

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**DISEÑO DE TERRITORIOS PARA LA RECOLECCIÓN
DE RESIDUOS SÓLIDOS EN ÁREAS MUNICIPALES**

POR

MARÍA DEL ROSARIO ALVARADO VAZQUEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

SEPTIEMBRE 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**DISEÑO DE TERRITORIOS PARA LA RECOLECCIÓN
DE RESIDUOS SÓLIDOS EN ÁREAS MUNICIPALES**

POR

MARÍA DEL ROSARIO ALVARADO VAZQUEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

SEPTIEMBRE, 2017

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Diseño de territorios para la recolección de residuos sólidos en áreas municipales», realizada por el alumno María del Rosario Alvarado Vazquez, con número de matrícula 1453344, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis

Jania Astrid Saucedo

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez

Asesor

Miguel Mata Pérez

Dr. Miguel Mata Pérez

Revisor

José Eduardo Trejo de la Torre

MLYCS José Eduardo Trejo de la Torre

Revisor

Vº. Bo.

Simón Martínez Martínez

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, septiembre 2017

A mi familia quienes me apoyaron todo el tiempo.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XII
Resumen	XIII
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Objetivo	4
1.2.1. Objetivos específicos	4
1.3. Justificación del problema	5
1.4. Hipótesis	5
1.5. Metodología	5
1.6. Estructura de tesis	7
2. Antecedentes	9
2.1. Logística urbana	10
2.1.1. Aplicaciones de la logística urbana	12
2.2. Crecimiento poblacional	16

2.3. Gestión de residuos sólidos	22
2.4. Métodos actuales de recolección de residuos sólidos	25
2.5. Diseño de rutas de recolección	28
3. Diseño de territorios	33
3.1. Modelación matemática	33
3.2. Antecedentes de diseño de territorios	36
3.3. Aplicaciones de los problemas de diseño territorio	37
3.4. Un modelo básico de diseño de territorio	40
3.5. Métodos de solución	45
4. Descripción del modelo matemático	47
4.1. Descripción del problema	48
4.2. Modelo 1	48
4.2.1. Consideraciones y supuestos	49
4.2.2. Notación	49
4.3. Características del modelo 1	51
4.4. Modelo 2	52
4.4.1. Consideraciones y supuestos	52
4.5. Características del modelo 2	54
4.6. Otras consideraciones	54

5. Caso de estudio: San Nicolás de los Garza	57
5.1. Municipio de San Nicolás de los Garza	57
5.2. Problemáticas municipales	58
5.3. Recopilación de datos	59
5.4. Pruebas y experimentaciones	61
5.4.1. Resultados modelo 1	62
5.4.2. Resultados modelo 2	64
5.5. Validación del modelo	69
6. Conclusiones	72
6.1. Conclusiones	72
6.2. Implementación y utilidad de la metodología	74
6.3. Trabajo a futuro	75
A. Distritos del municipio de San Nicolás de los Garza	76
B. Datos del caso de estudio	80
C. Resultados	83

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Logística de los negocios	10
2.2. Logística en el manejo de recursos para recolección de residuos sólidos	15
2.3. Evolución de la población mundial	17
2.4. Población en Nuevo León	18
2.5. Generación total de residuos sólidos	19
2.6. Generación total de residuos sólidos	20
2.7. Composición de residuos sólidos	22
2.8. Etapas de la gestión de residuos	23
2.9. Círculo vicioso del servicio ineficiente	24
2.10. Clasificación de los métodos de recolección	26
2.11. Método de esquina o de paradas fijas	27
2.12. Método de recolección de acera	27
2.13. Método intradomiciliario o de llevar y traer	28
2.14. Método de recolección de contenedores	28
3.1. Criterios del diseño de territorios	43

5.1. Distritos del municipio San Nicolás de los Garza	61
5.2. Diseño de territorios propuesto para los proveedores	62
5.3. Diseño para los distritos 19, 21, 23 y 24	65
5.4. Diseño para los distritos 7 y 8: Solución 1	66
5.5. Aplicación del algoritmo: Parques no contiguos (Paso 3)	67
5.6. Aplicación del algoritmo: Parques adyacentes (Paso 4)	68
5.7. Aplicación del algoritmo: Comparación de distancias al centro de te- rritorio (Paso 5)	68
5.8. Diseño para los distritos 7 y 8: Solución 2	69
A.1. Distritos Casa Bella y Balcones	76
A.2. Distritos Vicente Guerrero, Santo Domingo y Del Paseo	77
A.3. Distritos La Fe, Casa Blanca y Talavera	77
A.4. Distritos Centro, CEDECO y El Refugio	77
A.5. Distritos Del Vidrio, Constituyentes y Nogalar	78
A.6. Distritos Pedregal, Residencial Anahuac y Lagrange	78
A.7. Distritos Industrial, Andalucía y Cuauhtémoc	78
A.8. Distritos Las Puentes, Anáhuac y Jardines de Anáhuac	79
B.1. Matriz de adyacencia de los distritos	81
B.2. Parques y medida de actividad	81
B.3. Distancias entre parques metros	82

C.1. Diseño para los distritos 1, 2 y 17	83
C.2. Diseño para los distritos 6 y 22	83
C.3. Diseño para los distritos 10, 12 y 13	84
C.4. Diseño para los distritos 19, 21, 23 y 24	84
C.5. Diseño para los distritos 3, 4 y 5	84

ÍNDICE DE TABLAS

4.1. Pseudocódigo del método de solución para el criterio de contigüidad.	56
5.1. Distritos del municipio de San Nicolás de los Garza	60
5.2. Asignación de distritos para cada proveedor	63
5.3. Planeación para limpieza de parques para el proveedor D	65
5.4. Planeación para limpieza de parques para el proveedor F	67
5.5. Planeación para la limpieza de parques para el proveedor F solución 2	69
5.6. Asignación de proveedores	70
5.7. Comportamiento de instancias	71

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y mi novio por su apoyo incondicional. A mi asesora, Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez, por el tiempo dedicado al desarrollo de esta tesis, al Dr. Miguel Mata y al MLYCS Eduardo de la Torre, por contribuir con la revisión de la tesis. A mis profesores por sus valiosas enseñanzas. A la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, por su apoyo económico durante este tiempo. A CONACyT, por aceptarme en su programa nacional de becas de posgrado.

RESUMEN

María del Rosario Alvarado Vazquez.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: DISEÑO DE TERRITORIOS PARA LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS
SÓLIDOS EN ÁREAS MUNICIPALES.

Número de páginas: 90.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Actualmente el servicio de limpieza y recolección de residuos sólidos en parques de los municipios de la Zona Metropolitana de Monterrey presenta problemas al momento de planificar el diseño de los territorios para este servicio, debido a que se realiza de manera manual y empírica. Por lo tanto, se propone un diseño territorial mediante la adaptación de un modelo matemático para la limpieza y recolección de residuos sólidos en parques particularmente el modelo será aplicado a un municipio de la Zona Metropolitana de Monterrey. Para esto se consideraron los siguientes objetivos particulares:

1. Realizar un análisis detallado de los datos, requerimientos, restricciones y condiciones determinados por la empresa encargada de la limpieza y recolección con el propósito de lograr un completo conocimiento del problema.

2. Proponer un modelo matemático que represente el problema expuesto, es decir, una abstracción matemática del problema, con la finalidad de determinar el tamaño máximo para el cual es posible encontrar soluciones exactas con métodos convencionales.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: En esta investigación se logra obtener la aplicación de un modelo matemático de diseño de territorios para el servicio de limpieza y recolección de residuos sólidos en parques de San Nicolás de los Garza, siendo este el aporte principal, en donde, se consideraron los factores más importantes para este servicio, como son la cantidad de residuos a recolectar y la frecuencia del servicio.

Como conclusión importante los resultados obtenidos mediante el modelo matemático planteado son satisfactorios en la parte computacional y además ofrecen un adecuado diseño de territorios cumpliendo con los criterios de planificación de contigüidad, balance, compacidad e integridad espacial. Es fundamental señalar que la aplicación del modelo matemático ayuda a mejorar la toma de decisiones en la planeación de diseño de territorios para la limpieza y recolección de residuos sólidos en parques, debido a que actualmente los encargados del servicio realizan de manera empírica esta tarea.

Por otra parte, un aspecto destacable de los resultados es la cobertura del servicio, lo cual asegura un nivel de servicio adecuado, en donde todos los parques del municipio de San Nicolás de los Garza serán limpiados una vez al mes, asimismo de generar un mayor control en la asignación de los parques a los proveedores considerando la carga de trabajo.

Firma del asesor: Janía Astrid Saucedo
Dra. Janía Astrid Saucedo Martínez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, debido a la creciente urbanización muchas ciudades enfrentan retos difíciles que conllevan a aplicar conceptos de logística urbana. También conocida como la logística de la ciudad incluye temas de transporte urbano, transporte de mercancías, servicios de correos, servicios de limpieza y mantenimiento de calles, gestión de parques y jardines, recolección de basura, servicios de respuesta rápida y servicios urbanos básicos. Para garantizar la eficiencia en las operaciones y continuidad en los servicios anteriormente mencionados es necesario la utilización de herramientas de optimización.

La Investigación de Operaciones es la rama de las matemáticas que ofrece una base científica a problemas de toma de decisiones, dentro del campo de aplicación destacan una gran diversidad de problemas. En particular, en este trabajo abordamos un problema en la disciplina de diseño territorial para la recolección de residuos sólidos en áreas municipales, coloquialmente conocidas como parques.

El objetivo del trabajo se centra en solucionar un problema de planeación de diseño de territorios para la limpieza y recolección de basura en áreas municipales, dicho problema se debe al alto volumen de residuos sólidos en los parques de la Zona Metropolitana de Monterrey.

La investigación propone un diseño territorial mediante la adaptación de un

modelo matemático que minimice la distancia total, ponderada por la cantidad de residuos sólidos generados en los parques, sujeto a restricciones de compacidad, contigüidad y balance, así como también restricciones relacionadas a tiempo, capacidad y recursos disponibles.

Se pretende diseñar territorios para la recolección de residuos con el objetivo de hacer un uso adecuado de equipo y personal, aumentar la cobertura de servicio, disminuir costos de servicios y conservación y cuidado del medio ambiente.

La idea principal de este trabajo es presentar al lector cómo las herramientas de Investigación de Operaciones, pueden utilizarse exitosamente para brindar soluciones a problemas prácticos importantes como en este caso el diseño de territorios para prestación de servicios (recolección de residuos sólidos), y dar un apoyo de una manera científica, a un proceso de toma de decisiones a los encargados del servicio.

A continuación en este capítulo se presentará la descripción del problema, el objetivo que se busca cumplir, la justificación, es decir, porque es importante solucionar dicho problema, también se mostrará la hipótesis, metodología y finalmente la estructura de la tesis.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El crecimiento de la población descontrolado que se ha dado los últimos años en Nuevo León es uno de los problemas más grandes que existen, ya que implica un incremento de la demanda de alimentos y bienes materiales, y acelera el proceso de agotamiento de los recursos aumentando la generación de residuos y otros impactos. Si no existe un control de la generación de residuos, sobre todo en las ciudades grandes, la acumulación de estos, genera problemas en el medio ambiente y en la salud.

Para definir nuestro problema a abordar se comenzó a delimitar el sistema a

estudiar, para esto se investigó la organización de la Secretaría de Servicios Públicos, quienes son los responsables del servicio de limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales de los municipios de la Zona Metropolitana de Monterrey, actualmente dicha tarea la realizan mediante concesiones del servicio con proveedores de cuadrillas de limpieza, también se estudió la forma en la que trabajan actualmente, así como las deficiencias que se presentan en el servicio de limpieza y recolección de áreas municipales.

En un principio se tenían, de manera general, las diversas problemáticas que enfrentan la mayoría de los parques de la Zona Metropolitana de Monterrey, entre los principales problemas esta el exceso de generación de residuos, esto debido a dos hechos, por un lado el rápido crecimiento de la hierba en las áreas verdes y por otro, la acumulación de basura en contenedores además de basura tirada en los alrededores de los parques, ante tal problemática muchos de los ciudadanos presentan quejas constantemente de las condiciones en las que se encuentran las áreas municipales puesto que las zonas se vuelven un foco de inseguridad, adicionalmente estas condiciones favorecen la aparición de mosquitos, roedores, reptiles y otros insectos que pueden propiciar la propagación de enfermedades. Aunado a esto, la falta de mantenimiento de bancas y juegos de los parques y el mal uso del equipo de recolección son otras de las problemáticas que enfrentan.

Con la información anterior se define que el problema central consiste básicamente en que no existe una planeación adecuada del diseño de territorios para la limpieza y recolección residuos sólidos en áreas municipales por parte de Servicios Públicos. Para atacar este problema se propone un diseño territorial mediante la modelación matemática.

El realizar una investigación que estudie la problemática en el diseño de territorios para la limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales en Nuevo León desde el punto de vista logístico representaría la oportunidad de generar propuestas que optimicen los recursos, además de la posibilidad de expandir y

adaptar herramientas cuantitativas para la solución de problemas en otras áreas y/o sectores.

De esta manera, una óptima recolección de residuos sólidos constituye una actividad en la cual es de esperarse la reducción de enfermedades en la población (eliminación de vectores biológicos, proliferación de insectos y roedores) al reducir posibles focos de infección, dando como resultado el saneamiento, protección y conservación del medio ambiente.

1.2 OBJETIVO

Mejorar el servicio de cobertura de limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales que ofrece Servicios Públicos mediante la planeación de diseño de territorios aplicando un modelo de optimización de programación lineal entera mixta.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la forma actual de planificación de rutas y los métodos de recolección de los residuos sólidos, con el fin de conocer los recursos que son involucrados en el servicio.
- Elaborar un diseño de territorios en la recolección de residuos sólidos en las áreas municipales de un municipio de la Zona Metropolitana de Monterrey.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Hoy por hoy, el manejo de residuos enfrenta desafíos, tanto en logística como en costos, dado la excesiva generación de residuos, consecuencia del crecimiento poblacional en centros urbanos. La necesidad de controlar tanto daños a la población como al medio ambiente transforma el problema de recolección en un problema de públicos y de privados. Esto conduce a la necesidad de desarrollar de manera integral soluciones, centradas principalmente en la recolección, transporte y disposición de los residuos del área bajo estudio.

En la mayoría de los municipios el manejo empírico del servicio de aseo urbano, ha ocasionado que este servicio carezca de una adecuada planificación y organización, lo cual se ha traducido en altos costos de funcionamiento, por esta razón se busca mejorar el trabajo actual.

1.4 HIPÓTESIS

Con la implementación de un modelo de optimización de programación lineal entera mixta se espera mejorar el servicio de cobertura de limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales mediante la planeación de diseño de territorios de un municipio de la Zona Metropolitana de Monterrey.

1.5 METODOLOGÍA

A continuación, se muestran las etapas de la metodología de investigación que se utilizará para resolver el problema de planificación de diseño de territorios para la limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales.

1. Descripción del problema: Aquí se estudiará la forma en la que trabajan ac-

tualmente los responsables del servicio de limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales, así como las deficiencias que se presentan en el servicio. Y de esta forma, concretar de manera concisa el problema a resolver.

2. Revisión de literatura: Se desarrollará durante un largo periodo de estudio, ya que se iniciará analizando de manera general, todos los conceptos relacionados con la gestión de residuos sólidos y las distintas herramientas que se han empleado para la solución del mismo.
3. Formulación de modelo matemático: En esta fase, se realizará la adaptación del modelo base de diseño de territorios, que es la clave para el planteamiento del problema. De manera más concreta se efectuará la descripción de los objetivos del sistema, es decir, lo que se desea optimizar, se identificarán las variables implicadas y se determinarán las restricciones del sistema.
4. Recopilación de datos: Este trabajo de investigación se realizará con apoyo de Servicios Públicos, encargados de la limpieza y recolección de basura de áreas municipales específicamente del municipio de San Nicolás de los Garza. La finalidad es ayudar a sus directivos con propuestas concretas para realizar una planeación de diseño de territorios para la limpieza y recolección de basura en áreas municipales.

La investigación es de tipo documental y de campo por ello una vez formulado el modelo matemático de acuerdo con nuestro problema de estudio, se continua con la recopilación de los datos pertinentes sobre los parámetros involucrados en la investigación. Las herramientas que se utilizarán son: entrevistas con el encargado de Servicios Públicos, Sistemas de Información Geográfica (SIG), cartografía del municipio, GAMS/CPLEX y Excel. La entrevista permitirá recabar información en forma verbal, a través de preguntas elaboradas sobre datos específicos de los métodos de recolección en áreas municipales como son: la frecuencia de recolección, la cantidad de proveedores de servicio de recolección, el equipo con el que cuenta el personal de servicio, el área de cobertura de servicio, la clasificación de las áreas municipales, etc.

Los SIG permitirán la obtención de las distancias de entre cada una de las áreas municipales y la cartografía la ubicación específica de una de las áreas municipales. Finalmente Excel permitirá la captura de todos los datos mencionados anteriormente para posteriormente ser vaciados al *software* GAMS.

5. Pruebas y experimentación: Una vez que se tiene el modelo y los datos, se procede a derivar una solución matemática empleando las diversas técnicas y métodos matemáticos para resolver problemas y ecuaciones. En esta etapa se realizará la experimentación de varios casos prueba en GAMS, *software* que se utilizará para resolver el modelo matemático.
6. Validación del modelo: La validación de un modelo requiere que se determine si dicho modelo puede predecir con certeza el comportamiento del sistema. Un método común para probar la validez del modelo, es someterlo a datos pasados disponibles del sistema actual y observar si reproduce las situaciones pasadas del sistema. En general el objetivo es comprobar que el modelo replica bajo ciertos supuestos la situación actual. En esta etapa se ajustarán los territorios tentativos además de determinar si se cumplen los criterios de integridad espacial, conectividad, compacidad y balance. Finalmente, si no arroja los resultados esperados se adecua el modelo.
7. Interpretación de resultados: Una vez obtenida la solución del modelo, el siguiente y último paso del proceso es interpretar esos resultados y dar conclusiones y cursos de acción para la implementación del sistema. Si el modelo utilizado puede servir a otro problema, es necesario revisar, documentar y actualizar el modelo para sus nuevas aplicaciones.

1.6 ESTRUCTURA DE TESIS

La estructura utilizada en este documento para exponer el trabajo realizado es la siguiente:

En el capítulo 1 se presenta la descripción del problema, así como el objetivo e hipótesis de la misma. Posteriormente, en el capítulo de antecedentes, se presentará la revisión bibliográfica donde se explican los conceptos necesarios para la comprensión y contextualización del trabajo, abordando la literatura de crecimiento poblacional, gestión de residuos sólidos, los métodos actuales de recolección y la logística urbana. También, como parte de los antecedentes en el capítulo 3, se revisan todos los conceptos relacionados con el diseño de territorios, aplicaciones y los métodos de resolución.

En el capítulo 4, se presentará la descripción completa del modelo matemático desde las consideraciones y supuestos establecidos, así como las restricciones del sistema.

El capítulo 5 mostrará el caso de estudio, las pruebas y experimentaciones llevadas a cabo con el modelo matemático. Y finalmente, en el capítulo 6 se presentarán las conclusiones de la investigación.

A continuación se presenta el capítulo de antecedentes.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En este capítulo se realizará una revisión del concepto de logística urbana y sus aplicaciones más importantes, asimismo se muestra su relación con el crecimiento de la población mundial y finalmente se presentan los problemas que conlleva dicho crecimiento.

Los métodos de análisis logístico tuvieron su desarrollo histórico en el campo militar, mientras que su aplicación en el *management* empresarial se introdujo hace pocas décadas. En 1998 el Council Of Logistics Management (CLM) establece el concepto de logística como el proceso de planeación, ejecución y control eficiente y efectivo del flujo y almacenamiento de bienes, servicios y la información asociada, desde el punto de origen al punto de consumo, con el propósito de satisfacer las necesidades de los clientes (Ballou, 2004).

Tenemos que las actividades logísticas dentro de una empresa son: aprovisionamiento, almacenamiento, empaque, distribución física, transporte, información, atención al cliente mercancías y gestión de inventarios, ver figura 2.1. Sin embargo, la logística también está presente en actividades no empresariales como los bancos, hospitales, áreas públicas y otras entidades similares; mientras que la logística urbana involucra las actividades anteriores, y está íntimamente relacionada con los estudios de tránsito de la ciudad y el uso del suelo (Menoyo, 2006).

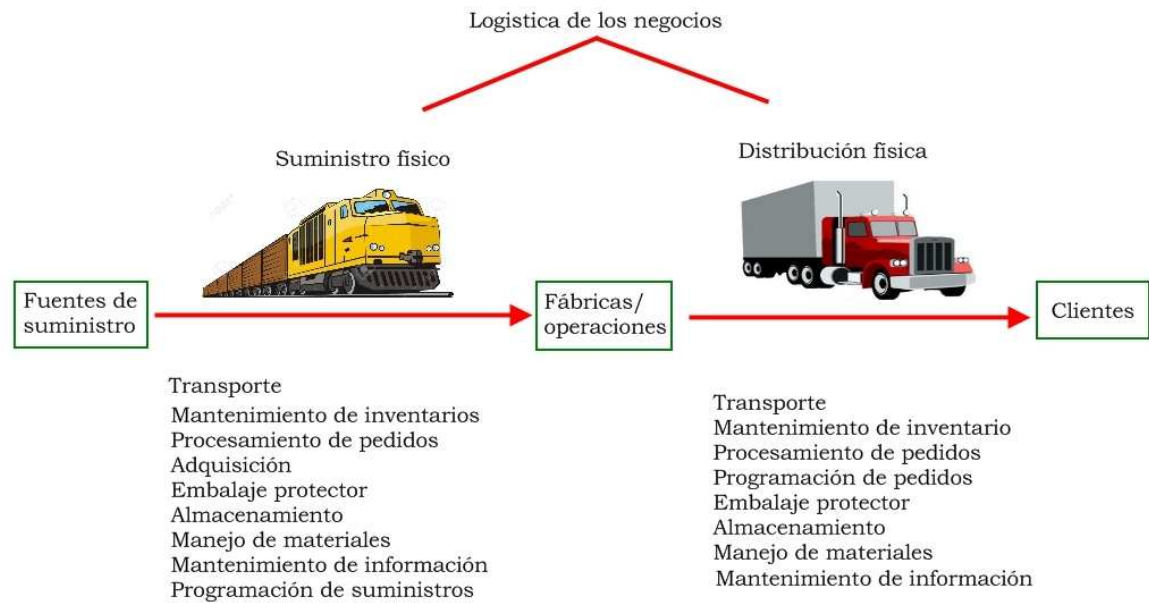


Figura 2.1: Logística de los negocios

Fuente: Ballou (2004)

2.1 LOGÍSTICA URBANA

La logística urbana se origina a consecuencia de la necesidad de adoptar una postura integral que globalice la planificación y gestión urbana. Se trata de una disciplina capaz de considerar de forma global todas las operaciones y servicios presentes en la ciudad, teniendo en cuenta al conjunto y no a las partes que lo componen y, prestando especial atención a la sostenibilidad del sistema (Robusté *et al.*, 2000).

Se considera la logística urbana similar al concepto de logística empresarial con la diferencia de que la urbana incluye la planificación, ejecución y control eficiente del flujo y almacenamiento de materiales e información relacionada a escala urbana. A continuación, se muestran el concepto de logística urbana definido por diferentes autores.

Una definición formal, presentada por Cerdá (2010), establece que la logística urbana es el eslabón de la cadena de transporte de mercancías que se sitúa dentro de

la ciudad, cuyo objetivo principal es proporcionar un servicio de aprovisionamiento y distribución, tanto a los establecimientos empresariales localizados en ella como al consumidor final.

De manera similar, Macário *et al.* (2008) establecen que la logística urbana es el último eslabón de la cadena logística, por lo tanto, es el sector que presenta mayor impacto en la economía debido a la dependencia de otras actividades económicas de sus servicios. El propósito de la logística urbana es un desarrollo sostenible en áreas urbanas.

Winkenbach *et al.* (2015) mencionan que el concepto de logística urbana, también llamada logística de la ciudad, busca promover el desarrollo sostenible disminuyendo los factores negativos externos como por ejemplo, la congestión, las emisiones de contaminantes, el consumo de combustible, el ruido y otros factores ambientales, con la finalidad de facilitar la actividad económica y social en las zonas urbanas.

Un aspecto destacable de las definiciones anteriores establecidas por Cerdá (2010), Macário *et al.* (2008) y Winkenbach *et al.* (2015), es que la logística urbana tiene como objetivo un desarrollo sostenible de la ciudad, lo cual implica tres factores importantes: sociedad, economía y medio ambiente. En general la logística urbana busca integrar todos los servicios y operaciones presentes en la ciudad teniendo como objetivo el beneficio social de la colectividad

Por otro lado, Suero Perez *et al.* (2013) mencionan que en los últimos años los conceptos logísticos están siendo aplicados a la optimización y mejoramiento del flujo de las ciudades, lo que se conoce como logística urbana, debido a que se están presentando problemas de congestión de transporte en la distribución de productos, ya que muchas veces, las operaciones de carga y descarga de mercancías se realizan de forma que entorpecen el tráfico, esto junto con la inadecuada ubicación de los centros de consumo y la escasez de sistemas alternativos de transporte y estacionamiento son algunas de las actividades erróneas dentro del flujo de la ciudad que necesita ser controlado y solucionado por esta disciplina.

La logística urbana tiene como objetivo optimizar la planificación, gestión y control, de manera integrada y coordinada, del movimiento de mercancías dentro de una red logística en un área metropolitana (Rezende y Aghezzaf, 2015).

De manera semejante, Oliveira y Correia (2014) describen que la logística urbana debe ser un proceso de optimización de las actividades logísticas completas realizadas por las entidades tanto públicas como privadas en las áreas urbanas, considerando los impactos sociales, ambientales, económicos, financieros y energéticos. Así, que este concepto para Oliveira y Correia (2014) surge para buscar equilibrar los diferentes objetivos y necesidades de los actores involucrados en la distribución de bienes.

De modo que, para los autores Suero Perez *et al.* (2013), Rezende y Aghezzaf (2015) y Oliveira y Correia (2014) ven el concepto de logística urbana como un proceso de optimización, por lo tanto, desde esta perspectiva se puede lograr una adecuada utilización de los recursos dentro de la ciudad de tal manera que se obtengan beneficios con un costo mínimo.

Por lo que, la logística urbana juega un papel importante para la economía y la calidad de la vida en las ciudades, por lo tanto, es fundamental realizar actividades de mejora o que resuelvan problemas presentes en operaciones y servicios en ciudades.

2.1.1 APLICACIONES DE LA LOGÍSTICA URBANA

La logística urbana busca solucionar diferentes problemas presentes en la ciudad, a continuación, diferentes autores establecen algunas herramientas utilizadas para resolverlos.

Taniguchi *et al.* (2014) establecen que la logística urbana desempeña un papel importante en la creación de sistemas de transporte urbano eficientes, seguros y respetuosos con el medio ambiente. En su trabajo se revisan las tendencias e inno-

vaciones recientes en la modelización de esta disciplina describiendo la formulación, las metodologías de solución y aplicaciones de estos modelos. Un aspecto destacable de su trabajo es que se menciona que las soluciones de la logística urbana ayudan a resolver problemas difíciles como la congestión del tráfico, la contaminación del aire, los accidentes y el gran consumo de energía, esto debido a que esta ciencia considera múltiples objetivos, así como el comportamiento de múltiples actores involucrados en actividades.

Por otro lado, Winkenbach *et al.* (2015) indican que la logística urbana aborda problemas de congestión, emisiones de contaminantes, consumo de combustible, el ruido y otros factores ambientales. En su trabajo presentan un modelo de programación lineal que resuelve un problema de enrutamiento de localización en el contexto de servicios de logística urbana. Otro trabajo similar es el de Villamizar *et al.* (2014) el cual también aborda un problema de localización de centros de distribución urbanos y en que se propone un método exacto basado en la programación lineal entera para la toma de decisiones estratégicas, tácticas y operacionales. Dicho problema está motivado en que las grandes ciudades necesitan restringir el movimiento de camiones en ciertas áreas residenciales.

Tanto Taniguchi *et al.* (2014) y Winkenbach *et al.* (2015) coinciden en que la movilidad, la sostenibilidad y la habitabilidad son tres objetivos importantes en las ciudades que busca la logística urbana, además, que ambas publicaciones muestran como propuesta la solución de problemas relacionados con esta disciplina mediante modelación matemática

Desde otro enfoque, Macário *et al.* (2008) señalan que la logística urbana plantea serias complicaciones que existen en la ciudad, por ejemplo: congestión, ruido, obstrucción de carreteras y aceras, degradación de las infraestructuras, entre otros. Estos problemas tienen elevados costos para la sociedad y complican la sostenibilidad urbana. Para resolver dichos problemas el autor propone que un modelo de negocio puede ser implementado en esta rama, comprometiendo todos los subsistemas con-

tenidos en el sistema logístico urbano y además asegura que la transferencia de este concepto optimizará las relaciones entre los diferentes subsistemas que componen, minimizando las tensiones existentes, promoviendo la competitividad y soluciones sostenibles.

Finalmente, a nuestra consideración el autor que determina de manera concreta los problemas que aborda la logística urbana es Robusté *et al.* (2000), en su trabajo establece que esta disciplina incluye temas desde las operaciones logísticas clásicas hasta operaciones urbanas necesitadas de análisis científico y una consideración global en el ámbito urbano. La logística urbana engloba diversos temas como son: el transporte urbano en todas sus modalidades (transporte público, tráfico, aparcamientos, peatones, motos y bicicletas), el transporte de mercancías, los servicios de correos, los servicios de limpieza, riego y mantenimiento de calles, la recolección de basuras, los servicios de respuesta rápida (policía, bomberos, asistencia médica, etc.), las operaciones de mantenimiento de las redes de infraestructuras básicas urbanas, la gestión de parques y jardines, los servicios de nueva generación derivados del avance tecnológico en informática y telecomunicaciones (venta vía telefónica y el comercio a través de internet). Por último, existe un ámbito de aplicación sobresaliente, es el referido a los suministros de servicios urbanos básicos, como son las redes de agua, electricidad, gas, teléfono, recolección de basura, etc.

El motivo por el cual se puede englobar bajo una misma perspectiva toda esta serie de operaciones y servicios urbanos, tradicionalmente diferenciados e independientes, reside en el hecho de aceptar que la lógica de funcionamiento de todas ellas es, si no idéntica, sí similar (producción y entregas justo a tiempo, entregas en ventanas temporales, servicio a diario, adecuación de servicios a patrones de demanda, previsiones y prioridades, etc.) incidiendo en el uso de vías públicas y que, mediante una disciplina general capaz de integrarlas a todas, puede lograrse una concordancia conjunta capaz de optimizar los recursos escasos de las áreas metropolitanas atendiendo a la vez a la sostenibilidad del sistema.

Es importante mencionar que el tema interés de aplicación de la logística urbana en esta investigación, es la recolección de residuos sólidos, por lo tanto, habiendo hecho la revisión anterior podemos concluir que existe una relación directa entre logística y la recolección de residuos de la siguiente forma: la logística en el manejo de recursos para la recolección de residuos sólidos agrupa las actividades que ordenen los flujos de materiales (planificación de rutas de recolección) coordinando los recursos utilizados (equipos de recolección, recursos urbanos) y demanda requerida (cantidad de residuos a recolectar) para asegurar un nivel determinado de servicio al menor costo posible. Ver figura 2.2 para visualizar gráficamente la relación anterior.



Figura 2.2: Logística en el manejo de recursos para recolección de residuos sólidos.

Es clave señalar que muchos factores apuntan a que los diferentes sectores que convergen en los servicios urbanos no podrán o sabrán, por sí mismos, optimizar sus operaciones teniendo como objetivo el beneficio social de la colectividad. Los fundamentos científicos de la logística urbana ayudarán a definir estándares de calidad de servicio que producirá un cambio importante en la cultura de cada sector y en el de la propia administración.

Por último, es conveniente destacar que la logística urbana, puede establecer una relación directamente proporcional entre la actividad económica y el volumen de la población, de manera que, conforme crecen la actividad económica y la población,

aumenta la complejidad de la optimización del funcionamiento de la cadena de la logística urbana (Cerdá, 2010).

Actualmente, la logística urbana enfrenta grandes retos precisamente debido al crecimiento urbano, el aumento de demanda, el incremento de frecuencias de las entregas en un tiempo determinado, la creciente competencia por el uso de la infraestructura limitada y la complejidad de los problemas de competencia transversal que el transporte urbano de bienes genera y se enfrenta (Macário *et al.*, 2008). Por esta razón, con el crecimiento poblacional, la logística urbana se vuelve un aspecto importante para plantear estrategias que ayuden a los procesos logísticos internos de cada ciudad, y de esta forma evitar el caos que un mal control podría generar en las ciudades. A continuación, se presentan los problemas relacionados con el crecimiento poblacional.

2.2 CRECIMIENTO POBLACIONAL

Es un hecho que el acelerado crecimiento de la población mundial y su relación con un potencial agotamiento de los recursos origina la mayor parte de los problemas ambientales.

Durante el origen de la humanidad, la población se encontraba en armonía con su entorno ambiental, pero años después con la fabricación de herramientas se redujo la mortalidad y se incremento la natalidad, esto debido a la elaboración de armas para la protección y la caza, causando un mayor crecimiento de la población. Posteriormente con el surgimiento de las actividades primarias se volvió a generar un incremento en la población. Finalmente, la revolución científica e industrial ocasionó la mayor expansión demográfica de la historia. Por ello, ni la falta de alimentos ni las enfermedades son factores que limiten el crecimiento de una población (Camare-ro Bullón, 2002).

En la figura 2.3 puede apreciarse como ha ido evolucionado la población mun-

dial desde la aparición de la especie humana y su crecimiento a lo largo de los años. También se puede observar que, durante un período de alrededor de 1000 años, el crecimiento había sido continuo y lento, sin embargo, después de ese período se dio un acelerado crecimiento poblacional.

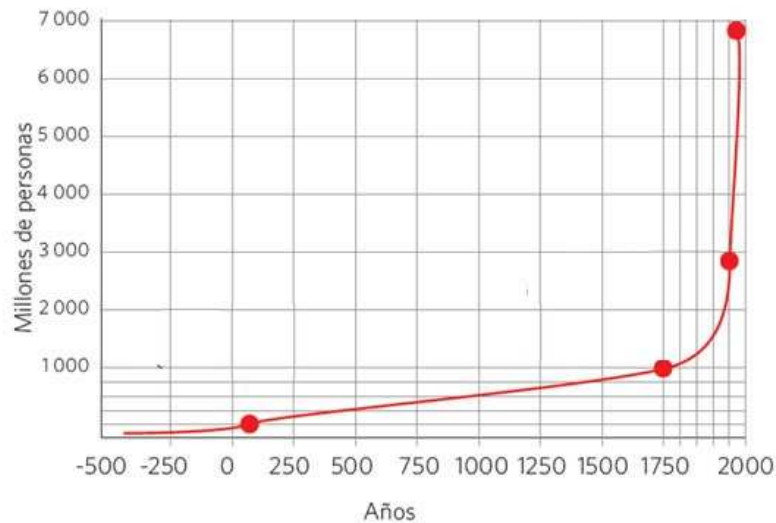


Figura 2.3: Evolución de la población mundial

Fuente: Portal-Educativo (2014)

Según datos de Sevilla Gaitan (2012), en el año 1804 habitaban 1 000 millones de personas en el planeta, después la humanidad tardó 123 años en sumar otros mil millones de habitantes; 33 años en alcanzar los 3 000 millones en 1960; 14 años en llegar a los 4 000 millones; un año en rebasar los 5 000 millones (1987); y tan solo 12 años en alcanzar los 6 000 millones (1999) y los 7 000 millones (2011).

Se puede observar que durante las primeras etapas las cifras se mantuvieron similares, sin embargo, hubo un cambio brusco en los últimos años esto debido a la natalidad y la mortalidad. Éstos dos índices influyen significativamente en el crecimiento poblacional; el índice de natalidad y supervivencia superó ampliamente al índice de mortalidad, y mejoraron sustancialmente las perspectivas de vida.

Con base en estos datos demográficos, queda de manifiesto que en la actualidad la población del mundo crece de forma exponencial, en el caso particular de nuestro

país, México está entre los once países más poblados del mundo, en la Encuesta Intercensal 2015, realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se contaron 119 millones 530 mil 753 habitantes en México. De manera más concreta en Nuevo León ha aumentado drásticamente la población, hecho similar al crecimiento mundial de la población, en la figura 2.4, se muestra una gráfica de la cantidad de habitantes desde 1900 hasta al 2015 en Nuevo León.

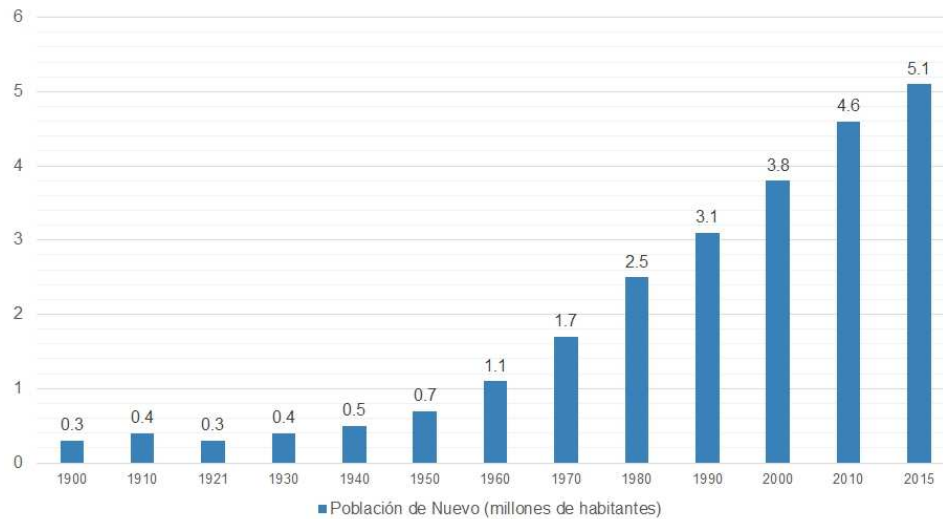


Figura 2.4: Población en Nuevo León

Fuente: INEGI (2015b)

En Nuevo León se prevé que la población continúe aumentando en las décadas futuras, en 2020 alcanzará una cifra de 5 440 277 de personas con una tasa de crecimiento de 1.27 % anual; en 2030 llegará a 6 097 769 habitantes con un ritmo de crecimiento menor, 1.01 % anual, según datos del Consejo Nacional de Población, (CONAPO, 2010).

Ante tal situación es imprescindible mencionar que el crecimiento poblacional es una de las principales causas de los problemas ambientales, pues implica un consumo permanente y continuo de energía, recursos y el consecuente aumento de la contaminación. Es decir, cuanto mayor sea el número de individuos, más recursos serán necesarios. El consumo de esos recursos provoca alteraciones del medio ambiente y contaminación, con consiguiente formación de grandes cantidades de residuos

sólidos (García Sanz, 1990).

Según datos oficiales del INEGI (2014), tenemos que en México diariamente se recolectan 102 887 315 kilogramos de basura en todo el territorio nacional, por lo que aproximadamente se está recolectando 0.86 kilogramos de residuos por persona al día en el país, es decir, que básicamente alrededor de un kilogramo de basura es generado por una persona. En la figura 2.5, se observa que al igual que el incremento de la población mundial, la generación de residuos sólidos en México ha ido en aumento en los últimos años, el cual es un hecho alarmante y preocupante.

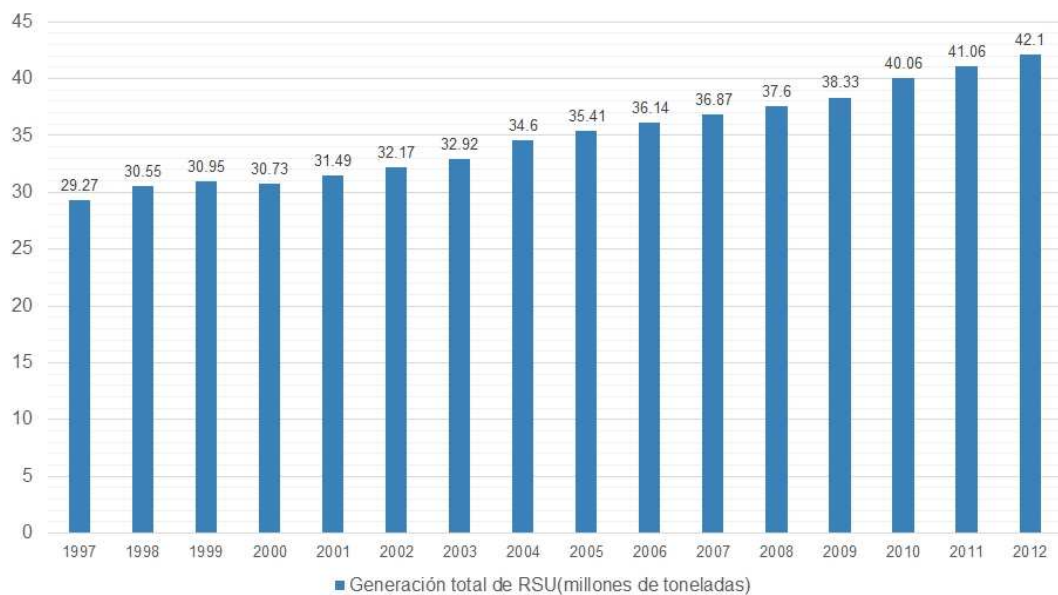


Figura 2.5: Generación total de residuos sólidos

Fuente: SEMARNAT (2014)

Otro dato interesante es que de la cantidad anterior el 25% va a dar directamente a calles y parques. Esta es una problemática preocupante causada por el crecimiento poblacional y el consumo exagerado de objetos innecesarios desechados en un periodo corto, como son los bienes de consumo, muchos de los cuales se presentan envueltos en papel, plástico o cartón; a esto se suma la abundante propaganda y publicidad impresa en papel y repartida en la vía pública y que, casi siempre, es arrojada a la calle. El comercio, las escuelas y otras instituciones tiran diariamente

enormes cantidades de papel.

Por otro lado, más de la mitad de basura que se genera en todo el país se recolecta en siete entidades, en la figura 2.6 se muestran los porcentajes de cada entidad, específicamente en Nuevo León el 3.6 % corresponde a 4 037 198 kilogramos diarios de basura que son recolectados en el estado (INEGI, 2014). El crecimiento de la población así como el desarrollo industrial, la urbanización y otros procesos y efectos del desarrollo de Nuevo León, vienen produciendo un incremento considerable en la cantidad y variedad de los residuos sólidos generados en las actividades desarrolladas por la población de todos los municipios del Estado.

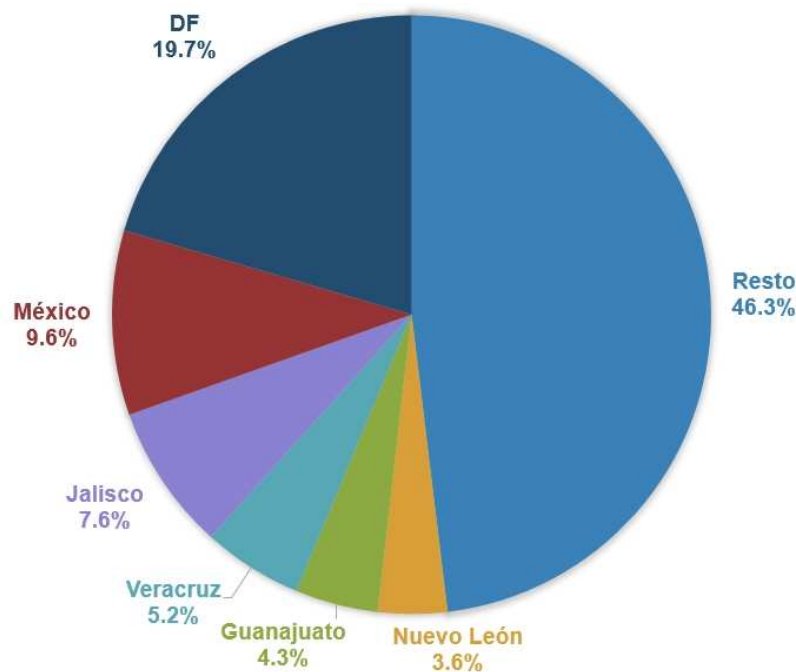


Figura 2.6: Generación total de residuos sólidos

Fuente: INEGI (2015a)

En general, tenemos que la generación de residuos sólidos ha alcanzado niveles alarmantes, por una parte el crecimiento de la población conlleva a un aumento en la producción de residuos y por otra parte la producción de residuos per cápita ha crecido, debido a esquemas y patrones de vida que asocian erróneamente conceptos como calidad de vida y desarrollo con mayor consumo y un incremento de generación

de residuos, lo que provoca un aumento de la contaminación, el agotamiento de los recursos naturales, etc., entre la interminable lista de factores (Fernandez Colomina, 2005). Es importante mencionar que el dato de la generación total de residuos sólidos urbanos es una variable relevante en la medida que permite determinar las políticas públicas en la materia para llevar a cabo una adecuada gestión de residuos sólidos mediante uso de diferentes herramientas que permitan reducir esas cantidades.

Según la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2012), define a los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) como «aquellos residuos que son generados en las casas, como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas, además, aquellos generados en sectores comerciales, industriales, institucionales y de mercados; son también los que resultan de la limpieza de las vías o lugares públicos y que tienen características como los domiciliarios. Su manejo y control es competencia de las autoridades municipales y delegacionales». Es importante recalcar que los residuos se generan en todas las etapas de las actividades humanas, durante la extracción y procesamiento de materias primas, así como el consumo de productos intermediarios y/o finales.

De acuerdo con la SEMARNAT (2014), la composición de los residuos depende, entre otros factores, de los patrones de consumo de la población: por lo general, países con menores ingresos producen menos residuos dominan los de composición orgánica, mientras que en los países con mayores ingresos los residuos son mayormente inorgánicos debido al mayor consumo de productos manufacturados. México ilustra la transformación entre ambos tipos de economías: en la década de los 50, el porcentaje de residuos orgánicos en los residuos totales oscilaba entre 65 % y 70 % de su volumen, mientras que para 2012 esta cifra se redujo al 52.4 % . En la figura 2.7 se muestra la composición de los residuos sólidos urbanos en México.

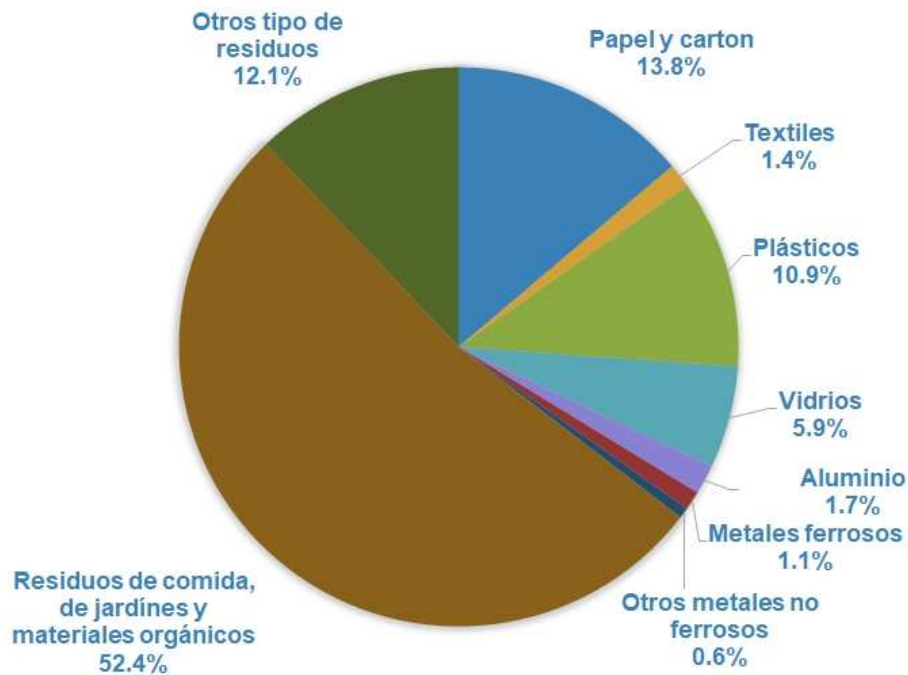


Figura 2.7: Composición de residuos sólidos

Fuente: SEMARNAT (2014)

2.3 GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

La administración del proceso de los residuos sólidos urbanos, conocido como gestión integral de los residuos sólidos urbanos, consta de un intrincado sistema de partes íntimamente relacionadas unas con otras. Se define como la aplicación de técnicas, tecnologías y programas para lograr objetivos y metas óptimas para una localidad en particular (Umaña *et al.*, 2003). Esta definición implica que primero hay que determinar una visión que considere los factores propios de cada localidad para asegurar su sostenibilidad y beneficios. Después, se debe establecer e implementar un programa de manejo para lograr esta visión. Este programa debería optimizar los aspectos técnicos, organizativos y económicos, y optimizar los impactos sociales, en la salud y en el ambiente.

En sus aspectos más simples la gestión de residuos, implica tres grandes etapas: generación, recolección, disposición final, en la figura 2.8 se presenta de manera

específica las etapas de la gestión de los residuos sólidos.



Figura 2.8: Etapas de la gestión de residuos

Fuente: Umaña *et al.* (2003)

La gestión de residuos sólidos, especialmente lo relacionado con la disposición final, es una tarea compleja que se ha convertido en un problema común en las grandes ciudades. Ello se refleja en la falta de limpieza de las áreas públicas, la recuperación de residuos en las calles, el incremento de actividades informales, la descarga de residuos en cursos de agua, etc. (Jaramillo, 2002).

Los riesgos asociados a la gestión negativa de los residuos sólidos en un período largo de tiempo según Fernández Colomina (2005) son:

- El deterioro de la salud de la población, causado por el contacto directo con los residuos o por el contacto indirecto a través de moscas, mosquitos, cucarachas, ratas, etc.
- La degradación del ambiente sobre todo del aire debido a la generación de gases generados en el proceso de descomposición de los residuos.
- La contaminación del suelo provoca la alteración de la superficie terrestre con sustancias químicas, poniendo en peligro los ecosistemas.

- La contaminación provocada por residuos puede afectar la imagen visual de la naturaleza.

Además de las consecuencias mencionadas anteriormente la generación de residuos sólidos se agrava debido a la crisis económica y a la debilidad institucional que obligan a reducir el gasto público y a mantener tarifas bajas, en la figura 2.9 se observa como esta situación puede crear un círculo vicioso de un mal servicio (Umaña *et al.*, 2003). Adicionalmente, la poca educación sanitaria y la escasa participación ciudadana generan una gran resistencia al momento de pagar los costos que implican el manejo y la disposición de residuos lo que constituye otra de las causas que agravan el problema.

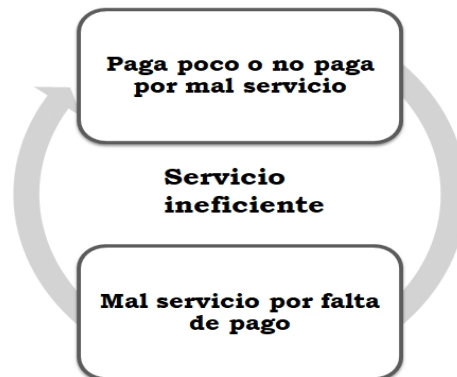


Figura 2.9: Círculo vicioso del servicio ineficiente

Fuente: Umaña *et al.* (2003)

La recolección es un servicio fundamental para el manejo de los residuos sólidos, por lo que es necesario establecer una atención especial que involucre la planeación y operación de este servicio, debido a que es la etapa más importante en términos de costos dentro de la gestión de residuos, por lo cual es fundamental determinar una serie de lineamientos que permitan prestar el servicio de una manera eficiente, minimizando los costos operativos. Cabe mencionar que la recolección de residuos es una etapa que puede optimizar sus operaciones, como se verá más adelante, dado que se puede realizar el mismo trabajo de maneras muy diferentes.

En este sentido, se manifiesta la necesidad de buscar soluciones adecuadas

para su manejo y control de la recolección de residuos. Una solución es el diseño de territorios en la recolección de residuos, pero también es importante destacar que los municipios y los demás organismos afronten racionalmente la gestión de los residuos sólidos, teniendo en cuenta, entre otras consideraciones: el nivel de educación ambiental de la comunidad y su capacidad de pago del servicio de aseo urbano; las implicaciones que acarrea la mezcla de residuos; el valor económico de algunos de estos; la complementariedad de los sistemas de tratamiento y disposición final; y el costo inherente a los procesos que suponen su recolección, transporte, tratamiento y eliminación.

La gestión de residuos sólidos no solamente incluye el tratamiento, reciclaje y disposición adecuada, considera la responsabilidad y compromiso de la población para reducir dichos residuos además de la implementación de tecnologías y procesos basados en la sostenibilidad.

2.4 MÉTODOS ACTUALES DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

Es importante conocer los métodos actuales que se llevan a cabo para la recolección de residuos. Sin embargo, antes vale la pena recalcar que la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 1997) define los métodos de recolección como el conjunto de procedimientos y actividades que se llevan a cabo para recoger o transferir los residuos generados en una fuente particular a un vehículo especialmente diseñado para recibir, compactar en algunos casos, contener y transportar esos residuos.

Existen diferentes clasificaciones de los métodos de recolección según la SEDESOL (1997), por una parte, se pueden clasificar dependiendo del grado de especialización de los vehículos recolectores utilizados en la prestación del servicio, como: mecanizados, semimecanizados y manuales. Los mecanizados y semimecanizados se utilizan en localidades urbanizadas, mientras que los manuales, son más usuales en

zonas de difícil acceso y localidades rurales.

Los métodos de recolección se pueden clasificar según el tipo de demanda por atender, en métodos para demandas de tipo continuo y semicontinuo y para demandas de tipo discreto. En general, se puede decir que un método de recolección está definido por el tipo de demanda exigida y por el grado de tecnificación de los equipos utilizados. En la figura 2.10 se muestra de manera general dicha clasificación.

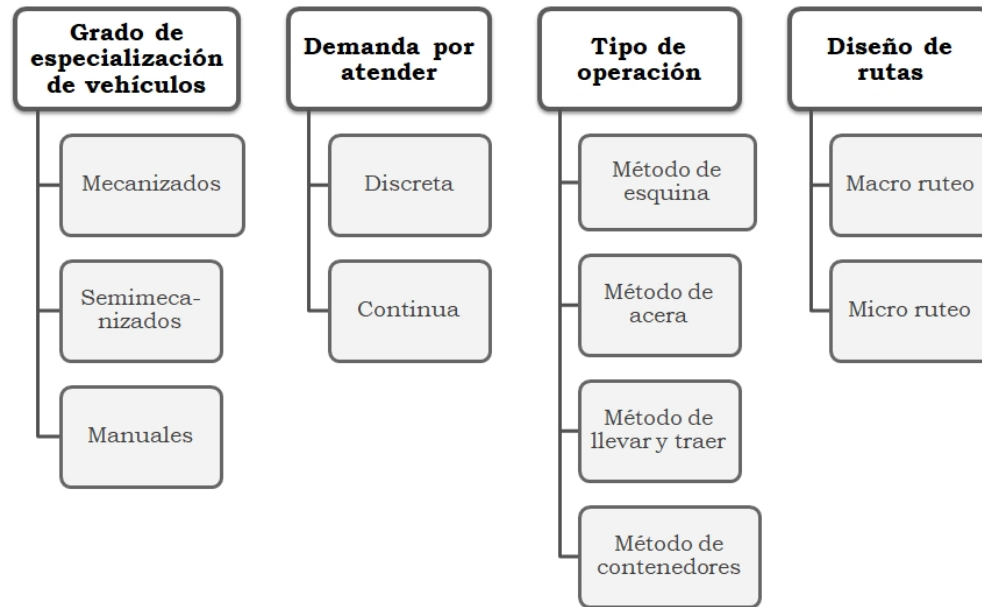


Figura 2.10: Clasificación de los métodos de recolección

A continuación, se describen, tomando en cuenta los criterios anteriores, los métodos de recolección a escala nacional:

a) Método de esquina o de paradas fijas: Consiste en diseñar rutas de recorrido para cada vehículo recolector, donde se les señala a los usuarios en qué lugar se realizarán las paradas, para que en estos puntos acudan a entregar sus residuos y éstos sean descargados en el interior del vehículo, ver figura 2.11.

b) Método de recolección de acera: En este método, el usuario debe sacar su recipiente al borde de la banqueta cuando oye la campana que toca uno de los operadores del vehículo de recolección. Posteriormente el vehículo pasa haciendo parada en cada lugar donde haya recipientes o bolsas con basura, su recorrido es



Figura 2.11: Método de esquina o de paradas fijas

lento, para que el personal de recolección tenga tiempo de recoger el recipiente, descargar su contenido a la caja del vehículo y lo devuelva al lugar de donde lo tomó, en la figura 2.12 se observa gráficamente el método.



Figura 2.12: Método de recolección de acera.

c) Intradomiciliario o de llevar y traer: En este método los usuarios colocan sus recipientes o contenedores en un área dentro de la fuente de generación, que sea accesible a los trabajadores, quienes se introducen para conducir y vaciar los recipientes en el vehículo recolector, devolviendo los vacíos al sitio original, observar figura 2.13.

d) Método de recolección de contenedores: Este es utilizado en los centros de mayor generación de desechos, como son los edificios multifamiliares, mercados, escuelas y zonas de gran densidad de población o zonas inaccesibles. Este método consiste en instalar cajas metálicas de gran capacidad volumétrica en los patios o estacionamientos de dichos centros de generación, a fin de que los habitantes depositen

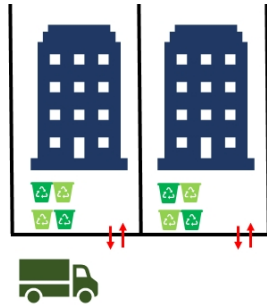


Figura 2.13: Método intradomiciliario o de llevar y traer.

en ellos sus desperdicios (ver figura 2.14).

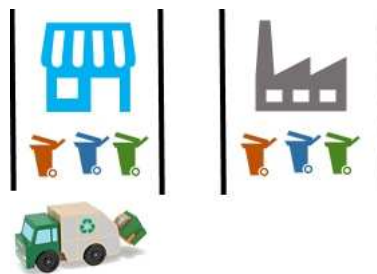


Figura 2.14: Método de recolección de contenedores.

Es importante mencionar, que al seleccionar un método de recolección se debe considerar las características particulares de la localidad, los hábitos de la población, los costos asociados entre otros aspectos; posteriormente se determinará el diseño de las rutas de recolección de residuos.

2.5 DISEÑO DE RUTAS DE RECOLECCIÓN

Según Gutiérrez Galicia (2008), regularmente los sistemas de recolección en México carecen de rutas de recolección y en los casos en los cuales se tiene, en su mayoría estas se realizan en función de la experiencia de los encargados de los sistemas de recolección y los conocimientos de la zona que tengan los operadores de los vehículos.

Para el diseño de las rutas, la SEDESOL (1997) realiza dos clasificaciones:

macroruteo y microruteo. El macroruteo es la asignación de vehículos recolectores a diversas áreas de la ciudad para realizar la recolección, y el microruteo es el recorrido específico que deben cumplir diariamente los vehículos de recolección en las áreas de la población donde han sido asignados.

En la literatura revisada para el diseño de microrutas, se encontró que se ha descrito y desarrollado diversos algoritmos asociados a la localización y diseño de rutas mediante modelos deterministas, tales como: *Vehicle Routing Problem* (VRP) y *Travel Salesman Problem* (TSP), algunas aplicaciones de estos, cuyo objetivo es optimizar los recorridos para la recolección de residuos de los mismos pueden verse en los trabajos de Simón *et al.* (2012), Bing *et al.* (2014) y Ayala Rodríguez y Gonzáles Butrón (2001). Así mismo Pérez Arriaga *et al.* (2007) presentan una descripción de los diferentes métodos aplicados para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos, como por ejemplo heurísticas y metaheurísticas.

Profundizando en los trabajos mencionados anteriormente tenemos que Simón *et al.* (2012) diseñaron e implementaron un método aproximado para la resolución del problema de ruteo de vehículos con restricción de capacidad para la recolección de residuos infecciosos en una ciudad de Argentina.

Ayala Rodríguez y Gonzáles Butrón (2001) presentan la optimización de un sistema de recolección en la acera para los sectores urbanos, es un problema combinatorio en el que se atraviesan todos los arcos de una red mixta, sujetos a la capacidad del vehículo y restricciones de tiempo. En este trabajo se propone una formulación flexible que funciona con medios de recolección y transporte separados también se propone un esquema de secuenciación para asignar rutas.

Por otra parte Bing *et al.* (2014) comparan las opciones de recolección de residuos plásticos que utilizan la eco-eficiencia como indicador de referencia. El problema de recolección se modela como un problema de rutas para vehículos y se utiliza una heurística para mejorar las rutas.

Existe un gran número de trabajos que destacan en el diseño de microrutas en

donde dependiendo del ámbito de aplicación y los factores considerados se realiza dicho diseño. Es importante recalcar que las herramientas más utilizadas para el diseño de rutas son los modelos matemáticos, dado que permiten una mayor descripción y comprensión de los hechos y factores del sistema de recolección. Además de esto, son de gran utilidad para la toma de decisiones de los encargados del servicio de recolección, puesto que les proporciona información valiosa de una manera organizada, permitiéndole ver hechos que no serían observables de otra manera.

Para complementar los modelos matemáticos en el diseño de rutas, diferentes autores proponen algunas herramientas computacionales y los SIG como es en el caso de Araiza Aguilar y José Zambrano (2015), Marí Pastor (2013) y Cerrón (1998); estos trabajos concuerdan en que con el uso de estas herramientas se minimizan los tiempos de cálculo y a la vez se evita el sesgo que el ser humano introduce al moldear las rutas a su conveniencia. Por ejemplo en el trabajo de Cerrón (1998) se propone un programa de Visual Basic para Excel denominado Mars V.13 dicho programa permite encontrar la solución a problemas complejos de rutas de recolección de residuos sólidos.

Por otra parte, en el diseño de las macrorutas, Márquez Pérez (2008) menciona algunos aspectos a considerar para el diseño de las rutas entre ellos formar territorios lo más homogéneos posibles en cuanto a sus características de generación de residuos y cuyos límites estén delimitados por accidentes geográficos o por instalaciones urbanas otro aspecto a considerar es la compacidad de los territorios con el propósito de que, en cada territorio determinado, se realice un recorrido específico con el vehículo, que cubra la mayor cantidad de domicilios con la mayor eficiencia en carga.

Es importante mencionar que no existe algoritmo o programa para macrorutear, el diseñador de las macrorutas, contando con los elementos descritos, dividirá la ciudad en n áreas iguales, de tal forma que cada una de esas áreas genere aproximadamente la cantidad de residuos sólidos que llene un camión durante su recorrido (SEDESOL, 1997). De este panorama surge la propuesta de investigación, diseño de

territorios para la recolección de residuos sólidos en áreas municipales.

Es elemental destacar que existen diferentes factores que se deben tomar en cuenta para el diseño de las rutas de recolección, tanto para el macro y microruteo, son los siguientes criterios: el tipo de fuentes generadoras por atender, la cantidad de residuos por recolectar, la topografía de la zona, la traza urbana del área por recolectar, las vialidades existentes y el sentido del tránsito, el tipo de vehículos con que se cuente, el nivel socioeconómico de la zona, la densidad de población, la frecuencia de recolección, la distancia entre paradas y estaciones, la distancia al sitio de transferencia o disposición final, el tráfico en la ruta y condiciones de los caminos. En particular para esta investigación los factores tomados en cuenta para realizar el macroruteo son: la cantidad de residuos, la frecuencia de limpieza, el tipo de vehículos con que se cuente y las distancias entre cada una de las áreas municipales considerando el sentido de las calles.

Algo significativo para destacar en este apartado es que los factores y criterios mencionados anteriormente están estrechamente relacionados con el diseño de territorios para la recolección de residuos, por lo tanto, se hará una combinación de dichos factores y criterios con el objetivo de obtener un diseño óptimo para la limpieza y recolección de residuos.

En resumen, los métodos mencionados anteriormente son métodos generales de recolección de residuos domiciliarios, no obstante, en el caso de la recolección de residuos en áreas municipales los sistemas se realizan en base a conocimientos empíricos empleados todavía hoy en día en algunas ciudades, consisten en depositar los restos bajo los árboles de forma más o menos amontonada para su posterior recogida mediante un equipo de trabajo compuesto por varios operarios y un camión con caja abierta.

Del mismo modo, pero para evitar acumulaciones de residuos en la vía pública, se coordina la labor de poda con la de recolección, para lo cual se dota al equipo de poda con un vehículo de caja abierta donde unos operarios cargan de forma manual

las ramas, hojas y troncos desprendidos.

Entre los servicios de residuos sólidos, es importante no olvidar que, el de mayor costo es el de recolección. Por ello, de manera implícita la optimización en los sistemas de recolección permitirá a corto plazo reducir costos y mejorar la calidad y cobertura del servicio.

Es relevante mencionar que independientemente de la herramienta que se ofrezca para mejorar los servicios de recolección de residuos es necesario fomentar y mejorar otros aspectos como son: la capacitación al personal municipal, impulso de una cultura ambiental a la población, participación de la comunidad en la formulación de proyectos, entre otros.

Debido a que no existe un algoritmo o programa para realizar el macroruteo, se propone el diseño territorial como herramienta de optimización para la recolección de residuos sólidos en áreas municipales, en el siguiente capítulo se revisan todos los conceptos relacionados con este modelo matemático.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE TERRITORIOS

En este capítulo se incluye las ventajas y desventajas de la modelación matemática así como la contextualización y conceptos relacionados con el problema de diseño de territorios. Se realiza una revisión de los aspectos más relevantes de diseño de territorios, como la definición y las aplicaciones. También se muestra una revisión de los modelos generales de diseño de territorios en particular, se pondrá énfasis en los criterios más relevantes mencionados en la literatura. Por último, se hará una revisión a las técnicas de resolución de problemas de este tipo.

3.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA

El uso de modelos matemáticos para la representación de un problema es comúnmente empleado en la investigación de operaciones ya que provee muchas ventajas, a continuación se mencionan algunas:

- Permite obtener un mejor conocimiento del problema.
- Proporciona una descripción concisa del problema lo cual hace más comprensible la estructura del mismo.
- A partir del modelo se suele ver con claridad los datos que son importantes

para el problema.

- Para las instancias pequeñas es posible en muchos casos resolverlos con el uso de paquetes computacionales. Ésto permite obtener una idea del comportamiento del problema en este tipo de instancias.

Por otro lado, existen también algunas desventajas que deben mencionarse, como por ejemplo, se tiene que un modelo es por definición una idealización abstracta del problema, es decir, que el modelo es una simplificación del problema real implicando ciertas suposiciones que deben justificarse. Por lo tanto, se debe tener cuidado que el modelo sea una representación lo más apegada posible al problema real.

Es primordial destacar en este apartado que la modelación matemática se relaciona íntimamente con los problemas que trata de resolver la logística urbana. A continuación, se presenta la clasificación de las problemáticas que aborda la logística urbana y las herramienta matemáticas que se utilizan para solucionar dichos problemas propuestas por Robusté *et al.* (2000).

- Localización: Considera situaciones tanto de emergencia como aquellas que no son. En el primer caso algunos ejemplos son: la localización de estaciones de policías, bomberos y ambulancias también incluye localización de plantas de consolidación y clasificación de residuos, para estos problemas el modelo de optimización utilizado es el problema del p -centro. En el segundo caso destaca la localización de plataformas logísticas, terminales de transporte, oficinas postales y de administración, equipamientos sociales y contenedores de residuos, el problema de la p -mediana es el modelo utilizado para resolver estas cuestiones.
- Ruteo: Existen dos categorías, la primera es cobertura de arcos, las problemáticas que resuelve son: limpieza y riego de calles, recolección de residuos a domicilio, lectura de parquímetros y servicios de gas, agua, teléfono y electricidad, el planteamiento matemático utilizado es el problema del cartero chino. La

segunda categoría es cobertura de nodos, para los cuales se emplea el TSP y el VRP como planteamientos matemáticos utilizados, las problemáticas que plantea son líneas de transporte público, recolección de contenedores de basura, distribución de mercancías, inspección y recolección de monedas en teléfonos públicos y máquinas expendedoras de productos, distribución de mercancías, envíos a domicilio, paquetería y finalmente rutas de policías, bomberos, ambulancias y protección civil.

- **Previsión:** Considera la generación de residuos, generación de viajes, mantenimiento de redes de suministros y operaciones salida y retorno. Hace uso de *forecasting-p* para solucionar los problemas mencionados.
- **Priorización de actualizaciones:** Aborda como problemática el mantenimiento de pavimentado de calles y propone el uso de problemas de asignación y análisis multicriterio para encontrar una solución.
- **Benchmarking de calidad:** Considera la frecuencia y nivel de servicio del transporte público y accesibilidad universal.

En general, la logística urbana propone herramientas de optimización para que los servicios y operaciones urbanos disminuyan ineficiencias y además para mejorar la utilización de los recursos, teniendo como objetivo el beneficio social de la colectividad.

Es importante resaltar que para el diseño de las macrorutas con la revisión de literatura llevada a cabo anteriormente, se determinó que no existe algoritmo o programa definido para macrorutear, por lo tanto, se propone realizar un diseño territorial para la limpieza y recolección de residuos sólidos en parques.

3.2 ANTECEDENTES DE DISEÑO DE TERRITORIOS

La división del territorio en diferentes regiones o zonas es un problema que está presente en diversas disciplinas relacionadas con ciencias de la tierra y del espacio y que ha sido tratado bajo diversas denominaciones tales como partición, regionalización, zonificación, delineación de zonas y/o distritos, asignación de unidades espaciales, etc.

Entre las herramientas utilizadas en el particionamiento territorial, destacan los modelos de localización-asignación (*location-allocation*) y los de particionamiento de conjuntos (*set partitioning*), que agrupan pequeñas áreas geográficas llamadas unidades básicas en un número dado de grupos geográficos más grandes, denominados territorios. El problema de particionamiento territorial se modela como un problema de la p -mediana (Díaz *et al.*, 2012).

En el trabajo de Kalcsics *et al.* (2009), el diseño de territorios se define como el problema de agrupación de pequeñas áreas geográficas en áreas más grandes llamadas territorios las cuales cumplen determinados criterios. Dependiendo del contexto, estos criterios pueden ser por motivos económicos relacionados al promedio de ventas potenciales, trabajo o número de vendedores, o tener un contexto demográfico, por ejemplo, número de habitantes, población electoral. No obstante, el objetivo fundamental consiste en crear territorios preferentemente balanceados, es decir de tamaño similar a uno o varios de estos criterios. En el caso de las restricciones espaciales existe un conjunto básico de condiciones presentes en la mayoría de las aplicaciones que fuerzan la creación de territorios contiguos, conexos y lo más compactos posibles.

El diseño territorial ha sido ampliamente investigado desde 1960, mencionan Moreno Regidor y Garcia Lopez de Lacalle (2011) en su trabajo, por lo que han aparecido varios modelos o formalizaciones matemáticas para este problema. Para la definición de las zonas se establecen una serie de condiciones espaciales y temáticas, que pueden variar considerablemente de un campo de aplicación a otro, especial-

mente las condiciones dependientes del contexto. Por el contrario, existe un conjunto básico de restricciones espaciales presente en la mayoría de ellas, tales como: integridad, conectividad y compacidad. De hecho, puede afirmarse que la propiedad de conectividad es el criterio espacial prioritario en los problemas de zonificación, por lo que resulta imprescindible la codificación explícita de las relaciones topológicas entre las unidades básicas.

Por otra parte, Kalcsics *et al.* (2009) afirman que en el área de investigación de operaciones el primer trabajo sobre el problema de diseño de territorios se remonta a Forrest y Garfinkel, (1964). Su trabajo más reciente es un amplio estudio sobre los enfoques de diseño territorio donde se presenta la técnica y el enfoque con el tema.

3.3 APLICACIONES DE LOS PROBLEMAS DE DISEÑO TERRITORIO

Según Moreno Regidor y Garcia Lopez de Lacalle (2011), los problemas de diseño territorios están motivados por muy diferentes aplicaciones que van desde distritación política hasta el diseño de los territorios para la asignación de servicios socio-económicos como servicios escolares, la recolección de residuos, los servicios de emergencia, de ventas de productos, etc. Sin embargo, las dos aplicaciones principales son distritación política y el diseño de territorios de ventas. A continuación se citan los campos de aplicación más relevante y los autores que han desarrollado sus investigaciones en ellos. Dicha clasificación de aplicaciones es propuesta por Moreno Regidor y Garcia Lopez de Lacalle (2011).

- Distritos político-electorales: Este problema radica en la partición de un área administrativa (ciudad o comunidad), en subáreas (distritos) cuya función consiste en seleccionar a los candidatos políticos que han de ser sus representantes. El objetivo del diseño de estos territorios es garantizar la democracia mediante

la aplicación de condiciones de equilibrio poblacional, conectividad y compacidad geométrica. En este ámbito destacan las investigaciones llevadas a cabo por Rincón García y Gutiérrez Andrade (2008) y Benabdallah y Wright (1992). En este último trabajo mencionado el autor utiliza como metodología el uso de una nueva medida de compacidad geométrica, que mide la calidad de las zonas electorales construidas mediante una malla formada con celdas cuadradas. Esta medida evita la formación de zonas alargadas y retorcidas y su eficiencia no se encontró limitada, ni fue limitante para lograr un buen equilibrio poblacional. Dicho trabajo fue aplicado en la dirección de cartografía del IFE y el autor propone aplicar este método en toda la República Mexicana.

- Diseño de territorios de ventas y prestación de servicios: Este problema es habitual a todas las empresas que gestionan fuerzas de venta y requieren dividir su área comercial en regiones o zonas de responsabilidad. En este ámbito destacan los trabajos llevadas a cabo por Zoltners y Sinha (1983) y Rios-Mercado y Pérez (2014). En la investigación realizada por Rios-Mercado y Pérez (2014), presenta un diseño y planificación de los territorios de venta y atención comercial de la red de distribución de bebidas embotelladas de la Embotelladoras ARCA con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de las fuerzas de ventas de la empresa. El problema se modela como un problema de programación entera mixta lineal (modelo de asignación) y presenta resultados favorables en métricas sobre eficiencia computacional y conveniencia económica.
- Diseño de territorios de los servicios y equipamientos ubicados en una localización fija: Este problema consiste en la asignación de recursos (escuelas, hospitales, etc.) a la población para la prestación de un servicio. En la delimitación de zonas escolares destacan los trabajos de Armstrong y Honey (1993). Este artículo describe un sistema espacial de soporte de decisiones (SDSS) que permite al administrador de una escuela analizar un problema diseño de territorios para servicios escolares y desarrollar una solución. Este sistema permite aumentar la funcionalidad del *software* de SIG con la proyección de la

población de áreas pequeñas y modelación de problemas de localización.

- Diseño de territorios para la prestación de servicios a domicilio: Muchas instituciones públicas prestan sus servicios de forma distribuida en un determinado ámbito geográfico. Tal es el caso de los servicios de recogida de basura, limpieza de calles, asignación de ambulancias o de unidades de policía, bomberos, etc. En este ámbito de aplicación destaca la investigación realizada por Muyldermans *et al.* (2002), en la planificación de las operaciones de reparto de sal en las carreteras.
- Diseño de territorios de recursos energéticos: El problema consiste en la distribución de la energía eléctrica, se busca la partición física de la red, para generar zonas de distribución económicamente viables desde el punto de vista de las compañías eléctricas. En este ámbito destacan los trabajos llevadas a cabo por Tiede y Strobl (2006).
- Diseño de territorios para la asignación/adquisición de usos del suelo: El objetivo principal de las aplicaciones destinadas a la planificación de usos del suelo es la selección de conjuntos de parcelas u otras unidades del terreno para implantar un determinado uso, de forma que se consiga un aprovechamiento sostenible y eficiente de los recursos y actividades productivas, se mejore la protección medioambiental y se facilite la igualdad social de servicio de emergencia.

Podemos observar que los problemas de diseño de territorios emergen de diversos tipos de aplicación del mundo real siendo el diseño de territorios para la recolección de residuos la aplicación de interés en el presente trabajo.

Como se mencionaba en un inicio, los aspectos económicos o también demográficos deben tomarse en consideración para el diseño y planificación de territorios equilibrados que luego se traducen en aspectos de eficiencia económica y nivel de servicio. Como ejemplo de lo anterior, si suponemos que cada uno de los

territorios obtenidos en un plan óptimo es administrado por un solo recurso tiene sentido entonces la aplicación de criterios de balanceo para la cantidad de camiones recolectores, el volumen de residuos, los recorridos en tránsito y tiempos recolección. También es importante considerar ciertas restricciones físicas como parte de la definición geográfica del problema. Nos referimos a las características de contigüidad y de compacidad que deben tener los territorios obtenidos como resultado del diseño óptimo.

En resumen, tenemos que los problemas de diseño de territorios surgen de diversos tipos de aplicación del mundo, sin embargo, consideran criterios similares y en la literatura se ha encontrado un modelo básico que considera dichas características.

3.4 UN MODELO BÁSICO DE DISEÑO DE TERRITORIO

Desde principios de los años sesenta, muchos autores han investigado problemas de diseño de territorios. Kalcsics *et al.* (2009) dan una amplia visión de un conjunto de criterios y objetivos encontrados en la literatura. A pesar de la amplia gama de aplicaciones, que presentan los autores, Zoltners y Sinha (1983), Rios-Mercado y Pérez (2014), Benabdallah y Wright (1992), Rincón García y Gutiérrez Andrade (2008), Armstrong y Honey (1993), Muyldermans *et al.* (2002), Tiede y Strobl (2006), la mayoría de ellos tienen las mismas premisas básicas, obtener territorios compactos, contiguos, y equilibrados, siendo estos criterios el núcleo de un modelo genérico.

Un modelo básico o genérico presenta varias ventajas, a menudo, tal modelo ya proporciona una aproximación suficiente del problema en cuestión. Además, este modelo genérico puede servir como punto de partida para los modelos más complejos tomando criterios de planificación adicionales en cuenta, por lo que es aplicable a una gama mucho más amplia de problemas. Modelar los aspectos más comunes del problema de diseño territorio permite una amplia aplicabilidad de los algoritmos. A continuación, se presentan los componentes del modelo básico que se definen en el

trabajo de Kalcsics *et al.* (2009), que básicamente coinciden con todos los trabajos relacionados con las aplicaciones de diseño de territorial.

- Áreas básicas: Un problema de diseño territorio abarca un conjunto V de áreas básicas, a veces también llamadas unidades de cobertura de ventas. Estas áreas básicas son objetos geográficos en el plano: puntos (por ejemplo, direcciones de geo-codificados), líneas (por ejemplo, la calle secciones) o áreas geográficas (por ejemplo, áreas de código postal, condados, zonas comerciales de empresa predefinidos). En el último caso, las áreas geográficas generalmente se dan como polígonos. En la figura 3.1 cada número representa un área básica.

La definición del problema incluye atributos cuantificables para cada área básica. Estos atributos cuantificables se nombran como medidas de actividad, por ejemplo, potencial de ventas, número de habitantes, cantidad de clientes, demanda del servicio, tiempo de trabajo, etc. En la mayoría de los casos se utiliza un único atributo que sirve para calcular el tamaño de las zonas.

- Centros de territorios: En general, un centro se asocia a cada territorio. Esto puede ser cierto sitio específico, por ejemplo, una residencia o una oficina, o simplemente el centro geográfico de la territorio. En general, el centro es idéntico con el centro de una de las áreas básicas que comprende el territorio. En el modelo de estos centros puede o bien ser predeterminado y fijo o sujeto a la planificación.
- Número de territorios: El diseño territorial debe contar con un número fijo de territorios previamente establecido. En la figura 3.1 los diferentes colores representan los territorios formados.
- Asignación única de áreas básicas (integridad espacial): Cada unidad básica se debe asignar únicamente a un solo territorio. Esto quiere decir que los territorios definen conjuntos distintos de unidades básicas.
- Homogeneidad (balance o equilibrio): Es de suma importancia que los territorios estén balanceados con respecto a cada medida de actividad. Lo anterior

representa que, para cada territorio, los tamaños de las medidas de actividad estén dentro de un rango establecido. Por la presente la medida de la actividad (o tamaño) de un territorio es la medida total de la actividad del contenido de áreas básicas.

- La contigüidad (conectividad): Cada territorio debe ser contiguo. Esto implica que para cada par de unidades básicas pertenecientes al territorio existe una ruta que las comunique, compuesta exclusivamente por unidades básicas colindantes entre sí y pertenecientes al mismo territorio. Con el fin de obtener los distritos contiguos, se requiere información explícita del vecindario para las áreas básicas. Aunque existen varios modelos que se basan en un gráfico del vecindario para las áreas básicas. Se puede observar en la figura 3.1 que en los territorios formados de color morado y verde no cumplen con el criterio de contigüidad, puesto que existen áreas básicas que no están dentro de sus respectivos territorios
- Compacidad: Los territorios deben ser geográficamente compactos. Esto significa que la distancia entre las unidades básicas dentro de un mismo territorio es pequeña. La figura 3.1 muestra que se cumple el criterio de compacidad dado que se muestran figuras geométricas más o menos regulares de los territorios.

De manera general el objetivo puede informamente describirse como sigue: particionar el conjunto V de áreas básicas en un número p de los territorios que satisfacen los criterios de planificación especificadas como el equilibrio, la compacidad y contigüidad.

Según Kalcsics *et al.* (2009), los primeros en modelar el problema del diseño de territorios políticos como programación lineal entero mixto fue Hess en 1965. Esencialmente el modelo fue un problema de ubicación de instalación capacitada discreta.

Sean V el conjunto de áreas básicas y $V_c \subset V$ el conjunto de p centros territoriales. Para $v \in V$ e $i \in V_c$ y d_{iv} es la distancia de i a v . El tamaño promedio del



Figura 3.1: Criterios del diseño de territorios

Fuente: Bucarey, 2014

territorio es $\mu = \sum_{v \in V} w_v/p$. Sea $\tau > 0$ un valor de tolerancia para la desviación de los tamaños reales de los territorios de μ . La variable binaria de decisión se define como $x_{iv} = 1$ si el área básica v es asignada al centro i , y $x_{iv} = 0$ de otro modo.

$$\text{mín} \sum_{v \in V} \sum_{i \in V_c} w_v d_{iv} x_{iv} \tag{3.1}$$

$$\sum_{i \in V_c} x_{iv} = 1 \quad \forall v \in V \tag{3.2}$$

$$(1 - \tau)\mu \leq \sum_{v \in V} w_v x_{iv} \leq (1 + \tau)\mu \quad \forall i \in V_c \tag{3.3}$$

$$x_{iv} \in \{0, 1\} \quad \forall v \in V, i \in V_c \tag{3.4}$$

La función objetivo 3.1 minimiza la distancia total, ponderada con la medida de la actividad, de las áreas básicas a los respectivos centros territoriales. El modelo tiende a producir territorios compactos y también geográficamente conectado. La restricción 3.2 asegura que cada área básica es asignada a exactamente un centro de territorio. En la restricción 3.3 se garantiza que el tamaño de cada uno de los territorios este dentro de la tolerancia predefinida.

El resultado del modelo depende en gran medida del parámetro τ . Cuanto menor sea la tolerancia τ es mejor el equilibrio de los territorios obtenidos. Desafortunadamente, si τ es demasiado pequeña los territorios no son compactos ni conexos. La complejidad del problema y por lo tanto el tiempo de resolverlo generalmente aumenta cuanto menor es τ . Por otro lado, cuanto mayor sea la tolerancia, peor será el equilibrio de los territorios.

La forma de Hess para superar este problema establece la tolerancia a $\tau = 0$ y relaja la restricción de la integralidad de las variables de asignación $x_{vi} : x_{iv} \in [0, 1]$, entonces x_{vi} es la fracción del área básica v asignado al centro del territorio i . Este problema relajado es básicamente un problema clásico de transporte (Kalcsics *et al.*, 2009).

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{i \in V_c} w_v d_{iv} x_{iv} \quad (3.5)$$

$$\sum_{i \in V_c} x_{iv} = 1 \quad \forall v \in V \quad (3.6)$$

$$\sum_{v \in V} w_v x_{iv} = \mu \quad \forall i \in V_c \quad (3.7)$$

$$x_{iv} \geq 0 \quad \forall v \in V, i \in V_c \quad (3.8)$$

El problema de transporte se puede resolver de manera eficiente utilizando algoritmos de redes especializadas. En la solución óptima de transporte los territorios son perfectamente equilibrado.

Tanto el modelo básico y el clásico de transporte presentados por Kalcsics *et al.* (2009) son un apoyo para el problema abordado en la investigación. El presente trabajo se desarrolla para el diseño y planificación de los territorios para la limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales, para ello se realiza una adaptación del modelo básico considerando las características específicas del problema.

3.5 MÉTODOS DE SOLUCIÓN

El problema del diseño de territorios puede formalizarse con diferentes modelos matemáticos en los que se han utilizado diversas técnicas de optimización, con el objetivo de buscar la mejor o, simplemente, una zonificación satisfactoria de entre todas las soluciones posibles. En cualquiera de los modelos definidos, se plantea la búsqueda de las soluciones que minimicen o maximicen una determinada función objetivo y cumplan algunas restricciones. Las restricciones determinan el conjunto de soluciones o alternativas factibles, y se usan para eliminar los candidatos cuyas características no verifican las condiciones impuestas.

La complejidad de los problemas de diseño de zonas requiere algoritmos específicos para los diferentes casos, por lo que resulta muy difícil definir e implementar funciones genéricas que proporcionen una solución de carácter universal (Bucarey López, 2014).

Las técnicas de optimización que se han usado, exactas o heurísticas, permiten la búsqueda, ya sea de las soluciones óptimas o bien de las casi-óptimas respectivamente. Las aproximaciones exactas al problema de diseño de territorios nacen de manera natural al establecerse como un problema de programación lineal entera. Por otro lado, en los métodos heurísticos este problema en general es difícil de resolver en términos computacionales para instancias grandes ya sea por la cantidad de memoria necesaria requerida para resolverlos, o porque encontrar la solución óptima dentro del conjunto de soluciones factibles demanda tiempo elevado (Moreno Regidor y Garcia Lopez de Lacalle, 2011).

Es importante destacar que en el problema del diseño de territorios se dispone de n unidades básicas para generar m regiones o territorios, siendo $m < n$, existen del orden de m^n zonificaciones espaciales sin imponer restricciones de tamaño y conectividad a dichas regiones. Por un lado, aunque el valor de m sea pequeño, el número de soluciones crece exponencialmente a medida que n aumenta. Por otro,

cuando las zonas han de ser conexas, no existe una fórmula general que permita determinar el número total de soluciones (posibles zonificaciones), aunque se mantiene un comportamiento exponencial respecto a n (Moreno Regidor y Garcia Lopez de Lacalle, 2011).

Por lo tanto, dada la situación anterior muchos autores que presentan problemas con una gran cantidad de unidades básicas optan por utilizar métodos heurísticos para encontrar solución al problema de diseño de territorios, por mencionar algunos autores están Ricca y Simeone (2007), Bozkaya *et al.* (2001) y Ríos-Mercado y Fernández (2009).

Resumiendo el problema del diseño de territorios puede formalizarse con diferentes modelos matemáticos en los que se han utilizado diferentes herramientas de solución con el propósito de obtener una zonificación satisfactoria de entre todas las soluciones posibles.

Actualmente el proceso de planificación de diseño territorial para la limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales se define en forma manual y empírica. Lo anterior limita la posibilidad de operar con mejores esquemas que generen reducción de costos y conservación y cuidado de espacios verdes para la población que recurre a dichas áreas municipales. Mediante el uso del diseño de territorios se busca mejorar el servicio de tal forma que la limpieza y recolección se realice de forma óptima y eficiente, en el siguiente capítulo se describe la adaptación del modelo para resolver dicha problemática.

CAPÍTULO 4

DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Este capítulo tiene por objetivo mostrar la descripción detallada del modelo así como presentar la formulación propuesta del problema abordado en esta tesis. Primero se presenta específicamente el problema, los supuestos, las variables, parámetros y las notaciones usadas en el modelo. Después, se formula el modelo que fue adaptado del problema abordado en esta tesis y se explican detalladamente cada una de sus partes. En la parte final del capítulo se presenta un heurístico de solución para el modelo.

En la Zona Metropolitana de Monterrey la recolección de residuos sólidos es una tarea bajo la responsabilidad de los Gobiernos Municipales en turno. Existen ciertas limitaciones para su eficiente desempeño y una de ellas es sin duda la falta de aplicación de métodos de elaboración de diseño de territorios para la recolección óptima, criterios de localización y de la cantidad de basura generada en el municipio o ciudad.

4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema a solucionar, considerando la revisión de la literatura y la inexistencia de un algoritmo o modelo definido para el diseño de macrorutas para la limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales, consiste en la agrupación óptima de los parques de un municipio de la metropoli de Monterrey, de forma que se diseñen territorios que contribuyan a la cobertura del servicio de recolección.

Como consecuencia de este hecho nuestra propuesta consiste en mejorar la planeación del diseño de territorial para el servicio actual de recolección mediante la adaptación de un modelo matemático para la limpieza y recolección de residuos sólidos en las áreas municipales considerando los criterios de integridad espacial, homogeneidad, contiguidad y compacidad.

Es importante mencionar que los objetos que se busca agrupar son los parques del municipio de San Nicolás de los Garza, pero dado su gran cantidad de parques, se ha hecho un primer agrupamiento a fin de reducir la escala del problema y simplificar la solución. Así entonces se aplicó un modelo 1 donde se agrupan los distritos establecidos por el municipio y un modelo 2 para agrupar a los parques, a continuación se describen ambos modelos.

4.2 MODELO 1

Algunos municipios de la Zona Metropolitana de Monterrey, ya cuentan con una zonificación, conocida como distritación, que consiste en áreas que integran y delimitan un centro de población, sus aprovechamientos predominantes y las reservas, usos y destinos, así como la delimitación de las áreas de conservación, mejoramiento y crecimiento del mismo; cabe mencionar que dicha zonificación es distinta a la realizada por el Instituto Nacional Electoral (INE) para los procesos electorales.

El uso de este modelo es para determinar el agrupamiento óptimo de las zonas establecidas por un municipio de la Zona Metropolitana de Monterrey, con el objetivo ya mencionado anteriormente, reducir la escala del problema debido a la gran cantidad total de parques que tiene el municipio.

4.2.1 CONSIDERACIONES Y SUPUESTOS

- Cada área básica (distritos) debe estar asignada a un solo territorio.
- El número de territorio es conocido y está determinado con base a la cantidad de proveedores de servicio con los que cuente el municipio en este caso son considerados 8 proveedores, debido a que actualmente sólo estos 8 proveedores cumplen los requisitos para ser dados de alta como prestadores de servicios autorizados por el municipio.
- La medida de actividad está determinada por la cantidad de metros cuadrados que compone a cada uno de los parques puesto que está directamente relacionada con la cantidad de residuos generados.

4.2.2 NOTACIÓN

Conjuntos

I : Conjunto de áreas básicas (distritos), $i \in I$.

J : Conjunto de centros territoriales, $j \in J$ y $J \subset I$.

Parámetros

p : Número de territorios (cantidad de proveedores autorizados).

w_i : Medida de actividad (cantidad de m^2 a limpiar en el distrito i), $i \in I$.

$\mu = \sum w_i/p$: Promedio del tamaño de los territorios.

a_{ij} : Matriz de adyacencia, donde toma el valor de 1 si los distritos son adyacentes y 0 en caso contrario.

Variables binarias

$$x_j := \begin{cases} 1, & \text{si el distrito } j \text{ es un centro de territorio,} \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

$$y_{ij} := \begin{cases} 1, & \text{si el distrito } i \text{ es asignada al centro de territorio } j, \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Variables continuas

\bar{w}_j : Medida de actividad del territorio j .

$w_{\text{máx}}$: Mayor medida de actividad de los territorios formados.

$w_{\text{mín}}$: Menor medida de actividad de los territorios formados.

Modelo 1

$$\text{mín } w_{\text{máx}} - w_{\text{mín}} \tag{4.1}$$

$$\bar{w}_j = \sum_{i \in I} w_i y_{ij} \quad \forall j \in J \tag{4.2}$$

$$w_{\text{máx}} \geq \bar{w}_j \quad \forall j \in J \tag{4.3}$$

$$w_{\text{mín}} \leq \bar{w}_j + \mu(1 - x_j) \quad \forall j \in J \tag{4.4}$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \tag{4.5}$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{4.6}$$

$$a_{ij} x_j \geq y_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \tag{4.7}$$

$$x_j \leq y_{jj} \quad \forall j \in J \tag{4.8}$$

$$x_j, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J \tag{4.9}$$

$$w_{\text{máx}}, w_{\text{mín}}, \bar{w}_j \in \mathbb{R} \quad \forall j \in J \quad (4.10)$$

La función objetivo 4.1 minimiza la diferencia entre el territorio con mayor medida de actividad y el territorio con menor medida de actividad esto con la idea de formar territorios balanceados y de esta forma la carga de trabajo de cada proveedor de servicio este equilibrada. La restricción 4.2 determina la medida de actividad de cada territorio. La desigualdad 4.3 establece el territorio de mayor medida de actividad mientras que 4.4 el de menor medida de actividad. En la restricción 4.5 se busca que el número de centros ficticios instalados igual al número de territorios, por otra parte, 4.6 obliga a todos los distritos a ser asignados a un único centro. La desigualdad 4.7 asegura la contigüidad entre los distritos. La restricción 4.8 establece que si un distrito es centro de territorio este dentro del territorio. Y, finalmente, en 4.9 y 4.10 se define la naturaleza de las variables.

Debido a la cantidad total de parques que tiene el municipio, el objetivo de este modelo es reducir la complejidad del problema, como se mencionaba en el capítulo 3, el problema de diseño de territorios aumenta su dificultad debido al incremento de unidades básicas y en algunos casos se hace uso de métodos heurísticos, por lo tanto, el realizar una primera agrupación de los parques nos permitirá reducir la complejidad del problema y para ello se utiliza la zonificación establecida por el municipio. A continuación se realiza un análisis de la cantidad de variables y restricciones del modelo.

4.3 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO 1

En el trabajo de Saucedo Martínez (2005), se realiza un análisis de un modelo matemático de programación lineal entera mixta, a continuación para conocer las dimensiones del modelo 1 se realiza un análisis similar considerando las siguientes características.

- Número de variables binarias: $|J|+|I||J|$
- Número de variables continuas: $2+|J|$
- Número de restricciones de desigualdad: $3|J|+|I||J|$
- Número de restricciones igualdad: $|I| +|J|$
- Número total de restricciones: $4 |J| +|I||J| +|I|$

Por ejemplo, si tenemos 24 distritos (áreas básicas) y 24 centros territoriales, entonces, el modelo contará con 600 variables binarias, 26 variables continuas, 48 restricciones de igualdad y 648 restricciones de desigualdad, en total serían 696 restricciones.

4.4 MODELO 2

El uso de este modelo es para determinar el agrupamiento óptimo de los parques de un municipio de la Zona Metropolitana de Monterrey considerando los criterios de planificación y la frecuencia de limpieza y recolección del servicio. El objetivo del modelo 2 consiste en minimizar la distancia total de cada área básica a su respectivo centro. La idea de la función objetivo es obtener figuras lo más compactas posibles en el sentido de distancia.

4.4.1 CONSIDERACIONES Y SUPUESTOS

- Cada área básica (parque) debe estar asignada a un solo territorio.
- El número de territorio es conocido y está determinado con base a la frecuencia de la prestación del servicio de limpieza y recolección en este caso se consideran 4 semanas.

- La medida de actividad está determinada por la cantidad de metros cuadrados que compone a cada uno de los parques puesto que está directamente relacionada con la cantidad de residuos generados.
- La tolerancia relativa respecto a la capacidad se consideró un porcentaje entre un 5% y 10% .
- Las distancias de parque a parque consideran el sentido de las calles.

Los conjuntos considerados en este modelo son iguales al modelo 1, con la diferencia que en este caso las áreas básicas son los parques. Los parámetros también son similares, pero en el modelo 2 se considera d_{ij} como la distancia entre el parque i y el centro de territorio j y se descarta la matriz de adyacencia. Las variables binarias de decisión se definen como $x_j = 1$ si el parque j es un centro y $x_j = 0$ de otro modo, para $y_{ij} = 1$ si el parque i es asignada al centro j y $y_{ij} = 0$ en caso contrario.

Modelo 2

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_{ij} y_{ij} \quad (4.11)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = p \quad (4.12)$$

$$x_j \geq y_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.13)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.14)$$

$$(1 + \tau)x_j \mu \leq \sum_{i \in I} w_j y_{ij} \leq (1 - \tau)x_j \mu \quad \forall j \in J \quad (4.15)$$

$$x_j, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.16)$$

La función objetivo 4.11 minimiza la distancia total de cada área básica a su respectivo centro. La idea de la función objetivo es obtener figuras lo más compactas posibles en el sentido de distancia. En la restricción 4.12 se busca que el número de centros ficticios instalados sea igual al número de territorios, por otra parte, 4.13

prohíbe la asignación de un área básica a un centro no instalado. La ecuación 4.14 obliga a todas las áreas básicas a ser asignadas a un único centro. Las restricción 4.15 se garantiza que la carga de cada territorio este dentro de las capacidades inferiores y superiores establecidas. Y finalmente en 4.16 define la naturaleza de las variables.

4.5 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO 2

De manera similar se realiza el siguiente análisis para el modelo 2.

- Número de variables binarias: $|J| + |I||J|$
- Número de restricciones de desigualdad: $2|J| + |I||J|$
- Número de restricciones igualdad: $2|I|$
- Número total de restricciones: $2|J| + |I||J| + 2|I|$
- Numero de filas (ecuaciones): $1 + 2|J| + |I||J| + 2|I|$

Por ejemplo, si tenemos 45 parques (áreas básicas) y 45 centros territoriales, entonces el modelo contará con 2070 variables binarias, 90 restricciones de igualdad y 2115 restricciones de desigualdad. Las dimensiones que van en aumento conforme agradamos la cardinalidad de los conjuntos

4.6 OTRAS CONSIDERACIONES

En la literatura el cumplimiento todos los criterios de planificación simultáneamente por métodos exactos es difícil, por lo tanto, se ha recurrido a utilizar métodos heurísticos y metaheurísticos. Se presenta esta situación debido principalmente a que entran en conflicto los criterios de balance y contigüidad, son objetivos que están en competencia, ya que la mejora en uno de ellos puede provocar el deterioro del otro.

En este caso, para el modelo 1 los criterios de planificación del diseño de territorios se cumplieron en su totalidad esto debido a la función objetivo que se tiene, sin embargo, en el modelo 2 no se cumplió de criterio de contigüidad y compacidad por lo tanto se utilizó una metodología para establecer este criterio, para poderla aplicar se necesitan los siguientes datos: la matriz de distancias entre los parques, el mapa con resultados obtenidos de GAMS/CPLEX del modelo 2, realizar una matriz de adyacencia de los parques de un territorio y la tabla de resultados de Gams. En la tabla 4.1 se describen los pasos generales del algoritmo propuesto.

Es fundamental recalcar que como consecuencia de los nuevos territorios formados se cumple el criterio de contigüidad y compacidad, sin embargo, se infringe el criterio de balance. Es importante destacar que en la literatura la propiedad de contigüidad es un criterio espacial prioritario, de manera que ambas soluciones serán propuestas para los encargados del servicio haciéndoles saber que ambas propuestas están como apoyo a la toma de decisiones que ellos realizan, la zonificación dada por el modelo 2, mostraría un balance de trabajo mientras que la propuesta por la heurística, muestra desbalance pero contigüidad.

Algoritmo: Reasignación de parques no contiguos

Input: Matriz de adyacencia de los parques en cada territorio formado, donde un elemento toma el valor de 1 si los parques son adyacentes y 0 en caso contrario; matriz de adyacencia de todos los parques de los distritos; matriz de distancias entre cada parque; tabla de resultados del modelo 2 que contenga la medida de actividad de cada territorio.

Output: Parques contiguos.

While Criterio de contigüidad no se cumpla **do**

1. Identificar un territorio que contenga al menos un parque no contiguo.
2. Seleccionar un parque no contiguo del territorio.
3. Buscar los parques adyacentes del parque seleccionado del paso anterior.

4. **for** Parques adyacentes **do**

 Comparación entre distancias de los parques al centro de territorio.

end for

5. Seleccionar el parque con la menor distancia al centro de territorio.
6. Realizar intercambio entre el parque con menor distancia al centro de territorio y el parque no contiguo.

7. Calcular la medida de actividad de los dos territorios formados.

8. Evaluar criterio de contigüidad.

end while

9. **return** Cumplimiento del criterio de contigüidad de los parques y nuevos territorios formados.

Tabla 4.1: Pseudocódigo del método de solución para el criterio de contigüidad.

CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDIO: SAN NICOLÁS DE LOS GARZA

En este capítulo se muestra una breve descripción del municipio en el cual fue aplicado el modelo matemático, también se describen las herramientas utilizadas para la obtención de datos. Posteriormente se muestran las pruebas y experimentaciones llevadas a cabo.

5.1 MUNICIPIO DE SAN NICOLÁS DE LOS GARZA

Actualmente la Zona Metropolitana de Monterrey la conforman nueve municipios del Estado de Nuevo León y constituye la tercera conurbación más poblada de la República Mexicana; acorde con el más reciente conteo y delimitación oficial realizada en el año 2010, en forma conjunta, por INEGI, CONAPO y la Secretaría de Desarrollo Social del Gobierno Federal en ésta habitan un total de 4 080 329 personas en una superficie de 6 680 km² y en materia de desarrollo económico ostenta el segundo lugar a nivel nacional, sólo detrás de la Ciudad de México, capital del País (Gobierno-Municipal, 2013). En este complejo marco metropolitano destaca el municipio de San Nicolás de los Garza, ubicado geográficamente en el Norte de Monterrey, el cual alberga importantes áreas industriales, comerciales y habitacionales,

en las que se observa una constante evolución y transformación física.

La elección de la aplicación del modelo matemático en este municipio se debe principalmente a que San Nicolás juega un papel fundamental dentro del área metropolitana de Nuevo León, se le considera el sexto municipio a nivel nacional en términos del Índice de Desarrollo Humano y el décimo con Índice de ingreso mayor a nivel nacional (López Calva *et al.*, 2002). Por lo tanto, es de suma importancia brindar a su ciudadanía un excelente nivel de calidad de vida, lo cual involucra factores desde salud, vivienda, transporte, educación, riqueza hasta condiciones naturales, de ahí la importancia de que cuente con áreas verdes en buen estado. Por otro lado, considerando las condiciones físicas de San Nicolás geográficamente es un municipio más o menos regular lo cual facilita el diseño de los territorios.

5.2 PROBLEMÁTICAS MUNICIPALES

El municipio de San Nicolás al igual que otros municipios del área metropolitana presenta diversas problemáticas municipales, a continuación se mencionan algunas de ellas (Gobierno-Municipal, 2013).

Crecimiento Urbano: El permanente crecimiento de su actividad industrial genera un crecimiento urbano desordenado por aumento en la densidad poblacional de unas zonas y disminución de la misma en otras, lo que acentuaría el déficit de infraestructura, vialidad, equipamiento y servicios en las primeras y la subutilización de éstos en las segundas.

Industria: No existe una adecuada normatividad ni mecanismos de revisión y análisis que establezcan en forma evidente los principios ecológicos que deben guardar las actividades industriales, en aras de prevenir la contaminación, promover el desarrollo sustentable y sostenido, que minimicen el impacto ambiental.

Vialidad y transporte: El transporte público presenta deficiencias de ca-

pacidad, funcionamiento y conflictos en la prestación del servicio. Además, el escaso equipamiento urbano para brindar adecuada y oportuna solución a conflictos viales, peatonales y de seguridad que pudieran suscitarse en los nodos.

Medio ambiente: El municipio exhibe una disminución gradual en la calidad de vida que ofrece a sus habitantes, dada la contaminación de sus arroyos y parques, tiraderos de basura clandestinos, contaminación ambiental provocada por zonas industriales, transporte público inadecuado, ineficiencia en el abasto de agua potable y la falta de drenaje pluvial.

De las problemáticas anteriores la de interés para desarrollar este proyecto está enfocada en el medio ambiente, específicamente en mejorar la planeación del diseño de rutas de limpieza y recolección de residuos sólidos en áreas municipales.

5.3 RECOPIACIÓN DE DATOS

Las herramientas que se utilizadas para la recopilación de datos son: entrevistas con el encargado de la Secretaría de Servicios Públicos, los SIG, cartografía del municipio y Excel.

La entrevista permitió recabar información acerca de la zonificación del municipio, actualmente San Nicolás cuenta con 24 distritos los cuales consisten en delimitaciones territoriales estratégicas que gozan de homogeneidad en sus usos de suelo y gozan de equipamiento regional y primario para servicio de la población de sus barrios y en algunos casos al municipio en su conjunto. En la figura 5.1 se muestran los distritos y en la tabla 5.1 la cantidad de parques en cada distrito y también la medida de actividad.

Los distritos que conforman el municipio se muestran en las figuras A.1-A.7. En municipio si bien se cuenta actualmente con una agrupación distrital ésta carece de una estructura definitiva y perfectamente delimitada. De esta manera surge la

Tabla 5.1: Distritos del municipio de San Nicolás de los Garza

Distritos	Cantidad de parques	Medida de actividad m²	% m²
1. Casa Bella	11	71 344.02	5 %
2. Balcones	3	25 901.85	1.8 %
3. Centro	2	11 771.30	0.8 %
4. CEDECO	18	82 428.73	5.7 %
5. El Refugio	20	51 673.84	3.6 %
6. Vicente Guerrero	10	74 529.20	5.2 %
7. Santo Domingo	12	89 845.99	6.3 %
8. Del Paseo	17	10 6051.64	7.4 %
9. San Cristobal	7	27 787.56	1.9 %
10. La Fe	4	27 285.80	1.9 %
11. Casa Blanca	13	95 637.52	6.7 %
12. Talavera	14	130 072.60	9.1 %
13. Del Vidrio	14	52 549.01	3.7 %
14. Constituyentes	19	33 960.43	2.4 %
15. Nogalar	8	45 471.45	3.2 %
16. Pedregal	5	25 059.05	1.7 %
17. Residencial Anáhuac	7	51 956.72	3.6 %
18. La Grange	6	8 417.01	0.6 %
19. Industrial	0	0	0 %
20. Andalucía	19	97 414.25	6.8 %
21. Cuauhtémoc	12	77 329.98	5.4 %
22. Las Puentes	20	137 946.42	9.6 %
23. Anáhuac	11	42 991.38	3 %
24. Jardines de Anáhuac	13	67 664.64	4.7 %

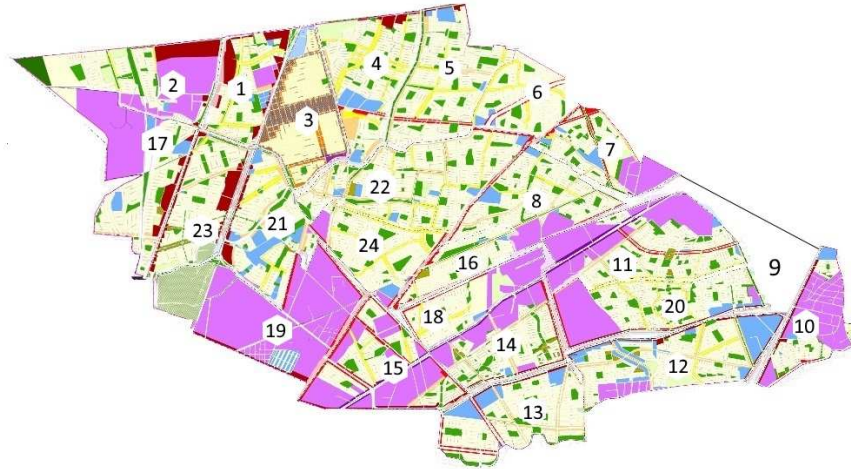


Figura 5.1: Distritos del municipio San Nicolás de los Garza

propuesta de este proyecto, el cual ofrece obtener una agrupación óptima.

Los SIG permitieron la obtención de las distancias de entre cada una de las áreas municipales y la cartografía la ubicación específica de una de las áreas municipales. Para capturar y almacenar estos datos se hizo uso de Excel para posteriormente ser vaciados al *software* GAMS.

5.4 PRUEBAS Y EXPERIMENTACIONES

Tanto para el modelo 1 y el modelo 2 se realizaron pruebas de programación en GAMS, que es el *software* que se utilizó como base para resolver dichos modelos caracterizados con los datos reales obtenidos, GAMS fue utilizado con CPLEX versión 12, y se corrió en una computadora intel Xeon E5-2697v2 2.7GHz con 12 cores cada uno, una memoria RAM de 64 Gb y disco duro de 1 Tb.

5.4.1 RESULTADOS MODELO 1

Para el modelo 1 propuesto se realizaron algunas pruebas, teniendo en cuenta los supuestos vistos en el capítulo anterior, considerando como áreas básicas los 24 distritos que conforman el municipio de San Nicolás, el tamaño de los parques en metros cuadrados, se establecieron 8 territorios debido a la cantidad de proveedores de servicio que cuenta el municipio y se construyó la matriz de adyacencia de los distritos (ver figura A.9).

En la figura 5.2 se muestra las agrupaciones correspondientes del modelo 1, cada color indica un territorio y cada territorio le pertenece a un proveedor de servicio por ejemplo el territorio conformado por los distritos 1, 2 y 17 le corresponde al proveedor A; el territorio conformado por los distritos 4, 5 y 6 le corresponden al proveedor B y así sucesivamente con los demás territorios.

En la tabla 5.2 se observa la asignación de los distritos a cada proveedor un aspecto destacable es asignarle al proveedor con menor capacidad, la medida de actividad más pequeña y al proveedor con mayor capacidad, la medida de actividad mayor.

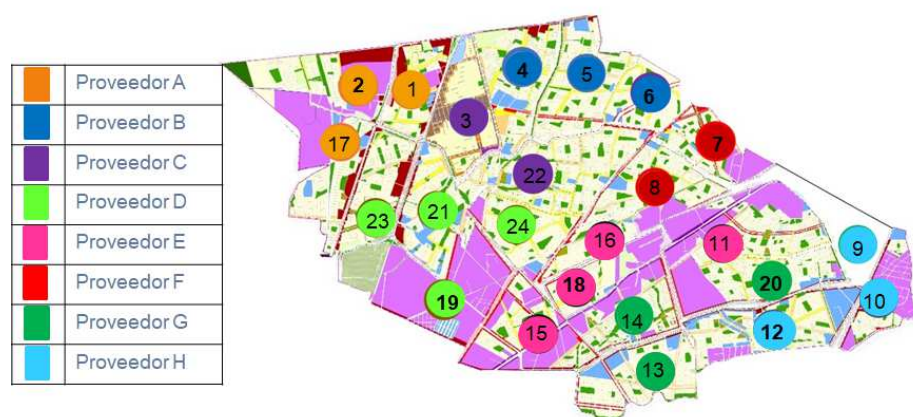


Figura 5.2: Diseño de territorios propuesto para los proveedores

De los resultados obtenidos se pueden destacar los siguientes aspectos:

Tabla 5.2: Asignación de distritos para cada proveedor

Distritos	Proveedores	Cantidad de parques	Medida de actividad m ²
1,2,17	Proveedor A	21	149 202.59
4,5,6	Proveedor B	48	208 631.77
3,22	Proveedor C	22	149 717.72
19,21,23,24	Proveedor D	36	187 986
11,15,16,18	Proveedor E	32	174 585.03
7,8	Proveedor F	29	195 897.63
13,14,20	Proveedor G	52	183 923.69
9,10,12	Proveedor H	25	185 145.96

- Si se lograran territorios perfectamente equilibrados, la medida de actividad promedio que le correspondería a cada proveedor de servicio sería de 179 386.29 m². Sin embargo, como normalmente no se pueden lograr territorios perfectamente equilibrados, la idea de la función objetivo es crear territorios casi perfectamente balanceados minimizando la diferencia entre los valores del territorio de mayor medida de actividad (Proveedor B) y el de menor medida de actividad (Proveedor A) en este caso se obtuvo un valor mínimo 59 426.18 m², lo que corresponde a un 4% del total de la medida de actividad. La finalidad principal de crear territorios balanceados es asignar una carga de trabajo equilibrada a cada proveedor, esto debido a que actualmente el desequilibrio en las cargas de trabajo causa que algunos parques queden sin limpiar por los proveedores.
- En las agrupaciones obtenidas, se observa en la figura 5.2, que los distritos son contiguos lo cual facilita el trabajo a los proveedores en cada distrito, debido a que su área de trabajo estaría delimitada.
- En la tabla 5.2 se muestra que no necesariamente el proveedor con mayor cantidad de parques tiene la mayor medida de actividad y tampoco se cumple

de manera contraria, esto debido a que influye el tamaño de los parques en cada distrito.

- Por último, es muy importante destacar la cobertura del servicio, dado que con este diseño todos los parques serán asignados a un proveedor lo cual garantiza la limpieza de todos los parques que conforman el municipio de San Nicolás de los Garza.

5.4.2 RESULTADOS MODELO 2

Una vez obtenido el diseño anterior para cada proveedor, ahora es necesario realizar una segunda agrupación, esto debido a que uno de los factores más importantes de la limpieza y recolección de residuos sólidos en parques es la frecuencia en este caso se considera que la limpieza de cada uno de los parques debe realizarse cada mes, es decir, cada 4 semanas.

Se realizaron 8 corridas al modelo 2, una para cada proveedor, considerando el tamaño en m^2 de cada parque y las distancias entre cada uno de ellos en metros (ver figura 7.11), además se estableció un 10% de tolerancia, para este caso los factores que influyen en la elección de la tolerancia son la distancia recorrida y el tiempo computacional. Por una parte, si la tolerancia es menor a 10% , la distancia recorrida aumenta y también los tiempos computacionales, en cambio, si la tolerancia aumenta, la distancia recorrida disminuye y el tiempo computacional también. La solución gráfica para el proveedor D se despliega en la figura 5.3, en donde cada color representa un territorio, de esta forma los parques que conforman el territorio color azul serán limpiados la semana 1, los parques que forman el territorio rosa serán limpiados la semana 2, los parques que forman el territorio rojo serán limpiados la semana 3 y por último los parques que forman el territorio amarillo serán limpiados la semana 4.

En la tabla 5.3 se muestra las semanas y la cantidad de parques que debe ser

limpiada en cada una de ellas, además se muestra la carga de trabajo (medida de actividad) de casa semana.



Figura 5.3: Diseño para los distritos 19, 21, 23 y 24

Tabla 5.3: Planeación para limpieza de parques para el proveedor D

Semana	Parques	Medida de actividad m^2
Semana 1	1-11, 17, 21	53 658.57
Semana 2	12-16,18,19,22	52 728.17
Semana 3	24-31	52 708.06
Semana 4	20,23, 32-36	46 947.11

Como análisis de los resultados anteriores tenemos que:

- En las agrupaciones obtenidas, la figura 5.3, muestra que los parques están contiguos o conectados lo cual facilita el trabajo para las cuadrillas de limpieza, debido a que su área de trabajo estaría delimitada.
- La carga de trabajo de cada semana esta balanceada, ver tabla 5.3, esto con

la idea de que la limpieza y recolección se realice en todos los parques y el trabajo sea equitativo cada semana para el personal.

- La cobertura del servicio se cumple dado que con este diseño todos los parques serán limpiados una vez al mes lo cual garantiza la limpieza de todos los parques que conforman el municipio de San Nicolás de los Garza.
- La distancia mínima recorrida de los parques al centro de territorio (parque central del territorio) es de 28 150 metros.

Por otro parte, como se mencionó anteriormente se realizaron 8 corridas al modelo 2 debido a que el municipio tiene 8 proveedores, sin embargo, en los resultados que se obtuvieron casos donde no se cumple el criterio de la contigüidad, para ello se propone la metodología del capítulo 4. En la figura 5.4 se muestra la solución del modelo 2 para el proveedor F. Así mismo en la tabla 5.4 muestra las semanas y la cantidad de parques que debe ser limpiada en cada una de ellas, además la carga de trabajo (medida de actividad) de cada semana.

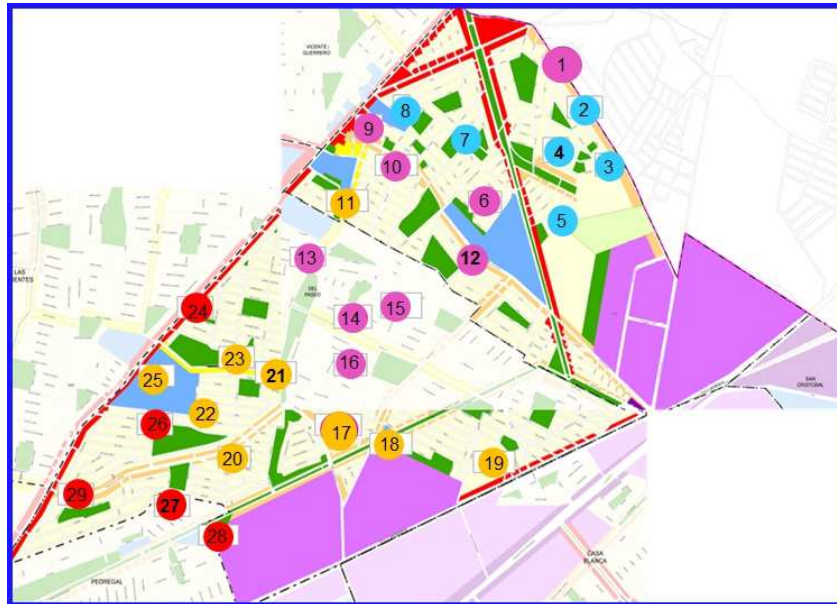


Figura 5.4: Diseño para los distritos 7 y 8: Solución 1

El algoritmo propuesto consiste en realizar intercambios hasta obtener territorios donde todos los parques estén contiguos, a continuación se describe gráficamente

Tabla 5.4: Planeación para limpieza de parques para el proveedor F

Semana	Parques	Medida de actividad m^2
Semana 1	2-5, 7, 8	52 387.76
Semana 2	1,6,9,10-16	48 546.66
Semana 3	11,17-23,25	50 697.79
Semana 4	24,26-29	44 265.42

de los pasos.

- Identificar los parques no contiguos en este caso son el parque 1, 11 y 24. Después comenzar a realizar los intercambios, puede seleccionarse cualquiera de los tres para comenzar, se considerará el parque 24, ver figura 5.5.



Figura 5.5: Aplicación del algoritmo: Parques no contiguos (Paso 3)

- El siguiente paso es identificar los parques contiguos a él, en este caso son el parque 25, 23 y 13, ver figura 5.6.
- Para determinar con cual parque de estos se hará el intercambio, se seleccionará aquel más cercano al centro de territorio (parque 27), en este caso el parque 25 es el más cercano, por lo tanto, se realiza el intercambio ver figura 5.7.
- De manera similar se realizan los intercambios para los parques 11 y 1. Una vez hechos todos los intercambios se ajusta la medida de actividad para cada territorio.

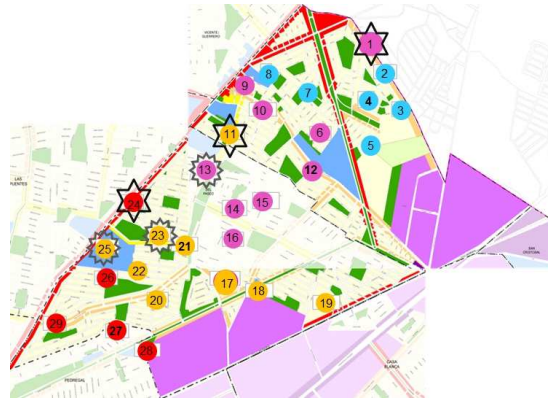


Figura 5.6: Aplicación del algoritmo: Parques adyacentes (Paso 4)



Figura 5.7: Aplicación del algoritmo: Comparación de distancias al centro de territorio (Paso 5)

La figura 5.8 muestra la segunda solución obtenida con el algoritmo propuesto. Es importante mencionar que en esta nueva configuración se cumple el criterio de contigüidad pero el criterio de balance se desajusta, dado que cada semana como se muestra en la tabla 5.5 la carga de trabajo es muy variable, por lo cual se deja la decisión final de la elección del solución a los encargados del servicio.

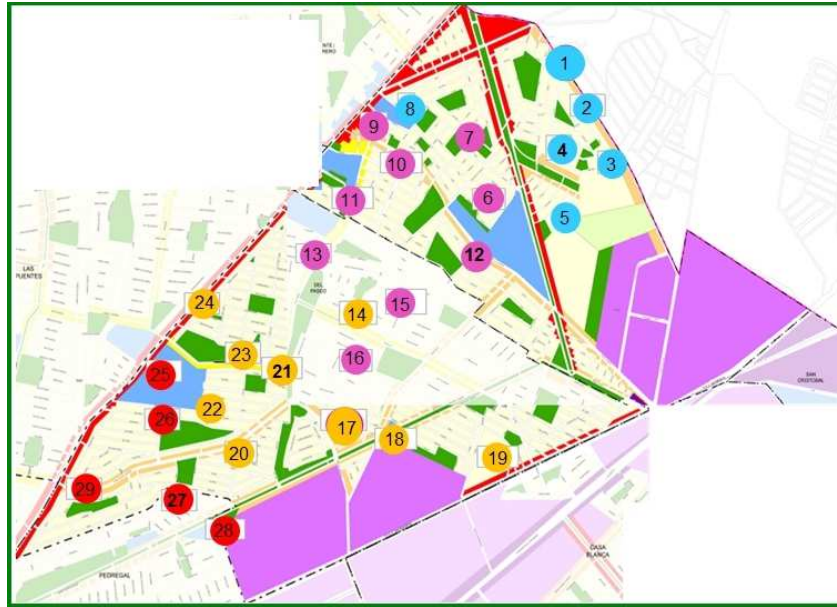


Figura 5.8: Diseño para los distritos 7 y 8: Solución 2

Tabla 5.5: Planeación para la limpieza de parques para el proveedor F solución 2

Semana	Parques	Medida de actividad m^2
Semana 1	1-5, 8	43 580
Semana 2	6,7,9,10-13, 15,16	56 877
Semana 3	14,17-24	48 893
Semana 4	25-29	46 546

5.5 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para validación del modelo se hicieron experimentaciones modificando parámetros en ambos modelos. Para el modelo 1 se aumenta y disminuye la cantidad de proveedores y con esto se espera ver el comportamiento del balance de los territorios. En la tabla 5.6 se muestra la cantidad de proveedores, la medida de actividad, la diferencia entre la mayor medida de actividad y la menor medida de actividad de los territorios, es importante señalar que cuanto menor sea esta diferencia los territorios estarán mejor balanceados.

Tabla 5.6: Asignación de proveedores

Cantidad de proveedores	Mayor medida de actividad	Menor medida de actividad	Diferencia
6	358 349.49	149 202.59	209 146.9
7	254 799.76	149 202.59	105 597.17
9	187 986	137 946.42	50 039.5
10	165 685.1	130 072.6	35 612.5
11	164 375.19	98 020.46	66 354.7
12	152 487.61	89 845.99	62 641.62

Se puede observar en la tabla 5.6 que no existe una relación proporcional al aumentar la cantidad de proveedores con la diferencia de las medidas de actividad, sin embargo realizando esta pruebas se podría recomendar, al municipio la contratación de entre 9 y 10 proveedores debido a que en la tabla son las diferencias más pequeñas de medida de actividad lo cual genera territorios balanceados, y con ello un equilibrio en las cargas de trabajo para cada proveedor.

Por otra parte también se realizaron pruebas aumentando a 34 distritos con 8 proveedores y el comportamiento fue similar y el tiempo computacional aumenta a 14 segundos lo cual es poco considerable.

En la literatura se ha encontrado que los problemas de diseño de territorios son difíciles de resolver inclusive para instancias pequeñas, pero en este caso particular el modelo 2 se corrió para instancias desde 21 unidades hasta con 45 unidades básicas presentando resultados computacionales satisfactorios, también se hicieron pruebas para 90 unidades y el comportamiento fue similar. Es importante mencionar que los datos considerados en las experimentaciones fueron tomados del caso real de estudio, solo se modificó la frecuencias y tolerancia. La tabla 5.7 muestra los tiempos computacionales conforme se aumenta la cantidad de unidades básicas y difiere la frecuencia del servicio, son tiempos muy similares excepto para el caso de 21 y 45 instancias con 1% de tolerancia donde el tiempo aumenta drásticamente, en estos

casos específicos no se puede establecer un criterio por el cual aumenta el tiempo computacional, debido a la generación de los casos que se estipuló, en decir los datos de los parques difieren en medida de actividad y contigüidad.

Tabla 5.7: Comportamiento de instancias

Cantidad de unidades básicas	Semanas	Tolerancia	Promedio de medidad de actividad	Tiempo computacional seg
21	2	1 %	74 601	0.20
21	4	1 %	37 300	0.34
21	4	5 %	37 300	0.27
21	8	1 %	18 650	954.99
21	8	5 %	18 650	0.42
45	2	1 %	79 581	0.23
45	4	1 %	39 790	5.89
45	8	1 %	19 895	991.17
90	2	1 %	159 162	1.31
90	4	1 %	79 581	0.52
90	8	1 %	39 790	20.52
90	8	5 %	39 790	16.95
90	8	10 %	39 790	0.72

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones a las que se llegaron, los aspectos relevantes de la investigación y finalmente se darán pautas para investigaciones futuras relacionadas con el tema.

6.1 CONCLUSIONES

La logística urbana puede ser vista como un proceso de optimización en diferentes operaciones y servicios que existen dentro de la ciudad. Específicamente la recolección de residuos sólidos en áreas municipales fue el tema de interés en este trabajo.

La propuesta que se proporciona hizo uso de herramientas de investigación de operaciones y el objetivo que se buscó fue optimizar los recursos disponibles con los que cuenta el municipio, y de esta forma mejorar la toma de decisiones en la planeación de la limpieza y recolección de residuos en áreas municipales, dado que actualmente los encargados del servicio realizan de manera empírica el diseño de territorios para el servicio.

En esta investigación se logra obtener una conceptualización basada en un modelo matemático para el diseño de territorios de limpieza y recolección de residuos

sólidos en áreas municipales de San Nicolás de los Garza, en el cual se consideran aspectos tales como cantidad de residuos a recolectar, la frecuencia del servicio de limpieza y recolección.

La conceptualización matemática de este problema fue realizada a través de un modelo de programación lineal entera mixta. El principal aporte de la adaptación de este modelo es la aplicación al servicio de limpieza y recolección de residuos de parques, en donde, se consideraron los factores más importantes para este servicio, lo cual es una contribución importante para la planeación el diseño de territorios de la recolección basura en logística urbana.

Los parques son elementos importantes en la traza urbana por los diversos beneficios ambientales, sociales y económicos que pueden producir. Por tales motivos es importante reconocer que la planeación para la limpieza y recolección de residuos es considerada materia de estudio e investigación en logística urbana. El impacto más importante en la logística urbana es precisamente la optimización del servicio, esto debido a que se ofrece una adecuada asignación de recursos en la planificación del diseño de territorios para la limpieza y recolección de residuos sólidos en parques. Además se pueden establecer estándares de la calidad del servicio de limpieza y recolección, lo cual sería un incentivo para mejorar la cultura de la administración.

Como conclusión importante los resultados obtenidos mediante el modelo matemático planteado son satisfactorios en la parte computacional y además ofrecen un adecuado diseño de territorios cumpliendo con los criterios de planificación de contigüidad, balance, compacidad e integridad espacial. Por otra parte, otra manera de evaluar estos criterios es a través de inspección visual de los territorios formados. Esto permite a los tomadores de decisiones encontrar dentro de un conjunto de posibles distribuciones cual es la mejor manera de dividir el municipio con datos cuantitativos.

Un aspecto muy importante con los resultados obtenidos es la cobertura del servicio, lo cual asegura un nivel de servicio adecuado, en donde todos los parques

del municipio de San Nicolás de los Garza serán limpiados una vez al mes, además de generar un mayor control en la asignación de los parques a los proveedores considerando la carga de trabajo. En caso de que los parques de alguna zona del municipio presenten deficiencias en cuanto al servicio de recolección las causas estarían enfocadas en la capacidad de los proveedores dado que la carga de trabajo se distribuye de manera equitativa.

La aplicación directa del modelo matemático para la operación de Servicios Públicos sería determinada por los encargados del servicio, sin embargo, entre los beneficios que se obtendrían esta una mayor eficiencia en el aprovechamiento del equipo de transporte y la cobertura del servicio.

6.2 IMPLEMENTACIÓN Y UTILIDAD DE LA METODOLOGÍA

La implementación de los resultados obtenidos con esta metodología dependen de principalmente dos factores. El primero de ello es que la implementación está directamente ligado a una herramienta computacional que facilite el estudio y planificación de los territorios. Esta herramienta debe tener implementado el modelo propuesto y además dar la facilidad a los tomadores de decisión de poder ingresar nuevas consideraciones.

El segundo factor relevante es la dificultad en la adopción por parte de los encargados de Servicios Públicos del municipio de San Nicolás y los proveedores de limpieza y recolección, debido a que durante muchos años su forma de trabajar ha sido manual e empírica, sin embargo, los beneficios esperados es la eficiencia del servicio para la satisfacción de la población del municipio de San Nicolás de los Garza.

6.3 TRABAJO A FUTURO

En el municipio de San Nicolás cada proveedor cuenta con un número determinado de cuadrillas y un tiempo disponible para la limpieza y recolección de cada parque, además la cantidad de juegos infantiles y bancas en cada parque difiere así como los tiempos de recorrido, las distintas capacidades de los proveedores son elementos que influyen en dicho servicio, por lo tanto, serían interesante proporcionarles a los encargados del servicio una nueva propuesta con estos elementos. Aunado a esto es importante señalar que cada parque cuenta con características específicas por ejemplo algunos tienen canchas de fútbol, equipo para realizar actividad física, juegos infantiles, pistas para caminar y algunos otros simplemente amplias zonas verdes y bancas, por lo tanto sería fundamental considerarlo en investigaciones futuras.

APÉNDICE A

DISTRITOS DEL MUNICIPIO DE SAN NICOLÁS DE LOS GARZA

En este apéndice se presentan gráficamente cada uno de los distritos que conforman el municipio de San Nicolás de los Garza, en cada uno las áreas de color verdes representan los parques (ver figuras A.1 a A.8).



Figura A.1: Distritos Casa Bella y Balcones



Figura A.2: Distritos Vicente Guerrero, Santo Domingo y Del Paseo



Figura A.3: Distritos La Fe, Casa Blanca y Talavera

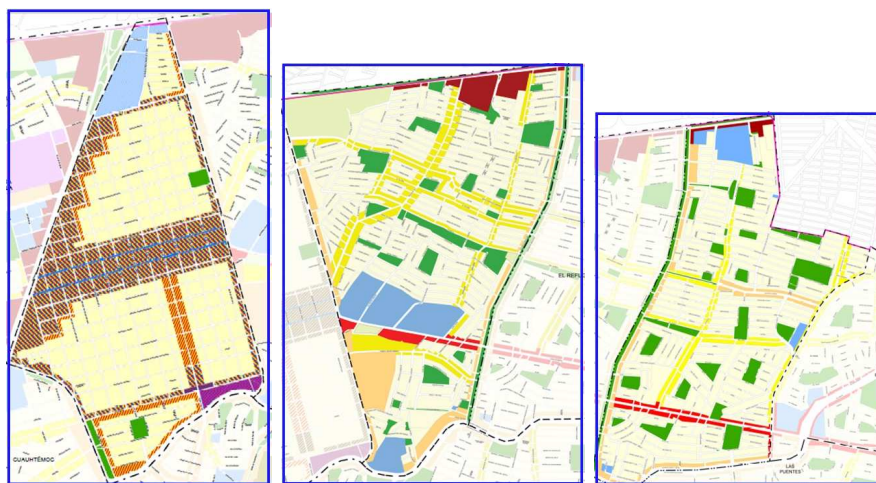


Figura A.4: Distritos Centro, CEDECO y El Refugio



Figura A.5: Distritos Del Vidrio, Constituyentes y Nogalar



Figura A.6: Distritos Pedregal, Residencial Anahuac y Lagrange



Figura A.7: Distritos Industrial, Andalucía y Cuauhtémoc



Figura A.8: Distritos Las Puentes, Anáhuac y Jardines de Anáhuac

APÉNDICE B

DATOS DEL CASO DE ESTUDIO

En este apéndice se muestran los datos utilizados para las experimentaciones de ambos modelos, la matriz de adyacencia de los distritos utilizada para el modelo 1, se presentan en la figura B.1, donde toma el valor de 1 si son adyacentes los distritos y cero en caso contrario.

Por otra parte, la figura B.2 muestra los datos de los parques de los distritos 19, 21, 23 y 24 utilizados para el modelo 2, en este caso se observa el número de parque, la calle en donde se encuentra ubicado y el área en metros cuadrados. También se muestran las distancias entre cada uno de los parques de estos mismos distritos en la figura B.3. Es importante mencionar que se construyeron ambas tablas para cada uno de los territorios formados.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	
4	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
5	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
7	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1
16	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
17	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1
20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
21	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	
22	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
23	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
24	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1

Figura B.1: Matriz de adyacencia de los distritos

Parque	Calle	Area m ²
1	Universidad de Mty	3,358.02
2	1 de Enero	5,531.03
3	18 de Marzo	39.03
4	Fco. Villa	3,501.08
5	15 de agosto	2,784.33
6	15 de agosto	5,508.58
7	Sebastian Aparicio	9,418.06
8	Fr. Pedro de Gante	513.97
9	Fr. Juan de Zumarraga	3,513.46
10	24 de mayo	4,374.38
11	Salvador Rivera	4,449.44
12	Heliotropo	4,538.53
13	Colibri	5,536.16
14	Gaviota	5,913.19
15	Av. Famosa	3,189.77
16	Ópalo	2,649.29
17	Justo Sierra	7,527.22
18	Cedros	6,016.07
19	Alamos	23,130.84
20	Pio XII	7,231.53
21	Saltillo	3,139.97
22	San Juan	1,754.32
23	San Clemente	6,703.09
24	Faustino Lizarraga	12,558.05
25	1a avenida	8,305.07
26	calle 15	6,523.25
27	3a avenida	3,142.58
28	Bosques Nordicos	3,790.82
29	Roma	2,613.33
30	Calle 23	10,235.26
31	Calle 25	5,539.70
32	Gilberto Delgado	12,010.07
33	Rio Nazas	7,137.51
34	Rio Conchos	5,971.52
35	Girasoles	5,324.03
36	Republica mexicana	2,569.36

Figura B.2: Parques y medida de actividad

APÉNDICE C

RESULTADOS

Finalmente, los resultados obtenido del modelo 2 se muestran gráficamente en las figuras C.1 a C.5.



Figura C.1: Diseño para los distritos 1, 2 y 17

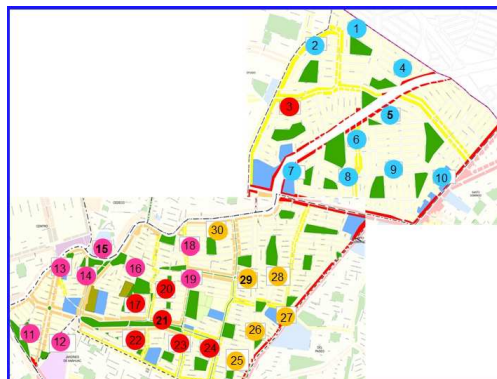


Figura C.2: Diseño para los distritos 6 y 22

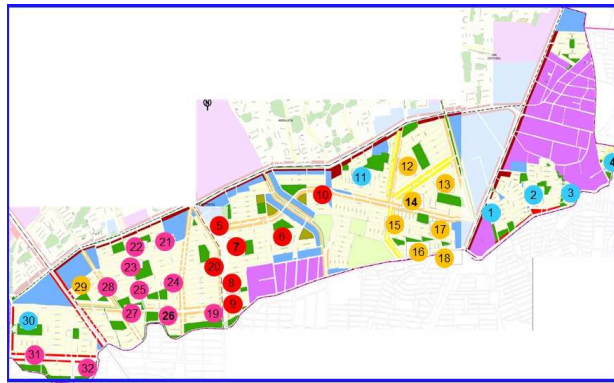


Figura C.3: Diseño para los distritos 10, 12 y 13



Figura C.4: Diseño para los distritos 19, 21, 23 y 24



Figura C.5: Diseño para los distritos 3, 4 y 5

BIBLIOGRAFÍA

- ARAIZA AGUILAR, J. A. y M. E. JOSÉ ZAMBRANO (2015), «Mejora del servicio de recolección de residuos sólidos urbanos empleando herramientas SIG: un caso de estudio», *Ingeniería*, (4), págs. 118–1128.
- ARMSTRONG, M. y R. HONEY (1993), «A spatial decision support system for school redistricting», *URISA Journal*, págs. 40–52.
- AYALA RODRÍGUEZ, A. y E. GONZÁLES BUTRÓN (2001), «Asignación de rutas de vehículos para un sistema de recolección de residuos sólidos en la acera», *Revista de Ingeniería*, (13), págs. 5–11.
- BALLOU, R. H. (2004), *Administración de la Cadena de Suministro*, segunda edición, Pearson, México.
- BENABDALLAH, S. y J. R. WRIGHT (1992), «Multiple subregion allocation models», *ASCE Journal of Urban Planning and Development*, (118), págs. 24–40.
- BING, X., M. DE KEIZER, J. M. BLOEMHOF-RUWAARD y J. G. VAN DER VORST (2014), «Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic wastes», *Waste Management*, (34), págs. 719–729.
- BOZKAYA, B., E. ERKUT y G. LAPORTE (2001), «A tabu search heuristic and adaptive memory procedure for political districting», *European Journal of Operational Research*, (144), págs. 12–26.
- BUCAREY LÓPEZ, V. (2014), *Un modelo matemático para el diseño de territorios*

- basados en el plan cuadrante de seguridad preventiva de Carabineros de Chile*, Tesis de Maestría, Universidad de Chile.
- CAMARERO BULLÓN, C. (2002), «Evolución de la población características, modelos y factores de equilibrio», *Fundación Univesidad de América*, 4(10), págs. 1–10.
- CERDÁ, I. (2010), *Logística urbana: ciudad y mercancías*, segunda edición, Marge Books, México.
- CERRÓN, M. (1998), «Estudio de diseño de rutas optimas de recolección mediante el software Mars», *Congreso Interamericano de Engenharia Sanitaria e Ambiental*, págs. 1–16.
- CONAPO (2010), «Dinámica demográfica 1990-2010 y proyecciones de población 2010-2030», *Informe técnico*.
- DÍAZ, A., B. BERNÁBE y D. LUNA (2012), «Relación lagrangeana para el problema de particionamiento de áreas geográficas», *Revista de Matemáticas: Teoría y Aplicaciones*, (19), págs. 169–181.
- FERNADEZ COLOMINA, A. (2005), «La gestión de los residuos sólidos urbanos en el desarrollo sostenible local», *Revista cubana de química*, (3), págs. 35–39.
- GARCÍA SANZ, B. (1990), «Población mundial y recursos alimenticios», *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, (49), págs. 27–35.
- GOBIERNO-MUNICIPAL, S. (2013), «Plan de desarrollo urbano sustentable 2013-2033 San Nicolás de los Garza», <http://transparencia.sanicolas.gob.mx/LTAINL/dic13/plan>
- GUTIÉRREZ GALICIA, F. (2008), *Análisis del Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos en el Centro Histórico de Morelia, aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG)*, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- INEGI (2014), «Indicadores del medio ambiente», *Informe técnico*.

- INEGI (2015a), «Banco de Indicadores», *Informe técnico*.
- INEGI (2015b), «Número de habitantes», *Informe técnico*.
- JARAMILLO, J. (2002), «Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones», *Informe técnico*.
- KALCSICS, J., S. NICKEL y M. SCHRÖDER (2009), «Towards a Unified Territory Design Approach – Applications, Algorithms and GIS Integration», *Berichte des Fraunhofer ITWM*, (71), pág. 40.
- LÓPEZ CALVA, L. F., R. DE LA TORRE, A. G. REYES, L. R. CHAMUSSY, C. R. GARCÍA y F. V. DOMÍNGUEZ (2002), «El desarrollo humano de los municipios en México», *Informe técnico*.
- MACÁRIO, R., A. GALELO y P. M. MARTINS (2008), «Business models in urban logistics», *Ingeniería y desarrollo*, (24), págs. 77–96.
- MARÍ PASTOR, J. (2013), *Optimización de la localización y recogida de residuos sólidos urbanos (RSU)*, Tesis de Maestría, Universidad Complutense de Madrid.
- MENOYO, H. (2006), «La logística urbana: conceptos básicos y proposiciones», *Revista Transporte, Desarrollo y Medio Ambiente*, **26**(1), págs. 45–48.
- MORENO REGIDOR, M. P. y J. GARCIA LÓPEZ DE LACALLE (2011), «Estado del arte en procesos de zonificación», *Revista GeoFocus*, (11), págs. 155–181.
- MÁRQUEZ PÉREZ, J. (2008), *Macro y Micro ruteo de residuos sólidos residenciales*, Tesis de Maestría, Universidad de Sucre.
- MUYLDERMANS, L., D. CATTRYSSE, D. V. OUDHEUSDEN y T. LOTAN (2002), «Districting for salt spreading operations», *European Journal of Operational Research*, (139), págs. 521–532.
- OLIVEIRA, L. y V. CORREIA (2014), «Simulation of an Urban Logistic Space for the Distribution of Goods in Belo Horizonte, Brazil», *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, (125), págs. 496–505.

- PORTAL-EDUCATIVO (2014), «Evolución de la población mundial», web www.portaleducativo.net.
- PÉREZ ARRIAGA, E., J. RACERO MORENOZ y G. VILLA CARO (2007), «Los sistemas de recolección de residuos sólidos (Los métodos y sus aplicaciones)», *CienciaUAT*, (4), págs. 58–60.
- REZENDE, R. y E. AGHEZZAF (2015), «City Logistics and Traffic Management: Modelling the Inner and Outer Urban Transport Flows in a Two-Tiered System», *Transportation Research Procedia*, (6), págs. 297–312.
- RICCA, F. y B. SIMEONE (2007), «Local search algorithms for political districting», *European Journal of Operational Research*, (189), págs. 1409–1426.
- RINCÓN GARCÍA, E. y M. A. GUTIÉRREZ ANDRADE (2008), «Compacidad en celdas aplicada al diseño de zonas electorales», *Suplemento/Supplement*, (5), págs. 73–95.
- RIOS-MERCADO, R. Z. y F. L. PÉREZ (2014), «Planificación inteligente de territorios comerciales bajo requerimientos de realineación y asignación disjunta», *Ciencia UANL*, págs. 91–101.
- ROBUSTÉ, F., J. M. CAMPOS y D. GALVÁN (2000), «Nace la Logística Urbana», en *IV Congreso de Ingeniería del Transporte*.
- RÍOS-MERCADO, R. Z. y E. FERNÁNDEZ (2009), «A reactive GRASP for a commercial territory design problem with multiple balancing requirements», *Computers Operations Research*, (36), págs. 755–776.
- SAUCEDO MARTÍNEZ, J. A. (2005), *Vericación y empleo computacional de un modelo matemático utilizado para un layout en un centro de distribución*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- SEDESOL (1997), *Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales*.

- SEMARNAT (2012), *Residuos sólidos urbanos y de manejo especial*.
- SEMARNAT (2014), «Residuos sólidos urbanos», *Informe técnico*.
- SEVILLA GAITAN, A. (2012), «El crecimiento de la población mundial a la luz de la gobernanza transnacional», *Revista NEJ*, **17**(1), págs. 125–138.
- SIMÓN, S., J. DEMALDÉ, J. HERNÁNDEZ y M. CARNERO (2012), «Optimización de Recorridos para la Recolección de Residuos Infecciosos», *Información Tecnológica*, (24), págs. 125–132.
- SUERO PEREZ, D., E. FONTALVO OROZCO y K. MEZA PERALA (2013), «Planteamientos Estratégicos para la Logística Urbana: Perspectiva de la Relación Universidad-Estado-Empresa», *INGENIARE*, (15), págs. 133–141.
- TANIGUCHI, E., R. G. THOMPSON y T. YAMADA (2014), «Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics», *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **125**, págs. 4–14.
- TIEDE, D. y J. STROBL (2006), «Polygon-based regionalisation in a GIS environment», *Trends in Knowledge-Based Landscape Modeling*, págs. 54–59.
- UMAÑA, G., J. G. LAROJ, C. S. ORTIZ, M. S. CÁCERES y M. BESSALEL (2003), «Guía Para la Gestión del Manejo de Residuos Sólidos Municipales», *Informe técnico*, Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). Programa Ambiental Regional para Centroamérica (PROARCA).
- VILLAMIZAR, A. M., J. M. TORRES y N. H. PADILLA (2014), «Mathematical Programming Modeling and Resolution of the Location-Routing Problem in Urban Logistics1», *Ingeniería y Universidad*, **18**(2), págs. 271–289.
- WINKENBACH, M., P. R. KLEINDORFER y S. SPINLER (2015), «Enabling Urban Logistics Services at La Poste through Multi-Echelon Location-Routing», *Transportation Science*, **50**, págs. 1–21.

ZOLTNERS, A. y P. SINHA (1983), «Sales territory alignment: A review and model»,
Management Science, (29), págs. 1237–1256.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

María del Rosario Alvarado Vazquez

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

DISEÑO DE TERRITORIOS PARA LA RECOLECCIÓN DE RESIDUOS
SÓLIDOS EN ÁREAS MUNICIPALES

Hija de Armando Alvarado Morales y Ma. Fortunata Vazquez Cruz, nacida el 18 de noviembre de 1991 en Monterrey, Nuevo León. Titulado como Licenciada en Matemáticas por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Actualmente cursa el posgrado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, becado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) el cual se encuentra inscrito en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC).