

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS**

**PROPUESTA DE LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES DE
RECOLECCIÓN VERSUS LAS METAS DE RECICLAJE DE ENVASES
IMPUESTAS POR LA LEY N°20.920.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

ANÍBAL VICENTE ASTORGA RIVERA

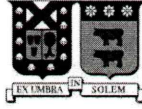
PROFESOR GUÍA

DR. PABLO ESCALONA R.

PROFESOR CO-REFERENTE

DRA. MÓNICA LÓPEZ C.

VALPARAÍSO, 06 DE AGOSTO DEL 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Propuesta de Localización de Estaciones de Recolección versus las Metas de Reciclaje de Envases Impuestas por la Ley N°20.920

Nombre del candidato(a): Anibal Vicente Astorga Rivera

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: Departamento de Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Dr. Pablo Escalona, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 07/08/2025 ; Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 07/08/2025 ; Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Agradecimientos

Doy gracias a mi familia, amigos y compañeros que estuvieron en el momento y lugar precisos para apoyarme en esta etapa de mi vida, que siempre me escuchaban y ayudaban en lo que podían. Por ello, siempre estaré agradecido por lo que han hecho por mí y esta victoria se la dedico a todos ustedes.



Tabla de Contenidos

1	Resumen Ejecutivo	6
2	Problema de Investigación	8
3	Objetivos	11
3.1	Objetivo General	11
3.2	Objetivos Específicos	11
4	Marco Teórico	12
4.1	Problema de los Residuos Sólidos Municipales	12
4.1.1	<i>Antecedentes</i>	12
4.1.2	<i>Destino Final de los Residuos</i>	14
4.1.3	<i>Ley N° 20.920</i>	17
4.1.4	<i>Decreto Supremo N°12: Sobre Envases y Embalajes</i>	19
4.1.4.1	Metas de Recolección y Valorización.	20
4.2	Situación Actual del Sistema de Gestión de Residuos en Viña Del Mar.	21
4.2.1	<i>Generación de Residuos Sólidos Municipales</i>	21
4.2.2	<i>Cobertura de Servicios de Aseo y Sistema de Recolección</i>	22
4.3	Factores Que Considerar En Programas Drop-Off	22
4.3.1	<i>Distancia y Accesibilidad de los Puntos de Recolección</i>	23
4.3.2	<i>Interacción con el entorno</i>	25
4.4	Modelos De Cobertura	25
4.4.1	<i>Modelo De Cobertura Máxima</i>	26



4.4.2	<i>Modelos Generalizados de Cobertura</i>	28
4.4.2.1	Forma 1	30
4.4.2.2	Forma 2	31
4.4.3	<i>The Gradual Covering Location Problem</i>	32
5	Formulación del modelo	35
5.1	Descripción del problema	35
5.2	Modelo Extendido	37
5.3	Modelo Compacto	39
6	Estudio Computacional	40
6.1	Preprocesamiento de Datos	40
6.1.1	<i>Conjuntos</i>	40
6.1.1.1	Cuadras, Manzanas o Nodos Demanda.	40
6.1.1.2	Posible Instalaciones Drop-Off o Nodos Oferta.	42
6.1.2	<i>Parámetros</i>	44
6.1.2.1	Demanda de Residuos Reciclables de la Cuadra i .	44
6.1.2.2	Distancia Mínima entre la Cuadra i y la Instalación Drop-Off j .	45
6.1.2.3	Radios de Cobertura.	45
6.1.2.4	Número Máximo de Instalación Drop-Off.	46
6.1.2.5	Coefficiente de tolerancia.	46
6.2	Resultados y Análisis	51
6.2.1	<i>Resultados Generales</i>	51
6.2.2	<i>Resultados vs Metas de Recolección y Valorización</i>	54



6.2.3	<i>Resultados respecto a la Situación Actual de la Comuna</i>	59
7	Conclusiones	66

Lista de Tablas

1	Metas de recolección y valorización de envases y embalajes por subcategoría de acuerdo con Decreto Supremo N°12	20
2	Metas de recolección y valorización en kilogramos de la zona de estudio de acuerdo con el Decreto Supremo N°12.	55
3	Resultados generales para nueve iteraciones considerando la situación actual de la zona de estudio.	61

Lista de Figuras

1	Toneladas producidas de residuos sólidos municipales a nivel nacional durante 2018 a 2021	13
2	Toneladas de Residuos Sólidos Municipales por Región	14
3	Función de beneficio relativo para la cobertura. Forma 1	29
4	Función de beneficio relativo para la cobertura. Forma 2	29
5	Visualización de la función de cobertura para una cuadra i	36
6	Manzanas censales de Viña del Mar pertenecientes a zona de estudio.	41
7	Centroides de cada manzana censal de Viña del Mar.	42
8	Posibles locaciones para instalar estaciones de drop-off.	43
9	Composición Residuos para la Comuna de Viña del Mar	44
10	Función de cobertura con $u = 0$.	47
11	Función de cobertura con $u < 0$.	47



12	Función de cobertura con $u = 1$	48
13	Función de cobertura con $u > 1$	48
14	Función de cobertura con u tendiendo a infinito.	49
15	Recolección esperada de residuos vs máxima cantidad de estaciones (p).	52
16	Cantidad de estaciones drop-off instaladas x_j vs máxima cantidad de estaciones (p).	53
17	Cantidad de cuadras cubiertas vs máxima cantidad de estaciones (p).	54
18	Recolección de residuos reciclables según la cantidad máxima de instalaciones a instalar vs. metas de recolección y valorización.	55
19	Localización meta año 3.	56
20	Localización meta año 6.	57
21	Localización meta año 9.	57
22	Localización meta año 12.	58
23	Ubicación actual de los puntos limpios en la zona de estudio.	60
24	Recolección de residuos reciclables según la cantidad máxima de estaciones a ins- talar vs. metas de recolección y valorización — Situación actual.	62
25	Localización meta año 6 - Situación actual.	63
26	Localización meta año 9 - Situación actual.	64
27	Localización meta año 12 - Situación actual.	64

1 Resumen Ejecutivo

La presente memoria tuvo por objetivo determinar las ubicaciones óptimas para estaciones de recolección (drop-off) y evaluar si dicha infraestructura permite cumplir las metas regulatorias establecidas por el Decreto Supremo N.º 12, vinculado a la Ley N.º 20.920. Para ello se empleó un modelo de cobertura gradual que incorpora la dependencia de la disposición a reciclar respecto de la distancia y características socioeconómicas de cada manzana de la zona de estudio.

Los resultados muestran que la meta máxima planteada por el Decreto puede alcanzarse instalando 26 estaciones entre las 98 ubicaciones candidatas identificadas, y que el uso de todas las ubicaciones viables permitiría una recolección potencial máxima equivalente al 79 % de la producción total de residuos reciclables de la zona.

Además, el análisis de la situación actual indica que la localización de los puntos limpios existentes no es óptima: seis instalaciones operativas recolectan aproximadamente 8 toneladas diarias, mientras que la misma cantidad situada en las posiciones óptimas del modelo permitiría cerca de 12 toneladas diarias. La infraestructura existente —incluido un despliegue de puntos monomateriales— permite cumplir las metas hasta el 16 de septiembre de 2026 (año 3 del calendario de metas) y varias de estas instalaciones fueron instaladas antes de la publicación del Decreto N°12. Esto evidencia una desconexión entre la normativa y la realidad local, y reduce el incentivo de los productores para migrar hacia un sistema puerta a puerta.

A partir de estos hallazgos, se recomienda reconsiderar la formulación y los mecanismos de cumplimiento de las metas de recolección, priorizando la optimización de la localización de estaciones y una estrategia que incorpore tanto puntos drop-off bien ubicados como medidas que faciliten la transición hacia sistemas de recolección domiciliaria cuando corresponda.



Palabras Clave — Localización óptima, Estaciones de recolección, Residuos reciclables,
Ley N°20.920, Decreto N°12, Gradual Covering Location Problem, Viña del Mar.

2 Problema de Investigación

Durante gran parte del siglo XX, el mundo implementó un "modelo de consumo lineal, que consistía en comprar-usar-desechar, impulsando así la producción al ritmo del consumismo que imponían los mercados"(Mora Blandón et al., 2020, p.5). Esto generó un aumento significativo en la cantidad de residuos a nivel mundial, lo que sobrecargó la capacidad de vertederos y rellenos sanitarios. Esta situación persiste hasta el presente, y se espera que para el año 2050 se produzcan 3539 millones de toneladas de residuos a nivel global. (Chen et al., 2020)

En Chile esta situación no ha sido diferente, solo “en el año 2021 se generó un total de 20 millones de toneladas de residuos, de los cuales el 97 % equivale a residuos no peligrosos y el 3 % a residuos peligrosos.” (Ministerio del Medio Ambiente, 2023) donde el “46 % corresponde a residuos sólidos municipales” (Ministerio del Medio Ambiente, 2023).

Para enfrentar este problema, en el año 2016 se promulgó la Ley 20.920, la cual extiende la responsabilidad del productor sobre los residuos generados por el consumo de sus productos. Esta ley obliga a los productores a financiar y gestionar sistemas de transporte y tratamiento de dichos residuos. (Ley N°20.920, 2016). Sin embargo, no es hasta el año 2021 donde se promulga el Decreto N° 12, que establece las metas de recolección y valorización de envases y embalajes (Decreto N°12, 2016).

Dado que la Ley 20.920 propone metas de recolección, esto impulsará a los productores a centrarse en sectores densamente poblados, donde se generan mayores cantidades de residuos sólidos municipales (Zambrano-Monserrate et al., 2021), para cumplir con sus metas que propone la Ley. Si bien la Región Metropolitana posee el 40 % de la población nacional (SUBDERE, s.f.), es interesante analizar otras regiones como la Región de Valparaíso, que mantiene esta alta pro-

porción de población y es la segunda región de Chile con mayor producción de residuos sólidos municipales (Ministerio del Medio Ambiente, 2023).

Dado que la Región de Valparaíso es importante para los sistemas de gestión que se están implantando por la Ley 20.920, surge la necesidad de entender las consecuencias y soluciones de la aplicación de la Ley a las propias comunas de esta región. Principalmente en comunas ya establecidas como Viña del Mar, que a pesar de estar fuertemente urbanizadas sigue aumentando la población con una expectativa de aumentar un 11 % desde el año 2017 hasta el final del año 2024 (BCN, s.f.).

Debido a lo anterior, se formularon las siguientes preguntas de investigación que se busca responder con esta memoria:

1. ¿Cuáles son las implicancias en el uso de recursos en la comuna de Viña del Mar que provoca la implementación de la Ley 20.920?
2. ¿Cuál es la localización óptima de estaciones de recolección para maximizar la recolección de residuos reciclables y cumpliendo lo propuesto en la Ley 20.920 en la comuna de Viña del Mar?
3. ¿La cantidad de lugares de reciclaje que existen actualmente cumplen con lo requerido por la Ley 20920 dentro de la comuna de Viña del Mar?

Para responder a estas preguntas de investigación, se procederá a realizar un análisis a la Ley 20.920 junto a todos los decretos promulgados posterior a la publicación de la Ley que influyan en su funcionamiento, para establecer los requisitos y su aplicabilidad a la comuna de Viña del Mar. Para luego construir un modelo de programación de localización óptima para determinar dónde instalar las estaciones de recolección con tal de cumplir los requerimientos que establece la ley. A



partir de los resultados obtenidos, se hace una evaluación entre las metas establecidas por la ley y los resultados obtenidos del modelo, lo que permitirá determinar si se pueden cumplir los objetivos de la ley y revisar si es coherente con la realidad de la comuna de Viña del Mar.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar los lugares donde instalar puntos de reciclaje en la comuna de Viña del Mar con el fin de verificar y comparar los resultados a las metas establecidas en la Ley N° 20.920, a partir de un modelo de programación matemática de localización óptima.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar la situación actual de generación de residuos sólidos municipales de la comuna de Viña del Mar, para determinar la cantidad de toneladas producidas por lugar habitacional.
- Identificar las metas y requisitos de la Ley N°20.920 para determinar la responsabilidad del productor.
- Formular un modelo de programación matemática que permita determinar las locaciones óptimas de los puntos de reciclaje en Viña del Mar, para cumplir con las metas establecidas por la Ley N°20.920.
- Comparar los resultados obtenidos del modelo respecto a lo pedido por la Ley N°20.920 para la comuna de Viña del Mar para revisar el correcto cumplimiento de la ley.

4 Marco Teórico

4.1 Problema de los Residuos Sólidos Municipales

4.1.1. *Antecedentes*

Los residuos sólidos municipales se definen como aquellos generados principalmente en los hogares y en establecimientos que prestan servicios, así como en pequeñas industrias. Estos incluyen edificios habitacionales, locales comerciales, expendios de alimentos, hoteles, establecimientos educacionales, cárceles, entre otros. Además, se consideran los residuos derivados del aseo de vías públicas, áreas verdes y playas. (Ministerio del Medio Ambiente, 2023)

La gestión de los residuos sólidos municipales es una prioridad para muchos países (Zlobina et al., 2021), una mala administración puede generar graves impactos en las comunidades y el medio ambiente donde se eliminan los desechos. La acumulación de estos residuos puede provocar cambios irreversibles en las propiedades físicas, químicas y biológicas del agua subterránea, afectando tanto la ecología como la economía de las áreas cercanas (Zlobina et al., 2021). Otros efectos incluyen un mayor riesgo de inundaciones (Fakorede et al., 2021), aumento en la transmisión de enfermedades y problemas respiratorios causados por la incineración de desechos, entre otras consecuencias. (Kaza et al., 2018)

Según el reporte “Global Waste Management Outlook” se estima que, en el año 2020, el mundo generaba 2100 millones de toneladas anuales de residuos sólidos municipales. De este total, al menos el 38 % se clasificaba como desechos no controlados, lo que significa que no eran gestionados de manera ambientalmente adecuada, siendo eliminados en vertederos ilegales o incinerados al aire libre. Además, el reporte estima que para el año 2050 la generación de residuos

aumentará a 3800 millones de toneladas, lo que representa un incremento del 56 %. (UNEP, 2024)

La situación en Chile no difiere mucho del panorama global. De acuerdo con el Octavo Reporte del Estado del Medio Ambiente, en el año 2021 se generaron alrededor de 9 millones de toneladas de residuos municipales para una población estimada de 20 millones de personas, lo que equivale a una generación per cápita de 1 kilos al día. (Ministerio del Medio Ambiente, 2023). En la Figura 1 se puede observar el cambio de la generación entre años de las toneladas de residuos sólidos municipales, notando un aumento del 1 % en el año 2021 respecto al año anterior.

Figura 1

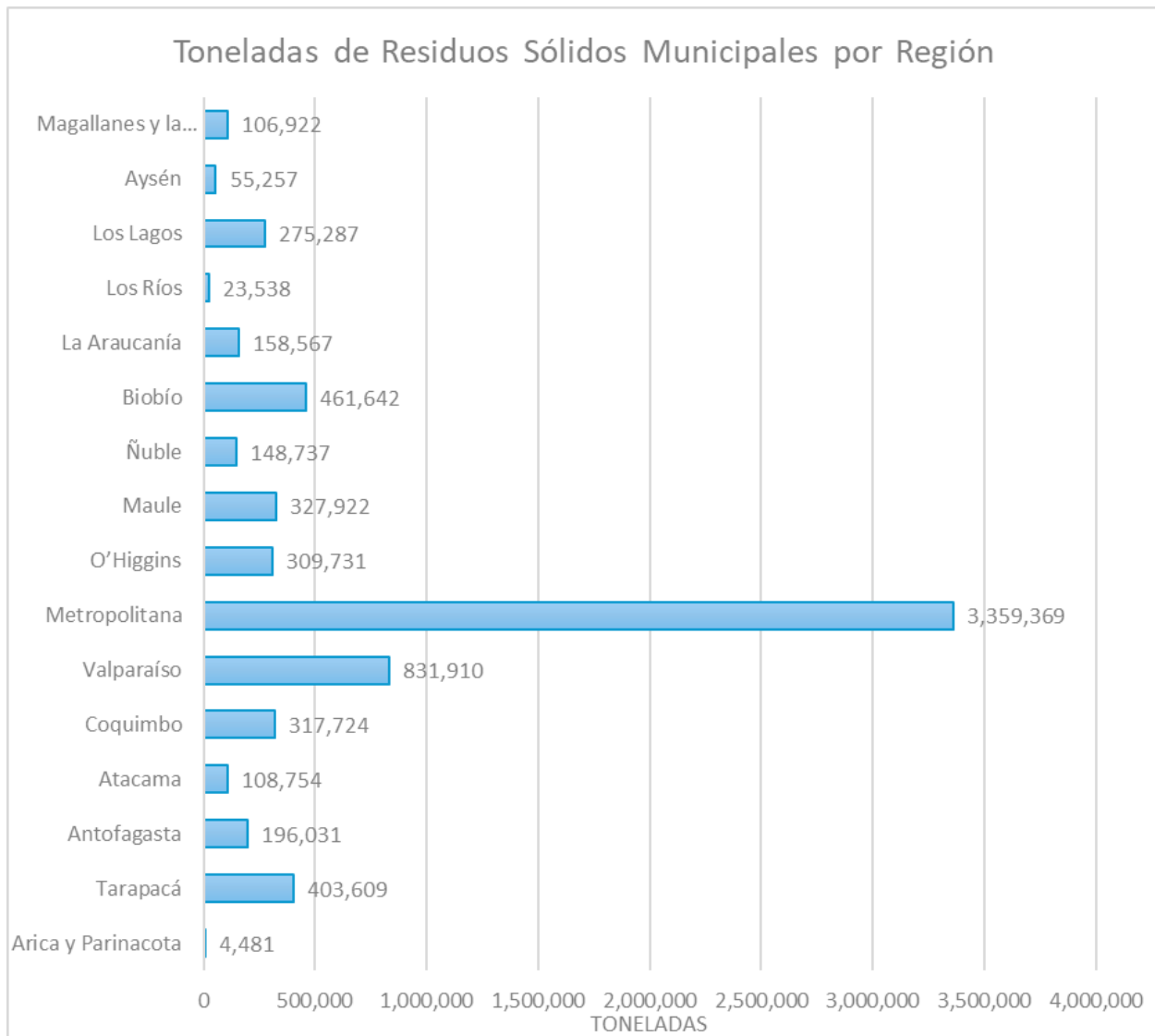
Toneladas producidas de residuos sólidos municipales a nivel nacional durante 2018 a 2021



Nota. Adaptado de *Ministerio del Medio Ambiente, 2023*.

Del total presentado el 47 % de los residuos corresponden a la Región Metropolitana, seguido por la región de Valparaíso con un 11,7 % y, en tercer lugar, la región de Biobío con un 6,5 %. (Ministerio del Medio Ambiente, 2023), estos porcentajes se pueden inferir en la Figura 2.

Figura 2
Toneladas de Residuos Sólidos Municipales por Región



Nota. Adaptado de *Ministerio del Medio Ambiente*, 2023.

4.1.2. Destino Final de los Residuos

Otro de los problemas en la gestión de los residuos es el destino final, una vez recolectados y transportados. Estos residuos pueden ser sometidos a algún tipo de valorización o disposición final, y donde una mala gestión de esta etapa puede generar consecuencias negativas, como problemas ambientales, económicos o de salud (Kaza et al., 2018). Por lo tanto, la valorización se refiere al

“conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar un residuo, uno o varios de los materiales que lo componen y/o el poder calorífico de los mismos.” (Ministerio del Medio Ambiente, 2021, p.214).

Estas acciones se dividen en tres, siendo:

- La reutilización se define como “la acción de revisión, limpieza o reparación, mediante la cual productos o componentes de productos desechados se acondicionan para que puedan reutilizarse sin ninguna otra transformación previa” (Ley N°20.920, 2016)
- El Reciclaje se puede definir como el uso de un residuo como insumo o materia prima en un proceso productivo, (Ministerio del Medio Ambiente, 2021)
- La valorización energética se define como emplear un residuo con el objetivo de aprovechar su poder calorífico. (Ley N°20.920, 2016)

Por otro lado, la disposición final de los residuos corresponde al proceso en el cual estos son depositados, ya sea en instalaciones legales o ilegales. Se reconocen cinco tipos principales de disposición final (Font, 2021):

- El basural se define como un lugar donde se disponen los residuos, en forma espontánea o programada, sin control sanitario ni ambiental.
- El Vertedero es un lugar de disposición final de residuos, que ha sido planificado para ese fin. Sin embargo, no cuenta con los requisitos y medidas sanitarias mínimas establecidas por el decreto supremo 189.
- El Relleno Sanitario es un sistema de disposición final de residuos sólidos municipales, construida y operada para reducir riesgos sanitarios y ambientales.

- El Vertedero ilegal, corresponde a sitios eriazos de más de una hectárea, donde se depositan sobre el suelo, residuos sólidos de distinta naturaleza, sin tomar medidas de mitigación para proteger el medio ambiente y la salud de las personas colindantes al sitio.
- Los Microbasurales son sitios similares a los vertederos ilegales, pero de menos de una hectárea, generalmente ubicados cerca de zonas habitacionales.

Dentro del contexto nacional, los datos del año 2021 muestran que el 50 % de los residuos se dispusieron en rellenos sanitarios y el 7 % en vertederos, mientras que el 20 % de los residuos sólidos municipales se sometieron a algún tipo de valorización. Esta tendencia refleja un cambio significativo en comparación con el año 2015 (Ministerio del Medio Ambiente, 2023). Esto indica que Chile está en transición de un modelo lineal de “extraer-utilizar-desechar”, que se basa en extraer recursos, transformarlos en productos finales, el consumo y luego el desecho, a un modelo de “economía circular”. Este nuevo enfoque busca encontrar un destino útil para los residuos, reintegrándolos en la cadena de producción, lo que mejora la productividad y reduce las consecuencias negativas previamente mencionadas (BCN, 2018). La transición hacia un modelo de “economía circular” en Chile ha sido impulsada por diversos incentivos legales. Un ejemplo destacado es la promulgación de la Ley N° 20.920, que establece un marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y el fomento del reciclaje. Esta ley tiene como objetivo incentivar el reciclaje dentro de las comunidades y crear una responsabilidad extendida para la recolección y valorización de los residuos reciclables.

4.1.3. Ley N° 20.920

En el año 2016 se promulgo la Ley N° 20.920, la cual establece un “marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y el fomento del reciclaje” (Ley N°20.920, 2016). Su principal objetivo es reducir la generación de residuos y fomentar la reutilización, el reciclaje y otros tipos de valorización, priorizándolos sobre la alternativa de la disposición final. La ley introduce la política de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), una herramienta muy usada en países europeos y Japón, donde ha demostrado ser efectiva. Esto se refleja en la diferencia entre el 1 % de residuos que estos países destinan a relleno sanitario, en comparación con el 50 % en Chile (Segura Á., 2020).

La Ley N° 20.920 establece que los productores de productos prioritarios son responsables de la organización y financiamiento de la gestión de los residuos generados por la comercialización de sus productos en Chile. De esta forma, los productores deben internalizar los costos y externalidades negativas relacionadas con el manejo de dichos residuos.

Para cumplir con sus objetivos, la ley incorpora varias herramientas destinadas a prevenir la generación de residuos, mediante incentivos y promoción de la valorización de residuos ya generados o futuros (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.). Dentro de ellas, las que se centran en la gestión de residuos sólidos municipales son:

- Sistemas de depósito y reembolso: mecanismo mediante el cual se cobra un pequeño depósito al consumidor final del producto en el momento de su compra, el cual será devuelto al consumidor en el momento en el que entregue el residuo de dicho producto en uno de los puntos destinados a tal efecto. (G-Advisory, 2018)

- Mecanismos de separación en origen y recolección selectiva de residuos: Son mecanismos donde el consumidor final se encarga de separar los residuos por tipos en el momento en que se producen, para lograr una eficiente recolección de estos. (G-Advisory, 2018)

Los productos prioritarios incluyen aceites lubricantes, aparatos electrónicos y eléctricos, baterías y pilas, envases y embalajes, neumáticos, y diarios y revistas. Estos productos están divididos en categorías que serán tratadas en diversos decretos supremos, en los cuales se establecen metas y obligaciones específicas para que los productores se hagan responsables de su gestión.

Además de lo mencionado anteriormente, la ley establece mecanismos de apoyo a la implementación del REP, donde los más importantes y que se relacionan con la gestión de residuos domiciliarios son:

- Educación ambiental: Sera de responsabilidad del Ministerio diseñar e implementar programas de educación ambiental, tanto de forma formal e informal, destinados a transmitir conocimientos y crear conciencia en la comunidad sobre la prevención en la generación de residuos y su valorización. (Ley N°20.920, 2016)
- Municipalidades: Las municipalidades podrán tomar acciones con el fin de colaborar con el adecuado cumplimiento de la Ley N° 20.920, a través de la celebración de convenios con sistemas de gestión y la incorporación a las ordenanzas municipales de la obligación de separar los residuos en origen y fomentar el reciclaje. (Ley N°20.920, 2016)
- Obligación directa a los consumidores: La Ley N° 20.920 obliga al consumidor de un producto prioritario a entregar el residuo de este al respectivo sistema de gestión, bajo las condiciones básicas establecidas por éstos e informadas a todos los involucrados. (Ley N°20.920, 2016)

Las metas de recolección, valorización y demás obligaciones relacionadas con los productos prioritarios serán establecidas por el decreto supremo correspondiente. La Superintendencia será la encargada de fiscalizar el cumplimiento de estas metas, y las infracciones serán sancionadas según su gravedad (Ley N°20.920, 2016).

Lo expuesto anteriormente describe el marco legal general de la Ley N° 20.920. Sin embargo, su correcta implementación requiere de decretos específicos para cada uno de los productos prioritarios mencionados. Hasta la fecha de esta memoria, solo se han promulgado dos decretos supremos: uno para envases y embalajes, y otro para neumáticos.

4.1.4. *Decreto Supremo N°12: Sobre Envases y Embalajes*

El Decreto Supremo N°12, promulgado el 16 de marzo de 2021, establece las metas de recolección y valorización, además de otras obligaciones específicas, enfocadas en los envases y embalajes. Este decreto se centra en regular los envases que se introducen en el mercado nacional, excluyendo aquellos reutilizables para el cumplimiento de las metas estipuladas.

En cuanto a la clasificación, los envases domiciliarios se dividen en cinco subcategorías principales: cartón para líquidos; metal; papel y cartón; plástico y vidrio. Si un envase no se ajusta a estas categorías, será clasificado en la subcategoría otros. Para los envases compuestos, se establece que, si el 85 % de la masa corresponde a un único material, el envase será clasificado en la subcategoría correspondiente a dicho material. En caso contrario, se asignará a dos o más subcategorías según su composición. Una excepción a esta regla son los cartones para líquidos, que siempre serán considerados dentro de su propia subcategoría, independientemente de su composición.

Este decreto también define las responsabilidades de los productores que introducen bie-

nes de consumo envasados o embalados en el mercado nacional, siempre que estos envases estén compuestos por al menos uno de los cinco materiales mencionados. Sin embargo, quedan exentos de estas obligaciones los productores que califiquen como microempresas o PYMES, así como aquellos que introduzcan menos de 300 kilogramos de envases al año.

4.1.4.1. Metas de Recolección y Valorización. Las metas de recolección y valorización de residuos de envases y embalajes domiciliarios que deben cumplir los productores a través de los sistemas de gestión están definidas según la cantidad de envases introducidos por ellos en el mercado nacional de acuerdo con lo establecido en la Tabla 1

Tabla 1

Metas de recolección y valorización de envases y embalajes por subcategoría de acuerdo con Decreto Supremo N°12

Subcategoría	Cartón para líquidos	Metal	Papel y cartón	Plástico	Vidrio
Primer año	5 %	6 %	5 %	3 %	11 %
Segundo año	8 %	9 %	9 %	6 %	15 %
Tercer año	11 %	12 %	14 %	8 %	19 %
Cuarto año	15 %	15 %	18 %	11 %	22 %
Quinto año	19 %	17 %	23 %	14 %	26 %
Sexto año	23 %	21 %	28 %	17 %	31 %
Séptimo año	27 %	25 %	34 %	20 %	37 %
Octavo año	31 %	29 %	39 %	23 %	42 %
Noveno año	36 %	32 %	45 %	27 %	47 %
Décimo año	40 %	36 %	50 %	30 %	52 %
Undécimo año	50 %	45 %	60 %	37 %	58 %
A contar del duodécimo año	60 %	55 %	70 %	45 %	65 %

Nota. Adaptado del Decreto Supremo N°12, 2021

A partir del 16 de septiembre de 2023 y durante los cuatro años de vigencia de esta disposición, los productores tendrán la posibilidad de cumplir hasta un 50 % de las metas asociadas a cada subcategoría de envases utilizando toneladas equivalentes de otras subcategorías, con la excepción del vidrio, que no puede ser considerado para este reemplazo.

El cumplimiento de las metas se considerará logrado únicamente en el momento en que

se produzca la valorización de los residuos. Esto implica que el simple acopio o transporte de los materiales no será suficiente; será necesario que los mismos hayan sido efectivamente procesados o reutilizados de acuerdo con las normativas establecidas.

Dado lo anterior, los productores afectados por la Ley N°20.920 verán como una oportunidad aquellas comunas donde la generación de residuos es relativamente más alta que el resto de las comunas del país, para su recolección y posterior valorización. Por lo que Viña del Mar se vuelve un caso interesante de investigar y decidir donde comenzar las gestiones.

4.2 Situación Actual del Sistema de Gestión de Residuos en Viña Del Mar.

Antes de analizar los efectos de la Ley N°20.920 en la comuna de Viña del Mar, resulta fundamental comprender su situación actual desde una perspectiva demográfica y de gestión de residuos domiciliarios.

La comuna de Viña del Mar se encuentra en la Región de Valparaíso en la parte central del país. Cuenta con una superficie de 121,6 km² y con una proyección de población de 371.490 habitantes al 2024 en base al último censo del año 2017 (BCN, s.f.).

Con el fin de entender de mejor manera el sistema actual de la comuna en gestión de residuos sólidos municipales, a continuación, se presenta la generación de residuos sólidos domiciliarios en la comuna y su forma de recolección.

4.2.1. *Generación de Residuos Sólidos Municipales*

Al año 2022, la comuna generó 156.684 toneladas de residuos sólidos municipales en solamente ese año (SUBDERE, 2024). Lo que corresponde una producción per cápita de 1,17 kg/día, dicho valor se encuentra sobre el nivel nacional de 1 kg/día. (Ministerio del Medio Ambiente,

2023)

Además, es importante conocer la proporción de generación de las distintas categorías, pero no se encuentra información actualizada de la proporción en la comuna de Viña del Mar.

4.2.2. Cobertura de Servicios de Aseo y Sistema de Recolección

Al año 2022, la comuna de Viña del Mar cuenta con una cobertura total en servicios de aseo, gestionados a través de un sistema mixto que combina recolección municipal y privada (SUBDERE, 2024).

El sistema de recolección se organiza en torno a la disposición de residuos en contenedores ubicados en puntos estratégicos, desde donde son recogidos por camiones recolectores. Estos puntos están distribuidos en zonas cercanas a los hogares, permitiendo que las familias depositen sus residuos según la programación comunicada por el municipio. La frecuencia de recolección es diaria, operando siete días a la semana (SUBDERE, 2024).

Considerando lo mencionado anteriormente, es importante para el análisis del considerar las dimensiones y tamaño poblacional de la comuna, pero esto no deja de aparte otros factores que pueden afectar a la formulación de un modelo matemático que se ajuste correctamente a la realidad que ocurre en la comuna

4.3 Factores Que Considerar En Programas Drop-Off

De acuerdo con varios estudios, el éxito de un programa de reciclaje mediante el uso de instalaciones drop-off depende de la participación de los hogares, sus costumbres de como tratan los residuos que producen y la familiaridad que tienen estos hogares con el sistema (Sidique et al., 2010). Uno de los principales factores que influyen en la motivación hacia el reciclaje son los

considerados factores logísticos.

Dentro de estos factores logísticos podemos encontrar:

- **Ubicación y Accesibilidad:** La proximidad de las estaciones de reciclaje a las áreas residenciales es crucial. Los costos de viaje y la distancia a las estaciones de drop-off afectan significativamente la frecuencia de uso. Cuanto más cerca estén las estaciones, mayor será la participación (Sidique et al., 2013).
- **Interacción con el entorno:** Como dichas estaciones de reciclaje interactúen ya sea en su forma o condición de llenado afectan a la disposición de la población a utilizarlas ya que nadie quiere estar cerca de una estación de basura llena por las consecuencias ambientales y olores que pueden emitir (Cho et al., 2006).
- **Tamaño y Número de Estaciones:** La planificación estratégica del número y tamaño de las estaciones de drop-off es esencial para cubrir adecuadamente la población y minimizar las distancias de viaje tanto para los usuarios como para los vehículos de recolección (Gautam y Kumar, 2005).

Para esta memoria nos centraremos en los dos primeros factores mencionados, ya que estos están directamente relacionados con el problema de localización de estaciones drop-off y como se integran dentro del entorno.

4.3.1. *Distancia y Accesibilidad de los Puntos de Recolección*

La actividad de reciclaje implica una inversión significativa de tiempo, espacio, dinero y esfuerzo por parte de las personas. Por ello, si el proceso se vuelve más accesible y conveniente, la participación en actividades de reciclaje debería incrementarse (Sidique et al., 2010).

Uno de los factores más determinantes en este contexto es la distancia entre los hogares y las estaciones drop-off. La relación entre la proximidad de estas instalaciones y la disposición de la población a reciclar ha sido ampliamente documentada en estudios previos. Por ejemplo, Tchobanoglous et al. (1993) establecieron que una adecuada localización de los puntos de recolección no solo reduce el costo personal del reciclaje, sino que también fomenta la participación en esta práctica.

De manera más específica, González-Torre y Adenso-Díaz (2005) concluyeron que, mientras menor sea la distancia entre los hogares y los puntos de recolección, mayor será la fracción de personas que optarán por reciclar. En el caso de España, identificaron que una persona preocupada por el medio ambiente no está dispuesta a destinar más de 5 minutos de ida y vuelta para trasladar sus residuos a un punto drop-off, es decir considerando que una persona camina en promedio $\frac{5 \text{ km}}{h}$, implica que estaría dispuesto a recorrer hasta aproximadamente 200 m para llegar al punto de recolección. Por otro lado, Sidique et al. (2010) determinaron que la cantidad de visitas a un punto de reciclaje disminuye en un 1 % por cada milla adicional de distancia recorrida, considerando el viaje de ida y vuelta.

Estos hallazgos demuestran que la distancia es un factor crítico en la implementación de programas de reciclaje mediante estaciones drop-off. La cercanía a los hogares desempeña un papel preponderante en la decisión de las personas para participar en actividades de reciclaje, siendo uno de los principales aspectos que deben considerarse al diseñar estrategias para mejorar la sostenibilidad y cumplir con las normativas vigentes, pero no es el único factor que afecta la decisión de las personas sino también como dichas estaciones interactúan con su alrededor.

4.3.2. *Interacción con el entorno*

La comuna de Viña del Mar es considerada una comuna con fuerte connotación turística, “esto se debe a su geografía, playas, áreas verdes y oferta cultural y gastronómica” (Municipalidad de Viña del Mar, s.f.). Esto ha construido una cultura dentro de los habitantes de la ciudad que intentan mantener de la mejor manera, por lo que es importante que la adición de los nuevos contenedores para residuos no impacte en la imagen de la ciudad, ya que una mala decisión en la colocación puede provocar que dichas estaciones superen su capacidad y desincentiven el reciclaje.

4.4 Modelos De Cobertura

Los problemas de cobertura buscan determinar la cantidad mínima de instalaciones necesarias y su ubicación óptima para garantizar que toda persona sea cubierta por una instalación dentro de una distancia razonable (Church y Velle, 1974). Este enfoque es especialmente relevante en proyectos de carácter público o en servicios de emergencia, donde se prioriza que la distancia a la instalación no supere un límite previamente definido.

En este caso, se presentarán dos modelos matemáticos de cobertura que proporcionan una formulación y un método de decisión matemática para la ubicación e instalación de los puntos de recolección ("drop-off"). Estos puntos permitirán a la población depositar sus envases y embalajes reciclables, cumpliendo con los requisitos establecidos por la Ley N° 20.920.

Para un mejor entendimiento de los modelos que a continuación se presentarán, se tiene que definir los siguientes términos:

- **Nodo Demanda:** Lugar donde se concentra la demanda de una parte específica de la población.

- **Nodo Candidato u Oferta:** Punto donde es posible instalar un servidor que atienda la demanda de la población.
- **Radio de Cobertura:** Distancia máxima a la que se puede encontrar un nodo oferta del nodo demanda, de tal manera que se considere que el nodo demanda se encuentra “cubierto”

4.4.1. *Modelo De Cobertura Máxima*

El modelo de localización de cobertura máxima o *Maximum Covering Location Problem* (MCLP) fue un modelo introducido por Church y Velle en 1974, este problema busca localizar un cantidad de p instalaciones para cubrir la máxima cantidad de demanda dado un radio de cobertura máximo que tiene cada instalación.

Formalmente, el problema se formula como sigue:

- **Conjuntos**

I : Conjunto de nodos demanda, indexado en $i \in \{1, \dots, |I|\}$

J : Conjunto de nodos candidatos, indexado en $i \in \{1, \dots, |J|\}$

- **Conjuntos indexados**

$N_i = \{j \in J : d_{ij} < S\}$: Conjunto de nodos candidatos cuya distancia con el nodo demanda i es menor al radio de cobertura máximo S .

- **Parámetros**

p : Número máximo de servidores a instalar

S : Conjunto de nodos candidatos, indexado en $i \in \{1, \dots, |J|\}$

d_{ij} : Distancia mínima entre el nodo demanda i y nodo candidato j

h_i : Demanda del nodo i

- Variables

x_j : 1 si se instala un servidor en j ; 0 en otro caso

y_i : 1 si el nodo i está cubierto por un servidor; 0 en otro caso

- Restricciones

1. No se puede instalar más de p servidores

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (1)$$

2. Un nodo demanda i no puede estar cubierto a menos que haya un servidor en su vecindad.

$$y_i \leq \sum_{j \in N_i} x_j \quad \forall i \in I \quad (2)$$

3. Integridad

$$x_j, y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3)$$

- Función objetivo

$$\max_{x,y} \sum_{i \in I} h_i y_i \quad (4)$$

■ Modelo Compacto

$$\begin{aligned} \text{MCLP: } & \max_{x,y} \sum_{i \in I} h_i y_i \\ \text{s.t: } & \sum_{j \in J} x_j \leq p \\ & y_i \leq \sum_{j \in N_i} x_j \quad \forall i \in I \\ & x_j, y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \end{aligned}$$

Este modelo presenta una limitación significativa, ya que asume que toda la demanda de un nodo se satisface si está cubierto (dentro de la distancia razonable) y que no se satisface en caso contrario. Sin embargo, este enfoque binario puede ser inadecuado para escenarios reales, donde la satisfacción de la demanda puede depender de la proximidad del punto de servicio.

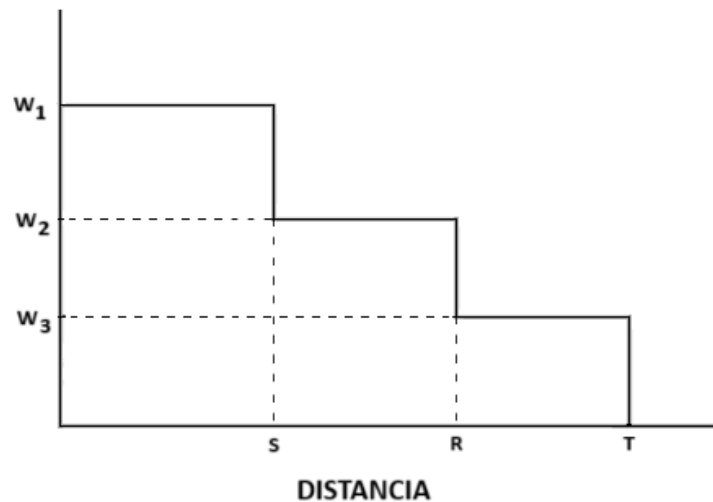
En este contexto, uno de los factores cruciales que afecta la demanda es la distancia de traslado, ya que influye directamente en la motivación de una persona para participar en el reciclaje. Modelos más realistas, como los modelos de cobertura gradual, consideran este factor de distancia.

4.4.2. Modelos Generalizados de Cobertura

Tal como menciona Church y Roberts (1983), el modelo de cobertura máxima simplifica la realidad al considerar que cada nodo de demanda se encuentra completamente cubierto cuando se instala un servidor en un nodo de oferta dentro de un rango R , situación que no tiende a darse en la realidad, ya que cada instalación trae sus propios beneficios y perjuicios a la zona en donde se instala, afectando la curva de beneficios según los efectos y distancias de estos mismos como se observa en la Figura 3 y 4, donde $w_1 < w_2 < w_3$ y $S < R < T$

Figura 3

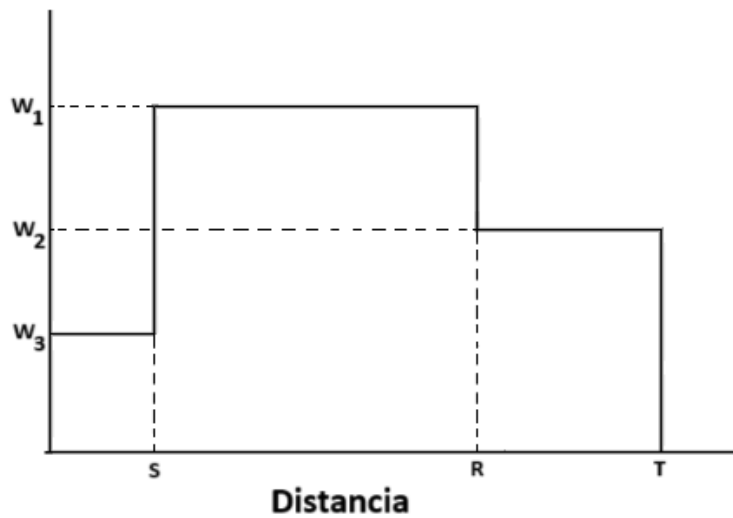
Función de beneficio relativo para la cobertura. Forma 1



Nota. Extraído y restaurado de Church y Roberts (1983).

Figura 4

Función de beneficio relativo para la cobertura. Forma 2



Nota. Extraído y restaurado de Church y Roberts (1983).

Se observa que en ambos casos dependiendo de la distancia que exista entre los nodos, el nodo de demanda estará afectado por un beneficio relativo específico según la curva.

4.4.2.1. Forma 1 Para resolver problema que use una curva como la presentada en la Figura 3, Church y Roberts (1983) formulo el siguiente modelo que combina los modelos de cobertura máxima y el problema de la P-mediana:

Función objetivo:

$$\max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} a_i c_{ij} y_{ij} \quad (5)$$

s.t.:

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I, \quad (6)$$

$$y_{ij} \leq x_j \quad \forall i \in I, j \in J, \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (8)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, \quad (9)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (10)$$

Conjuntos y Parámetros:

- I : Conjunto de nodos de demanda.
- J : Conjunto de nodos de ofertas.
- a_i : Peso, demanda (ejemplo población) del nodo de demanda i .
- c_{ij} : Beneficio de servir la nodo demanda i con el nodo oferta j .
- p : Numero de instalaciones a localizar.

4.4.2.2. Forma 2 Para resolver un problema con la curva de beneficio relativo presentada en la Figura 4, Church y Roberts (1983) menciona que dicho problema se puede resolver a través de la misma formulación que se menciono anteriormente, junto a la siguiente restricción adicional:

$$y_{ij} \geq x_j - \sum_{k \in G_{ij}} x_k \quad \forall i \in I, j \in N_i$$

Donde:

$$G_{ij} = \{k \in J \setminus \{j\} : d_{ik} \leq d_{ij}\}$$

$$N_i = \{j \in J : d_{ij} \leq S\}$$

Esta restricción garantiza que la demanda del nodo i se asigna a la instalación más cercana. Dado que el beneficio relativo de la cobertura es menor cuando el centro más cercano está a una distancia S en comparación con un centro en el rango (S, R) , la restricción fuerza la asignación al centro más cercano para capturar la disminución del beneficio. Este tipo de restricción es necesaria para aquellas partes de la curva cobertura-beneficio que no disminuyen monotónicamente con la distancia.

El problema de la p-mediana con las restricciones de asignación más cercana puede acomodar cualquier número de 'pasos' en una función de beneficio de Forma 2, siempre que se incluya una restricción de asignación más cercana para cada demanda i y cada centro j correspondiente a segmentos no decrecientes de la curva de beneficio.(Church y Roberts, 1983)

Pero dicha función de beneficios acarrea una relajación al considerar que el nodo demanda si se encuentra dentro del rango S tiene un beneficio relativo w_1 y si esta fuera de este un w_2 ($w_1 < w_2$) a pesar que entre dichas distancias pueden diferenciarse por muy poca distancia. Por

esta falencia se necesita buscar modelos que apunten a retirar esta relajación

4.4.3. *The Gradual Covering Location Problem*

El modelo de cobertura gradual, como se describe, es una generalización del Modelo de Cobertura Máxima (MCLP) que incorpora la relación entre el nivel de cobertura y la distancia a las instalaciones (Berman et al., 2010), incorporando aspectos de los modelos de p-mediana como la asignación de la demanda i a la instalación j . A diferencia del MCLP tradicional, que utiliza una cobertura binaria (total o nula), este modelo asume que la cobertura disminuye gradualmente a medida que aumenta la distancia entre los puntos de demanda y las instalaciones.

Este enfoque permite una representación más precisa y realista de fenómenos como la disposición a reciclar, ya que refleja la tendencia de la población a participar menos en el reciclaje cuando los puntos drop-off están más alejados.

Formalmente, el modelo se formula como sigue:

- Conjuntos

I : Conjunto de nodos demanda, indexado en $i \in \{1, \dots, |I|\}$

J : Conjunto de nodos candidatos, indexado en $i \in \{1, \dots, |J|\}$

- Conjuntos indexados

$N_i = \{j \in J : d_{ij} < R_{max}(i)\}$: Conjunto de nodos candidatos cuya distancia con el nodo demanda i es menor al radio de cobertura máximo del propio nodo.

- Parámetros

- $R_{max}(i)$: Radio de cobertura máximo para el nodo demanda i
- p : Número máximo de servidores a instalar
- d_{ij} : Distancia mínima entre el nodo demanda i y nodo candidato j
- $f(d_{ij})$: Función de cobertura respecto a la distancia que existe entre el nodo demanda i y el nodo candidato $j, f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$
- w_i : Peso relativo del nodo demanda i
- $b_{ij} = w_i f(d_{ij})$: Beneficio de cubrir el nodo demanda i con el nodo candidato j

■ Variables

- x_j : 1 si se instala un servidor en j ; 0 en otro caso
- y_{ij} : 1 si el nodo i está siendo cubierto por un nodo candidato j ; 0 en otro caso

■ Restricciones

1. No se puede instalar más de p servidores

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (11)$$

2. Un nodo demanda i no puede estar cubierto a menos que haya un servidor j en su vecindad.

$$y_{ij} \leq x_j \quad \forall i \in I, \forall j \in N_i \quad (12)$$

3. El nodo demanda i es cubierto por al menos una instalación

$$\sum_{j \in N_i} y_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (13)$$

4. Integrabilidad

$$x_j, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (14)$$

■ Función objetivo

$$\max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} b_{ij} y_{ij} \quad (15)$$

■ Modelo Compacto

$$\text{MCLP: } \max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} b_{ij} y_{ij}$$

$$\text{s.t: } \sum_{j \in J} x_j \leq p$$

$$y_{ij} \leq x_j \quad \forall i \in I, \forall j \in N_i$$

$$\sum_{j \in N_i} y_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I$$

$$x_j, y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

Este modelo, a diferencia del anteriormente planteado, incorpora restricciones que consideran la proporción de la demanda cubierta según la distancia y la asignación específica a un punto drop-off para cada centro poblacional. Esto permite abordar de manera más realista la situación planteada en el problema, reflejando las condiciones de la realidad.

Al incluir la proporción de demanda cubierta, el modelo reconoce que la distancia entre los centros poblacionales y los puntos de reciclaje influye directamente en la disposición de las personas a reciclar.

5 Formulaci3n del modelo

5.1 Descripci3n del problema

Considere la zona residencial de la comuna de Viña del Mar como una regi3n acotada y dividida por $I : (i = 1, \dots, |I|)$ cuabras, cada una con una producci3n diaria de h_i kg de residuos reciclables que deben ser recolectados.

Por otro lado, existen $J (j = 1, \dots, |J|)$ ubicaciones potenciales para la instalaci3n de estaciones de drop-off donde la poblaci3n ir3 a depositar sus residuos reciclables seg3n lo planteado por la Ley N°20.920. Sea d_{ij} distancia m3nima entre cada estaci3n j y cada cuadra i .

Considerando que la distancia desde una vivienda que se encuentre en una cuadra hasta al lugar de dep3sito de los residuos es un factor inhibitor para el reciclaje, se asume un radio m3nimo de cobertura R_{min} dentro del cual la poblaci3n estar3a completamente dispuesta a llevar sus residuos al punto de reciclaje y, un radio de cobertura m3ximo R_{max} hasta el cual la disposici3n a reciclar decrecer3 hasta volverse cero si se supera dicho radio.

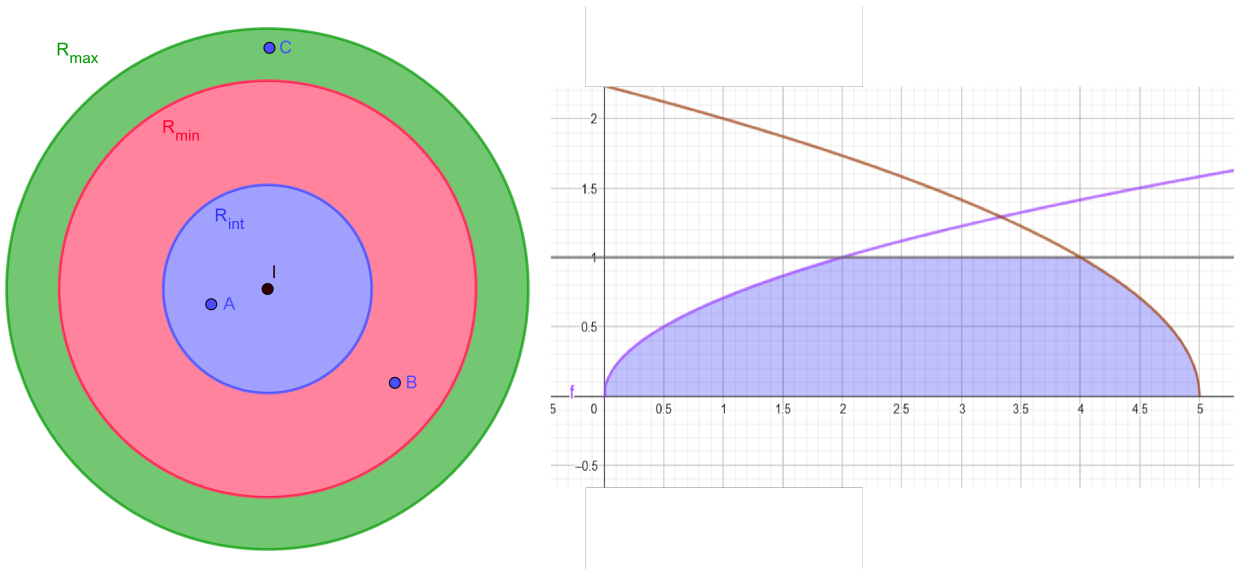
Adem3s considerando la posible afectaci3n del inter3s en dichas instalaciones seg3n las cuabras que se encuentren dentro del radio interior R_{int} y posteriores al radio m3nimo, se define un coeficiente de tolerancia u_i para cada cuadra i que demuestra que tan tolerante es la poblaci3n respecto a la distancia que se encuentra de la instalaci3n, donde al crecer el valor de u_i , disminuye el inter3s de reciclar fuera del intervalo $[R_{int}, R_{min}]$. Considerar que $R_{int} < R_{min} < R_{max}$.

La disminuci3n de la disposici3n de la poblaci3n a reciclar est3 definida por la funci3n de cobertura $f_i(d_{ij})$, la cual señaala el porcentaje de los residuos totales que ser3n llevados por la poblaci3n de la manzana i de acuerdo con la distancia a la que se encuentra la estaci3n drop-off j . Para efectos de este estudio, se considera una funci3n por tramos dada por:

$$f_i(d_{ij}) = \begin{cases} \left(\frac{d_{ij}}{R_{int}}\right)^{u_i} & d_{ij} \leq R_{int}, \\ 1, & R_{int} < d_{ij} \leq R_{min} \\ \left(\frac{R_{max} - d_{ij}}{R_{max} - R_{min}}\right)^{u_i}, & R_{min} < d_{ij} \leq R_{max} \\ 0, & R_{max} < d_{ij} \end{cases}$$

Figura 5

Visualización de la función de cobertura para una cuadra i



Nota. Elaboración propia.

Donde I corresponde a un nodo de demanda y A , B y C a nodos de oferta. En la Figura 5 se observa el comportamiento de la función de cobertura para un valor de $u_I = 0,8$.

Se considera que la población de cada cuadra siempre llevará sus residuos sólidos al punto drop-off más cercano con contenedores. Además, solo se podrán instalar p estaciones.

El objetivo del problema es maximizar la recolección de residuos con el objetivo de cumplir la Ley N°20.920.

5.2 Modelo Extendido

■ Conjuntos

I : Conjunto de cuadras, indexado en $i \in \{1, \dots, |I|\}$

J : Conjunto de lugares potenciales para instalar contenedores drop-off, indexado en $j \in \{1, \dots, |J|\}$

■ Conjuntos indexados

$N_i = \{j \in J : d_{ij} \leq R_{max}\}$: Conjunto de estaciones drop-off j que se encuentran a una distancia máxima de R_{max} de la cuadra i

$N_i^1 = \{j \in J : d_{ij} \leq R_{int}\}$: Conjunto de estaciones j que se encuentran a una distancia máxima de R_{int} de la cuadra i .

$N_i^2 = \{j \in J : R_{int} < d_{ij} \leq R_{min}\}$: Conjunto de estaciones j que se encuentran entre R_{int} y R_{min} de la cuadra i .

$N_i^3 = \{j \in J : R_{min} < d_{ij} \leq R_{max}\}$: Conjunto de estaciones j que se encuentran entre R_{min} y R_{max} de la cuadra i .

■ Parámetros

h_i : Demanda de residuos reciclables de la cuadra i

d_{ij} : Mínima distancia entre la cuadra i y la instalación drop-off j

R_{int} : Radio de cobertura interior

R_{min} : Radio de cobertura mínima

R_{max} : Radio de cobertura máxima

p : Número máximo de instalaciones de drop-off

u_i : Coeficiente de tolerancia para cada cuadra i

■ Variables

x_j : 1 si se instala un instalación drop-off en j ; 0 en otro caso

y_{ij} : 1 si la instalación drop-off nodo j satisface a la cuadra i ; 0 en otro caso

■ Restricciones

1. Cantidad máxima de instalaciones drop-off a instalar.

$$\sum_{j \in J} x_j \leq p \quad (16)$$

2. La cuadra i puede estar cubierta por la estación drop-off j , solo si la estación está instalada.

$$y_{ij} \leq x_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (17)$$

3. Single Source Constraint

$$\sum_{j \in J} y_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (18)$$

4. La cuadra i solo puede ser asignada a la estación drop-off más cercana

$$y_{ij} \geq x_j - \sum_{k \in J: d_{ik} \leq d_{ij}, k \neq j} x_k \quad \forall i \in I, j \in J \quad (19)$$

5. Integrabilidad de las variables

$$x_j, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (20)$$

■ Función objetivo

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \quad & \sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i^1} \left(h_i \left(\frac{d_{ij}}{R_{int}} \right)^{u_i} y_{ij} \right) \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i^2} (h_i y_{ij}) \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i^3} h_i \left(\frac{R_{max} - d_{ij}}{R_{max} - R_{min}} \right)^{u_i} y_{ij} \end{aligned} \quad (21)$$

5.3 Modelo Compacto

$$\begin{aligned} \text{GCLP: } \max_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \quad & \sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i^1} \left(h_i \left(\frac{d_{ij}}{R_{int}} \right)^{u_i} y_{ij} \right) \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i^2} (h_i y_{ij}) \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in N_i^3} h_i \left(\frac{R_{max} - d_{ij}}{R_{max} - R_{min}} \right)^{u_i} y_{ij} \\ \text{s.t:} \quad & \sum_{j \in J} x_j \leq p \\ & y_{ij} \leq x_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J \\ & \sum_{j \in J} y_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in I \\ & y_{ij} \geq x_j - \sum_{k \in J: d_{ik} \leq d_{ij}, k \neq j} x_k \quad \forall i \in I, j \in J \\ & x_j, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \end{aligned}$$

6 Estudio Computacional

A continuación se presenta el método y los supuestos utilizados para la obtención de datos con el fin de ejecutar el modelo GCLP. Posteriormente se exponen los resultados obtenidos y se realiza un análisis detallado de dichos resultados.

6.1 Preprocesamiento de Datos

6.1.1. Conjuntos

6.1.1.1. Cuadras, Manzanas o Nodos Demanda. La demanda de este problema corresponde a los envases y embalajes generados por la población, los cuales deben ser entregados en las instalaciones *drop-off*, de acuerdo con lo establecido en la Ley N°20.920 (2016). Por otro lado, los nodos de demanda son representados por la ubicación de la población que debe ser atendida.

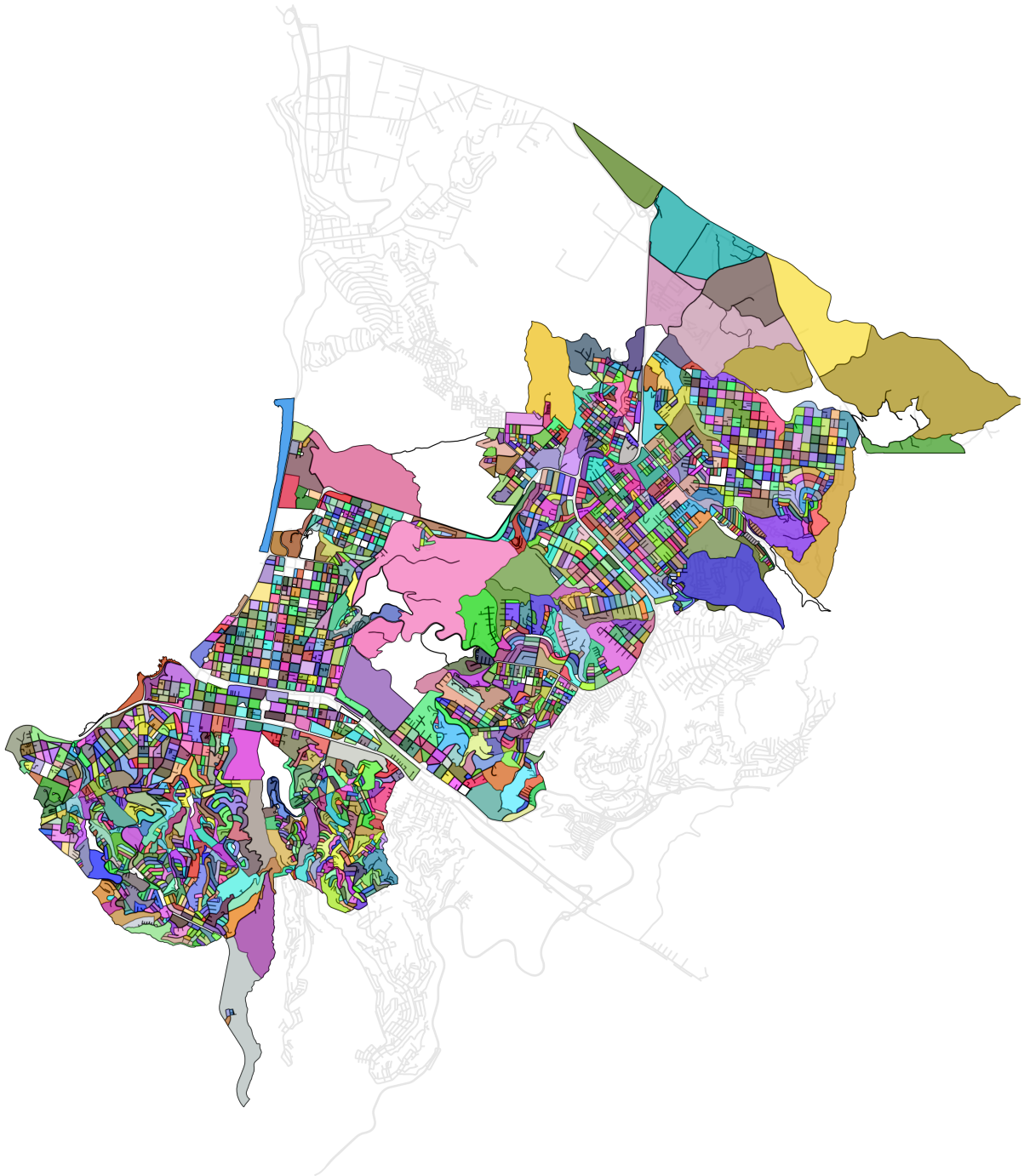
Para establecer los nodos de demanda dentro de la comuna de Viña del Mar se utilizaron las manzanas censales habitadas en el área de estudio. Según el INE (2015), las manzanas censales se definen como “la unidad geográfica básica con fines estadísticos que conforman zonas censales en áreas urbanas y las aldeas en el ámbito rural, contiene un grupo de viviendas contiguas o separadas, edificios, establecimientos y/o predios, delimitados por rasgos geográficos, culturales y naturales”.

En este estudio se seleccionó el 62 % de la zona urbana de la comuna de Viña del Mar, considerando únicamente las manzanas con viviendas y población asignada. Adicionalmente, se excluyeron los distritos censales 4, 6, 7, 12 y 16 debido a factores de distancia o altitud que dificultan el análisis, aunque podrían ser considerados en estudios posteriores. De acuerdo con la información entregada por el INE (s.f.), cada manzana censal se encuentra identificada mediante

un color distintivo, como se aprecia en la Figura 6.

Figura 6

Manzanas censales de Viña del Mar pertenecientes a zona de estudio.

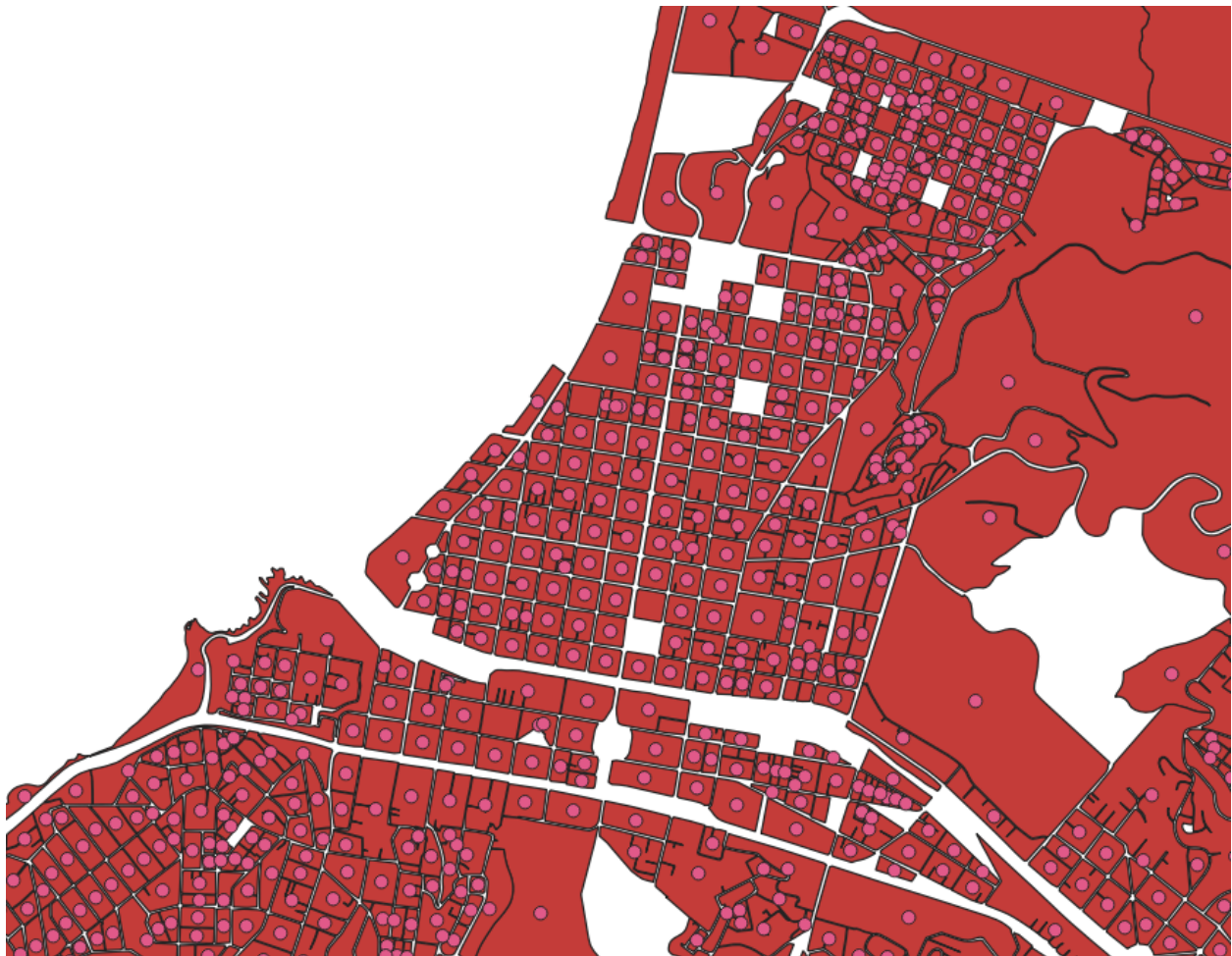


Nota. Elaboración propia de datos de INE (s.f.).

La zona seleccionada corresponde a 2217 manzanas censales, lo que equivale al 62 % de las manzanas de la comuna (INE, s.f.). El área y ubicación de dichas manzanas se obtuvo a partir de los geodatos abiertos del Censo 2017, los cuales proporcionan datos georreferenciados, puestos a disposición por el INE (s.f.). A partir de las manzanas se calcularon los centroides de sus áreas utilizando QGIS, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Fragmento de centroides de cada manzana censal de Viña del Mar.



Nota. Elaboración propia de datos de INE (s.f.).

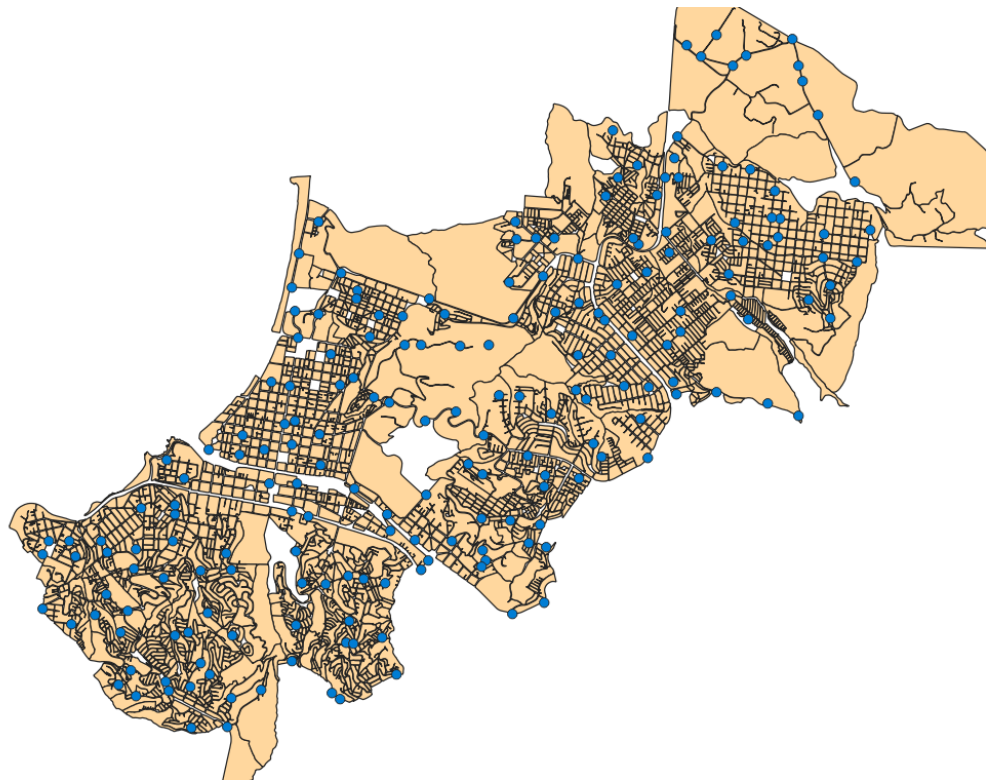
6.1.1.2. Posible Instalaciones Drop-Off o Nodos Oferta. Los nodos de oferta corresponden a las ubicaciones en las cuales pueden instalarse las estaciones *drop-off*. Considerando la

realidad de la comuna, los espacios destinados a contenedores de basura general se encuentran en esquinas de intersecciones de calles secundarias, además de lugares ya designados para contenedores de reciclaje, como plazas, playas y centros comerciales. Por lo tanto, las ubicaciones posibles para nuevas instalaciones son intersecciones de calles que no correspondan a avenidas y lugares de acceso público no restringido.

Para identificar dichas ubicaciones se realizó un análisis mediante QGIS, utilizando un mapa de calles para localizar intersecciones que cumplieran las condiciones establecidas. Posteriormente se depuró el conjunto de nodos, eliminando aquellos repetidos o inviables por su posición. Finalmente, se seleccionaron 98 nodos de manera aleatoria, manteniendo una distribución uniforme en toda la zona de estudio.

Figura 8

Posibles locaciones para instalar estaciones de drop-off.



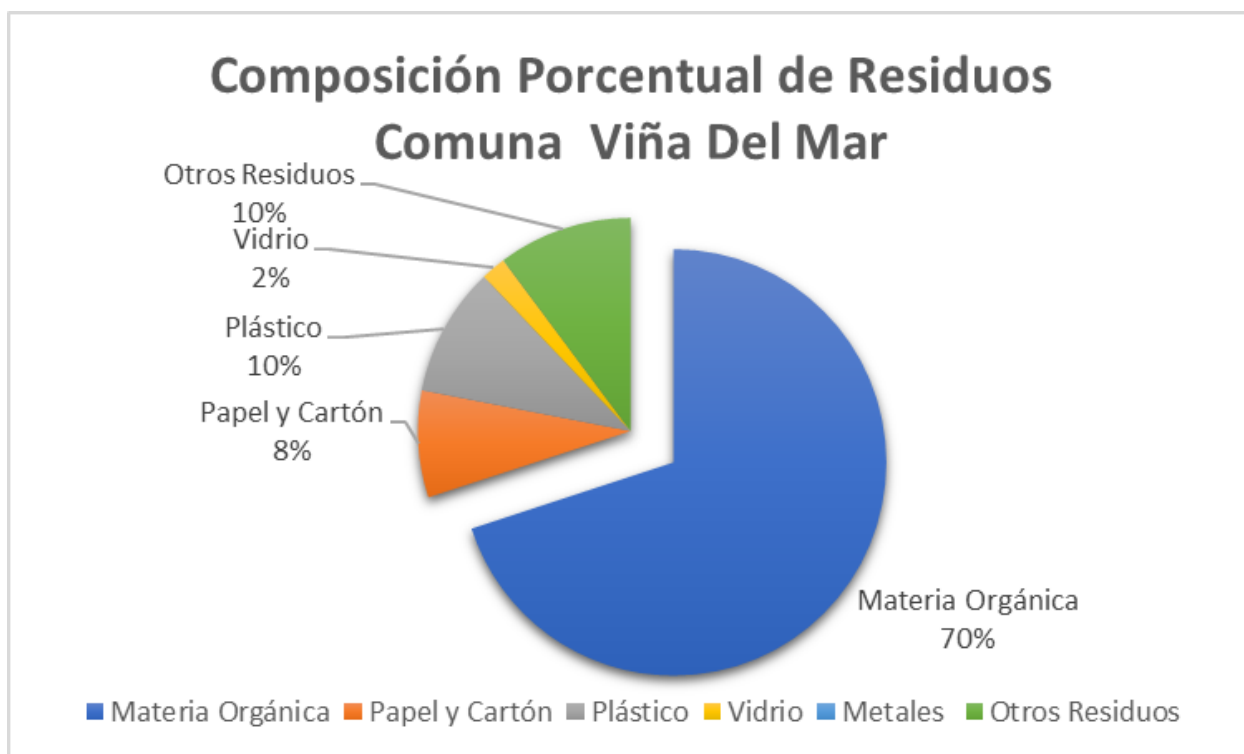
Nota. Elaboración propia de datos de INE (s.f.).

6.1.2. Parámetros

6.1.2.1. Demanda de Residuos Reciclables de la Cuadra i . (h_i). La demanda de cada cuadra está determinada por la cantidad de residuos reciclables que esta produce. Se considera la producción per cápita de residuos en la comuna de Viña del Mar, que, de acuerdo con lo descrito en la Sección 4.2.1, es de $1,17 \frac{kg}{hab.dia}$ para toda la población.

Figura 9

Composición Residuos para la Comuna de Viña del Mar



Nota. Adaptado de *Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo*, 2017.

De acuerdo con lo anterior, las categorías incluidas en la Ley N°20.920 son vidrio, papel y cartón, y plástico. No se considera “Cartón para líquidos” ni metales, dado que en el primer caso se clasifica dentro de “otros residuos” y, en el segundo, la generación es marginal SUBDERE (2017). Por tanto, la cantidad de residuos reciclables a considerar corresponde al 20 % de la generación

total de residuos, es decir, una producción per cápita de $0,234 \frac{kg}{hab \cdot dia}$.

Adicionalmente, se define como hm_i la cantidad de habitantes de la cuadra i , información obtenida del INE (s.f.) en formato georreferenciado.

6.1.2.2. Distancia Mínima entre la Cuadra i y la Instalación Drop-Off j . (d_{ij}). Para determinar la distancia mínima entre cada cuadra y cada instalación se utilizó el programa QGIS mediante la matriz de distancia estándar, la cual entrega la mínima distancia (en metros) entre dos capas de puntos seleccionadas. Se obtuvo así una matriz de distancias de 2.217×98 .

6.1.2.3. Radios de Cobertura. ($R_{int}, R_{min}, R_{max}$). Para el análisis del problema se considera tres radios de cobertura medidos en metros. El radio interno (R_{int}) es la distancia donde la persona puede percibir la cercanía de la instalación *drop-off* como un factor negativo, el radio mínimo (R_{min}) corresponde a la distancia mínima que una persona estaría dispuesta al 100 % de reciclar sin ser afectada por la cercanía del contenedor, y el radio máximo (R_{max}) corresponde a la distancia máxima que una persona estaría dispuesta a recorrer para dejar sus residuos. Más allá de este radio, la persona desistiría de reciclar en dicha instalación.

Para determinar el valor del radio mínimo, tenemos que considerar que una persona camina en promedio $4,7 \frac{km}{h}$ (Murtagh et al., 2020), y considerando lo mencionado por González-Torre y Adenso-Díaz (2005) que una persona estaría dispuesta a gastar a los más 5 minutos en traslado para desechar su basura, por lo que se define como radio mínimo la distancia total entre ir al lugar para depositar los residuos y el tiempo de retorno.

$$R_{min} = 195,834$$

Para el valor del radio interno se utiliza una distancia equivalente al tamaño de una cuadra del centro de la ciudad, ya que como menciono Cho et al. (2006), la cercanía de las estaciones afecta negativamente la salud de los habitantes del sector dentro de la cuadra

$$R_{int} = 100$$

Por otro lado, se considera un tiempo máximo razonable para el traslado de los residuos, un tiempo total de 20 minutos, considerando 10 minutos de ida y 10 minutos de vuelta. Resultado en el siguiente valor del radio máximo.

$$R_{max} = 783,34$$

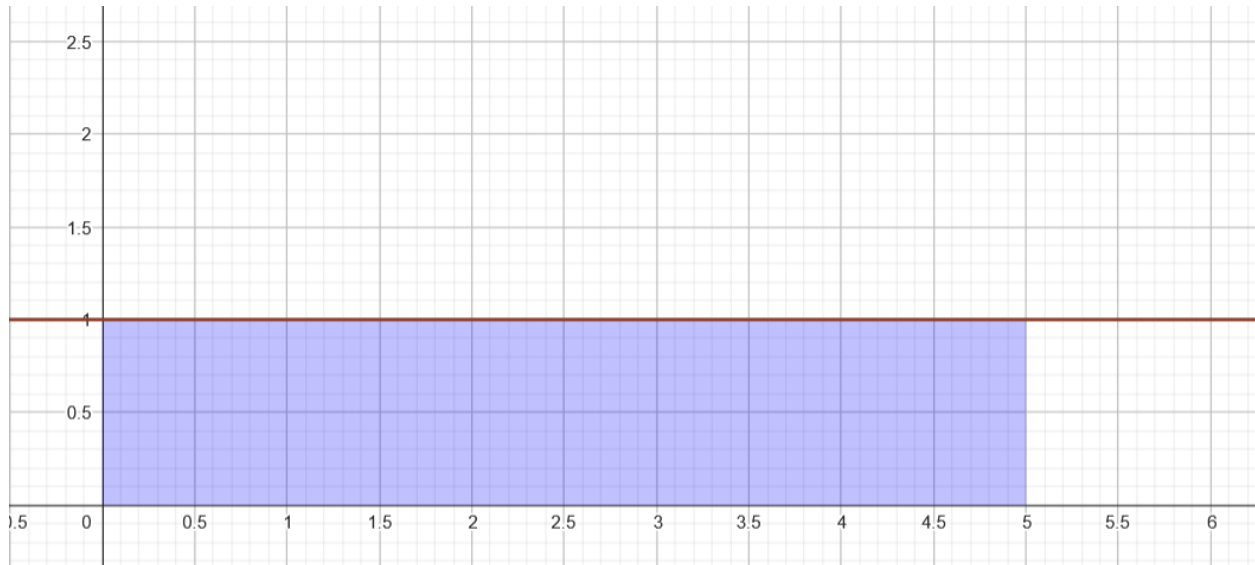
6.1.2.4. Número Máximo de Instalación Drop-Off. (p). El modelo se parametriza mediante p , asignándole valores de 1 a 98, acorde con la cantidad máxima de nodos de oferta disponibles en la comuna de Viña del Mar.

6.1.2.5. Coeficiente de tolerancia. (u_i). Este coeficiente permite ajustar la función de cobertura según las características particulares de cada cuadra, incorporando al modelo la realidad interna de la misma.

Considerando los valores de R_{int} , R_{min} y R_{max} como 2, 4 y 5 respectivamente, se observan los siguientes efectos en la función de cobertura:

Figura 10

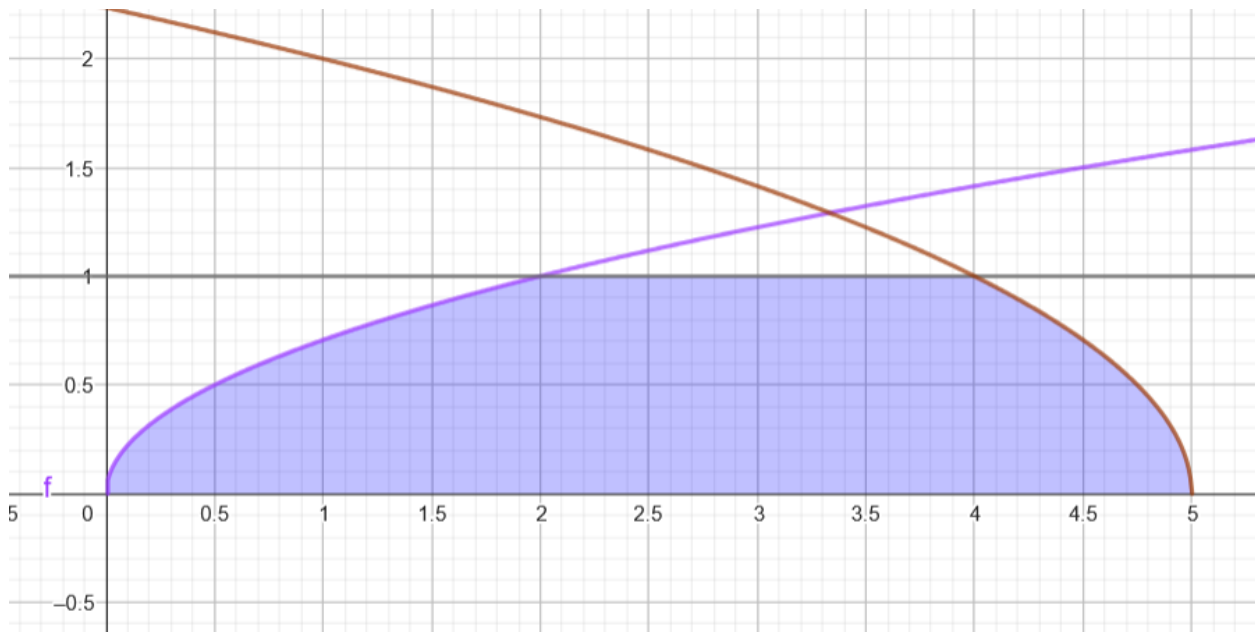
Función de cobertura con $u = 0$.



Nota. Elaboración propia.

Figura 11

Función de cobertura con $u < 0$.



Nota. Elaboración propia.

Figura 12

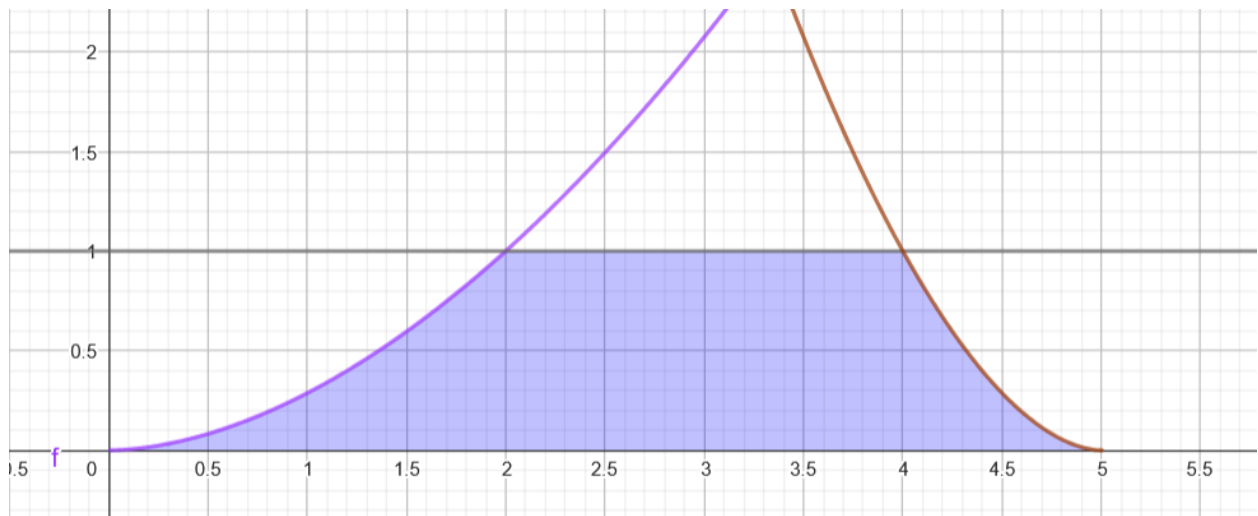
Función de cobertura con $u = 1$.



Nota. Elaboración propia.

Figura 13

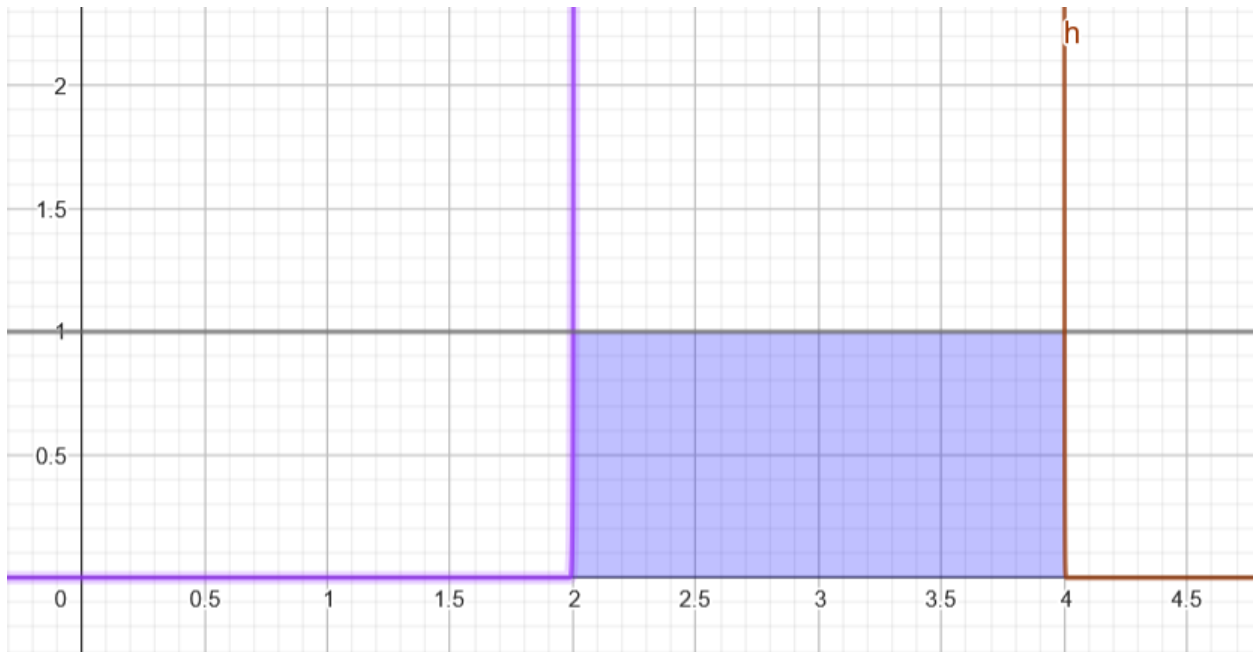
Función de cobertura con $u > 1$.



Nota. Elaboración propia.

Figura 14

Función de cobertura con u tendiendo a infinito.



Nota. Elaboración propia.

A partir de las figuras anteriores, se observa que, a menor valor de u_i , mayor es el interés por reciclar en los intervalos $[0, R_{int}]$ y $[R_{min}, R_{max}]$, mientras que dicho interés disminuye a medida que u_i aumenta.

Desde la perspectiva socioeconómica, se ha identificado que las personas de mayores ingresos tienden a rechazar la instalación de puntos de reciclaje cercanos y, además, muestran menor disposición a recorrer grandes distancias para reciclar (Sidique et al., 2013). En contraste, las personas de niveles socioeconómicos más bajos presentan mayor aceptación y tolerancia hacia estas instalaciones, así como mayor disposición a desplazarse.

Desde la perspectiva etaria, se observa que las personas de edad avanzada prefieren instalaciones no demasiado alejadas, debido a limitaciones físicas o de salud (Sidique et al., 2013). Por otro lado, jóvenes y adultos suelen participar activamente en el reciclaje, ya sea motivados por

campañas de concienciación o por interés personal, mostrando menor aversión a la ubicación de las instalaciones.

En función de lo anterior, se concluye que la población base está interesada en reciclar siempre que existan instalaciones cercanas a su lugar de residencia (Zhang et al., 2023). Esto sugiere que el comportamiento del parámetro u_i inicialmente se asemeja a la curva mostrada en la Figura 11.

Por tanto, el parámetro u_i se define en función del nivel socioeconómico de la cuadra y de la edad predominante de sus habitantes. A mayor nivel socioeconómico, mayor será el valor de u_i , y del mismo modo, este aumenta conforme se incrementa la proporción de población vulnerable.

El valor de u_i se calcula a partir de una base de 0,7, la cual se ajusta progresivamente según las proporciones poblacionales y la calidad de las viviendas, de acuerdo con los datos entregados por el INE (s.f.):

$$u_i = 0,7 + \frac{P_{0_i} + P_{6_i} + P_{M_i}}{1 + P_{1_i}} - \frac{V_{P2_i} + V_{P4_i} + V_{T3_i} + V_{T4_i}}{1 + T_{V_i}} \quad (22)$$

donde:

- P_{0_i} : Total de personas de 0 a 5 años en la cuadra i .
- P_{6_i} : Total de personas de 6 a 14 años en la cuadra i .
- P_{M_i} : Total de personas de 65 y más años en la cuadra i .
- P_{1_i} : Total de personas de 15 a 64 años en la cuadra i .
- V_{P2_i} : Viviendas con paredes de tabique sin forro interior (madera u otro) en la cuadra i .

- V_{P4_i} : Viviendas con paredes de materiales precarios (lata, cartón, plástico, etc.) en la cuadra i .
- V_{T3_i} : Viviendas con techos de paja, coirón, totora o caña en la cuadra i .
- V_{T4_i} : Viviendas con techos de materiales precarios (lata, cartón, plástico, etc.) en la cuadra i .
- T_{V_i} : Total de viviendas en la cuadra i .

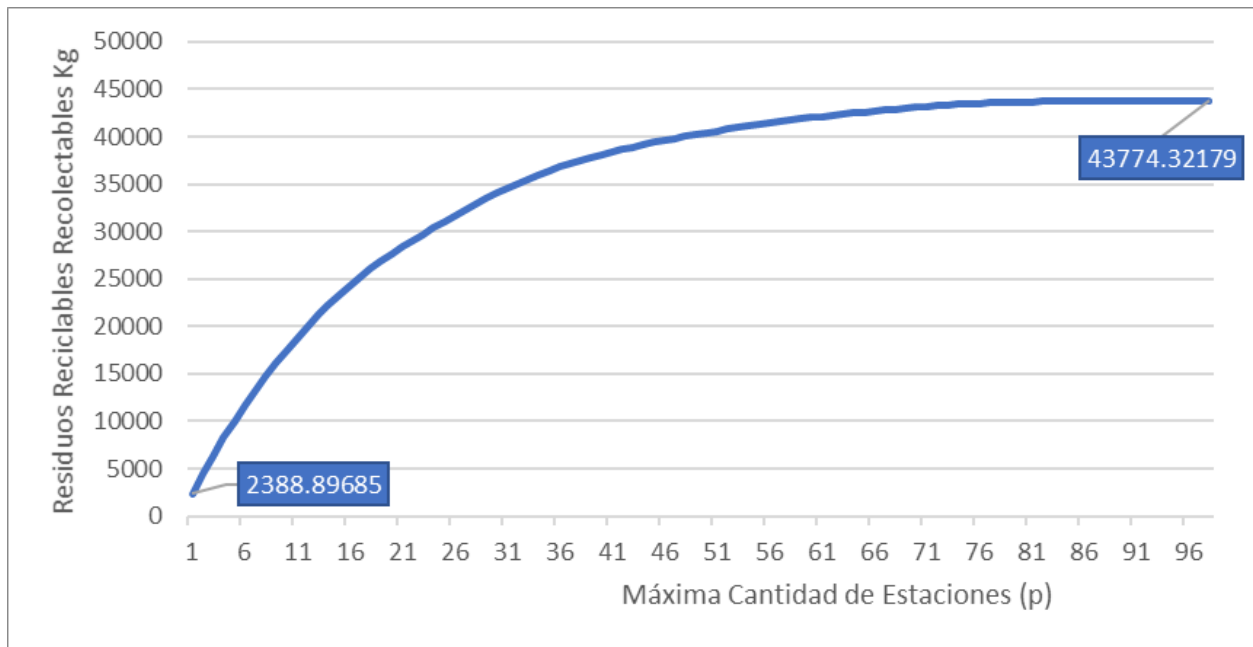
6.2 Resultados y Análisis

En la siguiente sección se presentan los resultados del problema presentado, el cual, dada su linealidad, fue resuelto mediante el programa AMPL utilizando el solver CPLEX 22.1.1 en un procesador Intel Core i5-10300H con 32GB de RAM.

Como se mencionó anteriormente, el modelo fue iterado para los distintos posibles valores de p de acuerdo a la cantidad de nodos oferta establecidos.

6.2.1. Resultados Generales

En la Figura 15 se observa la cantidad de residuos reciclables que pueden recolectarse al evaluar el modelo propuesto para distintos valores de estaciones máximas a instalar (p). De acuerdo con los resultados obtenidos, con la instalación de una sola estación *drop-off* se alcanza una recolección mínima de 2,4 toneladas diarias, mientras que al instalar el número máximo de estaciones permitidas se obtiene una recolección cercana a 43,7 toneladas diarias de residuos reciclables.

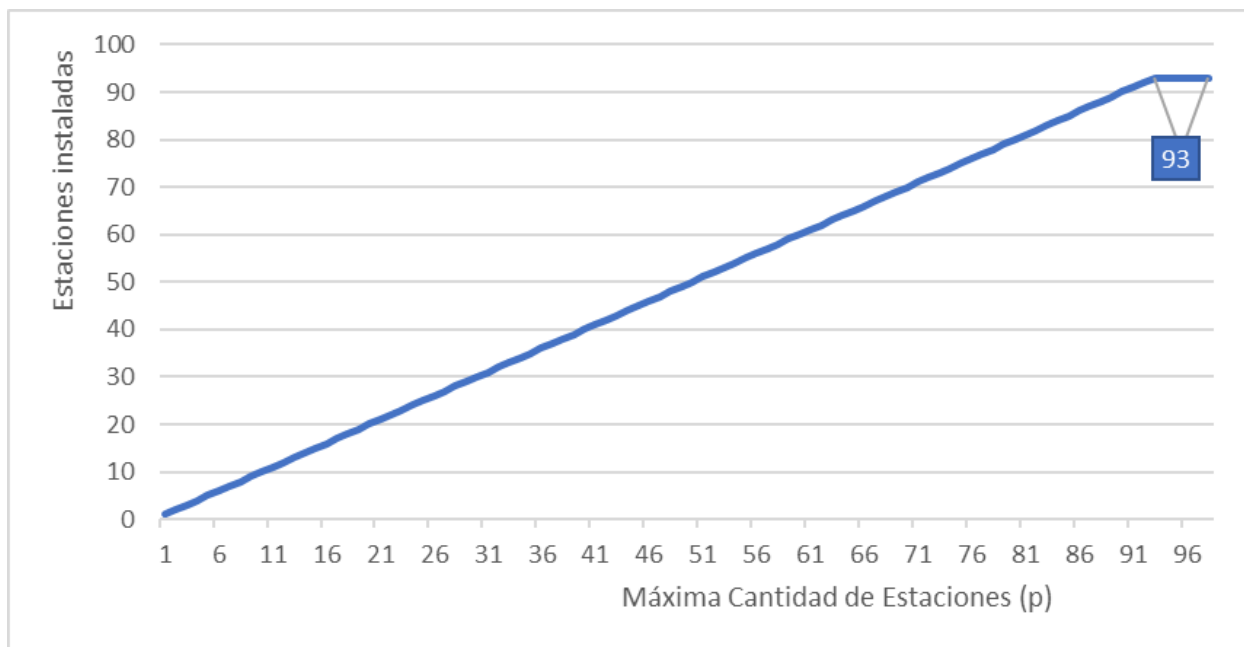
Figura 15*Recolección esperada de residuos vs máxima cantidad de estaciones (p).*

Nota. Elaboración propia.

Por otra parte, en la Figura 16 se muestra la cantidad de estaciones *drop-off* que deben instalarse para cada valor de p . La restricción establecida en la ecuación 16 se mantiene activa hasta $p = 93$, a partir de lo cual el número de instalaciones permanece constante en 93. Esto se debe a que instalar una estación adicional afectaría negativamente a las cuadras que ya se encuentran totalmente o parcialmente cubiertas por las estaciones existentes.

Figura 16

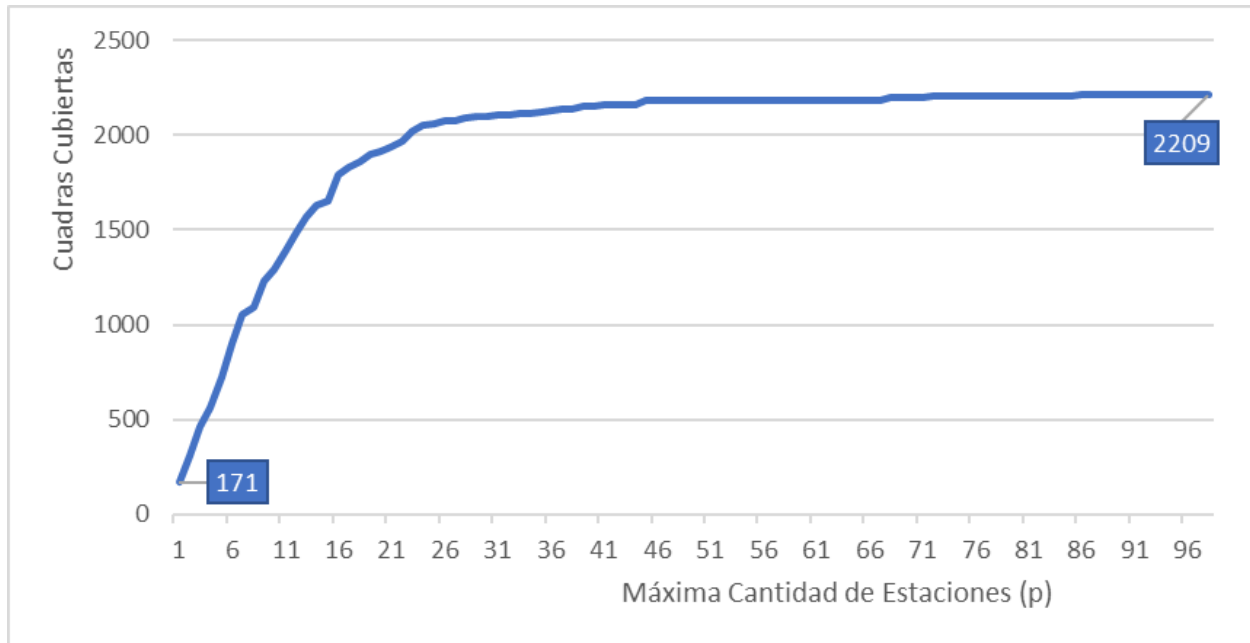
Cantidad de estaciones *drop-off* instaladas x_j vs máxima cantidad de estaciones (p).



Nota. Elaboración propia.

En cuanto a la cobertura del área de estudio, de las 2217 cuadras totales de la comuna de Viña del Mar se podrían cubrir, ya sea total o parcialmente, 171 cuadras si se instala únicamente una estación *drop-off*. En cambio, al instalarse las 93 estaciones se podrían cubrir 2209 cuadras, quedando solo 8 cuadras sin cobertura.

Figura 17
Cantidad de cuadradas cubiertas vs máxima cantidad de estaciones (p).



Nota. Elaboración propia.

6.2.2. Resultados vs Metas de Recolección y Valorización

Para determinar la cantidad de estaciones *drop-off* necesarias para cumplir con las metas de recolección y valorización, en primer lugar se deben definir dichas metas en kilogramos de acuerdo con la zona de estudio.

La población total de la zona de estudio es de 235957 personas, según los datos entregados por el Instituto Nacional de Estadísticas (s.f.) en el contexto del Censo 2017. Considerando una producción per cápita de residuos de $1,17 \frac{kg}{hab-dia}$ y la descomposición de tipos de residuos presentada en la Figura 9, se obtiene una producción total diaria de 55213,94 kilogramos de residuos reciclables en la zona. Tomando en cuenta las metas de valorización establecidas por la Ley N°20.920, descritas en la Tabla 1, se calculan las metas diarias en kilogramos a cumplir de acuerdo con el año de operación para las categorías Papel y Cartón, Plástico y Vidrio. Los resultados se

presentan en la Tabla 2, donde se observa que la meta de recolección máxima propuesta por la Ley, a cumplirse a los 12 años de funcionamiento, corresponde únicamente al 57 % de la producción total de residuos reciclables.

Tabla 2

Metas de recolección y valorización en kilogramos de la zona de estudio de acuerdo con el Decreto Supremo N°12.

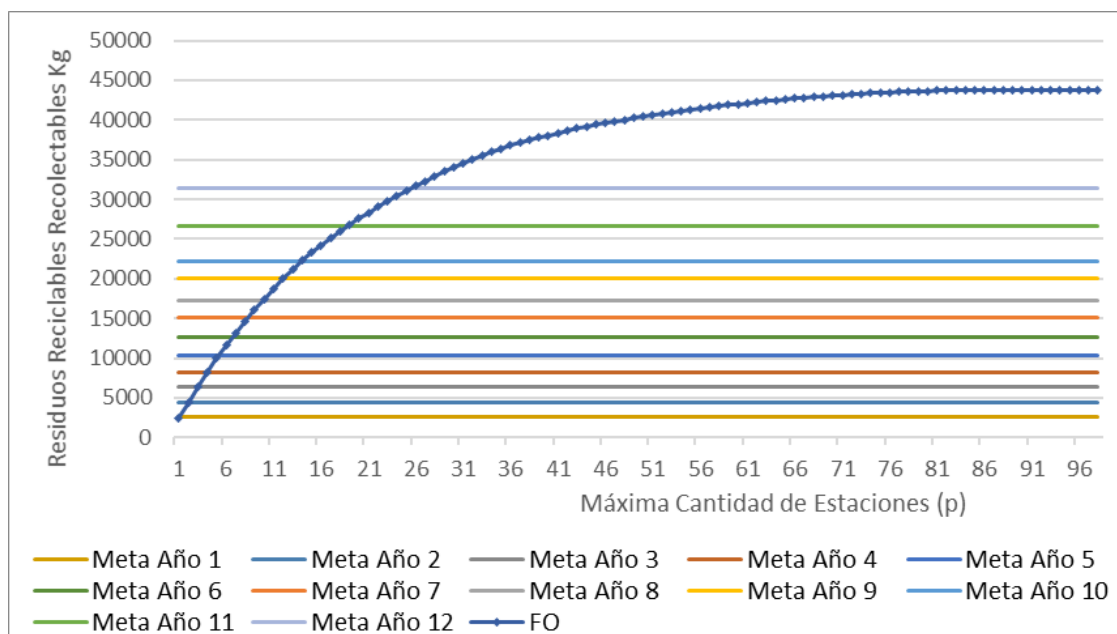
Material	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
Papel y Cartón	1104	1988	3092	3975	5080	6184	7509	8613	9939	11043	13251	15460
Plástico	828	1656	2209	3037	3865	4693	5521	6350	7454	8282	10215	12423
Vidrio	607	828	1049	1215	1436	1712	2043	2319	2595	2871	3202	3589
Total	2540	4472	6350	8227	10380	12589	15073	17282	19987	22196	26668	31472

Nota. Elaboración propia.

Con estas metas definidas y los resultados obtenidos mediante el modelo propuesto, se construyó el gráfico presentado en la Figura 18. Este gráfico muestra la relación entre la cantidad de residuos reciclables recolectados al instalar un máximo de p estaciones y las metas diarias establecidas anualmente de acuerdo con el Decreto N°12.

Figura 18

Recolección de residuos reciclables según la cantidad máxima de instalaciones a instalar vs. metas de recolección y valorización.

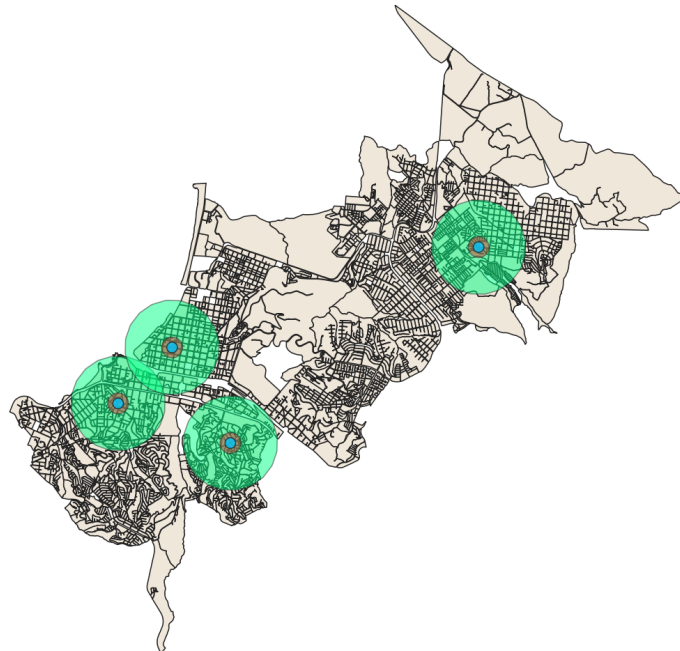


Nota. Elaboración propia.

De la figura se desprende que con la instalación de únicamente 4 estaciones *drop-off* es suficiente para cumplir las metas propuestas durante los tres primeros años. Asimismo, bastaría con instalar 26 estaciones con capacidad adecuada para recolectar la meta máxima propuesta por la Ley N°20.920, la cual debe alcanzarse a los 12 años de iniciada su vigencia.

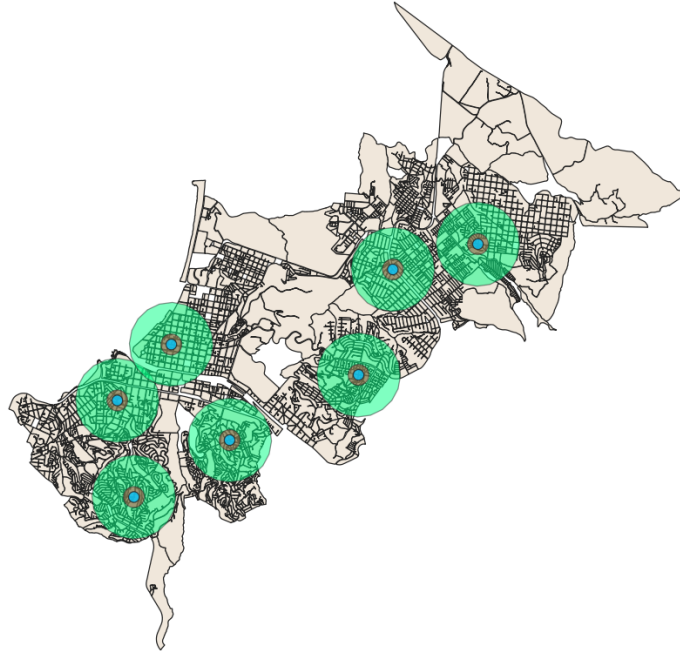
A partir de los resultados es posible determinar las ubicaciones específicas de las estaciones *drop-off* necesarias para cumplir las metas de los años 3, 6, 9 y 12, ilustradas en las Figuras 19, 20, 21 y 22, respectivamente. En cada estación instalada se representan tres radios de cobertura: en azul el radio interno (R_{int}), que indica un aumento progresivo del interés a medida que se aleja de la instalación; luego, el área roja delimitada por el radio mínimo, donde el interés alcanza el 100 %; y, finalmente, el área exterior, donde el interés decrece hasta llegar a cero en el radio máximo.

Figura 19
Localización meta año 3.



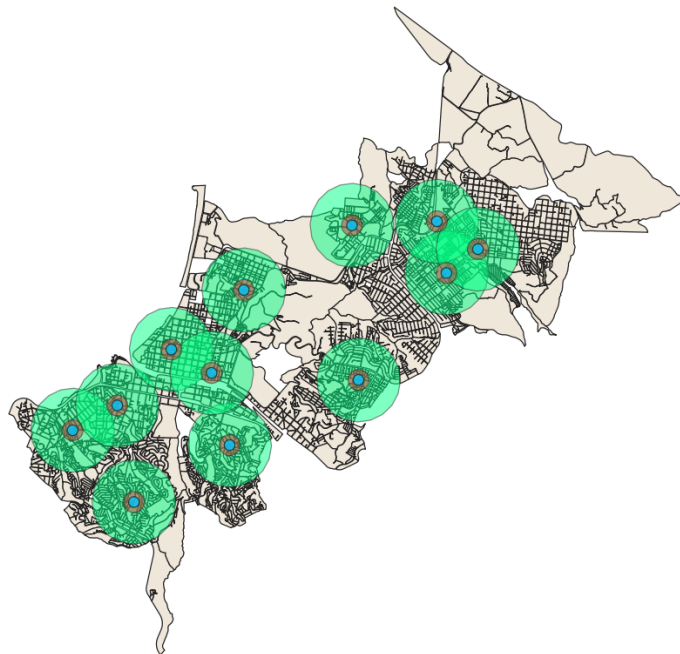
Nota. Elaboración propia.

Figura 20
Localización meta año 6.



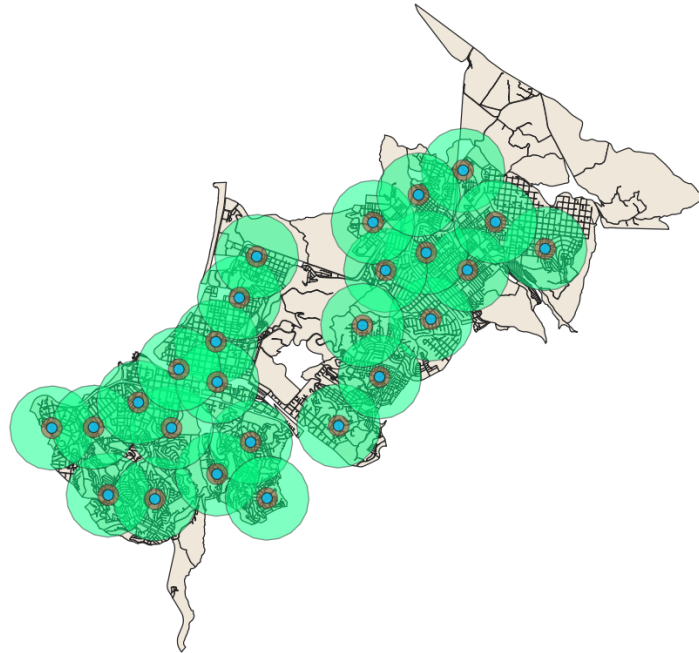
Nota. Elaboración propia.

Figura 21
Localización meta año 9.



Nota. Elaboración propia.

Figura 22
Localización meta año 12.



Nota. Elaboración propia.

En las ilustraciones anteriores se aprecia que el modelo sugiere la instalación de estaciones principalmente en dos zonas poblacionales de la zona de estudio, con una fuerte concentración en el sector suroeste. Esto se explica principalmente por la mayor densidad de viviendas y población en dicha zona, lo que permite una mayor recolección de residuos reciclables. Además, se observa que estas zonas se encuentran claramente delimitadas, tal como se muestra en la Figura 22.

Dado que las metas establecidas por la Ley pueden cumplirse con tan solo 26 de las 98 ubicaciones propuestas para la instalación de estaciones *drop-off*, surge la pregunta: ¿cuál sería la máxima cantidad de residuos que podría recolectarse si se utilizaran todas las ubicaciones propuestas?

Tal como se expuso en los resultados generales del modelo (véase Sección 6.2.1), el máximo número de instalaciones a instalar es de 93, lo que permitiría recolectar 43774,32 kilogramos

de residuos reciclables diarios, equivalente al 79 % de la producción total de la zona. Este resultado evidencia que la Ley N°20.920 establece metas relativamente bajas en comparación con la producción diaria de residuos y con el potencial de recolección posible al instalar estaciones en una fracción de las ubicaciones viables.

6.2.3. Resultados respecto a la Situación Actual de la Comuna

El modelo y los resultados presentados fueron desarrollados bajo el supuesto de que no existían estaciones previamente instaladas en la zona de estudio. Sin embargo, es necesario considerar que la comuna se encuentra actualmente en el segundo año de implementación de la Ley N°20.920 y de las metas establecidas en el Decreto N°12. Por lo tanto, resulta pertinente analizar si la infraestructura existente cumple las metas exigidas o si supera lo solicitado por la normativa.

Para este análisis se identificaron tres puntos limpios actualmente instalados, ya sea por iniciativa privada o municipal:

- Punto Limpio sector Reñaca Alto, ubicado a un costado del Complejo Deportivo Everton, en Calle Principal N°2, Reñaca Alto.
- Punto de Reciclaje de Botellas Plásticas PET, ubicado en Calle Limache N°2523.
- Punto Limpio TriCiclos, ubicado en Alessandri N°1255, Estacionamiento Homecenter Soddimac.

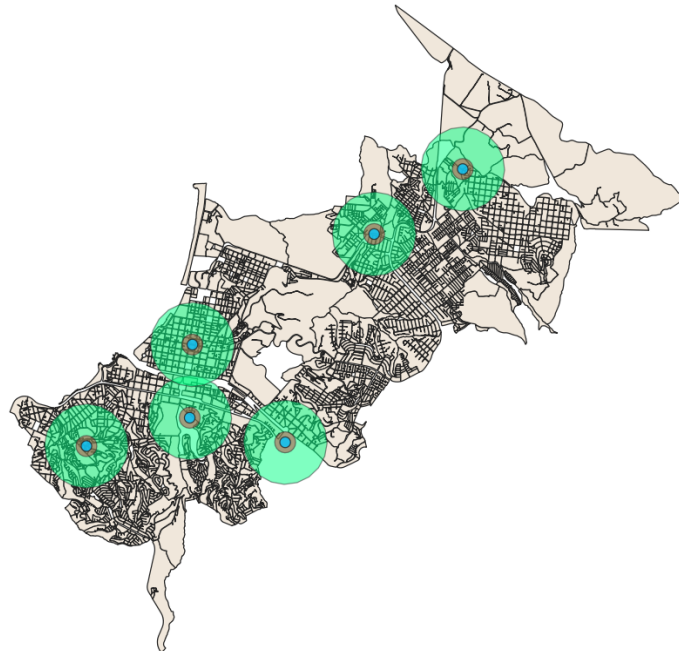
Adicionalmente, existen lugares con estaciones especializadas en un único tipo de residuo distribuidas por toda la comuna; sin embargo, la mayoría recolecta productos que no forman parte de las metas, como pilas o baterías.

A pesar de lo anterior, se identificaron tres puntos que cumplen con todos los requisitos establecidos por la Ley:

- Prorecicla, ubicado en 6 Norte, entre Av. Libertad y 1 Oriente.
- IMVM, ubicado en Quinta Vergara, sector Potrerillos.
- Contenedores ubicados en Calle Ocho N°170.

Figura 23

Ubicación actual de los puntos limpios en la zona de estudio.



Nota. Elaboración propia.

Con el fin de comprender cómo varían los resultados al considerar estas seis instalaciones como punto de partida, se ejecutó nuevamente el modelo, incorporando dichos nodos como instalaciones ya existentes y obligando a que permanezcan activas en la solución.

Los resultados generales para las primeras nueve iteraciones se muestran en la Tabla 3, donde p comienza en 6, valor correspondiente a las instalaciones actualmente operativas.

Tabla 3

Resultados generales para nueve iteraciones considerando la situación actual de la zona de estudio.

Máxima cantidad instalaciones	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cantidad a instalar	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Residuos recolectados	7489.31	9870.88	11584.35	13168.57	14750.84	16321.19	17866.11	19325.97	20462.49
Manzanas cubiertas	631	800	897	975	1134	1288	1383	1515	1581

Nota. Elaboración propia.

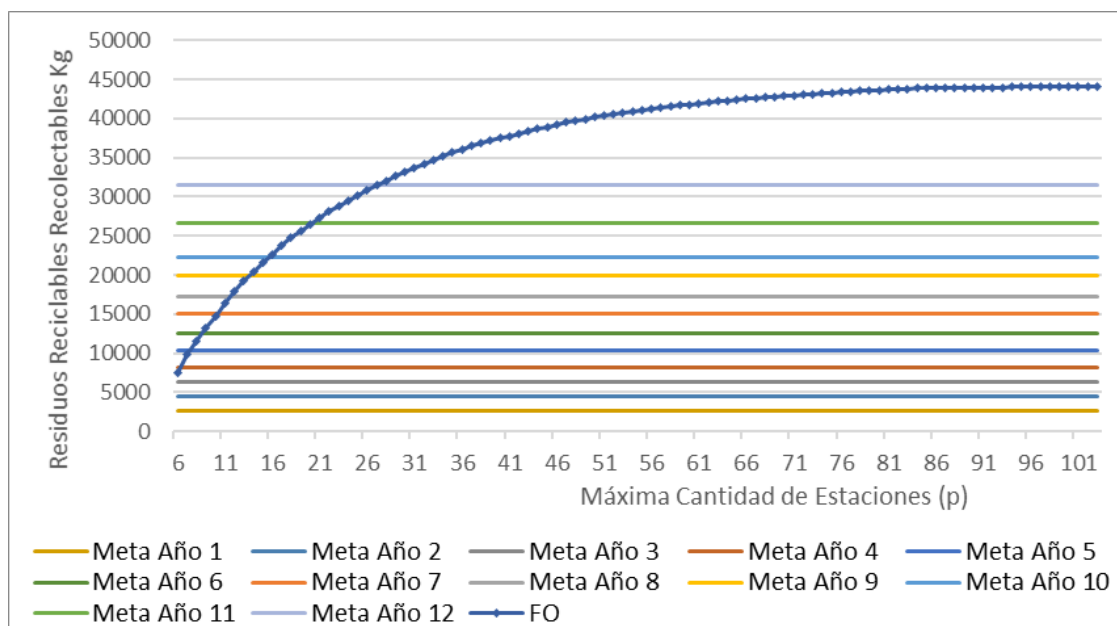
Estas seis estaciones cubren 631 de las 2217 manzanas de la zona, con una recolección estimada de 7489,31 kilogramos diarios. De acuerdo con la Tabla 2, esta cantidad permite cubrir la meta establecida para los tres primeros años.

De lo anterior se desprenden tres conclusiones respecto a la situación actual de la comuna y la Ley N°20.920. En primer lugar, las ubicaciones actuales de las estaciones *drop-off* no son necesariamente las más eficientes, ya que los resultados del modelo indican que bastaría con instalar solo cuatro estaciones para lograr el mismo cumplimiento de metas alcanzado actualmente con seis.

En segundo lugar, se evidencia la baja exigencia de la Ley N°20.920, dado que la infraestructura existente permite cubrir la meta establecida hasta el 16 de septiembre de 2026 (correspondiente al año 3) (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.). Además, gran parte de estos puntos limpios ya se encontraban instalados antes de la publicación del Decreto N°12, el 16 de marzo de 2021 (Decreto N°12, 2016), tal como consta en noticias oficiales del municipio (Ilustre Municipalidad de Viña del Mar, 2022) y en registros de plataformas especializadas (¿Cuál es tu huella?, 2021).

Figura 24

Recolección de residuos reciclables según la cantidad máxima de estaciones a instalar vs. metas de recolección y valorización — Situación actual.



Nota. Elaboración propia.

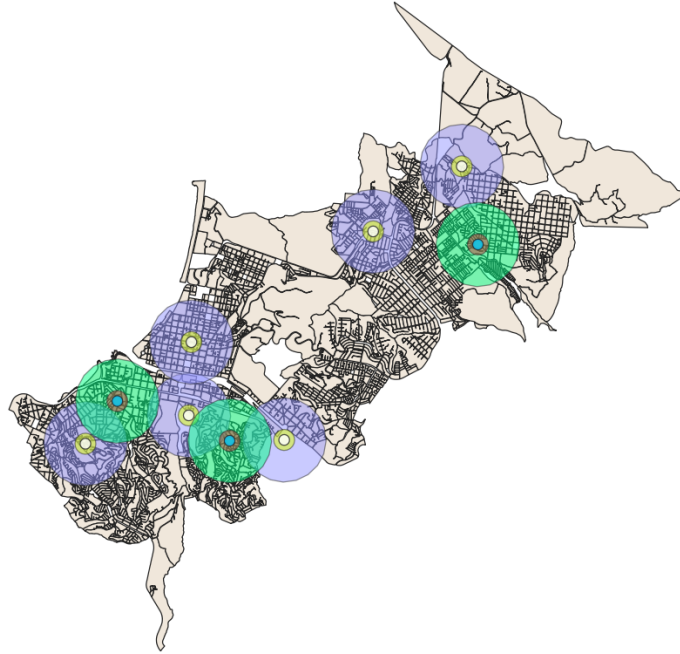
En tercer lugar, se observa un amplio despliegue de contenedores pequeños para un solo tipo de residuo distribuidos en gran parte de la zona. Según Ilustre Municipalidad de Viña del Mar (2022), se instalaron 600 puntos verdes solo para botellas plásticas, lo que implica un alcance significativo dado el alto porcentaje de este material en la composición de residuos, como se aprecia en la Figura 9. No obstante, esto deja en evidencia un menor foco en otros productos prioritarios, como vidrio o papel y cartón, que en conjunto representan una proporción equivalente a la del plástico. Esta situación podría estar orientada a incrementar artificialmente los indicadores de recolección total para el cumplimiento de la Ley, enfocándose principalmente en el plástico.

Las ubicaciones sugeridas por el modelo para cumplir las metas de los años 6, 9 y 12 se presentan en las Figuras 25, 26 y 27, respectivamente. En color azul se muestran las estaciones ya instaladas en la zona de estudio, mientras que en verde se señalan los puntos adicionales que el

modelo recomienda para maximizar la recolección de residuos reciclables.

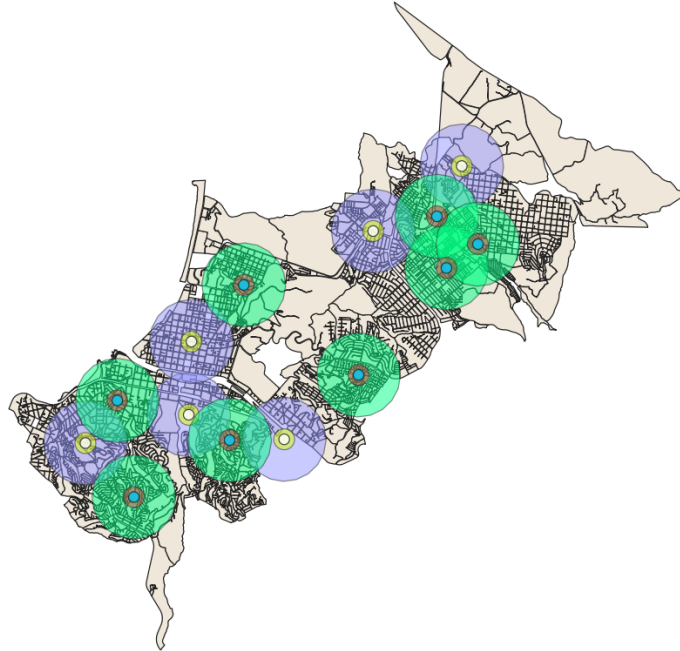
Figura 25

Localización meta año 6 - Situación actual.



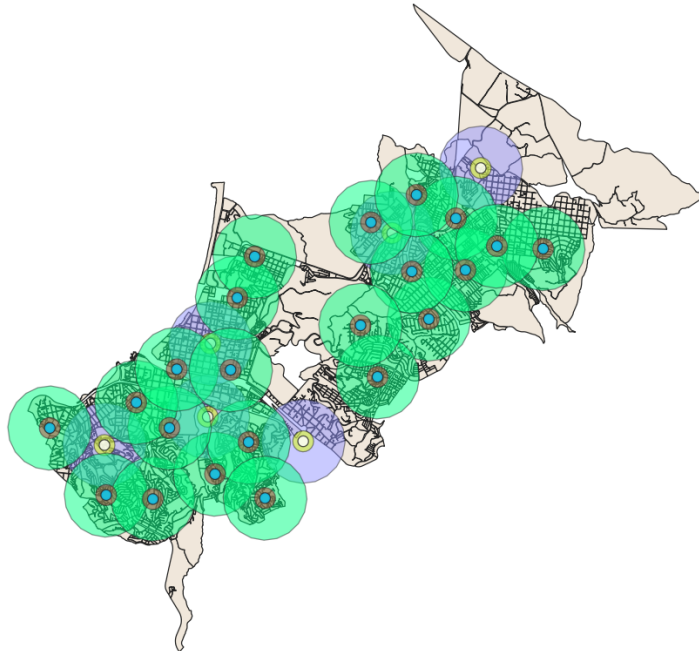
Nota. Elaboración propia.

Figura 26
Localización meta año 9 - Situación actual.



Nota. Elaboración propia.

Figura 27
Localización meta año 12 - Situación actual.



Nota. Elaboración propia.

Al igual que en los resultados presentados en la Sección 6.2.2, el modelo sugiere la instalación de estaciones principalmente en dos zonas poblacionales, con una marcada concentración en el sector suroeste. No obstante, a diferencia de los resultados anteriores, en los cuales bastaba con instalar cuatro estaciones para cubrir las metas de los primeros tres años, en este caso solo se requieren tres instalaciones adicionales para cubrir las metas de los tres años posteriores. Esto demuestra que la Ley no está aprovechando al máximo el potencial de recolección al establecer metas relativamente bajas.

7 Conclusiones

En esta memoria se analizó lo establecido por la Ley N°20.920, que define el marco para la Responsabilidad Extendida del Productor, y el Decreto N°12, que fija las metas de recolección y valorización de envases y embalajes. El objetivo fue comprender sus implicancias en la comuna de Viña del Mar y proponer la localización óptima de estaciones *drop-off* con el propósito de maximizar la recolección de residuos. Para ello se consideraron diversos factores inhibidores del reciclaje, tales como la distancia, el nivel socioeconómico y la edad de la población, mediante un modelo híbrido entre un modelo de cobertura gradual y un modelo con pesos relativos de demanda. Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos con las metas de recolección y valorización que establece la normativa vigente.

En primer lugar, a partir de los resultados obtenidos, se establece que la localización actual de los puntos de recolección de residuos reciclables en la zona de estudio de la comuna de Viña del Mar no es la más eficiente. Mientras las seis instalaciones actualmente existentes tienen una recolección estimada de 7,5 toneladas diarias, una misma cantidad de instalaciones ubicadas en los puntos óptimos determinados por el modelo permitiría recolectar aproximadamente 11,6 toneladas diarias. Esto evidencia la necesidad de revisar los criterios utilizados por el municipio para la instalación de estaciones, considerando que las ubicaciones propuestas cumplen con las mismas condiciones y características que las actuales, al encontrarse en lugares de acceso público no restringido o en intersecciones de calles.

En segundo lugar, el principal hallazgo de este estudio es la falta de coherencia entre las metas de recolección definidas por la normativa y la realidad comunal. Tal como establece la Ley N°20.920, los productores deben recolectar un porcentaje de los envases y embalajes que

introducen en el mercado. En la zona de estudio de Viña del Mar, estos residuos equivalen a 55,2 toneladas diarias de envases y embalajes (sin considerar cartón para líquidos ni metales), mientras que la meta máxima definida por la ley corresponde a una recolección de 31,5 toneladas diarias, la cual debe cumplirse a partir del año 12 de la vigencia del Decreto N°12 (septiembre de 2034).

De acuerdo con los resultados del modelo, dicha meta podría cumplirse instalando tan solo 26 estaciones de recolección, sin considerar las instalaciones existentes, o 22 estaciones adicionales a las ya operativas. Este resultado, sumado al despliegue de aproximadamente 600 instalaciones monomaterial distribuidas aleatoriamente por la comuna, demuestra una baja optimización de los recursos por parte de la autoridad local. Esto reduce el incentivo de los productores para implementar el objetivo final de la Ley, que es la transición a un sistema de recolección puerta a puerta, más costoso y que recae directamente en el productor, mientras que el sistema *drop-off* implica un mayor costo para el consumidor, quien debe separar y trasladar sus residuos.

Es relevante mencionar que las localizaciones propuestas para la instalación de estaciones de recolección se encuentran en espacios de acceso público no restringido y en zonas con alta concurrencia de la población adyacente. De acuerdo con los resultados obtenidos, la instalación de estaciones en 93 de las ubicaciones propuestas permitiría cubrir cerca del 78 % de los envases y embalajes generados en la comuna, en contraste con el 57 % planteado por la Ley.

Finalmente, a partir de los resultados y conclusiones presentadas, se recomienda una revisión y reformulación de las metas de recolección y valorización establecidas, con un enfoque diferenciado en comunas con alta generación de residuos. De esta manera se incentivaría a los productores a implementar sistemas de gestión más beneficiosos para la comunidad y se lograría mayor coherencia entre las metas y la realidad local, contribuyendo efectivamente al objetivo final de la Ley: reducir los residuos municipales y sus impactos en el medioambiente y en la calidad de



vida de la población.

Referencias

- BCN (2018). Las razones ambientales que llevaron a China a desarrollar modelos de economía circular. <https://www.bcn.cl/observatorio/asiapacifico/noticias/razones-ambientales-china-economia-circular>.
- BCN (s.f.). Reporte Comunal. Recuperado el 15 de Octubre de 2024 de https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunas_v.html?anno=2024yidcom=5109.
- Berman O., Drezner Z., y Krass D. (2010). Generalized coverage: New developments in covering location models. *Computers & Operations Research*, 37(10):1675–1687. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.003>.
- Chen D., Bodirsky B., Krueger T., Mishra A., y Popp A. (2020). The world's growing municipal solid waste: Trends and impacts. *Environmental Research Letters*, 15:7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8659>.
- Cho Y.-A., Kim L., Jung H. J., Lee M., Kim Y.-S., Kim I. K., Lee Y. K., Choi J. Y., y Cho Y. (2006). [does living nearby a garbage dumping site degrade the quality of life? a case study based on shin-dong myeon residents, chun-cheon si]. *Journal of preventive medicine and public health = Yebang Uihakhoe chi*, 39 4:302–8.
- Church R. y Velle C. R. (1974). The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, 32(1):101–118. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1974.tb00902.x>.
- Church R. L. y Roberts K. L. (1983). Generalized coverage models and public facility location. *Papers in Regional Science*, 53(1):117–135. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1983.tb00807.x>.

Decreto N°12 (2016). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago de Chile, 01 de Marzo de 2021.

Fakorede C. O., Anguruwa G. T., Ajayi O., y Odega C. A. (2021). Waste disposal practices and its environmental implications. *Nigerian Journal of Environmental Sciences and Technology*.

Font E. V. (2021). Gestión de residuos sólidos urbanos en microbasurales. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32412/2/BCN_Gestion_de_residuos_microbasurales_2021_FINAL.pdf.

G-Advisory (2018). Descripción y análisis de los sistemas de depósito y reembolso: ventajas e inconvenientes. <https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/06/16-SUPERMERCADOS-DE-CHILE-1.pdf>.

Gautam A. K. y Kumar S. (2005). Strategic planning of recycling options by multi-objective programming in a gis environment. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7(4):306–316. <https://doi.org/10.1007/s10098-005-0006-7>.

González-Torre P. L. y Adenso-Díaz B. (2005). Influence of distance on the motivation and frequency of household recycling. *Waste Management*, 25(1):15–23. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.08.007>.

Ilustre Municipalidad de Viña del Mar (2022). Municipio instala 600 nuevos puntos verdes para reciclaje de botellas y envases plásticos en viña del mar. Sitio web de la Municipalidad de Viña del Mar. <https://www.munivina.cl/noticias/municipio-instala-600-nuevos-puntos-verdes-para-reciclaje-de-botellas-y-envases-plasticos-en-vina-del-mar>.

INE (2015). Definición de Manzana Censal. <https://geoarchivos.ine.cl/File/boletines/Definici%C3%B3n%20Manzana%20Censal.pdf>.

INE (s.f.). Geodatos Abiertos. Recuperado el 15 de junio de 2025 de <https://www.ine.gob.cl/herramientas/portal-de-mapas/geodatos-abiertos>.

Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., y Van Woerden F. (2018). *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.

Ley N°20.920 (2016). Diario Oficial de la República de Chile. Santiago de Chile, 01 de Junio de 2016.

Ministerio del Medio Ambiente (2021). Sexto reporte del estado del medio ambiente. <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/06/REMA2021.pdf>.

Ministerio del Medio Ambiente (2023). Octavo reporte del estado del medio ambiente. <https://sinia.mma.gob.cl/estado-del-medio-ambiente/reporte-del-estado-del-medio-ambiente-2023/>.

Ministerio del Medio Ambiente (s.f.). Ley REP - Economía Circular. Recuperado el 21 de Octubre de 2024 de <https://economiacircular.mma.gob.cl/ley-rep/>.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile (2025). Puntos limpios — economía circular. Sitio web del Ministerio del Medio Ambiente. Recuperado el 22 de julio de 2025 de <https://economiacircular.mma.gob.cl/puntos-limpios>.

Mora Blandón V., Duque C., y Echeverri G. (2020). Avances tecnológicos para la mejora del reciclaje. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11586.71368>.

Municipalidad de Viña del Mar (s.f.). Nuestra ciudad - Viña del Mar. Recuperado el 06 de junio de 2025 de <https://www.munivina.cl/nuestra-ciudad/>.

Murtagh E. M., Mair J. L., Aguiar E., Tudor-Locke C., y Murphy M. H. (2020). Outdoor walking speeds of apparently healthy adults: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 51:125–141. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01351-3>.

Segura Á., Rojas L. P. Y. (2020). Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. <http://es.revistaespacios.com/a20v41n17/a20v41n17p22.pdf>.

Sidique S. F., Lupi F., y Joshi S. V. (2010). The effects of behavior and attitudes on drop-off recycling activities. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(3):163–170. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.07.012>.

Sidique S. F., Lupi F., y Joshi S. V. (2013). Estimating the demand for drop-off recycling sites: A random utility travel cost approach. *Journal of Environmental Management*, 127:339–346. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.001>.

SUBDERE (2017). Línea base diagnóstico y catastro de residuos sólidos domiciliarios captura año 2017. <https://proactiva.subdere.gov.cl/handle/123456789/518>.

SUBDERE (2024). Informe de Diagnóstico y Catastro Nacional de Residuos Sólidos Domiciliarios. Región de Valparaíso. https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/V%20Regi%C3%B3n%20de%20Valpara%C3%ADso%20RSD%20Marzo_2024_0.pdf.

SUBDERE (s.f.). Gobierno Regional Metropolitano de Santiago. Recuperado el 29 de septiembre

de 2024 de <https://www.subdere.gov.cl/divisi%C3%B3n-administrativa-de-chile/gobierno-regional-metropolitano-de-santiago>.

Tchobanoglous G., Theisen H., y Vigil S. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill international editions : Civil engineering series. McGraw-Hill Companies, Incorporated.

UNEP (2024). Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste: Turning Rubbish into a Resource. [Reporte]. Recuperado el 28 de octubre de 2024 de <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>.

Zambrano-Monserrate M., Ruano M., y Candelario V. (2021). Determinants of municipal solid waste: a global analysis by countries' income level. *Environmental Science and Pollution Research*, 28:1–10. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15167-9>.

Zhang S., Xia Z., Zhang C., Tian X., y Xie J. (2023). Green illusions in self-reporting? reassessing the intention-behavior gap in waste recycling behaviors. *Waste management*, 166:171–180.

Zlobina V. L., Medovar Y. A., y Yushmanov I. O. (2021). Assessing the hazard of environmental pollution by landfills of industrial and municipal wastes. *Water Resources*, 48(3):420–426. <https://doi.org/10.1134/S0097807821030155>.

¿Cuál es tu huella? (2021). Puntos limpios de reciclaje en viña del mar. Sitio web ¿Cuál es tu huella? <https://www.cualestuhuella.cl/noticia/puntos-limpios/2021/01/puntos-limpios-reciclaje-vina-del-mar>.