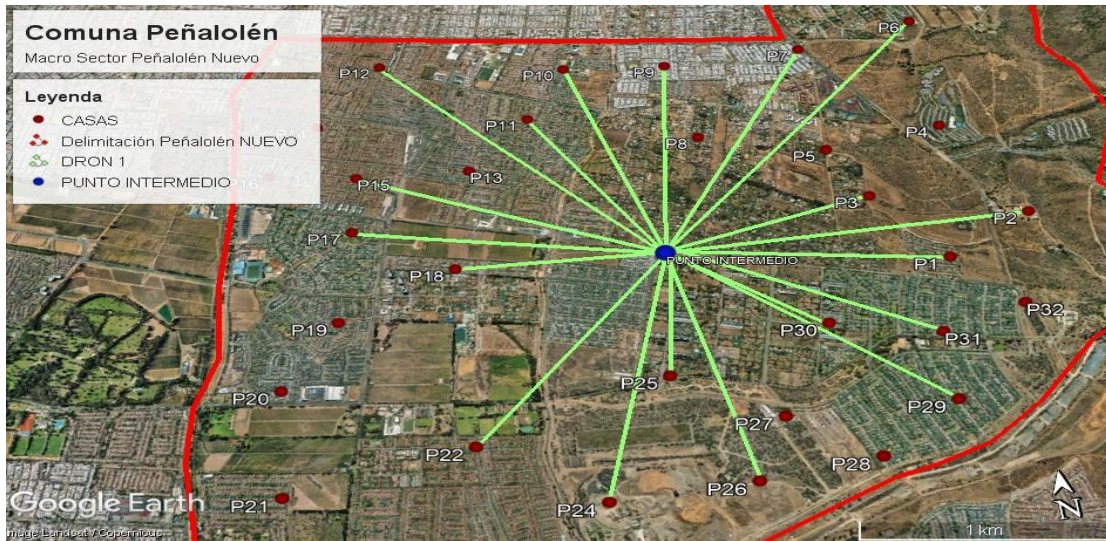
Dron1: 1-2-3-6-7-9-10-11-12-15-17-18-22-24-25-26-29-30-31.

Dron2: 4-5-8-13-14-16-19-20-21-23-27-28-32.

Se puede notar entonces que el modelo entrega una solución óptima y que es mejor que la obtenida manualmente porque **minimiza el makespan** al reasignar y secuenciar los puntos según sus tiempos efectivos de viaje; la mejora no proviene de repartir una cantidad fija de puntos por dron, sino de equilibrar el tiempo del dron más exigido.

Aunque el cálculo manual no alcanzó la optimización del modelo matemático, sus resultados fueron cercanos y permitieron comprender la lógica del proceso de distribución. Por lo tanto, el modelo valida y perfecciona lo realizado, proporcionando un resultado óptimo que servirá como referencia central para el proyecto.

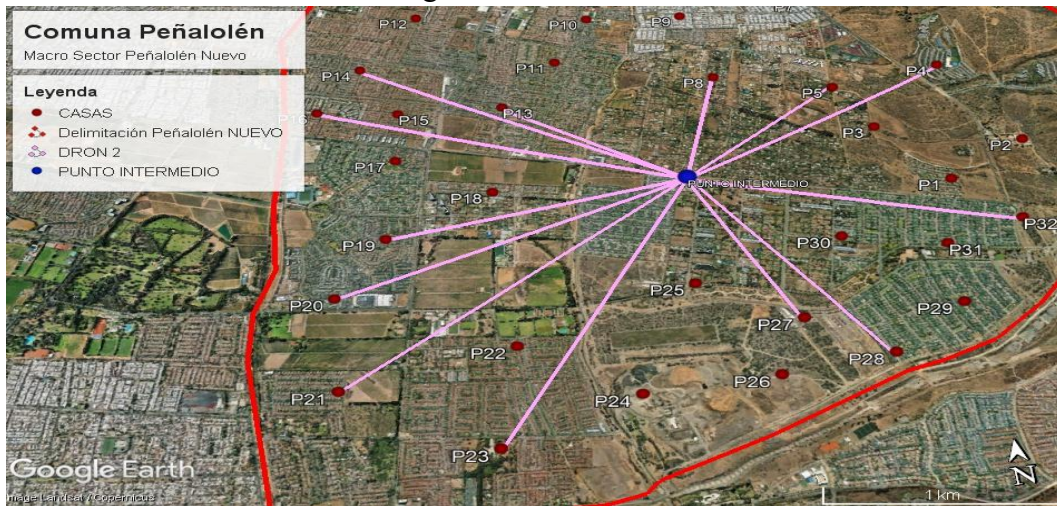
Figura 5.10: “Recorrido del DRON 1 según el Modelo”



Fuente: Google Earth Pro – 2025

En base a la figura anterior, se pueden observar los puntos de entrega asignados por el modelo y su secuenciación. Esta representación permite visualizar de manera ordenada el trayecto a seguir, identificando con claridad el orden de las entregas y la cobertura espacial de la operación.

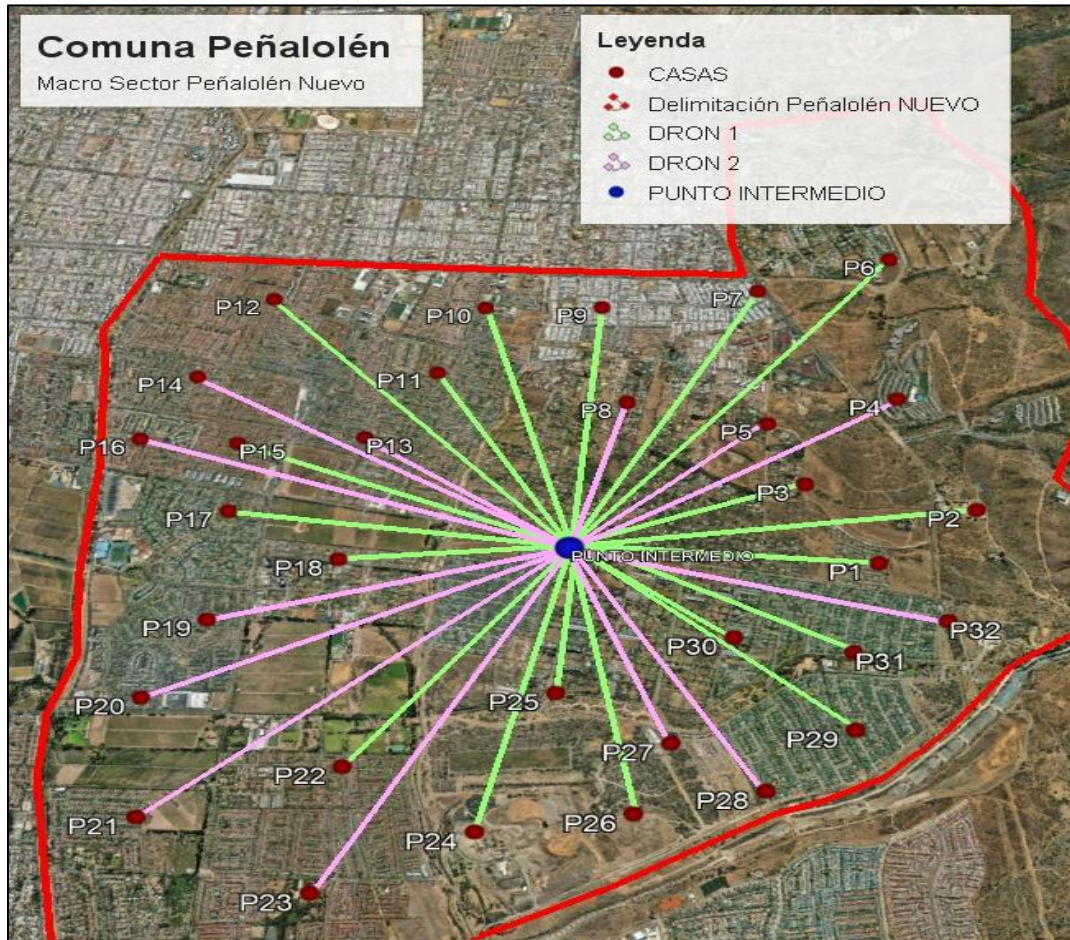
Figura 5.11: “Recorrido del DRON 2 según el Modelo”



Fuente: Google Earth Pro – 2025

Para el recorrido del Dron 2, se puede inferir que la carga de trabajo de este dron se encuentra balanceada en relación con el Dron 1, asegurando así una distribución más equitativa de las tareas y contribuyendo a la reducción del makespan.

Figura 5.12: “Recorrido de ambos Drones según el Modelo”



Fuente: Google Earth Pro – 2025

Las Figuras anteriores muestran de manera visual los recorridos asignados a cada dron según el modelo de optimización. Estas representaciones gráficas no solo complementan los resultados numéricos obtenidos, sino que también permiten visualizar de forma práctica el impacto del modelo en la eficiencia del sistema de distribución. Al analizar los recorridos, se confirma que el modelo no se limitó a repartir un número fijo de puntos, sino que realizó una asignación estratégica que equilibra los tiempos de vuelo, reduce el makespan y garantiza que ambos drones trabajen de manera coordinada.

5.9 Consideración de márgenes de error y simplificaciones del modelo

Si bien el modelo de optimización aplicado en la asignación de drones entrega resultados consistentes, es necesario reconocer que toda modelación matemática conlleva un margen de error debido a las simplificaciones realizadas. En este caso, los principales factores que pueden introducir variaciones en los resultados son:

- Suposición de autonomía y velocidad constantes, cuando en la práctica influyen variables como viento, altitud de vuelo o temperatura ambiental.
- Tiempo de servicio fijo por entrega (21 s), que puede extenderse en la realidad por factores humanos o de geografía urbana.
- Condiciones meteorológicas ideales (ausencia de lluvia o ráfagas de viento), que no siempre se cumplen.
- Homogeneidad de la flota y estado óptimo de las baterías, lo que en operaciones reales presenta variaciones.

Con base en literatura de operaciones logísticas con drones (López, 2024; Torabbeigi et al., 2020; UNAD, 2023), se adopta un margen de error del 5–10% para reflejar la incertidumbre en los cálculos. Esto se traduce en los siguientes ajustes:

a) Ajuste en el makespan (tiempo total de operación)

- Valor óptimo calculado por el modelo: 56,1 minutos.
- Con margen de error:
 - +5% = 58,9 minutos.
 - +10% = 61,7 minutos.

Por lo tanto, el tiempo real de operación puede fluctuar entre 56 y 62 minutos, lo que sigue siendo consistente con el límite operativo de 60 minutos, aunque introduce la posibilidad de pequeñas desviaciones.

b) Ajuste en la capacidad de entregas diarias

El modelo proyectó una capacidad de 256 entregas diarias (2 drones x 128 entregas/día). Considerando el margen de error:

- Reducción de 5% → 243 entregas/día.
- Reducción de 10% → 230 entregas/día.

Esto implica que, aunque el sistema sigue cumpliendo con el objetivo de 250 entregas diarias, en escenarios menos favorables podría requerir una ligera sobreasignación de recursos (por ejemplo, uso de una batería adicional o incremento en horas operativas de pilotos).

Este margen de error confirma que, si bien los resultados del modelo son robustos y proporcionan una estimación confiable del desempeño de la flota de drones, deben interpretarse como aproximaciones dentro de un rango operativo realista, y no como valores deterministas absolutos. En la práctica, factores externos como las condiciones meteorológicas, el estado de las baterías, variaciones en la velocidad de vuelo o el tiempo de servicio de cada entrega pueden generar pequeñas desviaciones respecto a los resultados proyectados. Por ejemplo, una reducción en la eficiencia de la operación podría requerir la utilización de una batería adicional o un incremento en las horas operativas de los pilotos, lo que impacta tanto en la logística diaria como en los costos asociados. Considerar este margen de error no solo aporta mayor realismo al análisis, sino que también fortalece la validez del estudio, ya que refleja la verdadera naturaleza de la planificación logística con drones: un sistema que, aunque altamente eficiente, está sujeto a variaciones inherentes a su entorno y a factores operativos.

5.10 Estudio Económico

Tal como se explicó previamente, la comuna actualmente realiza la entrega de medicamentos en la etapa final de distribución “última milla” mediante el uso de vehículos tipo furgón escolar, los cuales están destinados a atender a la población beneficiaria de Peñalolén. A través de entrevistas con la municipalidad, se logró obtener la siguiente información del programa “La Salud hasta tu Casa”, la cual forma parte de la Farmacia Comunitaria de Peñalolén:

- Utilizan 4 furgones en total, por lo que para la muestra seleccionada (Peñalolén Nuevo) utilizarían solo **2 furgones para realizar las entregas de medicamentos**.
- En la actualidad, la operación de los furgones se realiza durante jornadas de 8 horas al día, distribuidas de lunes a viernes, es decir un total de 21 días al mes. Para cada vehículo se requiere un equipo conformado por un conductor y un profesional del área de tecnología médica.

Con el objetivo de desarrollar un análisis económico para la innovación propuesta en comparación con el sistema actual, se lleva a cabo una evaluación detallada de los costos asociados a un mes de entrega de medicamentos en la zona de Peñalolén Nuevo. Esta elección se fundamenta en la recopilación de información sobre la cantidad de entregas y los plazos respectivos en dicho sector.

Se analizará en detalle los costos relacionados con la logística de distribución de medicamentos, incluyendo específicamente los gastos vinculados al desgaste (depreciación) y al mantenimiento de los vehículos utilizados en el modelo actual de reparto. Para dichos cálculos, se aplica una asignación proporcional basada en los días operativos del mes y en el grado de utilización de los furgones en las rutas asignadas, considerando que estos vehículos están en funcionamiento de manera continua durante la semana laboral. Adicionalmente, se contempla la desincorporación de estos furgones mediante su venta, ya que la propuesta tecnológica planteada busca reemplazar completamente el sistema de reparto actual.

Para efectos comparativos, este estudio no incluye los costos de preparación o dispensación de medicamentos, ya que dichos procesos se mantienen constantes con la nueva estrategia. El análisis económico se centra únicamente en las variaciones derivadas del sistema de distribución, considerando como base el uso de dos vehículos actualmente operativos y un equipo de cuatro funcionarios municipales encargados de los repartos, a partir de lo cual se elaboran las tablas de costos correspondientes.

Tabla 5.5: “Activos Actuales del Programa”

PRODUCTO	CANTIDAD	VALOR POR U SIN IVA	IVA	TOTAL POR 2 FURGONES
TOURING CARGO L1H2	2	\$21.990.000	\$2.745.500	\$24.735.500
			TOTAL	\$49.471.000

Tabla 5.6: “Costo de los Recursos Humanos del Programa Actual”

PERSONAL	CANTIDAD	SALARIO MENSUAL	SALARIO FINAL POR PERSONAL	SALARIO POR PERSONAL / DÍA
Tecnólogo medico	2	\$950.000	\$45.238	\$90.476
Chofer	2	\$800.000	\$38.095	\$76.190
			TOTAL	\$166.667

Para calcular correctamente los gastos de distribución en la zona, es necesario identificar los costos particulares asociados a las jornadas laborales del personal, tal como se indicó en la tabla precedente. El cual dio un total de \$161.905 pesos chilenos por parte del recurso humano utilizado para las entregas de un día en dicha zona y que multiplicado por los 21 días trabajados al mes dan un total de \$3.400.005 pesos chilenos. En base a estos cálculos se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 5.7: “Costos de Mantenimiento”

MANTENIMIENTO DE FURGONES	
Mantenimiento mensual	\$50.000
Mantenimiento semanal	\$12.500

En base a la tabla, el mantenimiento de los furgones es de \$50.000 pesos chilenos para ambos furgones.

Para continuar con los costos, es necesario calcular el tiempo total de transporte terrestre en minutos para los furgones, para esto se usará las distancias totales por recorrido de la columna "Distancia Total (km)" de las tablas anteriores y una **velocidad promedio de 30 km/h**, que corresponde a la velocidad habitual de un furgón en una comuna semiurbana como Peñalolén (Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito [Conaset], s. f.).

Tabla 5.8: “Tiempo total de entrega con el Furgón 1”

FURGÓN 1				
PUNTO/CASAS	Distancia (m)	Distancia Total (m)	Distancia Total (km)	Tiempo total de Transporte (min)
1	1588	3176	3,2	6,4
2	1200	2400	2,4	4,8
3	1271	2542	2,5	5,1
4	2400	4800	4,8	9,6
5	2011	4022	4,0	8,0
6	955	1910	1,9	3,8
7	1479	2958	3,0	5,9
8	1957	3914	3,9	7,8
9	1574	3148	3,1	6,3
10	1012	2024	2,0	4,0
11	1660	3320	3,3	6,6
12	989	1978	2,0	4,0
13	1771	3542	3,5	7,1
14	1985	3970	4,0	7,9
15	1331	2662	2,7	5,3
16	2034	4068	4,1	8,1
TOTAL	25217	50434	50,4	100,9

En base la tabla del Furgón 1 calculada, se puede determinar que el tiempo total de entrega de los medicamentos sería de 100,9 min, lo que equivale aproximadamente a **1 hora y 40,9 minutos**.

Tabla 5.9: “Tiempo total de entrega con el Furgón 2”

FURGÓN 2				
PUNTO /CASAS	Distancia (m)	Total distancia (m)	Distancia Total (km)	Tiempo total de Transporte (min)
17	1205	2410	2,4	4,8
18	1697	3394	3,4	6,8
19	2104	4208	4,2	8,4
20	1788	3576	3,6	7,2
21	2224	4448	4,4	8,9
22	655	1310	1,3	2,6
23	1763	3526	3,5	7,1
24	874	1748	1,7	3,5
25	660	1320	1,3	2,6
26	1382	2764	2,8	5,5
27	1777	3554	3,6	7,1
28	1941	3882	3,9	7,8
29	1008	2016	2,0	4,0
30	1584	3168	3,2	6,3
31	1867	3734	3,7	7,5
32	1130	2260	2,3	4,5
TOTAL	23659	47318	47,3	94,64

Para el Furgón 2, se puede determinar que el tiempo total de entrega de los medicamentos sería de 94,64 min, lo que equivale aproximadamente a **1 hora y 34,6 minutos**.

En base a los cálculos realizados anteriormente, se puede determinar que existe una alta cantidad de tiempo por entregas terrestres, en comparación con las entregas aéreas.

El recorrido anterior, tiene 32 entregas con un total de 97,7 km, Ahora se evaluarán los costos de ambos recorridos, resultando la siguiente tabla:

Tabla 5.10: “Consumo del furgón 1 y el furgón 2”

Furgón	Consumo (km/l)	Recorrido (km)	Cant. de litros utilizados	Costo final (CLP)
Furgón 1	8	50,4	6,3	\$ 8.505
Furgón 2	8	47,3	5,9	\$ 7.982

El rendimiento promedio de ambos furgones es de 8 km/l, lo que implica un consumo total actual de 12,21 litros, equivalente a un recorrido de 97,7 km en aproximadamente 3 horas de operación. Si se proyecta este desempeño a una jornada de 8 horas, el recorrido estimado sería de 260,53 km, lo que demandaría 32,566 litros de combustible. Considerando un precio por litro de \$1.350, el costo diario sería de aproximadamente \$43.963, lo que, en un mes con 21 días hábiles de operación, representaría un gasto total cercano a \$923.223.

En base a los tiempos de entrega calculados para los dos furgones asignados al sector de Peñalolén Nuevo, se puede estimar la capacidad operativa diaria en una jornada laboral de 8 horas. El Furgón 1, que tarda aproximadamente 100,9 minutos en realizar 16 entregas, puede completar 4 ciclos, alcanzando un total de 64 entregas, en cambio, el Furgón 2, con un tiempo menor de 94,6 minutos por 16 entregas, logra 5 ciclos en el mismo periodo, sumando 80 entregas en total. Esto significa que, combinados, ambos furgones podrían realizar 144 entregas en un día laboral. Esta cifra representa una capacidad operativa significativamente menor en comparación con el sistema propuesto de entrega mediante drones, el cual permitiría alcanzar las 250 entregas diarias bajo condiciones similares. Esta diferencia, evidencia las limitaciones del sistema actual basado en transporte terrestre y resalta la necesidad de considerar alternativas logísticas más eficientes.

Para poder visualizar de mejor manera la gran diferencia que existe entre usar furgones para el uso del transporte de medicamentos, versus el uso de drones para dichas operaciones, se calculará e investigará las siguientes informaciones para comparación de esta (Soludrones, s. f.), (SPGEO, s. f.), (Piamonte, 2020).

Tabla 5.11: “Información de Transporte Terrestre” (Empresa Piamonte)

CONCEPTO	Por Furgón	Total 2 Furgones
Precio Vehículo + IVA	\$ 24.735.500	\$ 49.471.000
Mantenimiento / mes	\$ 25.000	\$ 50.000
Frecuencia de Reemplazo		
Estimación de KM de vida útil	300000	600000
Duración estimada del vehículo en años	5 AÑOS	5 AÑOS
Capacidad de carga		
Capacidad de peso en KG	1.725	3450
Capacidad de Volumen en L	5000	10000
Operaciones	72 ENTREGAS/DIA	144 ENTREGAS/DIA
Salarios de los conductores / mes	\$ 800.000	\$ 1.600.000
Salario tecnólogo médico / mes	\$ 950.000	\$ 1.900.000
Consumo de combustible en KM/L	8 KM POR LITRO	16 KM
Precio del combustible en CLP/L	\$ 1.350	\$ 2.700

Tabla 5.12: “Información de Transporte con Drones” (Empresa Soludrones)

CONCEPTO	Por Dron 1 Dron	Flota de 2 Drones
Precio de Compra	\$ 11.500.000	\$ 23.000.000
Juego de baterías (2 por Dron)	\$ 1.200.000	\$ 2.400.000
Mantenimiento	\$200.000/ AÑO	\$400.000/AÑO
Por vuelo	\$500 (aproximadamente)	\$1.000 (aproximadamente)
Frecuencia de reemplazo	2 años (baterías)	2 años (baterías)
Juego de baterías (2 por Dron)	\$1.200.000 (2 años de vida útil)	\$2.400.000 (2 años de vida útil)
Alcance del Dron	DJI Matrice 350 RTK	DJI Matrice 350 RTK
Alcance en KM	25,8 km (por carga)	25,8 km (por carga)
Capacidad de Carga		
Capacidad de peso en KG	2,7 kilos	5,4 kilos
Capacidad de Volumen en L	5 litros	10 litros
Operaciones	128 entregas/día (8 horas)	256 entregas/día (8 horas)
Numero de operadores	1	2
Salarios de los operadores / me	\$600.000	\$1.200.000
Salario solo 1 tecnólogo médico	\$950.000	\$950.000
Tamaño del juego de Baterías er	2,0 kWh	4,0 kWh
Precio de la Electricidad por KW	\$192 CLP/kWh	\$384 CLP/kWh

En base a las Tablas 5.11 (Furgones) y 5.12 (Drones), se realizó un análisis comparativo entre dos modalidades de transporte destinadas a la distribución de medicamentos en la comuna de Peñalolén. Este análisis se centró en los siguientes aspectos clave: costos de inversión y operación (Mercado Público, 2024), capacidad de carga, alcance, eficiencia energética (Ministerio de Energía de Chile, 2025) y volumen de entregas diarias (Chiletrabajos.cl, 2025).

1. Costos de inversión y operación

Los furgones presentan un costo de adquisición por unidad de \$24.735.500 (con IVA), lo que se traduce en una inversión total de \$49.471.000 por dos unidades. A ello se suman costos de mantenimiento (\$600.000 anuales por los dos furgones).

En contraste, los drones requieren una inversión significativamente menor: \$23.000.000 por dos drones. Su mantenimiento anual es también más bajo (\$400.000), y el costo energético es más eficiente (JMC Pasajeros, 2021), con un consumo eléctrico de 4 kWh por jornada y un costo de \$192 por kWh (Enel Distribución Chile, 2025).

2. Capacidad de carga

Los furgones tienen una capacidad de transporte muy superior: hasta 1725 kg y 5000 litros por unidad, ideales para transportar grandes volúmenes y cargas pesadas. Por otro lado, los drones tienen una capacidad limitada: 2,7 kg y 5 litros por unidad, lo cual los restringe exclusivamente a entregas pequeñas y livianas, como medicamentos o muestras médicas, pero significativamente mucho más rápidas (DJI Enterprise, 2024).

3. Alcance y vida útil

Un furgón está diseñado para alcanzar una vida útil de 300.000 km con un promedio de 60.000 km al año, lo que le permite funcionar de manera eficiente en extensas rutas. Los drones, por otro lado, cuentan con un alcance de 25,8 km por carga, con una duración de 2 años para las baterías y 5 años para el fuselaje, lo que restringe su radio de acción, pero los convierte en perfectos para áreas urbanas densas o de difícil acceso terrestre (DJI, 2025).

4. Operación y recursos humanos

Los furgones requieren de dos choferes con un salario mensual estimado de \$800.000, junto al salario de los dos tecnólogos médicos \$950.000 pesos, mientras que los drones requieren solo de dos operadores de drones con un salario de \$600.000 mil pesos mensuales cada uno y un tecnólogo médico con un salario de \$950.000 lo cual disminuye el gasto en personal.

En cuanto al rendimiento operativo, los drones son más eficientes en entregas unitarias: 128 entregas por dron al día, frente a 72 entregas diarias por furgón, Pero para ello, sin embargo, solo se utilizaron las mismas distancias de los drones ya obtenidas anteriormente solo que son la velocidad promedio de un furgón, lo cual por el contrario si fueran distancias reales de los furgones serían aún mucho más largas que la de los drones.

Para la logística de entrega de medicamentos en el sector de Peñalolén Nuevo, los drones resultan ser la opción más conveniente debido a su agilidad, eficiencia energética y adaptabilidad al contexto urbano del área. Esta zona, caracterizada por su alta densidad poblacional, calles estrechas y buena conectividad, favorece el uso de tecnologías de corto alcance como los drones, que permiten realizar hasta 128 entregas diarias por unidad, siendo ideales para transportar cargas pequeñas como frascos, cajas personales o muestras médicas. A diferencia de los furgones, cuya mayor capacidad de carga no se justifica en este caso por tratarse de trayectos cortos y entregas livianas, los drones también presentan menores costos operativos y de personal, lo que los convierte en una alternativa más económica y sustentable para una distribución rápida y precisa.

Tabla 5.13: “Tabla Comparativa: Furgones vs Drones para Distribución de Medicamentos”

Aspecto	Furgones	Drones
Costo de adquisición (con IVA)	\$49.471.000	\$23.000.000
Costo mantenimiento anual	\$600.000 CLP	\$400.000 CLP
Vida útil	5 años (300.000 km)	5 años fuselaje / 2 años batería
Km estimados por año	60.000 km	25,8 km por carga
Capacidad de carga (peso x unidad)	1.724 kg	2,7 kg
Capacidad de carga (volumen x unidad)	5.000 litros	5 litros
Rendimiento combustible / energía	8 km por litro de gasolina	4 kWh por jornada
Costo de combustible / energía día	\$43.963 x día	\$768 CLP (4 kWh x \$192 CLP)
Salario mensual chofer / operador	\$1.600.000 (2 choferes)	\$1.200.000 (2 operadores)
Salario mensual tecnólogo medico	\$950.000	\$950.000
Entregas diarias (jornada de 8 hrs)	144 entregas	256 entregas
Total entregas mensuales (21 días)	3024 entregas	5376 entregas
Alcance logístico	Alto (zonas amplias y rurales)	Medio-Alto (zonas urbanas)
Ideal para	Grandes volúmenes y rutas largas	Entregas rápidas y pequeñas

Para poder realizar una mejor descripción o explicación sobre los gastos mensuales y anuales tanto de los drones como de los furgones, primero se necesita el cálculo de la depreciación de ambos.

Furgón:

- Costo por unidad: \$24.735.500 CLP
- Vida útil: 5 años → 60 meses
- Depreciación mensual: $\$24.735.500 \div 60 = \412.258

Dron:

- Costo por unidad: \$11.500.000 CLP
- Vida útil: 5 años (fuselaje) → 60 meses
- Depreciación mensual: $\$11.500.000 \div 60 = \191.667

En resumen, los costos de los recursos humanos mensuales para el sistema que se desea implementar en base a los drones será el siguiente:

Tabla 5.14: “Costos de los Recursos Humanos del sistema a Implementar”

PERSONAL	CANTIDAD	SALARIO MENSUAL	SALARIO FINAL POR PERSONAL
Tecnólogo médico	1	\$ 950.000	\$ 950.000
Operador de Dron	2	\$ 600.000	\$ 1.200.000
TOTAL		\$	\$ 2.150.000

Por consiguiente, la inversión inicial para el sistema a implementar se verá reflejada en la siguiente tabla:

Tabla 5.15: “Inversión Inicial para el Proyecto”

Ítem	Cantidad	Costo unitario (CLP)	Costo total (CLP)
Dron DJI Matrice 350 RTK	2	\$ 11.500.000	\$ 23.000.000
Baterías TB65	4	\$ 600.000	\$ 2.400.000
Estación de carga BS65	1	\$ 2.500.000	\$ 2.500.000
Software de gestión	1	\$ 500.000	\$ 500.000
Centro de operaciones	1	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
Seguro anual	2	\$ 400.000	\$ 800.000
TOTAL		\$ 17.500.000	\$ 31.200.000

En base a las tablas 5.11, 5.12, 5.13 y 5.14, se puede inferir, que, dado que el trabajo se enfoca en la distribución de cargas pequeñas o medianas en áreas semiurbanas y de corta distancia, los drones se presentan como la opción más factible. Su menor costo o inversión inicial de \$31.200.000 millones de pesos chilenos, la alta eficiencia energética y bajos gastos operativos los convierten en una solución práctica y sostenible. Además, su capacidad para realizar entregas rápidas y precisas los hace ideales para responder a las necesidades específicas de zonas como Peñalolén, donde la agilidad y la cobertura puntual son fundamentales.

En este contexto, aunque los vehículos terrestres ofrecen una mayor capacidad de carga y alcance, su uso sería menos eficiente para este tipo de operaciones. Los altos costos iniciales y operativos, junto con su diseño para distribución masiva, los hacen menos adecuados para cubrir distancias cortas y cargas ligeras. Por lo tanto, los drones destacan como la herramienta ideal para satisfacer las demandas logísticas del proyecto de manera eficiente y económica.

Con el fin de realizar una evaluación económica más precisa sobre la factibilidad del sistema de entrega mediante drones, se considerará la venta de los furgones que actualmente son utilizados en el programa “La salud hasta tu casa”. Ya que estos serán reemplazados por el nuevo sistema equipado por drones. Esta decisión se justifica en que, al ser reemplazados por la nueva flota de drones, los vehículos dejarán de cumplir una función operativa en dicho sector.

Para esto, se realizó un pequeño estudio de mercado para conocer al valor residual de un furgón actualmente en Chile, el cual es de un total de \$18.000.000 pesos chilenos por cada uno (Autocosmos, s. f.). Dicha venta será incorporada a los ingresos del primer año del proyecto, contribuyendo de manera significativa a fortalecer su viabilidad económica. Este aporte no solo respaldará el flujo financiero inicial, sino que también servirá como un elemento estratégico para sustentar el desarrollo y consolidación de esta iniciativa innovadora en el mediano y largo plazo.

Tabla 5.16: “Valor total de la venta de los Furgones”

Venta de Furgones	Cantidad	Venta Total
\$18.000.000	2	\$36.000.000

Finalmente, Para las entregas de un mes y año, se tendrá la siguiente tabla con los gastos del programa actual, así como los gastos operacionales mediante el uso de los Drones.

Tabla 5.17: “Análisis de Costos Operacionales para los Furgones”

Concepto	Monto Mensual CLP	Monto Anual CLP
Combustible	\$ 923.223	\$ 11.078.676
Mantenimiento	\$ 50.000	\$ 600.000
Recurso humano	\$ 3.500.000	\$ 42.000.000
Depreciación	\$ 412.258	\$ 4.947.096
TOTAL	\$ 4.885.481	\$ 58.625.772

Tabla 5.18: “Análisis de Costos Operacionales para los Drones”

Concepto	Monto Mensual CLP	Monto Anual CLP
Arriendo	\$ 1.500.000	\$ 18.000.000
Energía	\$ 32.256	\$ 387.072
Mantenimiento	\$ 33.333	\$ 399.996
Recurso humano	\$ 2.150.000	\$ 25.800.000
Depreciación	\$ 191.667	\$ 2.300.004
TOTAL	\$ 2.407.256	\$ 46.887.072

En base a las tablas 5.17 y 5.18 sobre los costos operacionales del programa actual y el nuevo sistema a implementar, se puede definir que los ingresos para este se obtendrán a través de la diferencia que existe entre ambos costos, es decir \$58.625.772 pesos, menos \$46.887.072 pesos, resultando un total de \$11.738.700 pesos chilenos.

Finalmente, para poder comprender de manera más clara y precisa este ingreso, resulta fundamental elaborar un flujo de caja efectivo proyectado a un horizonte de 5 años, considerando una tasa de descuento del 10%, la cual se estima como la más adecuada y óptima para un proyecto de carácter social como el que se propone implementar. Este flujo permitirá visualizar no solo la rentabilidad y sostenibilidad económica en el tiempo, sino también evaluar de forma anticipada los posibles escenarios financieros y el impacto que podría generar en el mediano y largo plazo.

Tabla 5.19 “Flujo Incremental proyectado en 5 años”

AÑO	0	1	2	3	4	5	TOTAL
INGRESOS							
Ahorro de costos		\$ 11.738.700	\$ 11.738.700	\$ 11.738.700	\$ 11.738.700	\$ 11.738.700	\$ 58.693.500
venta de furgones		\$ 36.000.000					\$ 36.000.000
TOTAL INGRESOS		\$ 47.738.700	\$ 11.738.700	\$ 11.738.700	\$ 11.738.700	\$ 11.738.700	\$ 94.693.500
EGRESOS / GASTOS OPERATIVOS							
Inversión inicial drones	\$ 31.200.000						\$ 31.200.000
Certificación DGAC	\$ 2.000.000						\$ 2.000.000
Reposición Baterías TB65			\$ 1.150.000		\$ 1.150.000		\$ 2.300.000
Mantenimiento		\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 2.000.000
Seguro RC		\$ 300.000	\$ 300.000	\$ 300.000	\$ 300.000	\$ 300.000	\$ 1.500.000
Licencias DGAC		\$ 150.000	\$ 150.000	\$ 150.000	\$ 150.000	\$ 150.000	\$ 750.000
Personal Operativo		\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 4.800.000	\$ 24.000.000
TOTAL EGRESOS	\$ 33.200.000	\$ 5.650.000	\$ 6.800.000	\$ 5.650.000	\$ 6.800.000	\$ 5.650.000	\$ 30.550.000
FLUJO NETO INCREMENTAL	\$ -33.200.000	\$ 42.088.700	\$ 4.938.700	\$ 6.088.700	\$ 4.938.700	\$ 6.088.700	\$ 64.143.500
TASA SOCIAL	10%						
VAN	\$16.100.000						
TIR	29,40%						
VAE	\$4.200.000						
CAE	\$4.200.000						

En base al flujo incremental corregido, se puede inferir que la inversión inicial asciende a \$31.200.000, a la que se suman costos de certificación inicial de \$2.000.000, totalizando \$33.200.000 en el año 0. Los ingresos operativos derivados del ahorro de costos frente al uso de un furgón alcanzan \$11.738.700 anuales, mientras que en el primer año se incorpora un ingreso

extraordinario de \$36.000.000 por la venta del furgón, elevando el flujo neto del año 1 a \$42.088.700. Los costos operativos incluyen mantenimiento de drones (\$400.000/año), seguro RC (\$300.000/año), capacitación/licencias DGAC (\$150.000/año) y personal operativo (\$4.800.000/año). La reposición de baterías se considera en los años 2 y 4 por \$1.150.000 cada vez, según los ciclos de vida estimados. Al descontar los flujos a una tasa social del 10%, se obtiene un Valor Actual Neto (VAN) de aproximadamente \$16.135.272 y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 29,4%, cifras que confirman la viabilidad financiera del proyecto bajo los supuestos establecidos. El periodo de recuperación de la inversión se sitúa en torno a 2 años, considerando los flujos sin descuento, y en 2,9 años aplicando la tasa del 10%.

En términos generales, las proyecciones indican que, durante los cinco años analizados, el proyecto no solo recuperará la inversión inicial y cubrirá los costos operativos, sino que también generará un excedente anual equivalente (VAE) de aproximadamente \$4,2 millones, el cual podría destinarse a nuevas fases del proyecto, mejoras tecnológicas o iniciativas que fortalezcan el impacto social en la comunidad beneficiaria. La consistencia de un VAN positivo y una TIR elevada refuerza la solidez de la propuesta y su capacidad para mantener resultados favorables frente a posibles variaciones en el entorno.

Capítulo 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente memoria desarrolló e implementó un modelo de optimización para la distribución de medicamentos en Peñalolén mediante el uso de drones, con el objetivo de mejorar el acceso a tratamientos para grupos vulnerables y reducir el impacto ambiental del sistema actual. Al aplicar el modelo de Programación Lineal Entera con CPLEX y OPL, se obtuvo que el mínimo tiempo total de la operación de entrega (makespan) corresponde a 56,1 minutos, distribuyendo de forma equilibrada los 32 puntos de entrega entre los dos drones. En comparación, los furgones utilizados en la logística terrestre requieren 100,9 minutos y 94,6 minutos para completar las mismas rutas, lo que evidencia una diferencia sustancial en favor de las entregas aéreas.

Bajo los supuestos operativos del estudio (cada dron realiza aproximadamente 16 entregas en ≈ 56 minutos y los pilotos trabajan 8 h/día), un dron puede efectuar cerca de 128 entregas diarias, por lo que dos drones en operación simultánea alcanzan un total de 256 entregas/día. Esta capacidad supera holgadamente la demanda objetivo de 250 entregas/día, con un excedente estimado de 6 entregas. De esta manera, el modelo confirma la viabilidad y eficiencia del sistema propuesto, al mismo tiempo que valida y mejora los cálculos manuales realizados previamente.

Desde una perspectiva económico-financiera, la operación mediante drones demuestra una reducción relevante en los costos operativos frente al sistema basado en furgones. La evaluación técnico-económica, considerando una inversión inicial de \$32 millones, arrojó un Valor Actual Neto (VAN) de \$16,1 millones y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 29,4%, con un periodo de recuperación inferior a tres años. Estos resultados no solo ratifican la factibilidad económica y la sostenibilidad del proyecto bajo las condiciones evaluadas, sino que también evidencian su potencial como solución innovadora para mejorar el acceso a medicamentos, contribuyendo al cuidado del medioambiente y optimizando la logística en zonas semiurbanas.

En conclusión, y bajo los supuestos previamente descritos, el sistema de distribución de medicamentos mediante drones en el macro sector Peñalolén Nuevo resulta **técnicamente factible y económicamente viable**, alcanzando un VAN positivo de \$16,1 millones y una TIR del 29,4%. No obstante, esta viabilidad está condicionada a que los parámetros operativos y de demanda se

mantengan dentro de los rangos considerados, por lo que se recomienda avanzar con precaución, monitoreando de forma continua los factores críticos que podrían afectar el desempeño del sistema.

El estudio cumplió con la mayoría de los objetivos, identificando las necesidades de medicamentos en Peñalolén y desarrollando un modelo de optimización que confirmó la viabilidad de los drones como medio de distribución eficiente. El análisis económico y operativo demostró que su uso es una alternativa viable en términos de costo y eficiencia.

Este trabajo realiza una valiosa contribución en varios ámbitos. En el campo de estudio, propone una metodología replicable para analizar la distribución logística en áreas urbanas y semiurbanas mediante el uso de drones, sentando las bases para investigaciones futuras. En términos sociales, mejora el acceso a medicamentos para grupos vulnerables en Peñalolén, promoviendo la equidad en la atención de salud y reforzando el impacto positivo en comunidades locales. Para la industria, demuestra el potencial de los drones como una solución innovadora y sostenible para la logística de última milla, posicionándolos como una herramienta clave en el avance de tecnologías emergentes.

Sin embargo, el estudio presenta ciertas limitaciones que deben considerarse para una posible implementación a gran escala. La autonomía de vuelo de los drones, especialmente con carga, restringe su capacidad para cubrir mayores distancias sin recarga, riesgo que puede mitigarse mediante estaciones intermedias y optimización de rutas. Condiciones climáticas adversas, disponibilidad limitada de puntos de aterrizaje, incidentes técnicos, la cadena de custodia de medicamentos y la protección de datos son otros desafíos relevantes, que pueden abordarse con planificación, protocolos de contingencia, mantenimiento preventivo, trazabilidad electrónica y medidas de seguridad informática.

Se recomienda ampliar la cobertura a otras comunas o regiones, explorar tecnologías para aumentar la autonomía de los drones, implementar estaciones de carga intermedias y automatizar la asignación de rutas mediante inteligencia artificial, también es importante reforzar la seguridad en el transporte de medicamentos sensibles. Estas acciones permitirían optimizar la eficiencia, confiabilidad y sostenibilidad del sistema, mostrando que la integración de drones puede transformar la logística, mejorando el acceso a servicios críticos y sentar un precedente en Chile.

Capítulo 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SAP, E. M. (2018, 24 diciembre). *Encuesta Nacional de Medicamentos: Un 58% de los chilenos consume al menos un medicamento al día*. *Emol*.
<https://www.emol.com/noticias/Nacional/2018/12/24/931973/Encuesta-Nacional-de-Salud-Un-58-de-los-chilenos-consume-al-menos-un-remedio-al-dia.html>
2. Puerto Varas, Peñalolén, Independencia y El Bosque superan seis veces recomendaciones de calidad de aire de la OMS. (2022, enero 17).
<https://www.elmostrador.cl/destacado/2022/01/17/puerto-varas-penalolen-independencia-y-el-bosque-superan-seis-veces-recomendaciones-de-calidad-de-aire-de-la-oms/>
3. Ranking de las comunas de Chile con peor calidad del aire durante 2021. (2022, enero 18). CodeXVerde. <https://codexverde.cl/ranking-de-las-comunas-de-chile-con-peor-calidad-del-aire-durante-2021/>
4. Etapa de diagnóstico (2022). ESTUDIO DE CAPACIDAD VIAL. Penalolen.cl. Recuperado el 29 de abril de 2024, de
https://participa.penalolen.cl/uploads/archivos/02_DIAGNOSTICO%20CAPACIDAD%20VIAL.pdf
5. BCN. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2023). Reportes Estadísticos 2024 de Peñalolén.
https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2024&idcom=13122
6. *Vista de Las personas mayores en la comuna de Peñalolén (Chile, 2021): Diagnóstico inicial para la política pública*. (s/f). Ucentral.cl. Recuperado el 1 de septiembre de 2025, de <https://revistafacso.ucecentral.cl/index.php/rumbos/article/view/535/632>
7. Ministerio de Desarrollo Social y Familia. (2022).
<https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/noticias/endide-2022-ministro-jackson-presenta-resultados>
8. Flemons, K., Baylis, B., Khan, A. Z., Kirkpatrick, A. W., Whitehead, K., Moeini, S., ... Hawkins, W. (2022). The use of drones for the delivery of diagnostic test kits and medical supplies to remote First Nations communities during COVID-19. *American Journal of Infection Control*, 50(8), 849–856. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2022.03.004>
9. Eichleay, M. A., Evens, E., Stankevitz, K., & Parker, C. (2019). Using the unmanned Aerial Vehicle Delivery decision tool to consider transporting medical supplies via drone.

Global Health, Science and Practice, 7(4), 500–506. <https://doi.org/10.9745/GHSP-D-19-00119>

10. Silva Villar, A., González Torralbo, H., & Nazal Moreno, E. (2021). Las personas mayores en la comuna de Peñalolén (Chile): Diagnóstico inicial para la política pública. *Rumbos TS*, 16(26), 37–72. <https://doi.org/10.51188/rrts.num26.535>
11. FAA. (2023). Unmanned aircraft systems (UAS): History and future. <https://www.faa.gov/uas/resources/timeline>
12. European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2021). Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA). <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/specific-category-civil-drones/specific-operations-risk-assessment-sora>
13. UK Civil Aviation Authority (CAA). (2025). Specific Operations Risk Assessment (SORA) and BVLOS operations. <https://www.caa.co.uk/drones/regulations-consultations-and-policy-programmes/policy-programmes/specific-operations-risk-assessment-sora/>
14. Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4), 411–458. <https://doi.org/10.1002/net.21818>
15. Pasha, J., Dulebenets, M. A., Kavvoosi, M., Abioye, O. F., Theophilus, O., & Wang, H. (2022). Drone scheduling problems in logistics: A systematic review and framework for future research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 111, 104785. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104785>
16. Shi, Y., Xue, Y., Ma, Z. J., & Luo, Z. (2022). A decision support tool for implementing drones in the healthcare supply chain: A case study of China. *Technological Forecasting and Social Change*, 176, 121458. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121458>
17. Seelos, C., Sofer, M., Burton, C., & Mair, J. (2018). *Making health innovations thrive in Africa*. Ssir.org. Recuperado el 29 de agosto de 2025, de <https://ssir.org/articles/entry/zipline-health-innovations-africa>
18. Atiga, M. O., Osei, P. P., & Amponsah, S. (2024). Medical drone delivery and its impact on healthcare accessibility: Evidence from Ghana. *Journal of Global Health*, 14, 04012. <https://doi.org/10.7189/jogh.14.04012>

19. Amukele, T., Ness, P. M., Tobian, A. A. R., Boyd, J., & Street, J. (2017). Drone transportation of blood products. *Transfusion*, 57(3), 582–588. <https://doi.org/10.1111/trf.13900>
20. Rodríguez, S. (2025). Drones en la distribución de insumos médicos para esclerosis múltiple: desafíos y oportunidades en Colombia. *Neurología argentina*, 17(2), 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.neuarg.2025.04.005>
21. ICAO. (2020). Unmanned Aircraft Systems (UAS) Toolkit. International Civil Aviation Organization.
22. ISO. (2021). ISO Standards for Unmanned Aircraft Systems (UAS). International Organization for Standardization.
23. Kellermann, R., Biehle, T., & Fischer, L. (2020). Drones for parcel and medicine delivery: Benefits and challenges. *Transport Research Part D: Transport and Environment*, 82, 102–118. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102311>
24. Matternet. (2020). Urban drone delivery operations. Matternet Inc.
25. Pasha, J., Govindarajan, A., & Rathi, S. (2022). Optimizing healthcare logistics using drones: A simulation-based approach. *Journal of Operations Management*, 68(2), 230–247.
26. Pinto, R., Almeida, G., & Costa, L. (2021). Implementación de drones para el transporte de medicamentos en Latinoamérica: oportunidades y barreras. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 45, e27. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.27>
27. Rosser, J. C., Vignesh, V., Terwilliger, B. A., & Parker, B. C. (2018). Surgical and medical applications of drones: A comprehensive review. *Journal of Medical Systems*, 42(6), 92. <https://doi.org/10.1007/s10916-018-0947-z>
28. UNICEF. (2019). Drones for health in Vanuatu. United Nations Children’s Fund.
29. WHO. (2019). Global strategy on digital health 2020–2025. World Health Organization.
30. Zipline. (2022). Transforming healthcare logistics with drones. Zipline International.
31. DGAC [DGAC]. (2017, febrero). OPERACIONES DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA (RPAS) EN ASUNTOS DE INTERÉS PÚBLICO, QUE SE EFECTÚEN SOBRE ÁREAS POBLADAS (2a Edición). DGAC. <https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2023/08/DAN-151-ED.2-ENM-1.pdf>

32. *Financial glossary*. (2025, septiembre 1). Cnmv.Es.
<https://www.cnmv.es/Portal/Inversor/Glosario?id=0&term=Valor%20actual%20neto%20de%20una%20inversi%C3%B3n,%20VAN&idlang=1>
33. Medicamentos más vendidos en Chile. (2021). Statista. Recuperado el 6 de septiembre de 2024, de <https://es.statista.com/estadisticas/1360429/farmacos-mas-consumidos-en-chile/>
34. Ministerio de Salud de Chile (MINSAL). (2020). Informe de enfermedades crónicas y su impacto en la salud de la población. <https://deis.minsal.cl/>
35. Envejecimiento saludable. (2021). Paho.org. Recuperado el 6 de septiembre de 2024, de <https://www.paho.org/es/envejecimiento-saludable>
36. *Censos de Población y Vivienda*. (INE, 2024). Default. Recuperado el 29 de agosto de 2025, de <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>
37. *Resultados Dashboard*. (2024). Censo 2024. Recuperado el 29 de agosto de 2025, de <https://censo2024.ine.gob.cl/resultados-dashboard/>
38. Leiva, A. M., Troncoso-Pantoja, C., Martínez-Sanguinetti, M. A., Nazar, G., Concha-Cisternas, Y., Martorell, M., ... Celis-Morales, C. (2020). Personas mayores en Chile: el nuevo desafío social, económico y sanitario del Siglo XXI. *Revista Médica de Chile*, 148(6), 799–809. <https://doi.org/10.4067/s0034-98872020000600799>
39. De Prensa, C. (2016, 8 abril). Farmacia Comunitaria de Peñalolén cuenta con despacho de medicamentos a domicilio. BioBioChile.
<https://www.biobiochile.cl/noticias/2016/04/08/farmacia-comunitaria-de-penalolen-cuenta-con-despacho-de-medicamentos-a-domicilio.shtml>
40. Drone DJI Matrice 350 RTK. (2023). Optron.com. Recuperado el 29 de agosto de 2025, de <https://optron.com/dji/wp-content/uploads/2023/05/matrice-350-rtk.pdf>
41. *Specs*. (2024). DJI. Recuperado el 29 de agosto de 2025, de <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs>
42. JMC Touring Escolar - Precios, información y más. (2020, junio 12). Piamonte.
https://www.piamonte.cl/jmc/touring-escolar/?utm_source
43. Normativa relacionada con Velocidad. (n.d.). Conaset. https://www.conaset.cl/normativa-velocidad/?utm_source
44. *Drone DJI Matrice 350 RTK*. (s/f). Soludrones - Servicios aéreos y Academia de drones. Recuperado el 29 de agosto de 2025, de <https://www.soludrones.cl/drone-dji-matrice->

[350-rtk?srsIid=AfmBOoqs6-gsgDmmK9MQGZCAis4LQPO1A2t-JIGCOoRxPtiP7u_22Uz6](https://www.autocosmos.cl/auto/usado/jmc/touring/281-14pas/003d1c6d560c43e7b258bb9398e86aca)

45. Autocosmos. (2020). JMC Touring usados en Chile. Recuperado el 29 de agosto de 2025, de <https://www.autocosmos.cl/auto/usado/jmc/touring/281-14pas/003d1c6d560c43e7b258bb9398e86aca>
46. *Batería Inteligente DJI TB65*. (2025). Heliboss.cl. Recuperado el 29 de agosto de 2025, de <https://heliboss.cl/serie-matrice/2586-bateria-inteligente-dji-tb65.html?srsIid=AfmBOorXAchG9uKHZOok-Veq3vGETvxoXyiJljJOuRoxlRwN8pE24W>
47. Mantenciones prepagadas - JMC Pasajeros. (2021, junio 1). https://www.jmcchile.cl/repuestos/mantenciones-pre-pagadas/?utm_source
48. Enel Distribución Chile. (2025). Tarifas eléctricas para clientes BT1. <https://www.enel.cl/es/personas/tarifas/electricidad.html>
49. Mercado Público. (2024). Licitaciones y contratos relacionados con drones y sistemas UAV para uso logístico. <https://www.mercadopublico.cl/>
50. Chiletrabajos.cl. (2025). Ofertas laborales para operadores de drones y técnicos UAV en Chile. <https://www.chiletrabajos.cl/>
51. DJI Enterprise. (2024). Recomendaciones de mantenimiento preventivo para drones industriales.
52. Ministerio de Energía de Chile. (2025). Boletín de precios de energía eléctrica promedio mensual. <https://energia.gob.cl>
53. IBA G CPLEX Optimization Studio. (2024, mayo 22). <https://www.ibm.com/es-es/products/ilog-cplex-optimization-studio>
54. Mapfre. (2020). *Solidaridad impropia y seguro de responsabilidad civil* (pp. 94–96). Fundación Mapfre. <https://app.mapfre.com/ccm/content/documentos/fundacion/cs-seguro/libros/solidaridad-impropia-y-seguro-de-responsabilidad-civil.pdf>
55. Dirección General de Aeronáutica Civil. (2019). *Manual para la certificación de centros de instrucción y de entrenamiento de aeronáutica civil* (Manual PEL-001). https://www.dgac.gob.bo/wp-content/uploads/2019/07/Manual_PEL_001.pdf

Anexo 1
Checklist Normativo Operativo – Uso de Drones (DAN 151 – DGAC, Chile)

Requisito Normativo (DAN 151)	Descripción / Criterio de Cumplimiento	Evidencia / Documento Asociado	Responsable
Registro RPAS en DGAC	El dron debe estar inscrito en el Registro Nacional de RPAS.	Certificado de inscripción DGAC	Responsable de flota
Habilitación del Piloto	Piloto con licencia DGAC vigente para operar RPAS.	Licencia DGAC + horas de vuelo	Piloto designado
Manual de Operaciones	Elaborar y presentar Manual de Operaciones ante DGAC.	Manual validado	Coordinador de operaciones
Altura máxima	Operaciones ≤ 400 pies (120 m).	Plan de vuelo	Piloto / Observador
Operación sobre áreas pobladas	Solo con autorización DGAC y medidas de mitigación.	Solicitud/autorización DGAC	Responsable legal
VLOS (Visual Line of Sight)	Mantener contacto visual directo o implementar observadores.	Plan de ruta y puntos de observación	Piloto / Observador
Coordinación con ATC	Si se opera en espacio aéreo controlado, notificar/coordinación obligatoria.	Comunicaciones con ATC registradas	Coordinador de misión
Seguro obligatorio	Seguro de responsabilidad civil vigente.	Póliza de seguro	Responsable administrativo
Zonas restringidas / críticas	Evitar zonas cercanas a aeropuertos, instalaciones críticas o militares.	Mapas y plan de vuelo	Piloto / Coordinador
Operaciones de interés público (ej. salud, emergencias)	Documentación adicional requerida: evaluación de riesgos, mitigaciones, permisos especiales.	Informe de mitigaciones DGAC	Jefe de proyecto

Anexo 2
Cuadro de riesgos con mitigaciones

Riesgo	Impacto	Medidas de mitigación
Autonomía limitada de drones	Alto	Estaciones de recarga intermedias, optimización de rutas y reducción de peso de carga cuando sea posible
Falta de puntos de aterrizaje adecuados	Medio	Identificación previa de zonas seguras, acuerdos con instituciones locales, uso de áreas temporales de aterrizaje
Incidentes técnicos o fallas	Alto	Mantenimiento preventivo, seguro de drones, protocolos de contingencia
Cadena de custodia de medicamentos	Alto	Embalaje seguro, trazabilidad electrónica, control de accesos
Privacidad y protección de datos	Medio	Cumplimiento de normativa de protección de datos, encriptación y monitoreo de información