



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN SISTEMAS – INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS
URBANOS, BACALAR, QUINTANA ROO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ GILBERTO SANDOVAL CUAGTLE

Director de Tesis
RICARDO ACEVES GARCÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, CDMX, 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. I. SOLER ANGUIANO FRANCISCA IRENE

Secretario: M. I. RIVERA COLMENERO JOSÉ ANTONIO

Vocal: DR. RICARDO ACEVES GARCÍA

1 er. Suplente: DR. DEL MORAL DÁVILA MANUEL

2 do. Suplente: M. I. RESENDIZ LÓPEZ HÉCTOR DANIEL

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

RICARDO ACEVES GARCÍA

FIRMA

Agradecimientos

A nuestra máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por permitir mi instrucción y formación dentro de sus instalaciones, las cuales son forjadoras de profesionistas y humanos bajo el un lema lleno de grandeza e inconmensurable amor a la cultura.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

A mis profesores, quienes se encargaron de formarme profesionalmente con sus conocimientos y amplia experiencia en las distintas áreas de estudio que la maestría requiere. Gracias por hacer de mí una persona crítica y objetiva al aclarar y resolver mis dudas e inquietudes.

Muy especialmente a mi tutor y director de tesis al Dr. Ricardo Aceves García, quien estuvo a cargo del desarrollo de la presente tesis. Por su entrega a mi aprendizaje, por compartir su sabiduría y por impulsarme a ser mejor en todo aquello que me proponga. Mi gratitud y respeto por su infinita paciencia y profesionalismo.

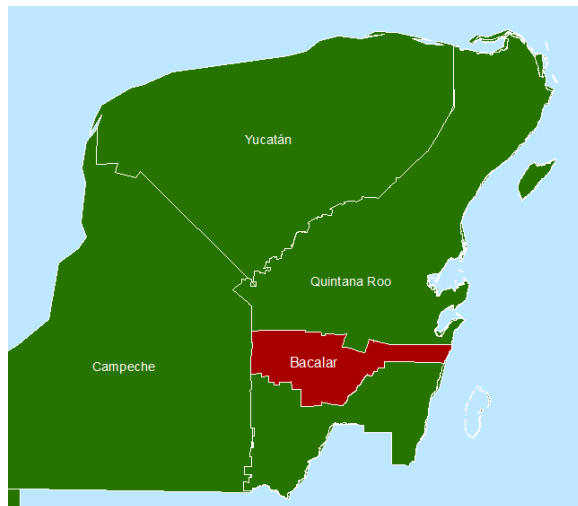
A mis padres, hermanos y amigos quienes con sus esfuerzos, sacrificios, atención y consejos me proporcionaron lo necesario para lograr de mí una persona con carácter y capaz de valerse por sí misma. Gracias por su apoyo, cariño y por compartir este difícil camino conmigo.

Este sueño es de todos. ¡Gracias!

Prefacio

La recolección de residuos sólidos urbanos (RSU) municipales es un problema de logística al cual se enfrentan a diario las entidades encargadas de su gestión. Una de las herramientas más utilizadas hasta la fecha para realizar la programación de estas tareas son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), otras técnicas propias de la ingeniería se han aplicado a lo largo del tiempo y han demostrado su eficacia en la planeación del servicio de limpieza, tal es el caso de la teoría de grafos.

La teoría de grafos y/o teoría de redes son herramientas ampliamente utilizadas por empresas y consultoras logísticas para la entrega y recepción de mercancías, sin embargo, en pocas ocasiones se utiliza para resolver situaciones como la limpieza de calles o la recolección de basura, por ello, este estudio está enfocado a la importancia que tiene la recolección de los residuos sólidos urbanos (RSU) municipales, debido a que éste es un problema de logística de servicio. El área de estudio contempla once de las principales localidades del Municipio de Bacalar, debido a que en estas localidades se concentra poco más del 50% de la población del mismo.



Municipio de Bacalar, Quintana Roo

El municipio de Bacalar es de reciente creación (2012), parte del mismo incluye el título de Pueblo Mágico y la Laguna de Bacalar es un importante centro turístico, motivo por el cual autoridades municipales y sociedad en general requieren un sistema eficiente de gestión integral de residuos sólidos urbanos (GIRSU) y cumplir con el eje principal de desarrollo del municipio, que es la sustentabilidad.

Se diseñó el sistema de recolección de RSU como modelos de redes, utilizando el método de recolección por parada fija y acera, además se utilizó la teoría de localización para situar una estación de transferencia. Para la solución planteada se utilizaron los principios de los modelos del agente viajero, cobertura máxima y el problema del cartero chino para diseñar las rutas de recolección y los métodos de centro de gravedad y 1-centro absoluto de la red para la localización de la estación de transferencia.

Se emplearon Sistemas de Información Geográfica (GIS) para representar el diagnóstico, la modelación de rutas, la localización de la estación de transferencia y los resultados obtenidos

ÍNDICE

Capítulo 1	5
1.1 Introducción	5
1.2 Justificación	6
1.3 Objetivo	7
1.3.1 Objetivos particulares	7
1.4 Resumen del caso de estudio (2015)	7
Capítulo 2 Marco contextual	9
2.1 Situación de México en la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU)	9
2.2 Generación y principales generadores de residuos sólidos urbanos (RSU) en México	10
2.3 Generación de RSU por tipo de localidad	11
2.4 Cobertura de la recolección de RSU	13
2.5 Costos de la recolección de RSU	13
2.6 Problemática y oportunidades de la GIRSU	14
2.7 Municipio de Bacalar (introducción al caso de estudio)	17
2.7.1 Programas de desarrollo y cuidado ambiental	18
2.7.2 Desarrollo turístico	19
Capítulo 3 Marco teórico y metodología	22
3.1 Métodos de recolección	22
3.2 Recolección de RSU	24
3.2.1 Camiones recolectores	24
3.2.2 Estaciones de transferencia (ET)	24
3.2.3 Frecuencia de recolección	26
3.3 Problema de localización de instalaciones y servicios (modelos de localización en redes) ..	26
3.3.1 Localización de instalaciones no deseables	27
3.3.2 Método del centro de gravedad	29
3.3.3 Método de 1 - centro absoluto de una red con pesos	29
3.3.4 Problema de cobertura (localización de paradas de recolección)	30
3.4 Diseño de rutas de recolección de RSU	31
3.4.1 Macroruteo y zonificación	31
3.4.2 Microruteo	31
Capítulo 4 Caso de estudio y aplicación de la metodología	36
4.1 Localización de la estación de transferencia (ET)	37
4.1.1 Localización de vértices de la región factible por medio del método del centro de gravedad	38
4.2 Diseño del servicio recolección de RSU	48
4.2.1 Microruteo	48
4.2.2 Macroruteo	69
Capítulo 5 Resultados y conclusiones	72
5.1 Resultados	72

5.1.1 Localización de la estación de transferencia (ET).....	72
5.1.2 Cálculo y asignación de recursos.....	74
5.1.3 Microrutas.....	76
5.1.4 Macrorutas.....	77
5.2 Conclusiones y recomendaciones.....	79
Referencias.....	83
Anexos.....	85
Localización de la estación de transferencia.....	85
Microrutas.....	86
Macrorutas.....	94

Capítulo 1

“La gestión integral de los residuos sólidos es una tarea muy compleja que se ha convertido en un problema común en los países desarrollados y en vías de desarrollo, debido a múltiples factores como el crecimiento, la crisis económica que obliga a la reducción de gasto público disminuyendo así la calidad en el servicio de limpieza, lo que se refleja en la falta de limpieza de vías públicas, la recuperación de residuos en la calle, el incremento de actividades informales, en la descarga de residuos en cuerpos de agua o el abandono de los mismos en tiraderos a cielo abierto y la presencia de personas en los sitios en condiciones de riesgo para su salud”.

1.1 Introducción

La importancia económica de la gestión de residuos se ha ido haciendo más y más patente en los últimos años y ello ha provocado una considerable expansión de la literatura relacionada al estudio de los mismos, al mismo tiempo que un notable desarrollo de las políticas públicas aplicadas en este ámbito.

En la gestión integral de los residuos sólidos urbanos (GIRSU) es fundamental realizar una buena planificación de la recolección de los residuos domiciliarios y Quintana Roo es conocido a nivel nacional como uno de los estados con mayor riqueza de recursos naturales, los cuales han sido impactados por la contaminación, efecto directo del desarrollo de diversas actividades humanas generadoras de residuos sólidos urbanos (RSU), los cuales aumentan en cantidad y volumen, generados por el incremento de la población y de los servicios de turismo que ofrece el estado, sea ofreciendo vida nocturna, zonas y cultura arqueológica, playas, museos, cenotes, pueblo mágico, reservas ecológicas, etc. El turismo es considerado una de las principales actividades económicas en dicha región, creando de esta manera una problemática social, política y ambiental.

El Gobierno del Estado de Quintana Roo a través de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA) y sus Ayuntamientos, ha puesto interés en atender dicha situación, enfocándose en la elaboración de diversos programas tales como, *Programa para la Prevención y la Gestión Residuos del Estado de Quintana Roo*, *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*, *Ley para la Prevención y la Gestión Integral de Residuos del Estado de Quintana Roo*, *Programa de Playas Limpias*, adoptando bases legales pero insuficientes para el desarrollo pleno de la prestación del servicio de limpia, recolección y tratamiento de residuos en sus sitios de disposición final, establecidos por la *Secretaría de Desarrollo Social y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*¹.

De la misma manera se ha actuado en el Municipio de Bacalar, poseedor de distintos atractivos turísticos, se han puesto en marcha diferentes programas para fomentar el desarrollo sustentable establecido en su *Plan de Desarrollo Municipal 2013 – 2016*, ahora 2016-2018.

¹ *Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA), Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI), Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Secretaría de desarrollo Social (SEDESOL).*

Por otra parte, en las *Leyes de Desarrollo y Gestión de RSU*, se menciona la importancia y las generalidades que se deben realizar para llevar a cabo una buena GIRSU, se destaca el *Manual de Instrucción de la Recolección de Residuos Sólidos de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)*, mismo que servirá para el desarrollo del presente escrito, sumado a ello se ha investigado algunos métodos de aplicación de sistemas de ruteo, tales como el problema el agente viajero y el problema del cartero chino, los cuales han sido aplicados en otras zonas logrando ahorros en tiempo y dinero, obteniendo una cobertura aceptable, lo cual se puede denominar como un sistema más eficiente en materia de la GIRSU.

La GIRSU se puede dividir en etapas a nivel general como se observa en la Figura 1.



Figura 1 Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos, Elaboración propia.

Dos de las etapas centrales de la GIRSU son la recolección y el transporte, ya que por sí solas, representan el mayor gasto, Jorge Jaramillo (2009)² señala que alrededor del 60 al 80% del costo total, por tal motivo es necesario una buena eficiencia de estas fases, problema que también se identificó durante la visita de campo al municipio de Bacalar.

Con la finalidad de reducir costos, es necesario revisar las herramientas disponibles para definir las mejores rutas en un sector determinado de una población. Actualmente se utilizan los Sistemas de Información Geográfica (SIG por su nombre en inglés, Systems Information Geographic) como herramienta básica para llevar a cabo tal fin, no así para el caso del municipio, sin embargo, se hará uso de los mismos en la resolución de la problemática en el municipio de Bacalar.

1.2 Justificación

Este estudio responde a la necesidad del Municipio de Bacalar de contar con una herramienta para planear la prestación del servicio de recolección de RSU con eficiencia con el fin de contribuir al desarrollo sustentable de municipio atendiendo ámbitos económicos, ambientales y sociales, con ello también se da la pauta para cumplir con los requisitos solicitados en el *Diario Oficial de la Federación*³ para la permanencia del municipio en el programa Pueblos Mágicos de México (conservación de los recursos naturales y buena imagen), razón por la cual el municipio ha llegado a ser un sitio turístico dentro de la República Mexicana, en otras palabras, es un proyecto orientado a mejorar parte de la GIRSU (recolección y transporte) aunado a la localización de una estación de transferencia debido a los largos recorridos que se deberán recorrer.

² Jaramillo. J. (2009). *Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (GIRSM)*, Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia.

³ *Diario Oficial de la Federación*, 26/09/2014.

1.3 Objetivo

El propósito de esta investigación es el diseñar un sistema de rutas para la recolección de RSU en las principales localidades del municipio de Bacalar y localizar una estación de transferencia, adoptando la visión del Plan de Desarrollo del Municipio de Bacalar para fomentar el desarrollo sustentable de dicho lugar, mediante la mejora en la cobertura de recolección, disminución de tiempos de recolección y menores costos de recolección.

El análisis, la solución, la presentación de resultados y la conclusión a la problemática se llevará a cabo mediante el uso de herramientas matemáticas de ingeniería tales como el problema del agente viajero (TSP), el problema del cartero chino (CPP), el problema de cobertura para la localización de servicios y el uso de Sistemas de Información Geográfica.

1.3.1 Objetivos particulares

Digitalizar y mapear la generación de residuos sólidos en un Sistema de Información Geográfica.

Determinar las zonas de recolección en función del equipo con que se cuenta en la zona y seleccionar el método de recolección en función de las características de la generación de los RSU.

Analizar la metodología para el diseño de rutas de recolección utilizando Sistemas de Información Geográfica integrando las variables de distribución de la generación.

Mejorar el sistema de rutas de recolección de RSU actual.

1.4 Resumen del caso de estudio

Bacalar es un municipio ubicado en la zona centro del Estado de Quintana Roo (QR). Tiene un territorio de 160 km² y un total de 36,747 habitantes y 57 comunidades (29 indígenas).

GIRSU	Instancias involucradas				
Etapas	Planeación	Construcción o ejecución de obras y proyectos	Conservación o mantenimiento	Regulación y reglamentación	Operación
Generación	No aplica	No aplica	No aplica	Coordinación de Servicios Públicos	No aplica
Recolección	Dirección de Obras Públicas	Coordinación de Obras Públicas y Desarrollo Urbano	Oficialía Municipal	Regulación y Reglamentación municipal	Coordinación de Servicios Públicos
Transferencia	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Transporte	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
Disposición final	Coordinación de Servicios Públicos	Dirección de Obras Públicas	Coordinación de Servicios Públicos	Regulación y Reglamentación municipal	Coordinación de Servicios Públicos

Tabla 1 Instituciones involucradas en la GIRSU del municipio de Bacalar. Elaboración propia.

El municipio de Bacalar es considerado urbano pequeño, de acuerdo al tamaño de su población, y se clasifica como rural de acuerdo a la condición de urbanización de la población.

Gestión de los residuos sólidos urbanos	
Recolección	La recolección domiciliaria de RSU sola se realiza en la cabecera municipal. Existen cuatro rutas de recolección, zona centro y zona costera Las localidades distintas a la cabecera no cuentan con servicio de recolección y sus residuos son llevados a tiraderos clandestinos o son quemados Los Residuos Peligrosos Biológico Infecciosos (RPBI), generados por las unidades médicas de la Secretaría de Salud del Estado de QR, IMSS y por los servicios de salud privados son recolectados por las empresas Medam y Ecomayab o por el servicio de limpia del ayuntamiento con el resto de la basura Los residuos peligrosos generados por las estaciones de gasolina, son recolectados por empresas privadas autorizadas por PEMEX
Transferencia	Los camiones recolectores van directamente a descargar al sitio de disposición final, por lo que no existe una fase de transferencia
Transporte	Al no haber transferencia, no es necesaria una fase de transporte
Disposición final	En el municipio de Bacalar el relleno sanitario tipo C que se encuentra en uso, tiene un área aproximada de 3 hectáreas, se reciben de 10 a 11 toneladas diarias, solamente de la recolección que hace el Municipio En el municipio existen muchos sitios de disposición final no controlados. Se trata de lugares que cada localidad ha asignado para la disposición de sus residuos. Estos tiraderos se han generado como consecuencia de la falta del servicio de recolección y disposición final por parte del Municipio
Identificación de proyectos y medidas de mejoras	Como resultado del análisis de la situación actual y de la problemática descrita, fue posible identificar las principales carencias que enfrenta la población del municipio de Bacalar en materia de infraestructura para recolección y disposición de residuos sólidos urbanos

Tabla 2 Fases de la GIRSU en el municipio de Bacalar. Elaboración propia.

Nombre del Proyecto identificado	Población beneficiada	Monto total de inversión (pesos con IVA)
Reestructuración de rutas de recolección domiciliaria	11,048	\$217,500
Diseño de rutas de recolección para localidades distintas a la cabecera municipal	10,477	\$290,000
Adquisición de dos vehículos recolectores para la cabecera municipal	11,048	\$4,290,000
Adquisición de un vehículo recolector para recolección en las localidades	10,477	\$2,145,000
Clausura del sitio de disposición final en Limones	2,535	\$1,911,497
Clausura del sitio de disposición final en Pedro Antonio Santos	497	\$70,875
Clausura del sitio de disposición final en Chacchoben	728	\$2,389,371
Clausura del sitio de disposición final en Lázaro Cárdenas	539	\$2,953,131
Clausura del sitio de disposición final en Miguel Hidalgo y Costilla	676	\$147,657
Clausura del sitio de disposición final en San Isidro la Laguna	860	\$147,657
Monto total de la inversión		\$14,562,688

Tabla 3 Identificación de proyectos y medidas de mejora en el municipio de Bacalar. Elaboración propia.

Capítulo 2 Marco contextual

“Los residuos generados por los grupos humanos siempre existieron, pero su presencia, en tanto problema ambiental, es un fenómeno reciente. La problemática de la basura se refiere explícitamente a dos fenómenos íntimamente relacionados; La expansión humana que se expresa en la ocupación, explotación y predominio de la especie en prácticamente todos los ecosistemas y rincones del planeta y; La lógica de producción-consumo industrial-capitalista”. Guzmán. M. Macías. C. (2011)⁴

2.1 México en la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU)

La producción excesiva de RSU es un problema global que afecta el estado del ambiente, la calidad de vida de las comunidades y el desarrollo de la misma, impidiendo ofrecer atractivos turísticos, limitando así las oportunidades de desarrollo y crecimiento de la población, sumado a ello se tiene la derrama económica que se debe realizar para la correcta GIRSU.

A nivel gubernamental, México enfrenta entre sus más grandes retos el de garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar. Ante la amenaza que representa la generación y disposición inadecuada de un volumen cada vez mayor de residuos, existe la obligación de revisar las políticas y la legislación en la materia, buscando mejorar los instrumentos de gestión y manejo de residuos.

La situación respecto a la generación de residuos cambia en nuestro país en la medida que los procesos de industrialización y de apertura comercial lo hacen, así como los cambios en los patrones de producción y de consumo han cambiado en la cantidad y composición de los RSU.

Tradicionalmente se le asigna la tarea de la GIRSU al Estado y es de ellos la responsabilidad de limpieza de áreas públicas y el servicio de recolección de RSU generados en casas habitación, en el caso de los municipios, la *Constitución Política Mexicana*⁵ pasa esta responsabilidad al Ayuntamiento, siendo éstos quienes realizan la operación de limpieza, mediante un organismo creado para tal efecto o a través de concesiones otorgadas a empresas particulares bajo un esquema de recolección.

Un factor importante del problema de la GIRSU además de la insuficiencia de los sistemas de recolección y el tratamiento de RSU, son los malos hábitos y poca conciencia de la población, el consumismo, lo cual genera un impacto ambiental negativo ya que esto aumenta la cantidad de RSU generados a nivel mundial.

En el caso de la cultura en la ciudadanía, existen “medidas” que se llevan a cabo en países más desarrollados, por ejemplo Alemania, en el cual, existen contenedores de basura para cada tipo de desecho, no se compran bolsas de plástico en supermercados, la basura que se genera al comprar

⁴ Guzmán. M. Macías. C. *The management of municipal solid waste: an anthropological approach*. 2011.

⁵ Título Quinto – De los Estados de la Federación y del Distrito Federal. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Artículo 115.

un producto perecedero o de consumo rápido puede ser regresado al vendedor e inclusive se otorgan descuento en la siguiente compra.

La mayor cantidad de los desechos generados en México provienen de las grandes ciudades o áreas metropolitanas, los municipios generan un porcentaje menor de residuos sólidos (RSU) a nivel nacional, sin embargo, esto no quiere decir que se tenga un excelente nivel de servicio referente a la GIRSU o que se encuentren en una situación óptima, en realidad de la totalidad de los municipios en el territorio mexicano, el *Diagnóstico Básico Extenso* (2014)⁶ establece que solo el 5 % de ellos realizan una adecuada GIRSU.

<i>Proporción de la población que recibe un servicio periódico (mensual, semanal o diario) de recolección de residuos sólidos urbanos en la vivienda respecto a la población total.</i>		<i>Porcentaje de municipios que declaran depositar residuos sólidos urbanos en sitios de disposición final controlados respecto al total de municipios que cuentan con sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos.</i>	
AÑO	PORCENTAJE	AÑO	PORCENTAJE
2012	99.36	2012	17.7
2014	99.43	2014	22.34

Tabla 4 Proporción de la población con acceso a la recolección de residuos y porcentaje de municipios con disposición adecuada de residuos sólidos. Elaboración propia con base en el Sistema Nacional de Información Geográfica y Estadística (SINEG).

El objetivo de la prestación del servicio es proteger la salud pública, la imagen del paisaje, el cuidado del medio ambiente, sin embargo, asociados a estos objetivos primordiales del servicio, están algunos objetivos del estado y en particular del organismo operador del servicio, los cuales son proteger la salud pública y el medio ambiente al menor costo posible, lo cual significa que el servicio mencionado, se debe ofrecer de manera eficiente.

2.2 Generación y principales generadores de residuos sólidos urbanos (RSU) en México

De acuerdo con la Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, (SEDESOL, 2013), Consejo Nacional de Población (CONAPO), Proyecciones de la población de México 2010-2050, se concluye que la generación de RSU se incrementó notablemente en los últimos años, 48% entre 1997 y 2012, pasando de 29.3 a 42.1 millones de toneladas lo cual es el resultado del crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas y el cambio en los patrones de consumo, además el volumen aumentó 3 veces más entre 1950 y 2012, pasando de 300 a 990 gramos y en promedio 3.3 kilogramos más por habitante por año, lo que corresponde a 46 millones de ton/día y 1.016 kg/hab/día para el año 2016⁷ a nivel país.

⁶ www.gob.mx/inecc, Residuos sólidos urbanos, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).

⁷ Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, (SEDESOL, 2013), Consejo Nacional de Población (CONAPO), Proyecciones de la población de México 2010-2050.

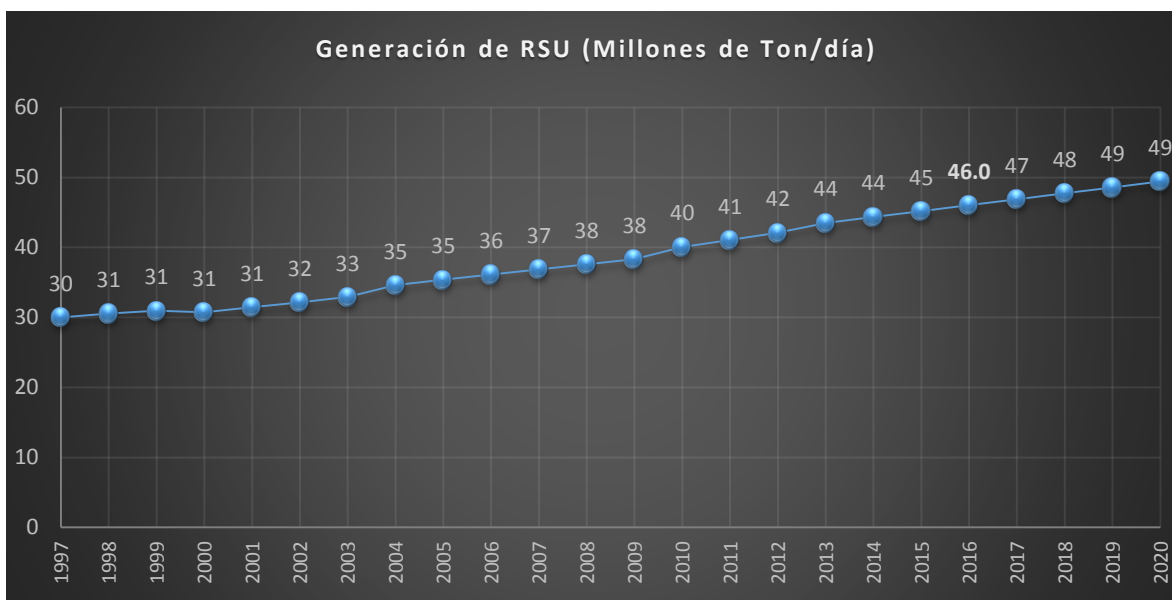


Figura 2 Generación diaria de RSU en México. Elaboración propia a partir de datos de CONAPO, SEDESOL y protecciones de México.⁸

2.3 Generación de RSU por tipo de localidad

De acuerdo al tamaño de las localidades, las zonas metropolitanas generan el mayor volumen de RSU, seguidas por las ciudades medias, las ciudades pequeñas y las localidades rurales o semiurbanas.

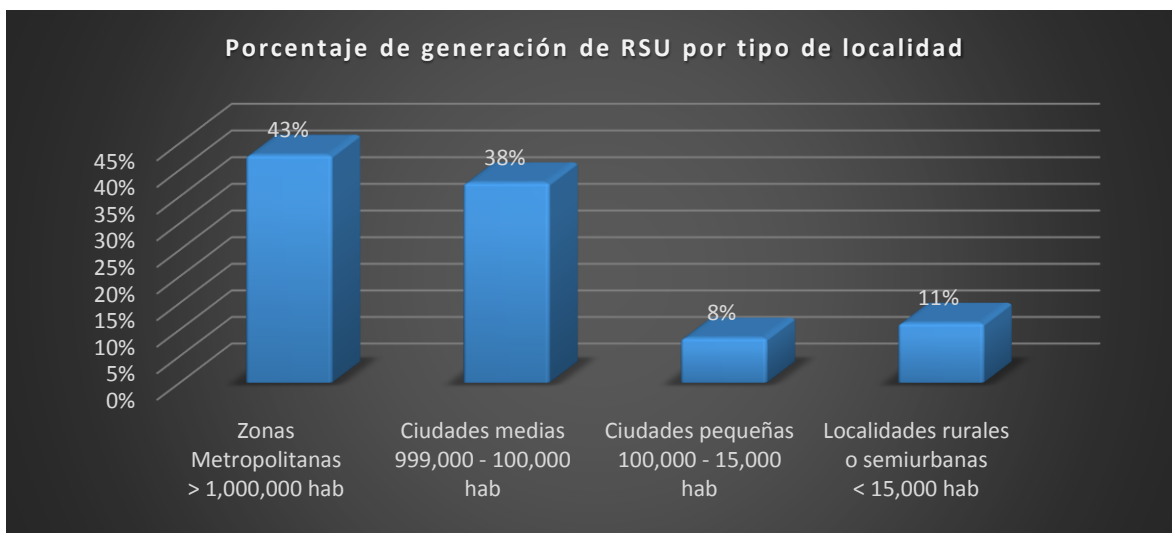


Figura 3 Generación de RSU por tipo de localidad. Elaboración propia a partir de SEDESOL e INEGI.⁹

⁸ Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. SEDESOL. México. 2013, Consejo Nacional de Población (CONAPO). Proyecciones de la población de México 2010-2050 y estimaciones 1990-2009. México.

⁹ Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, SEDESOL, Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI.

Las entidades federativas que generaron los mayores volúmenes de RSU en 2012 fueron el estado de México, la Ciudad de México y Jalisco, mientras que las que registraron los menores volúmenes fueron Nayarit y Tlaxcala, Baja California Sur, Campeche y Colima, Quintana Roo se sitúa en los estados con menor generación de RSU a nivel nacional situándose en la posición 23 en 2012.

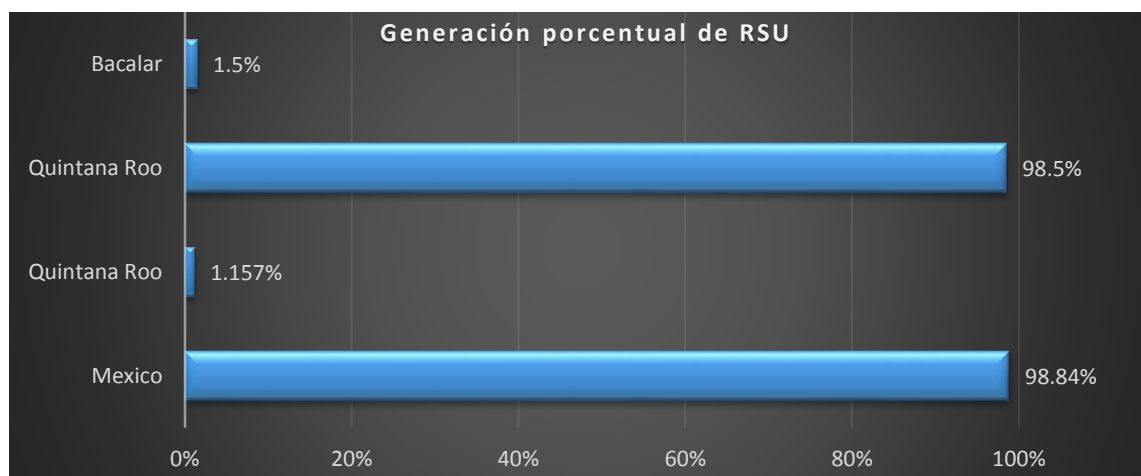


Figura 4 Generación de RSU por Entidad Federativa. Elaboración propia¹⁰

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 y 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%.

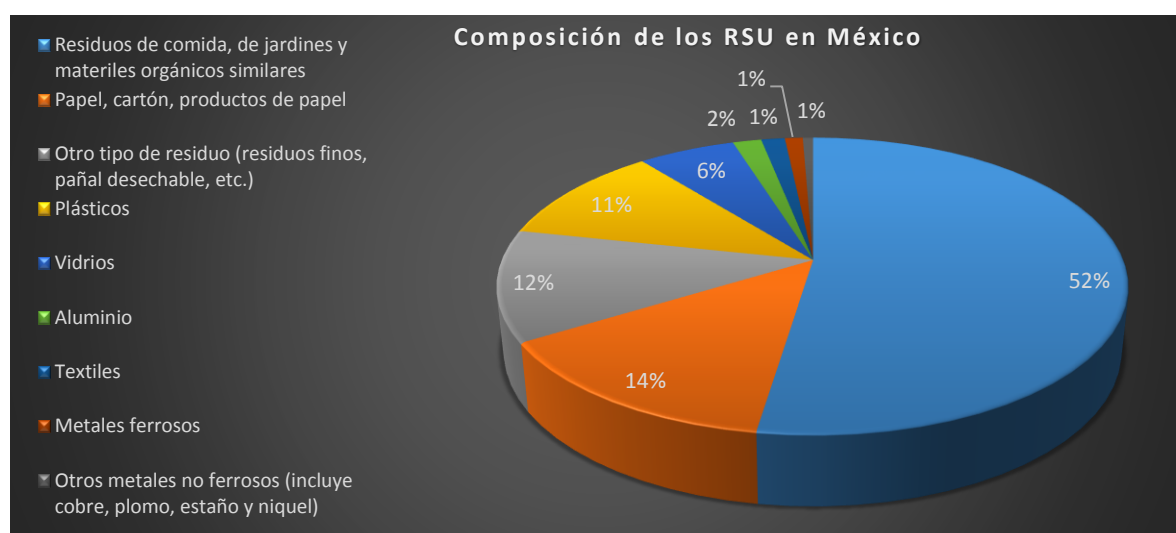


Figura 5 Composición de los RSU en México. Elaboración propia¹¹

¹⁰ IBID.

¹¹ IBID.

2.4 Cobertura de la recolección de RSU

Como respuesta a la GIRSU, la institución competente se encarga de poner en operación rutas, camiones, plantas de tratamiento, personal de limpieza, etc. y de acuerdo al *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales*¹² se calcula que se recolecta el 87% de las toneladas por día generadas. La cobertura en zonas metropolitanas y ciudades de tamaño medio va del 60% al 90%, mientras que en pequeñas áreas urbanas municipales, la cobertura va del 50% al 80%.

2.5 Costos de la recolección de RSU

Los costos son variables (\$30 - \$640 por tonelada en ciudades medias) y dependen de la eficiencia en el llenado del vehículo (el equipo más utilizados es el camión compactador con capacidades de 10m³ a 15m³, los cuales recolectan de 4ton/viaje a 10ton/viaje, el estado físico del equipo, la cantidad recolectada, la densidad poblacional y el diseño de rutas de recolección.

En la actualidad, existen 113 sistemas de transferencia en el país los cuales operan en distintos esquemas. Los costos como en las etapas anteriores, presentan grandes variaciones; en general representan el 29% del monto total del servicio integral y van de 22 hasta 145 \$/ton.¹³

Por otra parte, el costo por el servicio de limpia no suele recuperarse, ni suele incluir las externalidades o costos ambientales resultantes de la generación y manejo de los residuos, con lo cual los generadores de basura no pagan un precio justo por la cantidad de residuos que generaran, pasando así la factura a los impuestos pagados por la población.

Costos de recolección de residuos sólidos urbanos			
Costos de recolección/Países	Bajos ingresos	Medianos ingresos	Industrializados
US\$/ton	15 - 30	30 - 70	70 – 120
Mano de obra	15	40	70
Operación y mantenimiento (porcentaje del costo)	45	30	20
Costo de recolección (US\$/per cápita/año)	3 a 6	9 a 21	42 a 72

Tabla 5 Elaboración propia a partir de la Gestión Integral de los residuos sólidos municipales (GIRSM), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

El incentivo hacia los grandes generadores se realiza por medio de minimizar y aprovechar el valor de los residuos que genera y se le hace pagar por su manejo en forma proporcional al volumen y la peligrosidad de los mismos. En países de gran desarrollo existen tres componentes simples que los fabricantes deben tener en cuenta, tales como evitar desechos, recuperar residuos y eliminar residuos de una forma amigable al medioambiente.

¹² *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2013, RSU, INEGI.*

¹³ *IBID.*

2.6 Problemática y oportunidades de la GRSU

El manejo de los RSU en México es insuficiente e inadecuado, en la mayoría de los municipios no se cuenta con la infraestructura para prestar el servicio de recolección y disposición final de los RSU, además existen deficiencias y limitaciones en la prestación del servicio sin dejar de lado las pérdidas de oportunidades para el aprovechamiento de RSU el cual es escaso comparado con países de igual o mayor desarrollo.

Uno de los principales problemas en la GRSU es la escasez del número de rellenos sanitarios los cuales solo son estrictamente controlados en áreas metropolitanas o ciudades, por parte de los municipios no se dispone de rellenos sanitarios sino de tiraderos a cielo abierto y no controlados en su mayoría.

Otro de los problemas que se presenta en México es el parque vehicular, en las ciudades se dispone de un mejor servicio comparado con los municipios en donde en numerosos casos los vehículos son insuficientes, obsoletos e inapropiados.

Por otra parte, un volumen cada vez mayor de residuos implica el agotamiento de los recursos naturales de los cuales se extraen los materiales utilizados como insumos en la producción de bienes de consumo y que van a parar a la basura en forma de residuos, lo que futuramente generaría una escasez de los recursos.

Se estima que en México, entre 45% y 75%¹⁴ de los materiales que van a parar a tiraderos a cielo abierto o a rellenos sanitarios es recuperable lo que se traduce en una oportunidad de creación de negocios y empleos a partir de la valorización de los materiales que actualmente se desechan.¹⁵

Otra oportunidad desaprovechada es el valor calorífico de materiales desechados el cual podría utilizarse en la generación de energía como lo hacen los países de alto grado de desarrollo.

Asimismo, es común observar que los servicios de limpieza carecen de la infraestructura y los recursos suficientes para operar adecuadamente, contribuyendo a crear graves problemas de contaminación del agua, aire y suelo.

Considerando el potencial económico de la basura, resulta que muchos individuos en condiciones de pobreza extrema que viven de la “pepena”, lo hacen en condiciones inseguras, insalubres y carentes de prestaciones, siendo que podrían trabajar en mejores condiciones por medio de organismos, asociaciones, concesiones u otro en los que se pudiera emplear a estos trabajadores.

El tema de la GRSU engloba un sinnúmero de derivaciones, para los fines propios de la tesis, se mencionan los factores más importantes que afectan la misma esto se resume en la Tabla 6.

¹⁴ Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas, SEDESOL, Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI.

¹⁵ Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

	FACTORES	RELACIÓN
PROBLEMA	Infraestructura	No se cuenta con la adecuada o suficiente infraestructura para la GRSU. No se cuenta con infraestructura. La infraestructura está en malas condiciones o es obsoleta.
	Tamaño de la población	A mayor población, mayor cantidad de RSU. Mayor dispersión de los RSU, mayor complejidad de recolección.
	Aumento de la población	Mayor cantidad, mayor complejidad y mayores costos en la GRSU.
	Desarrollo/Urbanización y educación/cultura (hábitos)	A medida de la entrada de nuevos productos tecnológicos, mayor generación de RSU. La mayor o menor biodegradabilidad de los RS tiene relación con el desarrollo/urbanización/ de nuevas tecnologías en las ciudades. La cultura de la población es básica y repercute directamente en la GRSU ya que de sus hábitos depende el buen funcionamiento de cualquier proyecto social.
	Tamaño de la ciudad	A mayor tamaño, mayor generación de RSU. A mayor tamaño de la ciudad, mayor recorrido de los camiones recolectores, por lo tanto mayores costos y menor eficiencia de recolección.
	Desarrollo social	Desarrollo humano ¹⁶ vs pobreza multidimensional, a mayor desarrollo humano, mayor generación de RSU. Salud, riqueza, educación, marginación.
	Falta de responsabilidad gubernamental	Normativa vigente en la población. Normativa vigente en las empresas Corrupción

*Tabla 6 Relación entre los factores que afectan la generación de RSU y el problema que representan.
Elaboración propia.*

Para cada uno de los factores, se presenta una determinada lógica en el proceso de generación de RSU, es decir, de qué manera se generan los RSU, ésta se presenta en la Figura 6.

¹⁶ Por definición el desarrollo humano es el proceso por el cual una sociedad mejora las condiciones de vida de sus habitantes a través del incremento de bienes y servicios con los que se pueden cubrir sus necesidades básicas y complementarias y de la creación de un entorno social en el que se respeten los derechos humanos de todos ellos, sin embargo, el proceso de desarrollo tiene consecuencias subyacentes en la generación de RSU.

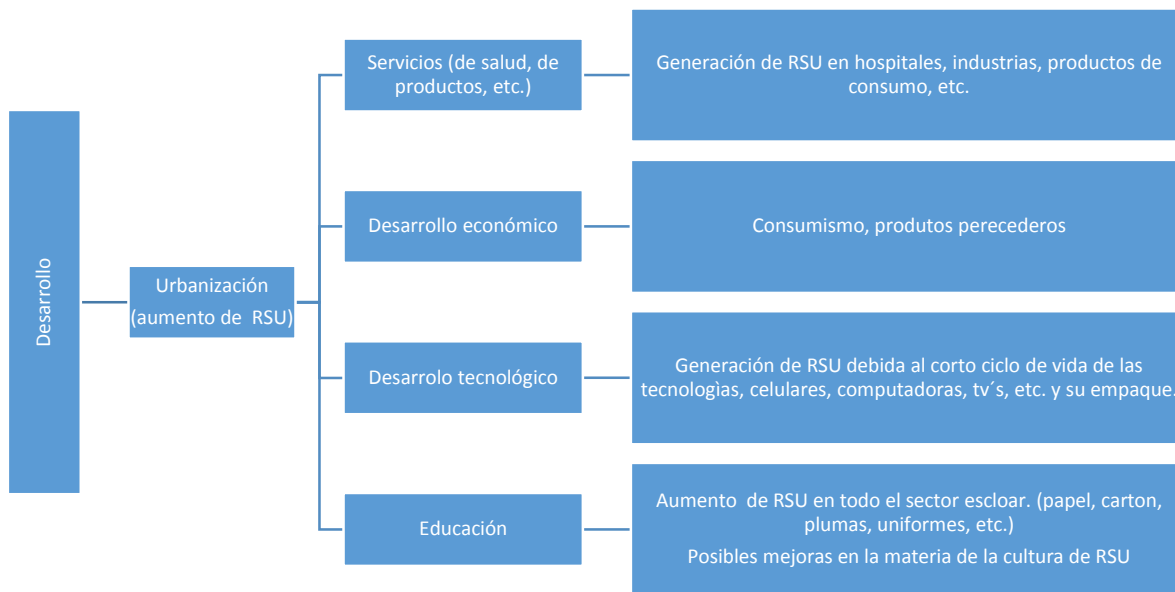


Figura 6 Ejemplo de la lógica de la generación de RSU por medio del factor desarrollo humano. Elaboración propia.

Una de las principales causas de existencia de la GIRSU, como ya se ha mencionado es la preservación de la salud de la población, es por ello que en este apartado se presentan las consecuencias de una mala gestión de RSU, de las que destacan las enfermedades (epidemias y pandemias).

Un ejemplo de las consecuencias que se pueden llegar a tener debido a la mala gestión de RSU se puede visualizar en lo que ocurrió en Europa en el siglo XIV, la peste bubónica muestra la despreocupación y el nivel de gravedad que puede producir la mala, ineficiente o nula recolección de RSU, la cual causó la muerte de 25 millones de personas en tres años Zahler (2009).¹⁷

En la actualidad se pueden observar los siguientes problemas;

- Contaminación de aguas y suelos. Por medio del alcance de las superficies hidráulicas o por vías subterráneas por medio de lixiviados.
- Contaminación atmosférica. Causada por los residuos particulados, el ruido y el olor.
- Mala imagen / paisajes. La acumulación en lugares no aptos causa efectos paisajísticos negativos, además de poder producir accidentes, tales como explosiones o derrumbes.
- Salud mental. Deterioro anímico y mental de las personas directamente afectadas.

¹⁷ Zahler, Diane. (2009). *The Black Death*. Minneapolis: Twenty-First Century Books. SBN10 082259076X.

Ventajas	Desventajas
La preocupación principal es mantener una ciudad limpia.	Falta de fondos para contar con equipo, personal, mantenimiento adecuado.
La municipalidad es directamente responsable ante el público.	Falta de personal capacitado, por lo tanto baja eficiencia y altos costos.
Con una buena organización pueden obtenerse menores costos.	Un exceso (ignorancia) en la burocracia puede dificultar un servicio óptimo.
Existe más flexibilidad para atender situaciones de emergencia o la ampliación de servicios.	

Tabla 7 Ventajas y desventajas a nivel municipal (Bacalar) de la GIRSU. Elaboración propia.

2.7 Municipio de Bacalar, introducción al caso de estudio

Del Plan de Desarrollo del Municipio de Bacalar (2013-2016)...

“...los municipios del país que generan condiciones para mantener una productividad sostenible, han podido generar prosperidad y establecer las bases para que la población tenga la oportunidad de desarrollarse en plenitud”.

“...la productividad aumentaría si la eficiencia de cada proyecto económico se eleva, cuando la innovación y el desarrollo tecnológico se reflejan en una capacidad de los proyectos para generar más con menos”.

...por lo tanto requerimos políticas públicas y estrategias que ayuden a incrementar de manera sostenible el potencial del desarrollo municipal en beneficio de toda la población. H. Ayuntamiento de bacalar. Plan municipal de desarrollo 2013-2016”.

La propuesta anterior y razón de ser del presente trabajo, otorga la pauta para entender lo que el Ayuntamiento del Municipio de Bacalar busca sustancialmente, esto es, el desarrollo sustentable del mismo, lo que desemboca en un mejoramiento del nivel de la calidad de vida, cuidado del atractivo turístico y el cuidado de la derrama económica para la GIRSU.

La trascendencia de este proyecto se puede observar en la Figura 7, la cual representa cómo afecta el mejoramiento en el sistema de la GIRSU en el municipio de Bacalar y cómo es que estas acciones están enfocadas al desarrollo del municipio.

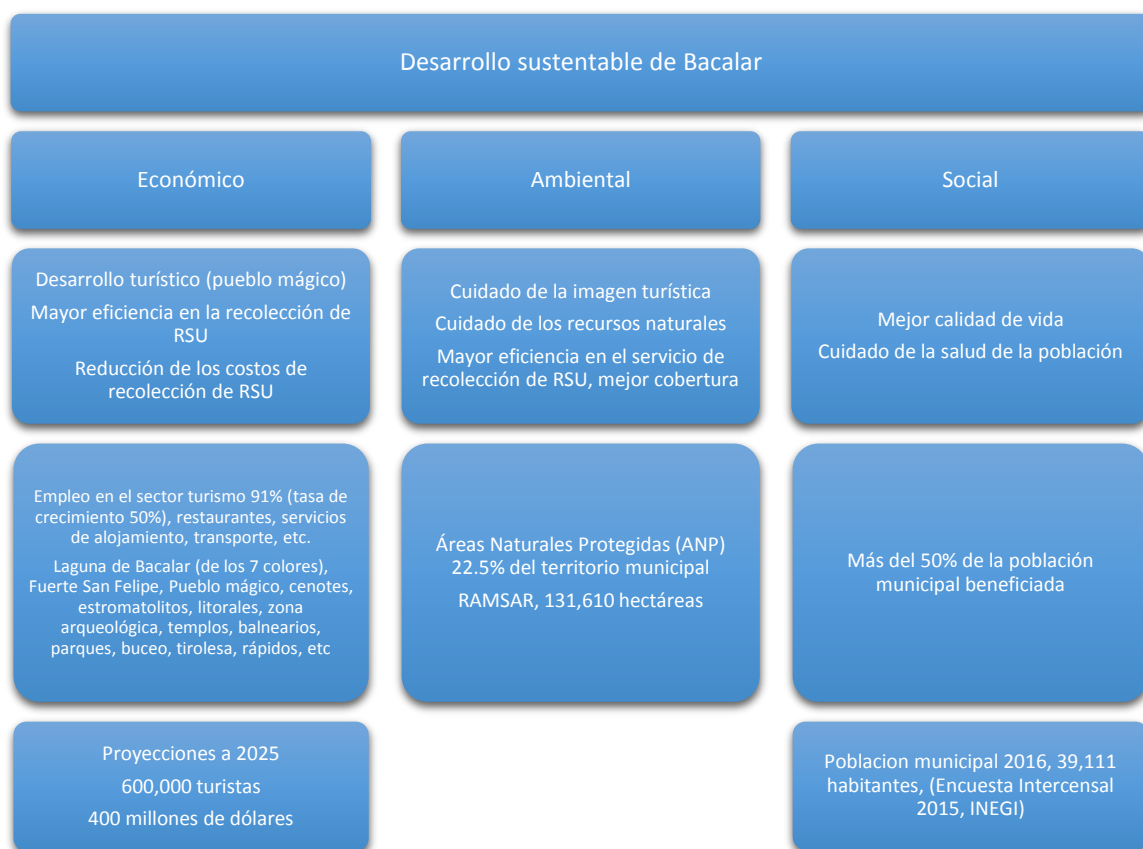


Figura 7 Trascendencia y contribución a los pilares del desarrollo sustentable de Bacalar. Elaboración propia.

2.7.1 Programas de desarrollo y cuidado ambiental

Por otra parte, una porción del municipio de Bacalar, se encuentra inscrito en el programa *Pueblos Mágicos de México* (ingreso del pueblo mágico de Bacalar en 2006¹⁸, Secretaría de Turismo, SECTUR) de México, el cual está dirigido a la conservación de la cultura de México, cuyo fondo es crear una oferta turística hacia el interior del país.

De acuerdo al *Diario Oficial de la Federación*¹⁹, se encuentran establecidos lineamientos generales para la incorporación y permanencia al programa *Pueblos Mágicos de México*, el cual refiere al mismo como un programa de desarrollo turístico integral para localidades que en un diferente nivel de desarrollo, organizan diversas acciones de carácter económico, social y ambiental con el propósito de mejorar las condiciones de vida de una localidad turística.

¹⁸ Ingreso del Municipio de Bacalar al programa pueblos mágicos por considerarse el lugar donde se dio el primer asentamiento maya de toda la región, por contar con un monumento histórico (Fuerte de San Felipe Bacalar) construido en 1729, y ejemplo de la arquitectura militar de la Nueva España.

¹⁹ Diario Oficial de la Federación DOF. 26/09/2016.

Cabe destacar que no se hace mención específica acerca de la GIRSU en dicha publicación del DOF, sin embargo, esto no significa el desentendimiento de la misma, al contrario, es un requisito que se da por sentado.

Sumado a ello, el municipio de Bacalar se encuentra inscrito en otros dos programas de gran importancia nacional e internacional, descritos en la Tabla 8.

PROGRAMA	ZONA INSCRITA EN EL PROGRAMA
Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional, especialmente como hábitat de aves acuáticas (RAMSAR).	RAMSAR 1332, Bala'anK'aax
Áreas Naturales Protegidas (ANP)	Distribuidas en el territorio correspondiente al municipio de Bacalar (1,612.25 km ² de territorio protegido, 22.5% de su espacio geográfico) tiene un sentido de conservación, restauración y desarrollo como áreas de conservación de la biodiversidad.
Pueblos Mágicos	Pueblo mágico de Bacalar

Tabla 8 Programas en los que actualmente se encuentra inscrito el Municipio de Bacalar

2.7.2 Desarrollo turístico

De acuerdo a la *Agenda de Competitividad Turística de México* (2014), económicamente el turismo en México representa el 8.9% del PIB nacional (es la tercer fuente de divisas) y la República se encuentra dentro de los primeros 100 lugares del Ranking Mundial de Competitividad Turística.

Además, Bacalar es un municipio meramente turístico, el empleo en este sector es la fuente principal de ingresos del municipio, el 91% de la población económicamente activa (PEA) pertenece a él y la tasa de crecimiento del mismo es del 50%, además se espera una derrama de 400 MDD y una llegada de 600,000 turistas para el año 2020.

Cifras de lo mencionado con anterioridad se pueden observar en la Tabla 9, la cual fue elaborada con base en el *Diagnóstico de Pueblos Mágicos, Indicadores de turismo de Bacalar, Quintana Roo 2014 y Retos y Perspectivas del Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos y Manejo Especial en el Estado de Quintana Roo 2011-2013*.

TURISMO		
Divisas generadas por turismo (Quintana Roo)	4500	MDD
Ingreso turístico del total nacional (Quintana Roo)	30	%
Empleo en el sector turismo (Municipio de Bacalar)	91.12	%
Tasa de crecimiento del empleo en el sector turismo (Municipio de Bacalar)	50.23	(Para el cálculo de este indicador, se tomó en cuenta la PEA (2010) y la población ocupada en el sector terciario, que comprende: Comercio; restaurantes y servicios de alojamiento; transportes, comunicaciones, correo y almacenamiento; servicios profesionales, financieros, corporativos, sociales y de gobierno)
Índice de satisfacción del turista	6.7	Rango del 1 al 10, siendo 10 la puntuación que refleja una satisfacción mayor al turista
Ocupación promedio anual hotelera	46	%
Número de hoteles	35	Equivalente a 328 habitaciones
Movimiento anual aéreo de pasajeros	147,376	
Visitantes anuales	320,104	
Derrama económica (MDD)	185	

Tabla 9 Turismo en el municipio de Bacalar

Por otra parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que una ciudad saludable es un proceso consciente que lleva a proteger la salud y no solo mejorarla, por lo tanto la salud no es un simple resultado si no el proceso de múltiples actividades encaminadas al bienestar social, físico, emocional y económico de la sociedad, mismas que se encuentran en la *Agenda de Competitividad Turística del Destino Bacalar*²⁰, quienes en un ejercicio más amplio han reconocido distintas problemáticas en los cuales se destaca la falta de un sistema de GIRSU, esto puede ser muestra en la Tabla 10 y algunos procesos en los cuales el diseño de un sistema de GIRSU tendría gran trascendencia.

La recopilación de toda la información hasta ahora manejada permitió la entrada de diversos proyectos en distintos sectores, evidentemente este documento se basa en ella y el área en los que se tuvo cabida fue en el sistema de manejo y recolección de residuos sólidos urbanos, sumado a ellos, del *diagnóstico del sector recolección y disposición de los residuos sólidos urbanos del municipio de Bacalar*²¹ también refleja la falta de un sistema de GIRSU en el municipio de Bacalar.

En la Tabla 11, se pueden observar los proyectos que son el resultado del diagnóstico de las problemáticas anteriormente descritas.

²⁰ *Agenda de Competitividad Turística del Destino Bacalar (ACDT Bacalar)*, Secretaría Estatal de Turismo del Gobierno del Estado de Quintana Roo (SEDETUR).

²¹ *Diagnóstico del sector recolección y disposición final de los residuos sólidos urbanos. Banco de Proyectos Municipales. Municipio de Bacalar, Quintana Roo. Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS), 2015.*

Problemática	Poco mantenimiento en la infraestructura turística a pesar de tener el distintivo de pueblo mágico.	Insuficiente el servicio de aguas residuales y pluviales	Se carece de un relleno sanitario que cumpla con la normatividad ambiental vigente.	Falta fomentar la educación ambiental institucional y ciudadana	El reglamento de imagen urbana se modifica o se aplica de diversas maneras al cambio del gobierno local
Causas	Falta limpieza, respeto y orden en la infraestructura turística.	La actividad turística y de la comunidad residente genera altos volúmenes de RSU.	La actividad turística genera altos volúmenes de RSU y La capacidad de los rellenos sanitarios son limitados	Falta fomentar una educación ambiental en la reducción, reutilización y reciclaje de Residuos Sólidos Urbanos.	Desconocimiento de las autoridades de los Reglamentos. Poca participación social en el cuidado de la imagen urbana.
Efectos	Los turistas no se llevan una grata impresión del destino a falta de una buena imagen.	Contaminación del agua del manto freático y las lagunas y cenotes.	Contaminación de agua en los mantos freáticos por lixiviados.	Falta una corresponsabilidad ciudadana.	Percepción de descuido en el destino.
Sector	Socio-gubernamental y Turismo	Ambiente	Socio - gubernamental y Ambiente	Socio – Ambiental	Socio - gubernamental

Tabla 10 Identificación de problemáticas en el municipio de Bacalar. Elaboración propia con base en la Agenda de Competitividad Turística del Destino Bacalar (ACDT Bacalar), SEDETUR.

Proyecto	Descripción	Problema a resolver	Acciones a realizar	Metas	Monto de la inversión
Sistema de manejo de residuos líquidos	Generar un plan de manejo ambiental para Bacalar sobre la disposición final de los residuos líquidos. Así como proponer el procedimiento más adecuado para su reutilización, reciclado y vertimiento teniendo en cuenta las leyes vigentes para cada tipo de procedimiento.	Manejo adecuado para residuos domésticos, industriales y hospitalarios, verificando que desde el sitio de generación hasta la disposición final haya un estricto y meticoloso cuidado con el transporte y almacenamiento	Implementar un sistema de recolección Construir una bodega de almacenamiento o	Reducir la probabilidad de ocurrencias de emergencias por materiales y residuos peligrosos Realizar acciones de preparación y perfeccionar los sistemas de respuesta a emergencias por materiales y residuos peligrosos con el fin de disminuir sus consecuencias	120 millones de pesos
Sistema de manejo y recolección de residuos sólidos	El crecimiento poblacional en Bacalar la recolección de los residuos sólidos domésticos se realiza en unidades convencionales: camiones compactadores, camiones de baranda y volquetes. En términos generales, el municipio no posee la capacidad ni cuentan con un plan estructurado para enfrentar sistemáticamente y racionalmente este problema. Se realiza una recolecta para las 22 toneladas de basura de apenas el 50% en dos días, y el otro 50% en los 3 días posteriores. Fines de semana no se tiene el servicio. El cual con la llegada de turistas y visitantes se incrementa.	Mejorar la calidad de servicio de limpieza pública en el destino. Así como fortalecer la capacidad técnica, administrativa y de regulación, del destino y del municipio, para mejorar la operación y administración del Servicio de Limpieza Pública. Además de Fortalecer el marco normativo como salvaguarda del medio ambiente.	Fortificar el mecanismo de recuperación de costos por el servicio de limpieza pública Motivar la inversión privada en el Sector de Residuos Sólidos Corregir problemas ambientales y reducir los peligros para la salud pública	Ampliar el nivel de cobertura Colaborar en la gestión administrativa a fin de introducir un reglamento para el manejo de residuos sólidos, así como preparar planes integrales para el manejo de residuos sólidos y ser un municipio modelo, preservando el cuidado del medio ambiente	40 millones de pesos

Tabla 11 Proyectos identificados en la tarea de la GIRSU del municipio de Bacalar. Elaboración propia con base en la Agenda de Competitividad Turística del Destino Bacalar (ACDT Bacalar), SEDETUR.

Capítulo 3 Marco teórico y metodología

La recolección y transporte de residuos son todas aquellas acciones relacionadas a transportar los residuos sólidos desde su almacenamiento en la fuente generadora hasta el traslado en el sitio de disposición final o a la estación de transferencia, incluyendo la recolección de los mismos con ayuda de un vehículo recolector.

Algunos de los sistemas de recolección en México carecen de rutas de recolección y en lo cotidiano los casos en las cuáles se tienen, éstas se realizan en función de la experiencia de los encargados de los sistemas recolección y los conocimientos de la zona que tengan los operadores de los vehículos.

Para el diseño de rutas de recolección es necesario enfocarse en las características del lugar, del equipo con que se cuenta, de la población, del tipo de servicio que se quiera manejar, del método de recolección a emplear, del tipo de residuos que se tratará y de la generación per cápita de RSU.

3.1 Métodos de recolección

Atendiendo al grado de especialización de los vehículos recolectores utilizados en la prestación del servicio, los métodos de recolección pueden clasificarse en métodos mecanizados, semimecanizados y métodos manuales.

No se puede decir que un método es mejor que otros ya que esto está en función de los Kg producidos, de la población, de los equipos con los que se cuente, entre otros factores que afectan la recolección de RSU.

El método utilizado para llevar a cabo la recolección de RSU en la cabecera del municipio de Bacalar es el de acera con lo cual problema de recolección puede modelar como uno de teoría de redes, el método que se acopla a las características de demanda de recolección de RSU es el principio del llamado problema del cartero chino (o ruteo en arcos), sin embargo, la propuesta del trabajo contempla el estudio de otras localidades incluida la cabecera municipal, por lo cual se empleará en el análisis el problema del agente viajero, TSP (por sus siglas en inglés Travelling Salesman Problem) en todas las localidades rurales y una urbana (Limonas) ya que se intuye que es el mejor método de recolección en las mismas, cabe destacar que en estas localidades no se cuenta con el servicio de recolección, más adelante se hablará de ellas.

Los métodos de recolección mecanizada de RSU más comunes se presentan en la Tabla 12, donde las ventajas y desventajas de los mismos también son descritas.

Método	Tipo de demanda	Participación del usuario	Descripción	Comentarios	Métodos teóricos para solucionarlo
Esquina o parada fija	Discreta	Alta	Los usuarios del sistema llevan sus recipientes hasta donde el vehículo recolector se estaciona para prestar el servicio. Una vez que los usuarios han llegado hasta el vehículo, forman una fila para que un operador les tome el recipiente y lo deposita en el la carrocería.	Es el más económico y es altamente utilizado en la república mexicana.	TSP
Acera (en puerta)	Continua	Media	El personal operativo del vehículo toma los recipientes con basura que han sido colocados por los usuarios sobre la acera con el fin de vaciar el contenido dentro de la tolva de dicho vehículo, regresándolos posteriormente al sitio de la acera de donde los tomaron. Bajas velocidades de recorrido del vehículo en ambos sentidos de la calle. Este método tiene más posibilidades de ser implantado en aquellas localidades que cuentan con calles de doble sentido y de preferencia, con camellones.	Es más costoso que el de esquina Animales domésticos y no domésticos (perros, gatos y ratas), pueden verse atraídos por recipientes con basura sobre la acera, pudiendo dispersar la basura al buscar su alimento resultando la recolección en forma más lenta. Suele recomendarse el uso de bolsas de polietileno herméticamente cerradas, así como el empleo de canastillas elevadas en las aceras donde se colocan los recipientes con los residuos; sin embargo, esto puede involucrar un costo adicional para los usuarios, que no siempre están dispuestos a cubrir.	TSP Cartero chino
Intradomiciliario o llevar y traer	Semicontinua	Baja o nula	Este método es semejante al anterior, con la variante de que los operarios del vehículo recolector, entran hasta las casas habitación por los recipientes con basura, regresándolos hasta el mismo sitio de donde los tomaron, una vez de haberlos vaciado dentro de la caja del vehículo.	Este método de recolección suele resultar más costoso que el de acera y que el de esquina.	TSP Cartero chino
Contenedores	Discreta	Alta	Es semejante al de esquina en cuanto a que el vehículo recolector debe detenerse en ciertos puntos predeterminados para llevar a cabo la prestación del servicio. Puede decirse que este método es el más adecuado para realizar la recolección en centros de gran generación o de difícil acceso; como pueden ser hoteles, mercados, centros comerciales, hospitales, tiendas de autoservicio y zonas marginadas, entre otras.	La localización de los contenedores, deberá disponerse de tal manera que el vehículo recolector tenga un fácil acceso a ellos y que, además, pueda realizar maniobras sin problemas.	TSP

Tabla 12 Métodos de recolección de Residuos Sólidos Urbanos. Elaboración propia.

3.2 Recolección de RSU

3.2.1 Camiones recolectores

En lo posible se sugiere que el vehículo recolector sea factible en cuanto a las características físicas de la localidad y la población, emplear vehículos con gran capacidad, provistos de compactadores herméticos para minimizar costos de recolección y evitar el derrame de líquidos que afectan la salud pública y el ambiente.

Debe elegirse un tipo de camión que sea adecuado para la recolección de los residuos sólidos, ya que no en todos los casos existe facilidad de acceso, penetración, maniobrabilidad y pendiente, requerida para la utilización y máximo aprovechamiento de determinado vehículo.

Carrocería	Descripción
Carga lateral	Se usan para carga mecánica de contenedores o manual con operarios, mediante un par de brazos se toma el contenedor, elevándolo y vaciándolo por la parte lateral de la caja o con los operarios arrojando la basura por un costado del camión.
Carga trasera	Son muy eficientes, la recolección se efectúa en forma más cómoda y menos fatigosa para el personal debido la altura (≤ 1.20 m) de carga. Permiten reducir la flota operaria del vehículo, por tanto los costos de operación general. Se utilizan para un tipo de recolección semi-mecanizada.
Carga frontal	Se usan exclusivamente para la carga mecánica de contenedores, mediante un par de brazos se toma el contenedor, elevándolo y vaciándolo por la parte superior de la caja.

Tabla 13 Tipos de carrocería para vehículos recolectores de carga lateral, trasera y frontal. Elaboración propia.

Los vehículos anteriormente mencionados se disponen en capacidades que varían desde una hasta doce toneladas, además existen sistemas más especializados para la recolección de RSU y otros más rústicos.

3.2.2 Estaciones de transferencia (ET)

Las estaciones de transferencia son centros de recepción de RSU ubicados en el entorno de las poblaciones, cuya finalidad es permitir la descarga de los camiones de recolección de RSU, evitando su desplazamiento hasta el centro de tratamiento.

En ellas los residuos se acondicionan para su traslado posterior mediante contenedores y vehículos específicos de transporte. Con ellas se consigue reducir los tiempos de ejecución de los servicios de recolección de las poblaciones alejadas del centro de tratamiento y se optimizan los costes de transporte, ya que se utilizan equipos más adecuados y aquellos residuos que lo permiten son compactados para aumentar las cantidades transportadas en cada viaje.

Las Estaciones de Transferencia (ET) tienen su razón de ser cuando las distancias entre los puntos de recolección y el punto final de vertido o tratamiento son considerables, y hagan inviable técnica y económicamente que los vehículos recolectores hagan esos desplazamientos para su vaciado. Es entonces cuando surge la necesidad de disponer de puntos intermedios de recolección y se adicionen hasta completar una carga mayor que haga más eficiente el transporte, es decir, que en un solo viaje y empleando medios de mayor capacidad, se transporte un peso en tonelaje neto equivalente a lo que sería la carga de varios camiones recolectores.

Las capacidades de las ET varían desde las 19 toneladas hasta las 80 toneladas, siendo estas últimas destinadas a volúmenes altos de generación y de tipo continuo en la demanda o para una alta generación de RSU y se emplean generalmente en grandes ciudades.

La implementación de éstas se recomienda cuando la distancia desde el punto de recolección hasta el punto de disposición final (SDF) es mayor a 20 kilómetros, el tiempo para llegar al SDF es mayor al 15% de la jornada de trabajo o la población está muy dispersa, específicamente donde se tienen grandes recorridos para levantar pocos desechos, ya que en estos casos se tienen mayores derramas económicas sobre el sistema de GIRSU.



Figura 8 Estación de transferencia, COGERSA

3.2.3 Frecuencia de recolección

La frecuencia consiste en la periodicidad con la que se realiza la recolección de residuos en los principales puntos, como son: domicilios, comercios, industrias, oficinas y hospitales, además es uno de los factores más influyentes para el diseño de rutas de recolección de RSU, la cual deberá contemplar que el volumen acumulado de basura no exceda la capacidad de los camiones recolectores y que el tiempo transcurrido desde la generación de basura hasta la recolección para su disposición final no exceda el ciclo de reproducción de la mosca, además de evitar focos infecciosos y la atracción de animales carroñeros a estos sitios.

Temperatura (°C)	Huevo a Pupa	Huevo a adulta
Promedio de 20	10.1	20.5
Promedio de 28	5.6	10.8
Promedio de 35	5.6	8.9

Tabla 14 Días de incubación y crecimiento de la mosca. Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales. SEDESOL.

Frecuencia de recolección	Descripción y observaciones
Diaria	Los camiones recolectores deben recorrer la totalidad de las rutas diariamente, excepto días de descanso, la basura acumulada se recolecta un día antes o un día después. Esta frecuencia es la que ofrece una mejor imagen del sistema hacia los usuarios pero es el que mayor costo involucra.
Cada tercer día	El camión recolector pasa un día sí y otro no, equivale a pasar tres veces por semana. Los camiones se llenan más rápido dando un recorrido menor, el "costo por tonelada-kilómetro" es menor contra la frecuencia diaria. A mediano y largo plazo, los costos de mantenimiento son menores, también por tonelada de basura transportada.
Dos veces a la semana	Los conceptos indicados anteriormente, referentes al "costo por tonelada-kilómetro", en teoría se abaratan conforme se disminuye la frecuencia de recolección, por lo cual se multiplican los costos generales. Sin embargo, conforme se disminuye la frecuencia en la recolección, se incrementan las desventajas de moscas, animales carroñeros, focos infecciosos y la percepción de un peor servicio por parte de la población aunado a la latente posibilidad de hacer que proliferen los tiraderos clandestinos.

Tabla 15 Frecuencias de recolección de RSU. Elaboración propia con base en el Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales. SEDESOL.

3.3 Problema de localización de instalaciones y servicios (modelos de localización en redes)

La localización de estaciones de transferencia puede ser modelada como un problema de la teoría de la localización de servicios, el cual se plantea como sigue, “*dada la localización de cada usuario, su demanda y los costos (tiempo, distancia, etc.) de transporte en la región de interés, determinar el número de servicios, la ubicación geográfica y la capacidad de cada uno de ellos, de tal forma que se optimicen los costos de transporte, de funcionamiento, fijos de instalación, etc.*” Aceves (2015).²²

²² Aceves. R. *El problema de la localización de servicios.*, Facultad de Ingeniería. UNAM.

Dentro de sus aplicaciones se puede utilizar para la localización de servicios de emergencia, servicios públicos, paradas de autobuses, buzones de correo, servicios educativos, aplicaciones militares, entre otras.

3.3.1 Localización de instalaciones no deseables

En este contexto el problema geográfico se resume en contestar a la siguiente pregunta: ¿En qué punto o puntos se deben colocar las instalaciones para que atiendan de modo adecuado a las empresas productoras y/o a las personas que producen residuos domésticos?

Para ello es preciso considerar el tipo de efecto que cada instalación produce en su entorno inmediato. Las instalaciones en general se clasifican en dos grandes tipos:

- 1) Instalaciones deseables, aquellas en que predominan los efectos positivos: escuelas, hospitales, comercios, cines, etc., e;
- 2) Instalaciones no deseables, en las que los efectos negativos son dominantes. En este último caso se encuentran, sobre todo, los lugares donde se tratan y eliminan los residuos que la sociedad produce: vertederos de RSU, centros de tratamiento de residuos industriales (tóxicos y peligrosos), estaciones de transferencia, etc. Bosque (2012)²³

El procedimiento concreto y técnico de evaluación multicriterio para determinar un conjunto de lugares candidatos que puedan acoger el tipo de instalaciones no deseables se basa en dos principios, eficiencia y justicia espacial. Mc Allister (1976)²⁴

- a. Principio de la eficiencia espacial. Se buscan localizaciones que, dada una posición concreta de la demanda (productores de RSU), determinen un coste mínimo (económico, distancia o tiempo) en la construcción y el uso cotidiano de estas instalaciones.

Este es un elemento esencial en este sentido es la minimización de los desplazamientos necesarios para que estas instalaciones sean utilizadas por los prestadores del servicio de recolección y grandes productores de RSU.

Simultáneamente, otro elemento significativo de la eficiencia espacial es la disminución de las molestias potenciales que estos centros ocasionan a la población residente en la región.

- b. Principio de la justicia espacial. Para este tipo de instalaciones no deseables, es importante, que no existan grandes diferencias geográficas ante la posibilidad de ser afectado por las molestias y riesgos provocados por ellas.

Las distancias existentes entre centros y población residente no deberían ser excesivamente diferentes, ya que esto implica grandes diferencias en la distribución de las molestias.

²³ Bosque, J. Gómez, M. Rodríguez, V. Rodríguez, E. Vela, A. (2012). Localización de centros de tratamiento de residuos, una propuesta metodológica basada en SIG. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*. ISSN: 0211-9803.

²⁴ Mc Allister, 1976, Morrill y Symons, 1977.

Otro elemento a considerar para concretar de modo preciso los factores que miden la eficiencia se debe considerar los distintos tipos de instalaciones de tratamiento de residuos las cuales se clasifican en instalaciones que deben ser situadas de manera muy especial (de alto riesgo) e instalaciones molestas (de mediano riesgo), la clasificación general de las instalaciones puede ser vista en la Figura 9.

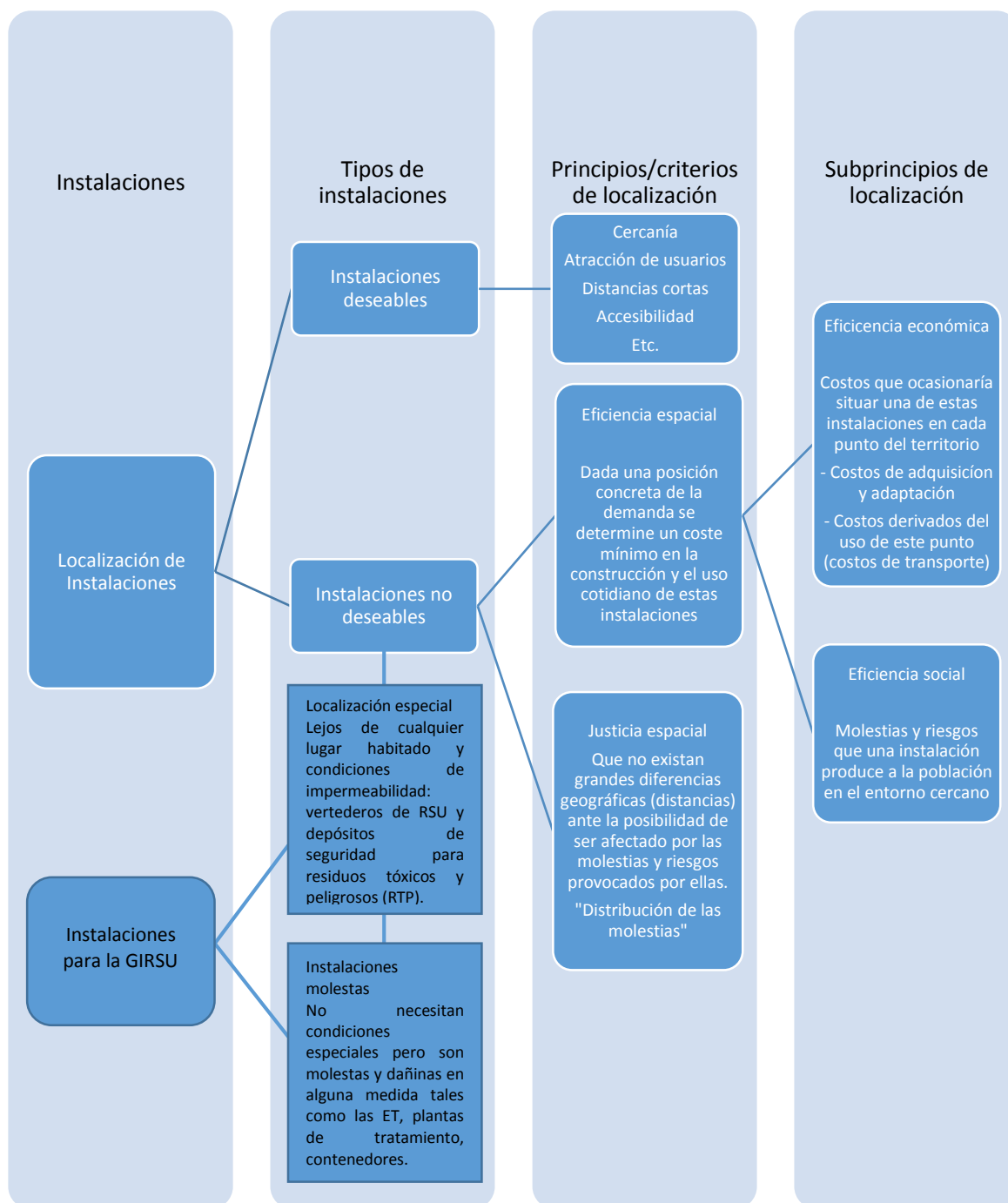


Figura 9 Clasificación de instalaciones en la GIRSU. Elaboración propia.

3.3.2 Método del centro de gravedad

El método del centro de gravedad consiste en un algoritmo de localización de una instalación considerando la demanda de otras existentes. Ésta es una técnica muy sencilla y suele utilizarse para determinar la ubicación de bodegas intermedias y puntos de distribución teniendo en cuenta las distancias que las separan y el aporte (en términos de utilidad, producción o capacidad) de cada instalación.

Este método trabaja con un sistema de coordenadas; como coordenadas geográficas (latitud - longitud), cartesianas o particulares de un lugar.

El planteamiento para la obtención de las coordenadas de la nueva instalación es el siguiente:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ix} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad C_y = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iy} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

Donde;

C_x es la coordenada x de la nueva instalación (localidad)

C_y es la coordenada y de la nueva instalación (localidad)

d_{ij} (x ó y) es la distancia de la ubicación i en términos de la coordenada x ó y

V_i es el peso (demanda por ejemplo) o aporte de la ubicación i en el sistema

3.3.3 Método de 1 - centro absoluto de una red con pesos

El algoritmo del 1-centro absoluto de una red con pesos tipo árbol establece el centro de la red referido a la demanda que existe en cada nodo de la misma desde un punto de vista geométrico, esto es importante ya que para la localización de las estaciones de transferencia, este método se traduce como el establecimiento de parte de los dos criterios mencionados con anterioridad, que son la eficiencia y justicia espacial.

El planteamiento para la obtención de las coordenadas del 1-centro absoluto es el siguiente:

Sea: h_i, h_j las demandas de los nodos (kg a recolectar)
 $d(i,j)$ la distancia entre los nodos i y j

Encontrar $B_{ij} = \frac{h_i * h_j * d(i,j)}{h_i + h_j}$ y localizar BST, tal que, $B_{ST} = \text{Max}_{ij} (B_{ij})$

La solución es el punto localizado en $\frac{h_T}{(h_S + h_T)} * d(S, T)$ del nodo S sobre la única

trayectoria de S a T, o equivalentemente,

Localizar el punto $\frac{h_S}{(h_S + h_T)} * d(S, T)$ del nodo T sobre la única trayectoria de T a S, el cual

será el 1-centro absoluto de la red.

3.3.4 Problema de cobertura (localización de paradas de recolección)

Este problema establece que un servicio será adecuado si se encuentra dentro de un radio o distancia dada para otro servicio, los criterios de cobertura varían dependiendo del enfoque que se requiera, por ejemplo, existe el problema para determinar el número óptimo de servicios para atender la demanda existente, el número mínimo de servicios para otorgar un nivel de servicio adecuado aunque no se cubra toda la demanda existente, etc.

Para la localización de paradas se opta por el enfoque de cobertura máxima, en donde la población gozará del servicio de recolección a costa de caminar una distancia dada, cubriendo la mayor población posible.

Entonces el planteamiento del problema consiste en encontrar el número de servicios que son necesarios tal que se maximice la cobertura de la demanda total, aun cuando este excede al número posible de servicios que se pueden instalar, por razones de presupuesto u otras.

Por lo cual el problema de máxima cobertura, consiste en determinar el número P de servicios que maximice la cantidad de demanda cubierta.

El modelo de conjunto cobertura trabaja bajo el supuesto de que la demanda en todos los nodos es idéntica, considera con igual importancia un nodo con demanda de 10 unidades y uno con 10,000.

Matemáticamente se tiene lo siguiente;

$$\text{Maximizar } G = \sum_i^j h_i * Z_i$$

Sujeto a;

$$\begin{aligned} \sum_j^i a_{ij} * x_j &\geq Z_i && \text{para toda } i \\ \sum_j^i x_j &\leq P \\ x_j &= 0, 1, \quad Z_i = 0, 1 \end{aligned}$$

Donde;

h_i	es la demanda del nodo i (kg a recolectar)
P	número de servicios a localizar (localización de paradas)
Z_i	1 si el nodo i es cubierto, 0 en otro caso

3.4 Diseño de rutas de recolección de RSU

De la teoría de grafos, el problema del agente viajero (TSP por sus siglas en inglés, Travelling Salesman Problem) y el problema del cartero chino, son útiles en el planteamiento y la solución a distintos problemas de ruteo ya sea de RSU, entrega de correos, etc., con el uso de los mismos se pretende obtener rutas de recolección de RSU que hagan eficiente la recolección de RSU en el sentido de cobertura, reducción de distancias, y menores tiempos de recolección lo que desemboca en la reducción de costos y la determinación adecuada de infraestructura para atender las necesidades básicas de la población del municipio.

3.4.1 Macroruteo y zonificación

El primer problema en la recolección de desechos sólidos, en particular de las macrorutas consiste en determinar el número adecuado de vehículos que deben utilizarse dada la generación de RSU, el método que se seguirá para la recolección y las posibilidades económicas del municipio.

En pocas palabras, se dice que el macroruteo es la asignación de camiones recolectores a las áreas en las que se prestará el servicio de recolección, se recomienda realizar un estudio de la población la accesibilidad y la generación per cápita de RSU.

Los elementos básicos que se requieren son:

1. Un estudio de generación de residuos sólidos, que determine la generación domiciliaria, así como la generación que se da en otras fuentes municipales.
2. La localización de las fuentes no domiciliarias de desechos que serán atendidas por el servicio.
3. La división de las localidades en áreas de recolección (zonificación), requiere tener en consideración factores como las fronteras naturales (ríos o canales que atraviesan la ciudad) y artificiales (como ferrocarriles, carreteras o calles muy transitadas). Se debe dividir la ciudad en áreas iguales de tal forma que cada una de esas áreas genere aproximadamente la cantidad de basura que llene un camión en su recorrido.
4. Las diferentes densidades de población y tipo de basura.
5. El tiempo y la distancia empleados para un viaje redondo hasta el sitio de disposición final.

3.4.2 Microruteo

En este proceso se traza una ruta definida la cual es la trayectoria de recolección desde su inicio hasta su final, para ello se estudiaron dos problemas, el problema del cartero chino y el problema del agente viajero.

3.4.2.1 Problema del agente viajero (Travelling Salesman Problem, TSP)

Un vendedor tiene que visitar $n + 1$ ciudades, cada una exactamente una vez. La distancia entre cada par de ciudades viene dada por d_{ij} . El problema es encontrar el recorrido que comienza y termina en la misma ciudad y minimiza la distancia total recorrida.

Sea x_{ij} una variable binaria que nos dice si el viajero va de la ciudad i a la ciudad j ($i=0,1,\dots, n$; $j = 1, 2,\dots, n + 1$; $i \neq j$). Se fija $x_{0, n+1} = 0$.

La función objetivo a minimizar es:
$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=1, j \neq i}^{n+1} d_{ij} * x_{ij}$$

Sujeto a las restricciones;

$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij} = 1$; ($j = 1, 2, \dots, n + 1$) Garantiza visitar cada nodo (parada) exactamente una vez

$\sum_{j=1, i \neq j}^{n+1} x_{ij} = 1$; ($j = 1, 2, \dots, n + 1$) Garantiza que se sale de cada nodo (parada) exactamente una vez

En general la manera de resolver el problema del TSP varía respecto del enfoque que se requiera y la distancia de la función objetivo, puede ser cambiada por un costo general (distancia, económico, tiempo) para así minimizarlo, la forma en la que se puede solucionar el problema consiste principalmente en heurísticas y metaheurísticas para grandes problemas o en problemas pequeños la solución puede ser dada por métodos exactos.

3.4.2.2 Problema del cartero chino (CPP)

Este planteamiento se encuentra dentro de los problemas de rutas en arcos (arc routing problems), los cuales consisten en encontrar rutas óptimas que atraviesen total o parcialmente las aristas de un grafo, las variaciones de los mismos dependerán de la red que se desee analizar, puede variar de acuerdo al tipo de grafo ya sea dirigido (DCPP), no dirigido (CPP), mixto (MCP), también puede variar de acuerdo al número de circuitos que se deseen encontrar (CCPP), incluso se puede considerar capacidades dentro de los mismos (m-CPP), etc. El modelo matemático de aplicación sería el que considera n circuitos con restricciones de capacidad y tiempo, sobre un grafo mixto, sin embargo, se realizaron simplificaciones para poder hacer uso del SIG y obtener las rutas de recolección, por lo cual en este apartado solo se plantea el principio del cartero chino pues el funcionamiento de TransCAD emplea este problema para la obtención de rutas.

El problema del cartero chino consiste en encontrar el camino más corto o circuito (tour o camino euleriano) cerrado, que visite cada arista de un grafo (conectado) no direccionado, o sea, que se recorra al menos una vez cada arista del grafo volviendo al punto (vértice o nodo) de partida.

Dado un grafo $G = (V, E, A)$ con costos asignados a sus aristas, encontrar un circuito de costo mínimo que pase por cada arista de G al menos una vez.

$$\text{Min} \sum_i^j c_{ij} * x_{ij} + \sum_i^j c_{ij} * (y_{ij} + y_{ji}) + \sum_i^j c_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_i^j (1 + x_{ij}) + \sum_i^j y_{ij} - \sum_i^j (1 + x_{ij}) + \sum_i^j y_{ji} \quad \text{para todo } i$$

$$y_{ij} + y_{ji} \geq 1 \quad \text{para todo } i, j \text{ que pertenezca a A, para todo } i, j \text{ que pertenezca a E}$$

$$x_{ij}, y_{ij}, y_{ji} \geq 0 \quad \text{enteras para todo } i, j \text{ que pertenezca a A, para todo } i, j \text{ que pertenezca a E}$$

Donde: x_{ij} representa el número de veces que cada arco (i,j) que pertenece a A, se repite en la solución
 y_{ji} representa el número de veces que la arista (i,j) que pertenece a E, aparece dirigida de i a j en la solución
 c_{ij} representa el costo por recorrer cada arco de i a j

3.4.2.3 Problema de ruteo de vehículos (VRP)

El problema de transporte (VRP) se encuentra dentro de la denominada clase de problemas NP-completos, es decir que el esfuerzo por encontrar una solución óptima crece de manera exponencial con el tamaño del problema además de las propiedades particulares para obtener una solución.

Esta clase de problemas determina un conjunto de rutas para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos para satisfacer la demanda de varios clientes dispersos geográficamente.

Para la solución al problema se utilizó el principio del VRP, sin embargo, existen variaciones al mismo (CVRP y VRPTW) las cuales fueron empleadas para la solución al problema.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

Sujeta a;

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = s \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = d_j \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, m$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \text{para toda } i \text{ y } j$$

Donde: Z = costo de distribución a minimizar (distancia o tiempo)
 x_{ij} = el número de unidades que se distribuyen del origen i al destino j
 d_j = demanda de cada cliente
 s_i = recursos con los que se cuenta para realizar la distribución

Todos estos planteamientos fueron de gran ayuda para la resolución del estudio de caso ya que los programas utilizados para la obtención de rutas, emplean los principios de estos problemas, el algoritmo exacto no se encuentra descrito, ya que es el producto que los proveedores de software otorgan, sin embargo, para hacer uso de ellos se realizaron modificaciones y simplificaciones de los planteamientos para resolver cada etapa.

Las soluciones de cada problema fueron “el alimento” o entrada de información para las etapas posteriores, esto se puede observar en la imagen Figura 10.

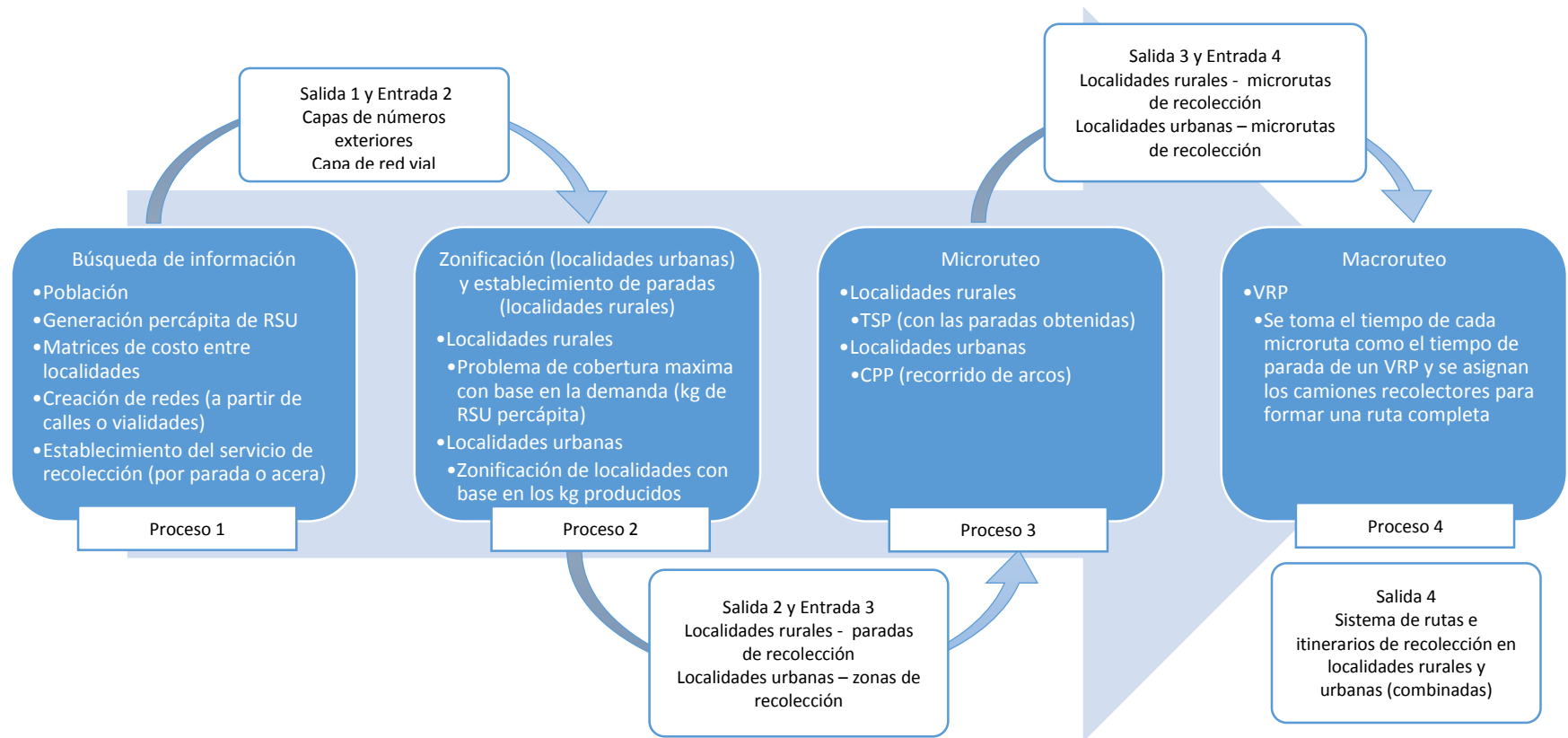


Figura 10 Procesos, entradas y salidas de la metodología general empleada. Elaboración propia.

En resumen, la metodología a seguir en el diseño del sistema de recolección de RSU en el municipio de Bacalar, se puede dividir en dos etapas principales, una la localización de la ET y dos el diseño del sistema de rutas en las distintas localidades, la metodología se puede ver en la Figura 11.

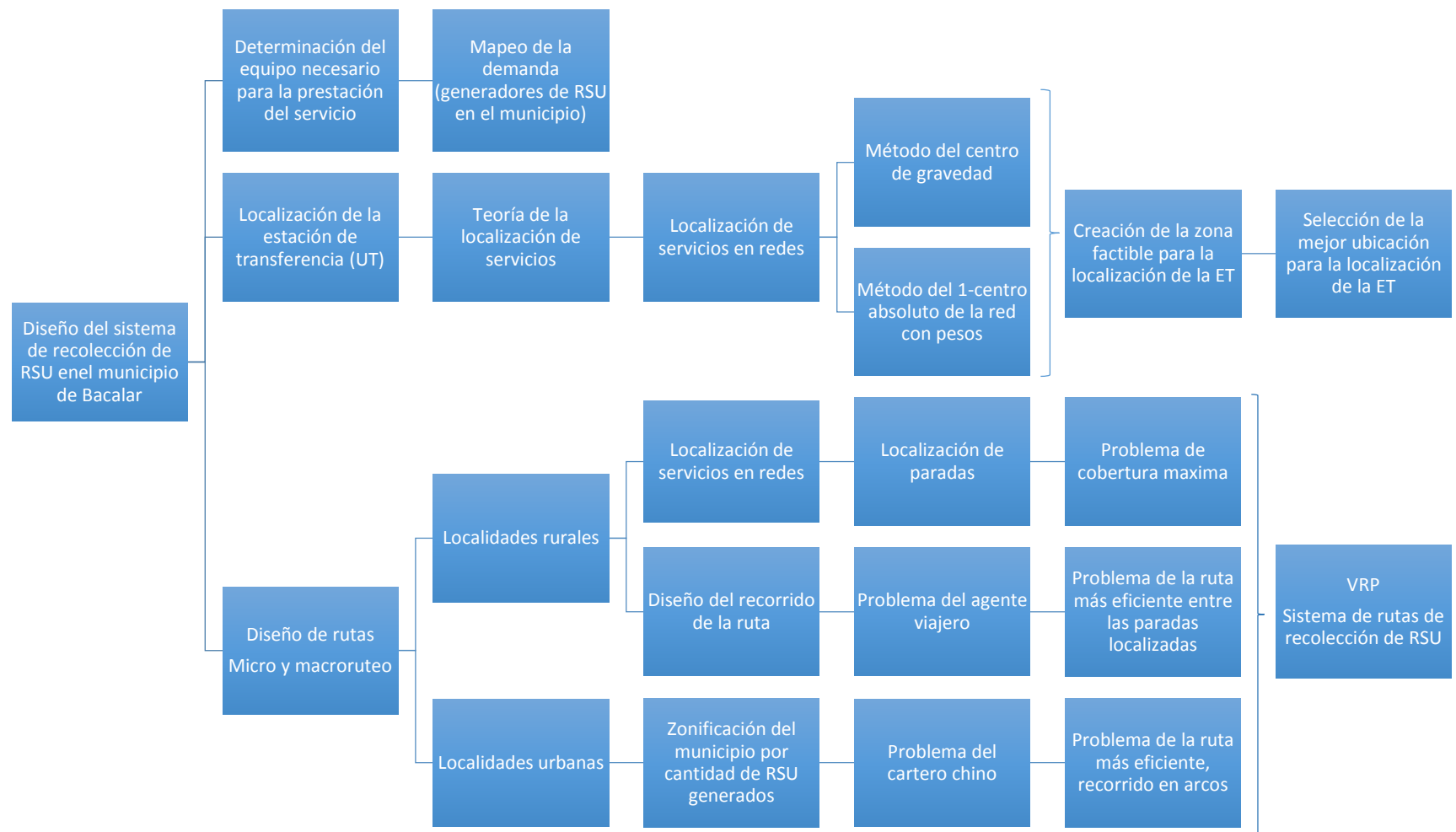


Figura 11 Metodología para el diseño del sistema de recolección en el municipio de Bacalar. Elaboración propia.

Capítulo 4 Caso de estudio y aplicación de la metodología

Bacalar, municipio de nueva creación, uno de los 10 municipios que integran el estado de Quintana Roo, contiene la Laguna de Bacalar, la más importante de las lagunas del sur de Quintana Roo y de gran atractivo turístico, cuenta con un litoral de 20.1 kilómetros de extensión en el mar Caribe, tiene una extensión territorial de 7,161 km² y su población aproximada es de 42 mil habitantes (2012)²⁵.

En el territorio del municipio de Bacalar existe un total de 59 localidades, las que destacan por el tamaño de su población, Bacalar (12,843), Limones (3,263) y Maya Balam (2,415).

	Bacalar	Quintana Roo
Población 2016	39,111	
% Población	2.80%	
Tasa crecimiento 1990 - 2010	0.70%	5.10%
Población 2010	37,370	1,350,945
Tasa crecimiento 2010 - 2030	2.80%	2.50%
Población 2030	65,500	2,232,702
Tipo de Municipio por condición de urbanización de la población	Rural	-
Tipo de Municipio por tamaño de la población	Urbano pequeño	-
Índice de desarrollo humano (IDH) 2010	0.748	0.759
Grado de Desarrollo Humano	Muy alto	Muy alto
Índice de salud	0.8784	0.866
Años promedio de escolaridad	8.2	-
Índice de educación	0.6892	0.691
PEA Total	15,240	593,121
	41.50%	44.70%
PEA hombres	10,361	396,779
	28.20%	29.90%
PEA mujeres	4,879	196,342
	13.30%	14.80%
Población Ocupada	14,841	574,027
	40.40%	43.30%
Población Desocupada	400	19,094
	1.10%	1.40%

Tabla 16 Indicadores principales de desarrollo del Municipio de Bacalar y Quintana Roo. Elaboración propia.

Se desconoce el motivo de la separación de Bacalar de su antiguo municipio Otón P. Blanco, sin embargo, se sabe que no se atendía con rapidez las demandas de los 57 poblados que ahora

²⁵ <http://bacalar.gob.mx>. H. Ayuntamiento del Municipio de Bacalar.

conforman el nuevo municipio, además se observó que el ayuntamiento se vio rebasado en capacidad para responder y atender las necesidades básicas de la población, tal es el caso de la recolección de RSU, cuyo sistema ha colapsado en distintas ocasiones y se han creado tiraderos clandestinos cerca de predios en la costera y en la carretera federal por la falta de la gestión de los mismos, por lo cual el nuevo ayuntamiento se ve en la necesidad de modificar constantemente las rutas de recolección sin llegar a eliminar los tiraderos clandestinos.

Debido a estas razones, se implementaron distintas medidas y programas para la conservación del ambiente, tales como “*reciclando basura por alimentos*”²⁶ y multas de hasta por tirar basura o quemarla en las calles, sin embargo, el problema continuó en pie.

Por medio de la proyección de población de CONAPO y SEMARNAT de 2016 se calcula que el Municipio de Bacalar produce alrededor de 46 toneladas diarias de RSU, mismas que han hecho colapsar la capacidad de los sistemas de recolección, sumado a esto, el número va en aumento de acuerdo a la urbanización y crecimiento de la población.

CVE_ENT	CVE_MUN	CVE_LOC	CVE_CARTA	LATITUD	LONGITUD	NOM_LOC	AMBITO
23	0004	0011	E16A65	184037	882343	Bacalar	U
23	0004	0021	E16A46	190127	880630	Limones	U
23	0004	0012	E16A56	185251	881413	Buenavista	R
23	0004	0024	E16A46	190212	881025	Chacchoben	R
23	0004	0116	E16A56	185844	881238	Lázaro Cárdenas	R
23	0004	0134	E16A55	185418	882304	Caan Lumil	R
23	0004	0168	E16A55	185000	882039	Miguel Hidalgo y Costilla	R
23	0004	0561	E16A55	185755	882424	Kuchumatan	R
23	0004	0583	E16A55	185621	882359	Maya Balam	R
23	0004	1077	E16A55	184841	882214	San Isidro la Laguna	R
23	0004	0068	E16A56	185718	880948	Pedro Antonio Santos	R

Tabla 17 Localidades de estudio. Elaboración propia.

4.1 Localización de la estación de transferencia (ET)

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3, la teoría utilizada para la localización de la estación de transferencia fueron los modelos de localización en redes, localización de instalaciones no deseables, específicamente el método de localización por centro de gravedad y el método del 1 – centro absoluto de una red con pesos. Se eligieron estos métodos debido a la estructura física de las localidades estudiadas, la cual nos permite hacer uso de ellos y cumplen con los principios de justicia y eficiencia espacial que rigen la localización de estaciones de transferencia, además de su relativa sencillez para el fácil entendimiento dirigido a las autoridades correspondientes.

²⁶ *Reciclando basura por alimentos en Chetumal y Bacalar, Gobierno del estado de Quintana Roo, 31-03-2015.*

La metodología empleada para la localización de la estación de transferencia se resume en la Figura 12.

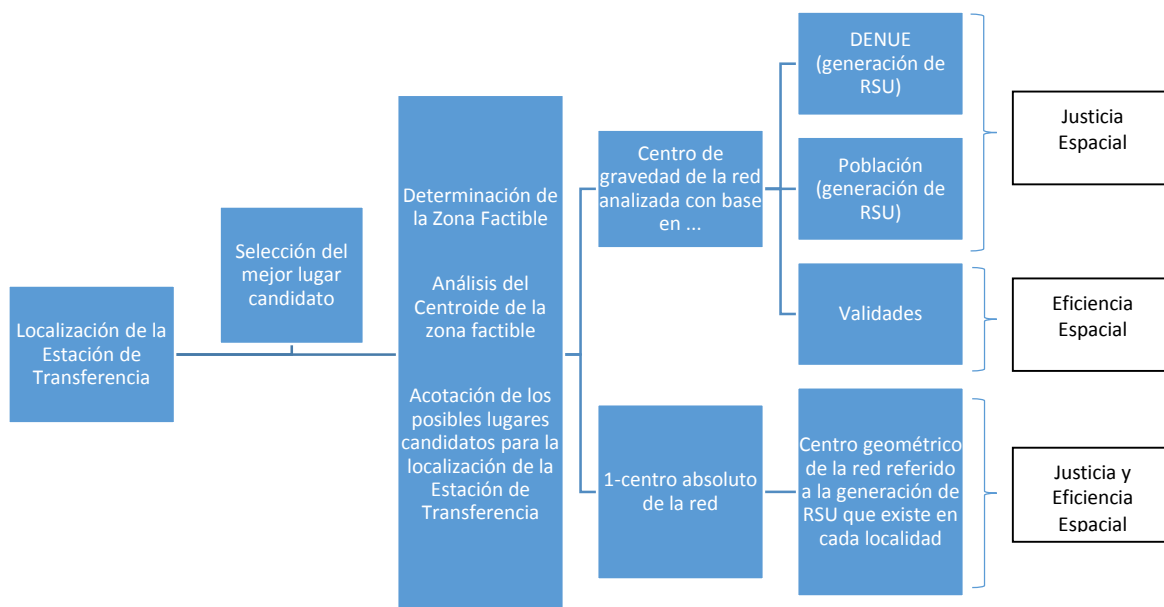


Figura 12 Metodología para la localización de la estación de transferencia. Elaboración propia.

4.1.1 Localización de vértices de la región factible por medio del método del centro de gravedad

Se localizaron tres centros de gravedad correspondientes a la 1) población (equivalente a la generación de RSU por casa habitación o domiciliaria), 2) eficiencia y accesibilidad de vialidades entre localidades y 3) generación de RSU de las distintas unidades económicas (DENUE) más importantes de la región.

Para cada uno de ellos se realizó una investigación de generación de RSU del municipio y en el caso del centro de gravedad de las vialidades se ponderaron las vías de transporte de acuerdo a la metodología de *Localización de centros de tratamiento de residuos*.

4.1.1.1 Centro de gravedad de generación de RSU de la población

Se determinó el centroide de cada localidad con su respectiva generación total poblacional de RSU y se aplicó el método como se muestra en la Tabla 18, de la cual, en la parte superior se muestra la operación correspondiente.

Para la aplicación del método del centro de gravedad se utilizaron coordenadas geográficas de longitud y latitud expresadas en grados decimales.

NOM_LOC	POB_2016	TON_RSU	POINT_X	POINT_Y	TON*X	TON*Y
Bacalar	12719	12.833	-88.396674	18.677074	-1134	240
Limonas	3298	3.328	-88.108516	19.024222	-293	63
Buenavista	700	0.706	-88.239227	18.882188	-62	13
Chacchoben	871	0.879	-88.174313	19.036043	-78	17
Lázaro Cárdenas	1741	1.757	-88.210496	18.979028	-155	33
Caan Lumil	436	0.440	-88.385503	18.904979	-39	8
Miguel Hidalgo y Costilla	809	0.816	-88.345074	18.831771	-72	15
Kuchumatan	1219	1.230	-88.406278	18.966204	-109	23
Maya Balam	2415	2.437	-88.399866	18.938516	-215	46
San Isidro la Laguna	1029	1.038	-88.370760	18.810601	-92	20
Pedro Antonio Santos	595	0.600	-88.165560	18.954946	-53	11

Tabla 18 Localización de los centroides de las localidades. Elaboración propia.

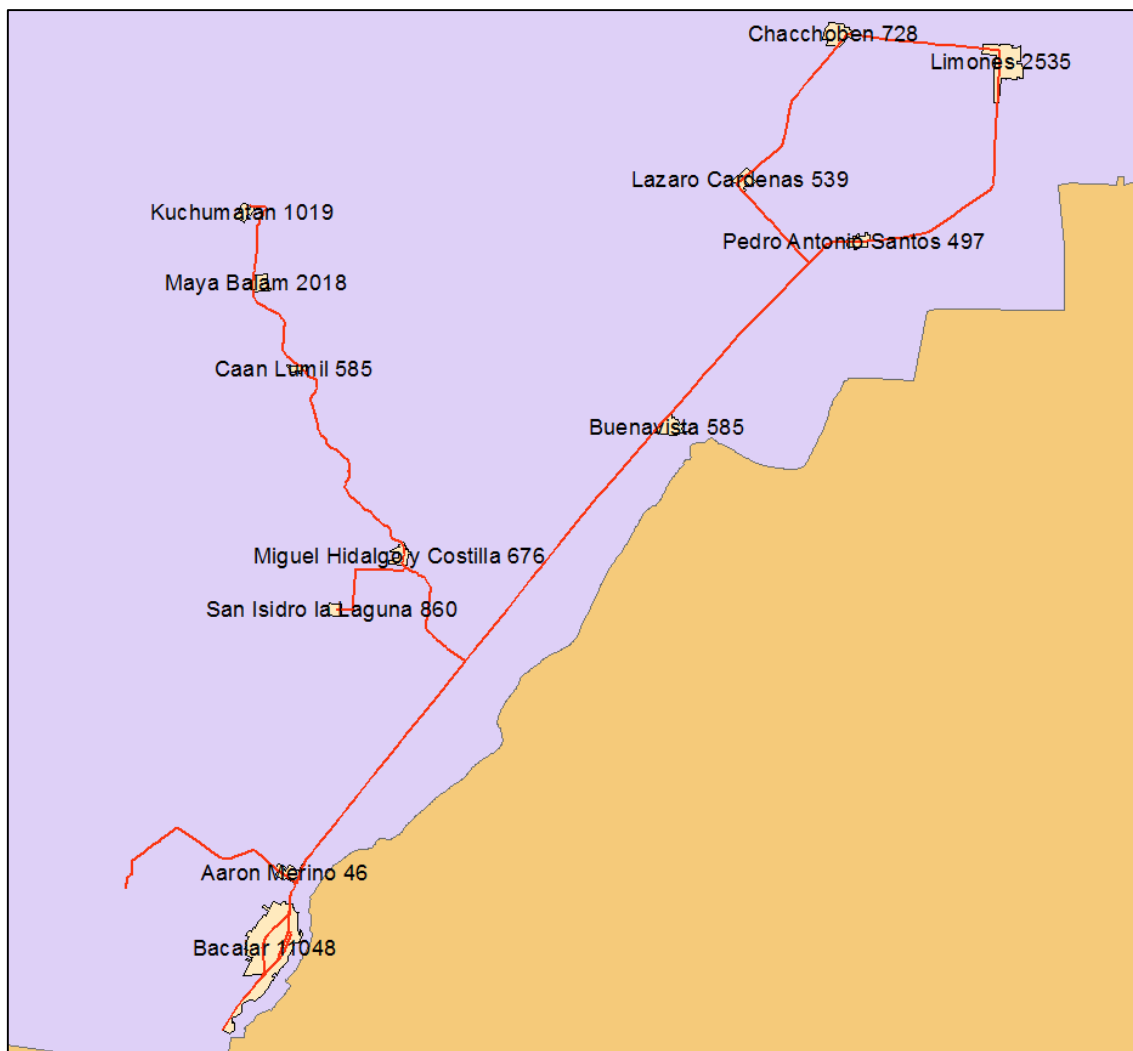


Figura 13 Centroides de las localidades de estudio. Elaboración propia.

Con lo cual realizando las operaciones correspondientes arroja un vértice con las siguientes coordenadas.

$$Cx = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ix} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad Cy = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iy} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

CENTROIDE DE GEN_POB (C1)	
X*	Y*
-88.328291	18.817676

Tabla 19 Centro de gravedad de generación de RSU de la población. Elaboración propia.

4.1.1.2 Centro de gravedad de generación de RSU de las unidades económicas

Antes de la aplicación del método para determinar el centro de gravedad se tuvo que determinar la cantidad de RSU generados por cada establecimiento, esto se realizó de acuerdo al tipo de comercio, al número de personas empleadas y al tipo de fuente generadora, con base en las estimaciones de la SEDESOL²⁷ (las cuales se pueden ver en la Tabla 20) y utilizando la generación per cápita del municipio.

Tipos de fuentes generadoras	Subclasificación	ID	Generación unitaria de residuos sólidos		Bacalar
Domiciliarios	unifamiliar	0	0.605	kg/hab/día	0.507
	plurifamiliar	1	0.772	kg/hab/día	0.647
Comercio	tiendas de autoservicio	2	2.572	kg/empleado/día	2.155
	tiendas departamentales	3	1.468	kg/empleado/día	1.230
	locales comerciales	4	1.373	kg/empleado/día	1.151
	mercados	5	3.35	kg/local/día	2.807
Servicios	restaurantes y bares	6	0.85	kg/comensal/día	0.712
	hoteles y moteles	7	1.035	kg/huésped/día	0.867
	centros educativos	8	0.058	kg/alumno/turno	0.049
	cines	9	0.012	kg/espectador/función	0.010
	estadios	10	0.054	kg/espectador/evento	0.045
Especiales	oficinas	11	0.179	kg/empleado/día	0.150
	terminal terrestre	12	2.418	kg/pasajero/día	2.026
	terminal aérea	13	5.177	kg/pasajero/día	4.339
	reclusorio	14	0.538	kg/interno/día	0.451
	unidades medicas				
Áreas publicas	nivel 1	16	1.279	kg/consultorio/día	1.072
	nivel 2	17	4.73	kg/cama/día	3.964
	nivel 3	18	5.58	kg/cama/día	4.676
	espacios abiertos	19	0.163	kg/m²/día	0.137
	vía pública	20	31.383	kg/m²/día	26.300

Tabla 20 Generación de RSU de acuerdo al tipo de fuente generadora. Elaboración propia con base en SEDESOL.

²⁷ Generación unitaria por fuente generadora en la Ciudad de México, SEDESOL.

est_poc / ID personas	0	1	2	4	5	6	7	8	11	16	17	18	19	20	Total
0 a 5	0	0	25	546	0	52	24	6	50	6	0	0	51	0	760
6 a 10	0	0	2	10	0	6	3	6	18	1	1	0	17	0	64
11 a 30	0	0	0	11	0	1	0	12	9	0	0	0	10	0	43
31 a 50	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	4
51 a 100	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	4
101 a 250	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
251 y más	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	5
Total	0	0	27	568	0	59	27	28	86	7	2	0	78	0	

Tabla 21 Cantidad de fuentes generadoras y número de empleados. Elaboración propia.

Lo que se observó fue que la mayoría de las fuentes generadoras de RSU caen en un estatus de 0 a 5 personas y con un ID igual a 4, lo cual nos dice que la mayoría de las actividades económicas realizadas en la región son por medio de locales comerciales, los cuales son las unidades DENUE que generan mayor cantidad de RSU en el municipio.

El 86% de las fuentes generadoras tiene de 0 a 5 personas empleadas, son locales comerciales y generan el 93% de RSU del total de RSU producido por DENUE.

est_poc/ID personas	0	1	2	3	4	5	6	7	11	12	13	16	17	18	19	20	Total
0 a 5	0%	0%	7%	0%	77%	0%	5%	3%	1%	0%	0%	1%	0%	0%	1%	0%	93%
6 a 10	0%	0%	1%	0%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	4%
11 a 30	0%	0%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%
31 a 50	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
51 a 100	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
101 a 250	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
251 y más	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Total	0%	0%	7%	0%	80%	0%	5%	3%	2%	0%	0%	1%	1%	0%	1%	0%	100%

Tabla 22 Porcentaje de generación de RSU por tipo de fuente generadora y número de empleados. Elaboración propia.

Nota: no se consideraron otros grandes generadores de basura tales como hospitales debido a que estos residuos requieren de un tratamiento especial y el servicio de recolección se realiza de manera separada.

Se ubicó la localización geográfica de cada unidad económica con su respectiva generación de RSU y se aplicó el método como se muestra en la Tabla 23, de la cual, en la parte superior se muestra la operación correspondiente.

Nombre del establecimiento	estr_poc	ID	coord_x	coord_y	Gen_Kg	w*x	w*y
ABARROTES GONZÁLEZ	0 a 5 personas	4	-88.391	18.683	3.433	-303.404	64.128
ABARROTES MAYRA	0 a 5 personas	4	-88.109	19.028	3.433	-302.434	65.314
ABARROTES Y NOVEDADES LA TERESITA	0 a 5 personas	4	-88.109	19.026	3.433	-302.436	65.307
ABARROTES Y NOVEDADES PETIT	0 a 5 personas	4	-88.389	18.680	3.433	-303.396	64.121
ADO Y EMPRESAS CORDENADAS	0 a 5 personas	11	-88.395	18.685	0.448	-39.557	8.361

Tabla 23 Muestra de las unidades económicas del municipio de Bacalar

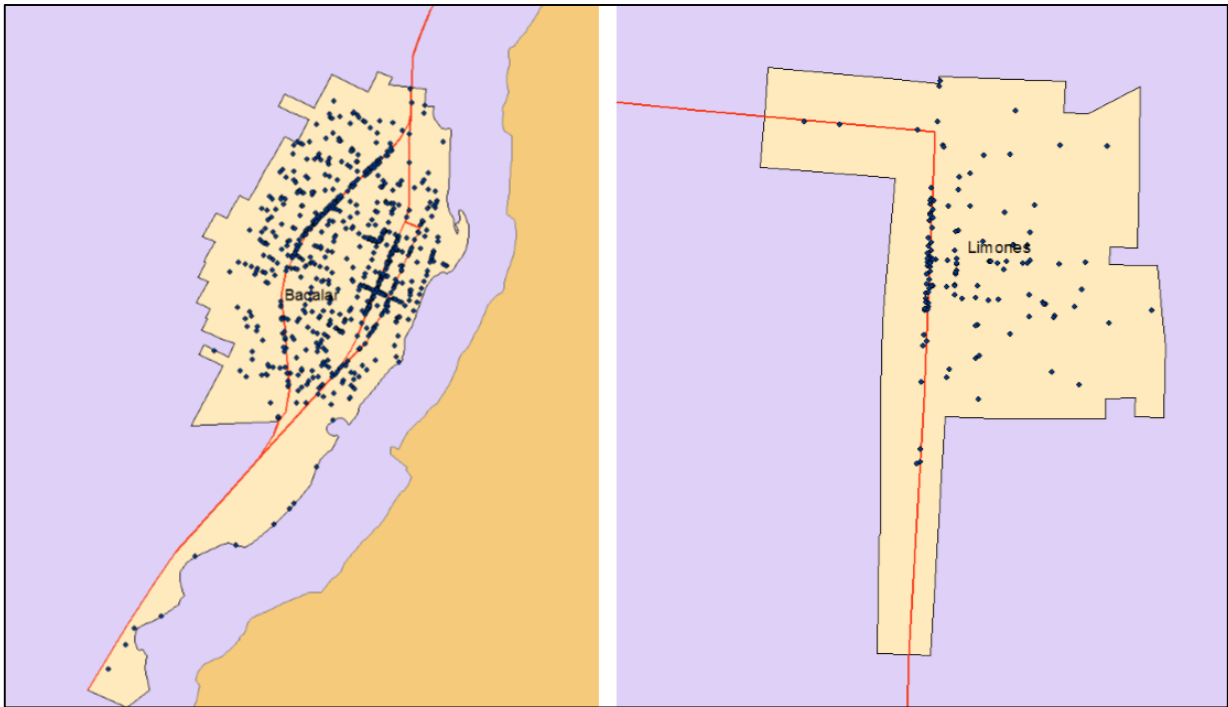


Figura 14 Unidades económicas (DENUE) Bacalar y Limones. Elaboración propia.

Con lo cual realizando las operaciones correspondientes arroja un vértice con las siguientes coordenadas.

$$Cx = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ix} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad Cy = \frac{\sum_{i=1}^n d_{iy} * V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}$$

CENTROIDE DE GENERADORES (NEGOCIOS) DENUE (C3)	
X*	Y*
-88.366525	18.711704

Tabla 24 Centro de gravedad de generación de RSU de las unidades económicas (DENUE). Elaboración propia.

4.1.1.3 Centro de gravedad de vialidades

Para determinar el centroide de las vialidades se recurrió a la metodología antes mencionada en la cual se debe ponderar cada vialidad de acuerdo a su número de sentidos, número de carriles, tipo de pavimentación, velocidad máxima de circulación y la administración a la que pertenece cada una de ellas. Del resultado de la ponderación, la que resulte con mayor puntaje será la vía más eficiente para ir de una localidad a otra.

Para el caso del municipio el número de sentidos es 2 en todas las vialidades, por lo cual puede ser descartado para los propósitos del estudio, del mismo modo el tipo de pavimentación es descartado ya que todas las vías de acceso a las localidades de estudio están pavimentadas, por consiguiente

la eficiencia de la vialidad depende solo del número de carriles, el límite de velocidad y administración.

Estos tres factores repercuten en el tráfico, tiempo de recorrido y mayor o menor accesibilidad a alguna localidad, todo esto forma parte de la eficiencia y justicia espacial, las cuales deben ser atendidas según los principios para localizar estaciones de transferencia.

Esta ponderación es atribuida a cada vialidad y finalmente se obtiene el centro de gravedad de la red de vialidades de la zona en cuestión.

Las ponderaciones utilizadas para la obtención del centroide de vialidades se muestran en las Tabla 27,..., Tabla 31.

código	num carr	administ	vel max	admin	carril	vel max	peso	POINT_X	POINT_Y	pond* X	pond*Y
3200	2	ESTATAL	100	0.80	0.6	0.9	0.860	-88.397093	18.937777	-76.0	16.3
3200	2	ESTATAL	100	0.80	0.6	0.9	0.860	-88.367086	18.868388	-76.0	16.2
3195	4	FEDERAL	110	1.00	1.0	1.0	1.000	-88.407336	18.656728	-88.4	18.7
3192	4	FEDERAL	110	1.00	1.0	1.0	1.000	-88.199379	18.961855	-88.2	19.0
3192	4	FEDERAL	110	1.00	1.0	1.0	1.000	-88.282550	18.833423	-88.3	18.8
3167	2	ESTATAL	100	0.80	0.6	0.9	0.860	-88.343907	18.832342	-76.0	16.2
3167	2	ESTATAL	100	0.80	0.6	0.9	0.860	-88.383221	18.904439	-76.0	16.3

Tabla 25 Muestra de las vialidades analizadas, dividido por columnas de izquierda a derecha se muestran las vialidades y los atributos de cada una, número de carriles (num carr), administración (administ), velocidad máxima permitida (vel máx), peso que se asignó a cada atributo y el peso total para cada vía, en la última columna se observa la aplicación del método de centros de gravedad, con lo cual se obtiene el centroide de vialidades. Elaboración propia.

CENTROIDE DE VIALIDADES (C2)	
X*	Y*
-88.322254	18.820341

Tabla 26 Centroide de preferencia de vialidades. Elaboración propia.

Administración	Ponderación	%
FEDERAL autopistas/vías nacionales	1	36%
ESTATAL principales	0.8	29%
ESTATAL secundarias	0.6	21%
ESTATAL terciarias	0.4	14%

Tabla 27 Ponderación de la administración. Elaboración propia.

	Ponderación	%
PAVIMENTADA	1	67%
NO PAVIMENTADA	0.5	33%

Tabla 28 Ponderación del tipo de pavimentación. Elaboración propia.

Número de carriles	Ponderación	%
4	1	36%
3	0.8	29%
2	0.6	21%
1	0.4	14%

Tabla 29 Ponderación del número de carriles de cada vialidad. Elaboración propia.

Número sentidos	Ponderación	%
1	0.5	33%
2	1	67%

Tabla 30 Ponderación del número de sentidos de cada vialidad. Elaboración propia.

Velocidad máxima	Ponderación	%
110	1	29%
100	0.9	26%
80	0.7	20%
60	0.5	14%
40	0.3	9%
20	0.1	3%

Tabla 31 Ponderación de la velocidad máxima permitida en cada vialidad. Elaboración propia.

4.1.1.4 Centro absoluto de árbol con pesos

El algoritmo del 1 - centro absoluto de una red con pesos tipo árbol establece el centro de la red referido a la generación de RSU que existe en cada localidad y con este método se acotan las posibles localizaciones para la ET, ya que desde un punto de vista geométrico, la posible solución solo corresponde a puntos sobre la red.

Esto es importante ya que para la localización de las estaciones de transferencia, este método se traduce como el establecimiento de parte de los dos criterios mencionados con anterioridad, que son la eficiencia y justicia espacial.

En los centroides anteriormente obtenidos no se hizo referencia a la longitud de las vialidades o la longitud total que se debe recorrer para ir de una localidad a otra, en este caso, la longitud junto con la generación de RSU son los puntos analizados.

De acuerdo con el método se debe obtener primero el árbol de expansión mínima de la red de vialidades, para ello se obtuvo la matriz O-D de la zona en estudio, seguido de la aplicación del método del 1 – centro absoluto el cual se desarrolla en las *Tabla 32, ..., Tabla 36*.

Distancia (km)	Bacalar	San Isidro la Laguna	Lázaro Cárdenas	Chacchoben	Limones
Bacalar	0	25	43	50	52
San Isidro la Laguna	25	0	37	45	46
Lázaro Cárdenas	43	37	0	8	15
Chacchoben	50	45	8	0	7
Limones	52	46	15	7	0

Tabla 32 Muestra de la matriz de distancias O-D de las localidades en estudio. Elaboración propia.

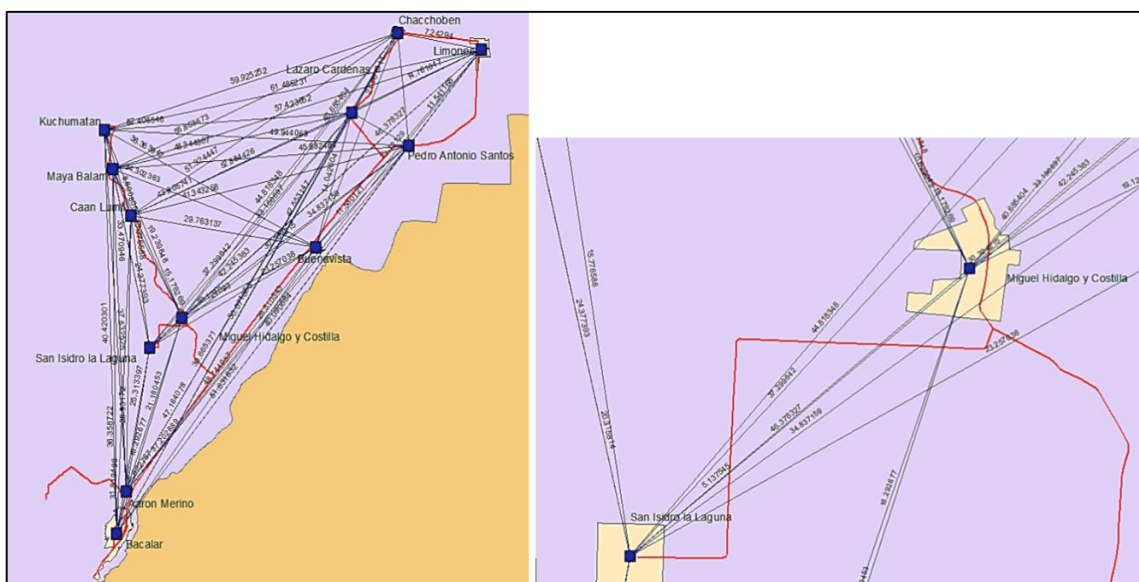


Figura 15 Obtención de la matriz O-D y muestra de la distancia entre localidades. Elaboración propia.

$h_i + h_j$ (Ton RSU)	Bacalar	Miguel Hidalgo y Costilla	San Isidro la Laguna	Buenavista	Caan Lumil	Maya Balam
Bacalar	25.7	13.6	13.9	13.5	13.3	15.3
Miguel Hidalgo y Costilla	13.6	1.6	1.9	1.5	1.3	3.3
San Isidro la Laguna	13.9	1.9	2.1	1.7	1.5	3.5
Buenavista	13.5	1.5	1.7	1.4	1.1	3.1
Caan Lumil	13.3	1.3	1.5	1.1	0.9	2.9

Tabla 33 Muestra de la matriz de demanda (h_i) de las localidades de estudio. La demanda se traduce como la generación de RSU. Elaboración propia.

$h_i * h_j$ (Ton RSU)	Bacalar	Miguel Hidalgo y Costilla	San Isidro la Laguna	Buenavista	Caan Lumil	Maya Balam
Bacalar	164.7	10.5	13.3	9.1	5.6	31.3
Miguel Hidalgo y Costilla	10.5	0.7	0.8	0.6	0.4	2.0
San Isidro la Laguna	13.3	0.8	1.1	0.7	0.5	2.5
Buenavista	9.1	0.6	0.7	0.5	0.3	1.7
Caan Lumil	5.6	0.4	0.5	0.3	0.2	1.1

Tabla 34 Muestra de la matriz de demanda (h_i) de las localidades de estudio. La demanda se traduce como la generación de RSU. Elaboración propia.

$B_{ij} = \frac{h_i * h_j * d_{ji}}{h_i + h_j}$	Bacalar	Buenavista	Caan Lumil	Maya Balam	Lázaro Cárdenas	Chacchoben	Limones
Bacalar	0.000	19.089	13.523	74.459	65.760	41.195	136.443
Maya Balam	74.459	18.785	1.690	0.000	49.354	36.089	80.779
Pedro Antonio Santos	22.985	3.757	10.489	22.094	3.307	5.318	5.868
Kuchumatan	45.384	17.216	2.785	3.321	37.924	30.727	55.233
Chacchoben	41.195	8.445	15.039	36.089	4.405	0.000	5.037
Limones	136.443	13.473	20.533	80.779	16.974	5.037	0.000

Tabla 35 Muestra de la matriz de la función objetivo; $Fo = \text{Max } B_{ij}$. Elaboración propia.

1 – Centro absoluto (C4)	
Máximo B_{ij}	136.443
Punto óptimo de localización sobre el camino único entre localidades $d_{ij} * h_i$ (ó h_j) / $(h_i + h_j)$	Ubicado a 41 km sobre la ruta única de Limones a Bacalar
	Ubicado a 10.632 km sobre la ruta única de Bacalar a Limones
Coordenadas	X -88.342604
	Y 18.761224

Tabla 36 Localización del 1 – centro absoluto. Elaboración propia.

4.1.1.5 Zona factible para la localización de la estación de transferencia

Una vez obtenidos estos cuatro centroides se trazó una zona factible entre estos puntos para situar la estación de transferencia, para ello se utilizó el software ArcGis en el módulo de ArcMap se reunió toda la información referente a los puntos obtenidos (Tabla 37), se consideró que todos los factores influyen de la misma manera, por lo cual el centroide de la región factible sería la ubicación más adecuada para localizar la estación de transferencia (lo cual se muestra en la Tabla 38), sin embargo, en el Capítulo 5 donde se muestran los resultados y las conclusiones obtenidas, se muestra la localización final de la estación de transferencia, esto debido a las condiciones físicas y geográficas del lugar.

CENTROIDE	X*	Y*	Ponderación	peso	X*	Y*
CENTROIDE DE GEN_POB (C1)	-88.334010	18.809803	1	25.0%	-22.084	4.702
CENTROIDE DE VIALIDADES (C2)	-88.323230	18.819841	1	25.0%	-22.081	4.705
CENTROIDE DE GENERADORES (NEGOCIOS) DENU (C3)	-88.366525	18.711704	1	25.0%	-22.092	4.678
1 - CENTRO ABSOLUTO SOBRE ARBOL CON PESOS (C4)	-88.342604	18.761224	1	25.0%	-22.086	4.690
			4	1	-88.341592	18.775642

Tabla 37 Vértices (centroides) de la región factible para la localización de la estación de transferencia. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 16, la región factible para la localización de la estación de transferencia se acotó a las dos vialidades que cortan la zona factible, ya que parte de la misma se cruza con cuerpos de agua, zonas propensas a inundaciones o áreas naturales, y existen establecimientos (ranchos) y la localización de las estaciones de transferencia no pueden estar a menos de 500 metros de la población.

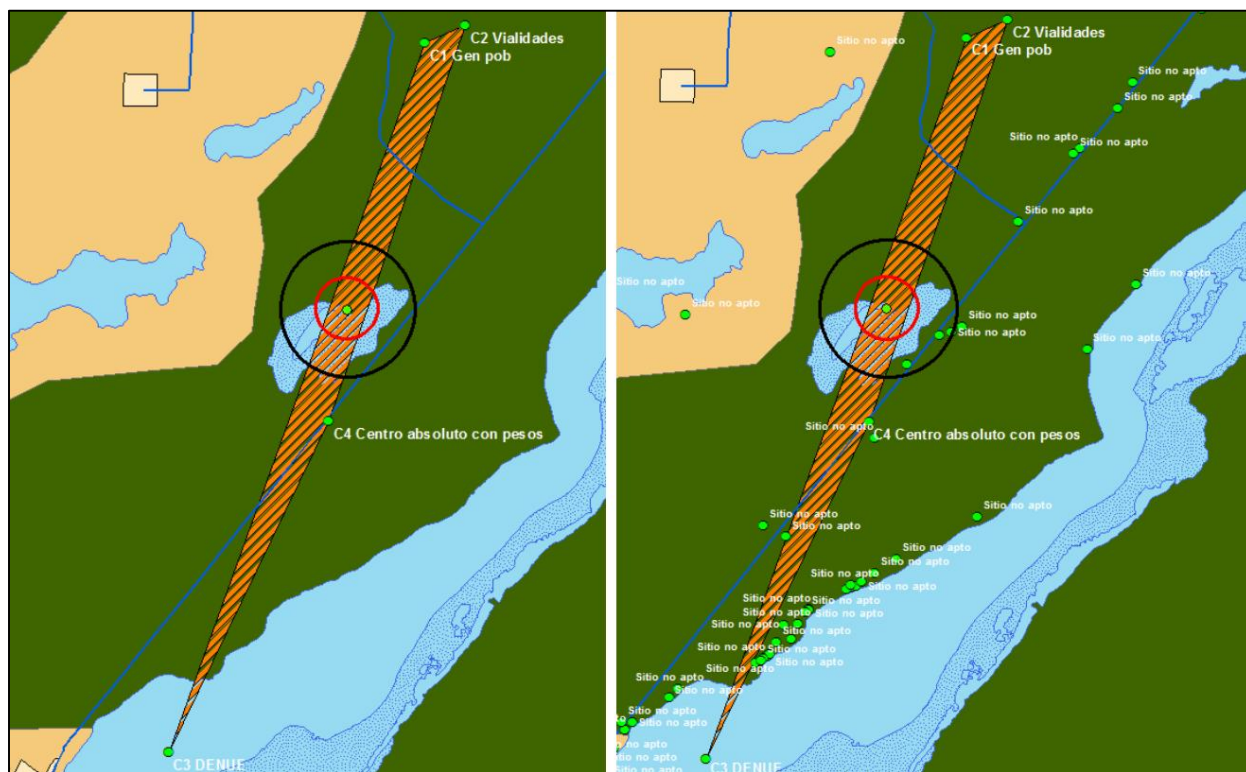


Figura 16 Región factible y sitios no aptos para la localización de la estación de transferencia. En rojo, radio de 500 m, en negro radio de 1000 m. Elaboración propia.

Localización del centro de la zona factible	
X	Y
-88.339919	18.777736

Tabla 38 Centroide de la región factible. Elaboración propia.

4.2 Diseño del servicio recolección de RSU

La teoría utilizada para el ruteo de vehículos se refiere a los problemas de redes denominados como el problema del agente viajante (TSP), el ruteo de vehículos (VRP) y el ruteo en arcos (Arc Routing).

De acuerdo a cada localidad y al tipo de servicio de recolección que se presta en la misma se utilizó el principio de cada uno de estos problemas para diseñar el recorrido de recolección de cada localidad.

En las localidades del municipio de Bacalar consideradas como rurales y con base en el levantamiento de campo realizado, el servicio de recolección es inexistente, por lo cual el servicio que se propone es por medio de la recolección por parada fija.

En las localidades del municipio de Bacalar consideradas como urbanas el servicio de recolección de RSU se realiza por medio de la recolección por acera debido a tener la infraestructura adecuada y a la costumbre de la gente en la localidad, esto solo aplica para la localidad urbana de Bacalar ya que en la localidad de Limones no se realiza la prestación del servicio.

La metodología empleada para el diseño del servicio recolección de RSU se resume en la Figura 17.

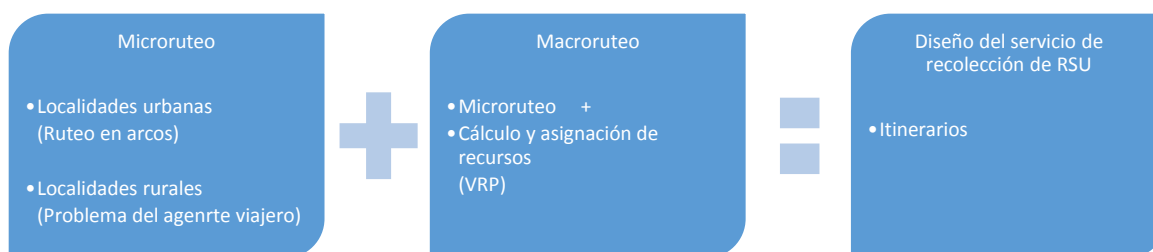


Figura 17 Metodología para el diseño del servicio recolección de RSU. Elaboración propia.

4.2.1 Microruteo

En la Tabla 39 se puede apreciar la propuesta del servicio de recolección de RSU y la manera en que se modeló cada ambiente.

Nombre de la localidad	Tipo de tipo de recolección de RSU	Tipo de servicio de recolección de RSU propuesto	Modelo empleado
Bacalar	Recolección por acera	Recolección por acera	Ruteo en arcos
Limones, Buenavista, Chacchoben, Lázaro Cárdenas, Caan Lumil, Miguel Hidalgo y Costilla, Kuchumatan, Maya Balam, San Isidro la Laguna, Pedro Antonio Santos	No existe	Recolección por parada fija	Problema del agente viajero

Tabla 39 Tipo de servicio de recolección de RSU propuesto para las localidades del municipio de Bacalar. . Elaboración propia.

4.2.1.1 Microruteo Localidades Rurales

El ruteo de vehículos se modeló por medio del problema del agente viajero (TSP), sin embargo, antes de ello se tuvieron que proponer las paradas por medio de modelos de cobertura, una vez obtenidas las mismas se llevó a cabo el ruteo, la metodología fue la que se muestra en la Figura 18.

Se presentará un ejemplo de la metodología seguida, este procedimiento se aplicó en todas las localidades rurales y en la localidad de Limones.



Figura 18 Metodología para el Microruteo de las localidades rurales. Elaboración propia.

1) Pasos previos y creación de la red

1.1) Descripción de paradas y tiempos de caminata para hacer uso del servicio de recolección

Las posibles soluciones al problema del establecimiento de paradas es cualquier intersección de la red de vialidades, se considera que cualquiera de estos puntos forma parte del espacio solución.

Los tiempos de caminata para hacer uso del servicio de recolección se refieren a la impedancia (así llamada en ARCGIS) que los usuarios presentan al hacer uso del servicio, la cual puede ser tiempo, velocidad y distancia en los problemas de cobertura descritos posteriormente.

Para el criterio finalmente utilizado (problema de cobertura máxima) la impedancia es de 100 metros, es decir que cada parada tiene esta cobertura, salvo alguna excepción.

En la Tabla 41 se aprecian los tiempos y distancias máximas que se recorrerían para hacer uso del servicio de recolección a distintas velocidades promedio de un ser humano caminando. La configuración de la red de vialidades en las zonas estudiadas nos permite hacer un símil con el teorema de Pitágoras para calcular los tiempos de caminata del usuario.

El recorrido realizado por el camión recolector es a través de las vialidades y se puede pasar por cualquiera de ellas siempre y cuando no estén restringidas en la red, la manera de prestar el servicio es por parada fija como se muestra en la Figura 19.

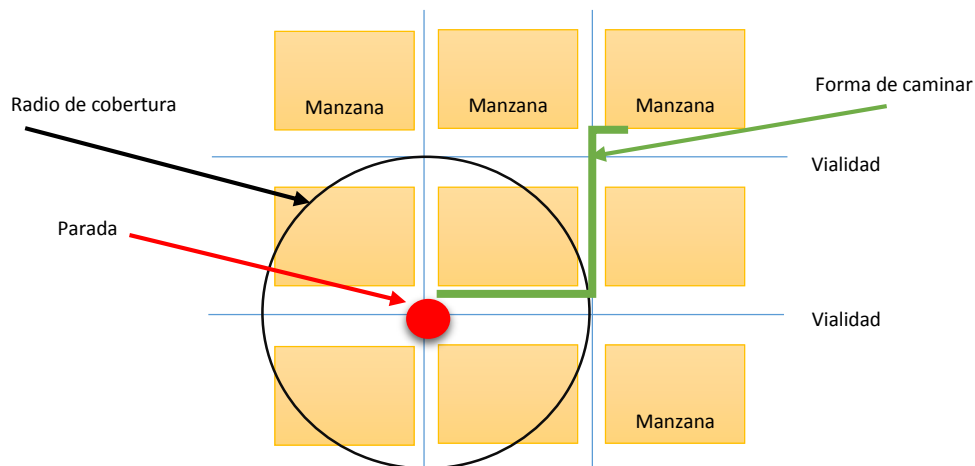


Figura 19 Servicio de recolección de RSU. Elaboración propia.

Por otra parte, los tiempos de parada dependerán del número de demanda atendida (usuarios), ya que no es conveniente realizar paradas de tiempos largos para atender a una cantidad pequeña de demandas o realizar paradas de tiempos cortos para atender una demanda mucho mayor.

Con base en el “Análisis del Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos”²⁸ donde se realizaron mediciones en campo, se obtuvieron los tiempos de la Tabla 40, de donde se puede

²⁸ Gutiérrez, F. Análisis del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el Centro Histórico de Morelia, aplicando Sistemas de Información Geográfica. Facultad de Ingeniería, UNAM.

concluir que dependiendo del método de recolección variará la cantidad de RSU recolectados y también el tiempo de parada, entonces se puede aproximar el tiempo necesario para recolectar 1 kg de basura y ello en conjunto con los usuarios atendidos se obtiene el tiempo por parada.

Cantidad recolectada de RSU (Kg/min)	Método de recolección
7.5 - 45	Campo
17.31 - 28.13	Acera
40 - 45	Parada fija
Tiempo (s) por Kg de RSU recolectado (s)	Método de recolección
8 - 1.33	Campo
3.46 - 2.13	Acera
1.5 - 1.33	Parada fija

Tabla 40 Cantidad de RSU recolectados por unidad de tiempo y método de recolección. Elaboración propia.

El valor promedio es de 2.9 s/kg, sin embargo, por las condiciones particulares de las localidades, donde se espera una menor concentración de RSU este número se hace mayor, por lo tanto se asignó un valor más grande (4 s) con lo cual el tiempo por kilogramo de RSU recolectado se aumenta en más del 25%, lo cual es una proposición justificada, coherente y factible.

cobertura de las paradas (metros)		vel caminando (km/h)	Tiempo máximo de caminata (min)			Tiempo máximo de caminata (s)			Tiempo máximo de caminata total (min)		
Radio de la parada	max dist caminada (m)		5	6	7	5	6	7	5	6	7
		vel caminando m/min	83	100	117	83	100	117	83	100	117
10	14		0.12	0.14	0.12	7	8	7	0.24	0.28	0.24
20	28		0.34	0.28	0.24	20	17	15	0.68	0.57	0.48
30	42		0.51	0.42	0.36	31	25	22	1.02	0.85	0.73
50	71		0.85	0.71	0.61	51	42	36	1.70	1.41	1.21
70	99		1.19	0.99	0.85	71	59	51	2.38	1.98	1.70
80	113		1.36	1.13	0.97	81	68	58	2.72	2.26	1.94
90	127		1.53	1.27	1.09	92	76	65	3.05	2.55	2.18
100	141		1.70	1.41	1.21	102	85	73	3.39	2.83	2.42
110	156		1.87	1.56	1.33	112	93	80	3.73	3.11	2.67
120	170		2.04	1.70	1.45	122	102	87	4.07	3.39	2.91
140	198		2.38	1.98	1.70	143	119	102	4.75	3.96	3.39
150	212		2.55	2.12	1.82	153	127	109	5.09	4.24	3.64
170	240		2.88	2.40	2.06	173	144	124	5.77	4.81	4.12
190	269		3.22	2.69	2.30	193	161	138	6.45	5.37	4.61
200	283		3.39	2.83	2.42	204	170	145	6.79	5.66	4.85

Más conveniente al usuario

Más conveniente al prestador de servicio

Tabla 41 Tiempos de caminata promedio. Elaboración propia.

1.2) Selección de paradas

Para la selección adecuada de paradas en las localidades se utilizó la teoría de localización, en específico se utilizó *el problema de cobertura máxima* con un radio de 100 metros, lo cual se consideró adecuado con base en la tabla anterior.

Los modelos de minimización de instalaciones y minimización de impedancia se utilizaron solo como apoyo, todo ello por medio del empleo del módulo Location-Allocation del software ARCGIS.

1.3) Capa de vialidades

Para cada localidad se descargaron las capas vectoriales de vialidades en formato “.shp” (formato utilizado por el software ARCGIS) de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)²⁹.

La limpieza, conectividad, construcción y atributos de la red se realizó manualmente empleando el SIG ARCGIS, esto consistió en revisar que las intersecciones de las calles representaran la realidad (puentes o intersecciones), que tuvieran el sentido, número de carriles, tipo de pavimentación, nombre vial, tipo vial, tiempo, velocidad y longitud correctas (Tabla 42) y a partir de la capa de vialidades se creó una red (con una velocidad promedio de 30 km/h) para el uso del software ARCGIS (Network dataset).

RED															
	OBJECTID *	Shape *	CVEGEO	CVEVIAL	CVESEG	NOMVIAL	TIPOVIAL	CVE_ENT	CVE_LOC	CVE_MUN	AMBITO	OID_1	ONEWAY	SENTIDO	Shape_Length
	28	Polyline	230100001	00122	00003	38	Calle	23	0001	010	U	70189		DOS	43.062066
	186	Polyline	230100001	00130	00002	38	Calle	23	0001	010	U	70347		DOS	118.440803
	188	Polyline	230100001	00130	00001	38	Calle	23	0001	010	U	70349		DOS	126.425989
	215	Polyline	230100001	00122	00002	38	Calle	23	0001	010	U	70376		DOS	39.702679
	217	Polyline	230100001	00122	00004	38	Calle	23	0001	010	U	70378		DOS	142.509474
	218	Polyline	230100001	00122	00001	38	Calle	23	0001	010	U	70379		DOS	128.161819
	491	Polyline	230100001	00088	00003	38	Calle	23	0001	010	U	70652		DOS	130.532381
	493	Polyline	230100001	00088	00004	38	Calle	23	0001	010	U	70654		DOS	112.326459
	494	Polyline	230100001	00088	00005	38	Calle	23	0001	010	U	70655		DOS	133.63378
	495	Polyline	230100001	00088	00001	38	Calle	23	0001	010	U	70656		DOS	114.694436
	496	Polyline	230100001	00088	00002	38	Calle	23	0001	010	U	70657		DOS	115.542103
	497	Polyline	230100001	00083	00001	38	Calle	23	0001	010	U	70658		DOS	106.080456
	500	Polyline	230100001	00083	00002	38	Calle	23	0001	010	U	70661		DOS	161.525411
	728	Polyline	230100001	00122	00005	38	Calle	23	0001	010	U	70889		DOS	20.790842
	325	Polyline	230100001	00010	00005	4	Calle	23	0001	010	U	70486		DOS	111.009103
	327	Polyline	230100001	00010	00004	4	Calle	23	0001	010	U	70488		DOS	97.383198

Tabla 42 Muestra de la construcción y atributos de la red. Elaboración propia.

1.4) Capa de números exteriores (NE)

Para cada localidad se descargaron las capas vectoriales números exteriores en formato “.shp” (formato utilizado por el software ARCGIS) de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)³⁰, sin embargo, para el caso de las localidades rurales el INEGI no ha publicado estas capas, por lo cual se utilizó el software Google Earth y ARCGIS para la creación de capas de puntos representativos de los números exteriores.

²⁹ Conjunto de Datos Vectoriales de Carreteras y Vialidades Urbanas Edición 1.0 (Distribución por Entidad Federativa), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

³⁰ Conjunto de Datos Vectoriales de Carreteras y Vialidades Urbanas Edición 1.0 (Distribución por Entidad Federativa), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

El proceso para realizar las capas representativas de números exteriores para las localidades rurales se realizó de manera que los puntos representativos de NE fueran aproximadamente igual al número de viviendas totales habitadas y al promedio ocupacional del total de viviendas habitadas³¹

NOM_LOC	POB_2016	TVIVHAB	PROM_OCUP	Y+	LI	LS	IDS	% ERROR
Buenavista	700	184	3.18	215	209.5	220.3	209	2.76%
Limonos	3263	618	4.17	764	745.4	783.6	730	4.51%
Chacchoben	871	236	3.08	276	268.8	282.6	277	-0.49%
Pedro Antonio Santos	595	128	3.88	150	145.8	153.2	150	-0.33%
Lázaro Cárdenas	1741	190	7.66	222	216.4	227.5	217	2.22%
Caan Lumil	436	72	5.06	84	82.0	86.2	86	-2.26%
Miguel Hidalgo y Costilla	809	148	4.57	173	168.5	177.2	179	-3.54%
Kuchumatan	1219	212	4.81	248	241.4	253.8	238	3.89%
Maya Balam	2415	409	4.93	478	465.8	489.7	459	3.92%
San Isidro la Laguna	1029	160	5.38	187	182.2	191.6	195	-4.34%

Tabla 43 Muestra de la construcción de la capa de NE. Elaboración propia.



Figura 20 Imagen satelital de la localidad Chachoben. Elaboración propia.

³¹ Censos y conteos de población y vivienda, ITER, INEGI y proyecciones de crecimiento poblacional de CONAPO.

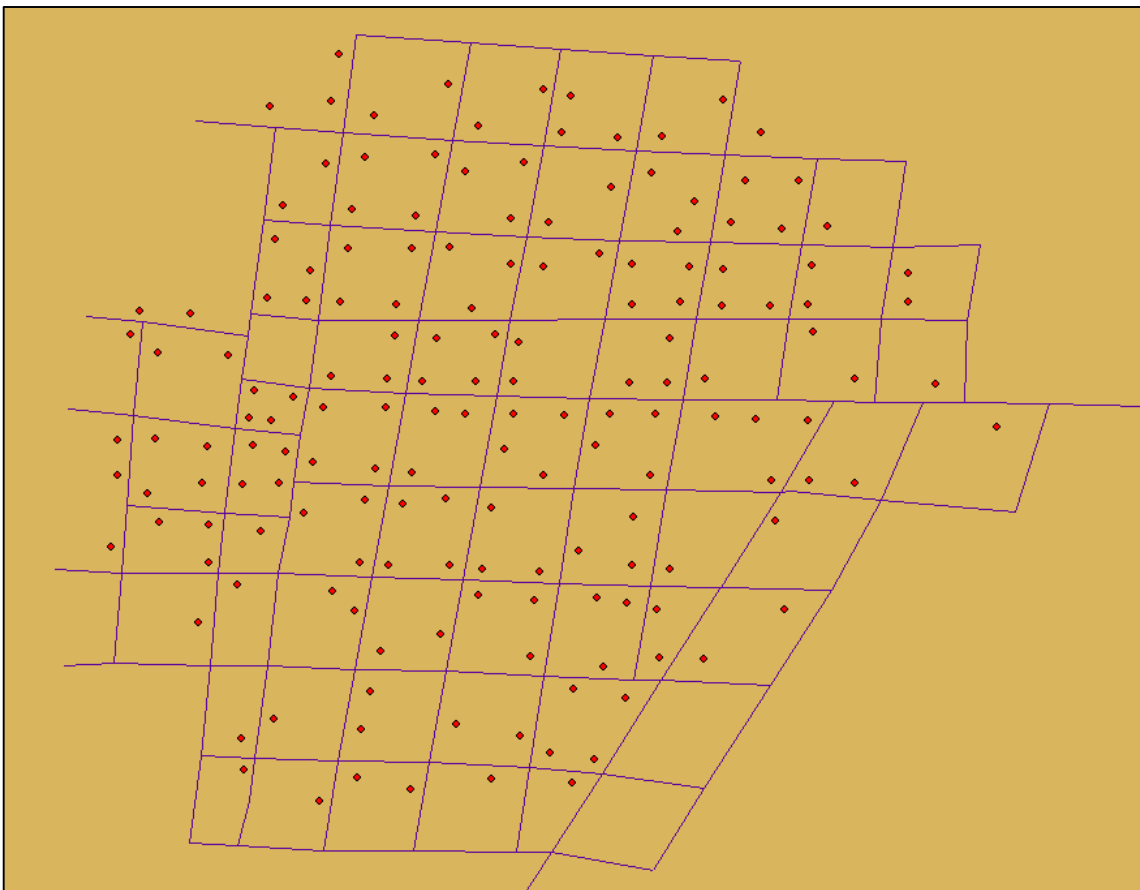


Figura 21 Capa de puntos representativos de NE (demanda) de la localidad Chachoben. Elaboración propia.

2) Selección de paradas de recolección

Siguiendo con la metodología propuesta, se utilizó la red creada en el paso anterior para el uso del módulo Location-Allocation de ARCGIS, el cual nos permite localizar instalaciones con base en una demanda al menor costo posible.

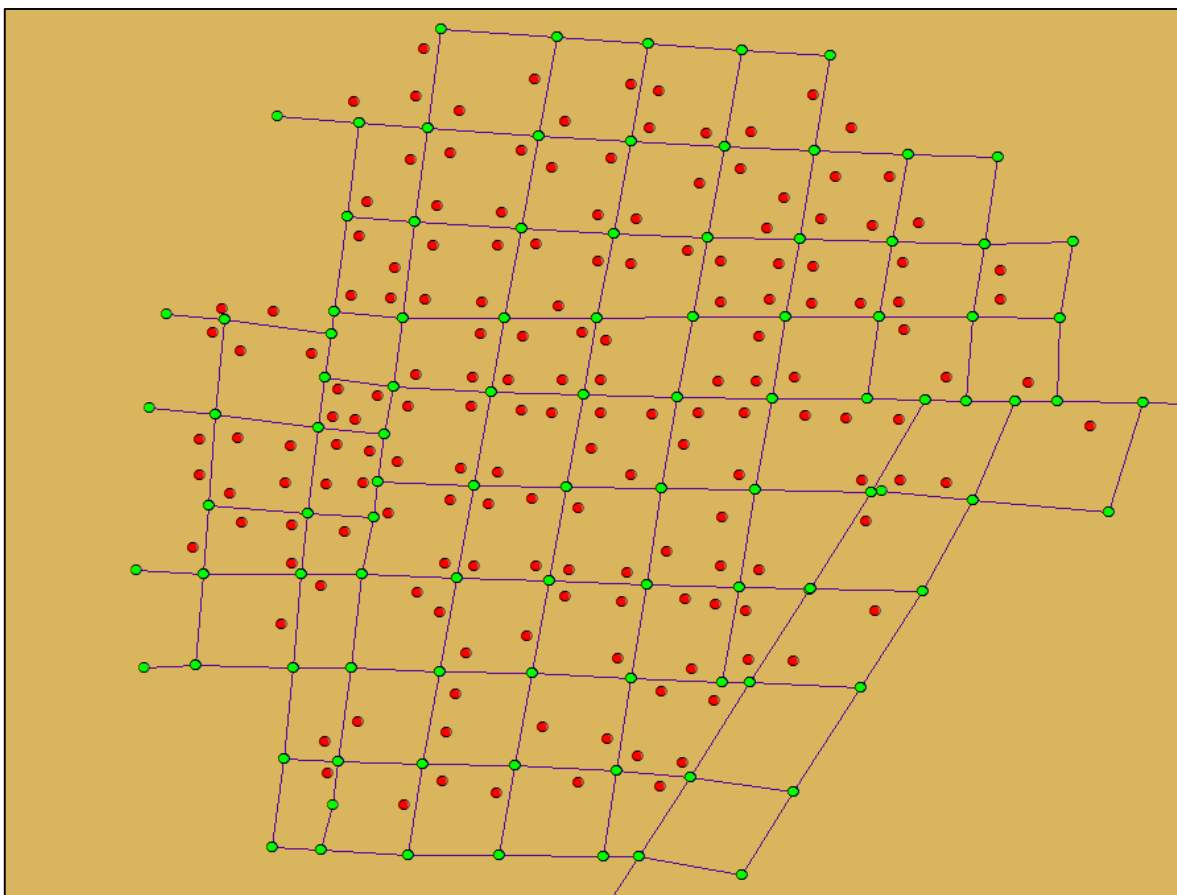
Para el caso analizado esto se puede traducir como sigue:

1. La capa representativa de números exteriores es la demanda para los problemas de localización de instalaciones, la demanda en sí es la generación promedio de kilogramos de RSU por vivienda.
2. Las intersecciones de la red creada son las posibles soluciones al establecimiento de paradas, denominadas “instalaciones” en ARCGIS.
3. El costo a minimizar (impedancia en ARCGIS) puede ser la distancia, un valor económico o tiempos, para la localización de las paradas es la distancia.
4. Existen tres problemas que se resolvieron en el desarrollo de este proyecto para la selección de paradas, dos de ellos solo fueron de apoyo y el otro fue el problema

seleccionado, en estos problemas se abordan tres enfoques, de los cuales los dos primeros convienen al prestador del servicio de recolección y a los usuarios del servicio respectivamente, el tercero se puede tomar como un enfoque mixto entre ambos el cual fue la solución a la localización de paradas. Esto se puede apreciar en la Tabla 44.

Enfoque	Problema	Descripción	Tipo de criterio	Ventajas y desventajas
Conveniente al prestador del servicio (municipio) de recolección	Minimización de instalaciones	Se selecciona el mínimo número de instalaciones (paradas) necesarias para cubrir la mayor cantidad de demanda (usuarios del servicio de recolección) a un costo mínimo total de impedancia (distancia total recorrida por el camión recolector).	De apoyo	Se tiene el control del número de paradas. La población podría no hacer uso del mismo debido a la dispersión de población que se presenta en la zona de estudio, además el establecimiento de muchas paradas para la cobertura total de los usuarios puede resultar en una ruta ineficiente en la comparativa tiempo vs Kg de RSU recolectados debido a la misma dispersión poblacional.
Conveniente para el usuario promedio del servicio de recolección	Minimización de la impedancia	Se eligen las instalaciones tales que la suma total de impedancias ponderadas (demanda asignada a una instalación multiplicada por la impedancia a la instalación) se minimice, en otras palabras, se seleccionan las paradas de tal forma que los usuarios del servicio caminen la mínima distancia total hacia las paradas seleccionadas (esta distancia debe ser propuesta).	De apoyo	El usuario camina la mínima distancia para gozar del servicio de recolección. Para el prestador del servicio resulta en un costo elevado, ya que la dispersión poblacional hace que se tengan demasiadas paradas (distancias de radios de cobertura muy pequeños) para la máxima cobertura de la demanda, por lo cual el consumo de combustible es mayor debido a la aceleración y desaceleración constante del camión recolector sumado al mayor desgaste del equipo.
Mixto, un intermedio entre lo conveniente tanto al prestador como al usuario del servicio de recolección	Maximización de cobertura	Se seleccionan las instalaciones (paradas) tal que se cubra toda o la mayor cantidad de demanda (usuarios) que se encuentre dentro de un radio de distancia especificado.	Seleccionado	Se minimizan y maximizan las ventajas y desventajas de los dos enfoques anteriores, sin embargo, no toda la población podrá caer en un radio igual de cobertura, por lo tanto se deben variar los mismos o llegar a un porcentaje de cobertura de la zona donde se preste el servicio de recolección.

Tabla 44 Criterios y problemas de cobertura seleccionados para la localización de paradas. Elaboración propia.



*Figura 22 En rojo, puntos de demanda y en verde posibles ubicaciones de paradas, localidad Chachoben.
Elaboración propia.*

Tomando como base lo anterior se realizaron iteraciones con el problema de máxima cobertura, tomando como base las soluciones de dos primeros problemas, es decir;

2.1) Minimización de instalaciones

- a) Impedancia = distancia (m)
- b) La gente acude a la instalación
- c) Se permiten vueltas en U (del camión)
- d) El corte de impedancia es 100 m (diámetro de cobertura máxima)
- e) Las posibles soluciones a la localización de paradas puede ser cualquier intersección de la red

El resultado es el número mínimo de paradas que se necesita para cubrir a toda la población y brindar el servicio de recolección de RSU a una distancia preseleccionada.

Esto se puede apreciar en la Figura 23, donde se muestra parte de la interfaz del módulo de Location-Allocation de ARCGIS.

Figura 23 Configuración del análisis del problema de minimización de instalaciones

2.2) Minimización de la impedancia

- Impedancia = distancia (m)
- La gente acude a la instalación
- Se permiten vueltas en U (del camión)
- El corte de impedancia es 100 m (diámetro de cobertura máxima)

Las posibles soluciones a la localización de paradas puede ser cualquier intersección de la red y el número de paradas máximo es la solución al problema de minimización de instalaciones anteriormente descrito.

El resultado es el número de paradas del problema 2.1 que cae dentro del diámetro de impedancia de 100 metros para el servicio de recolección de RSU, sin embargo, la localización de las paradas no es necesariamente la misma, en este caso se seleccionan los puntos a los cuales los usuarios caminarán la distancia mínima total.

Figura 24 Configuración del análisis del problema de minimización de instalaciones.
Elaboración propia.

2.3) Maximización de la cobertura

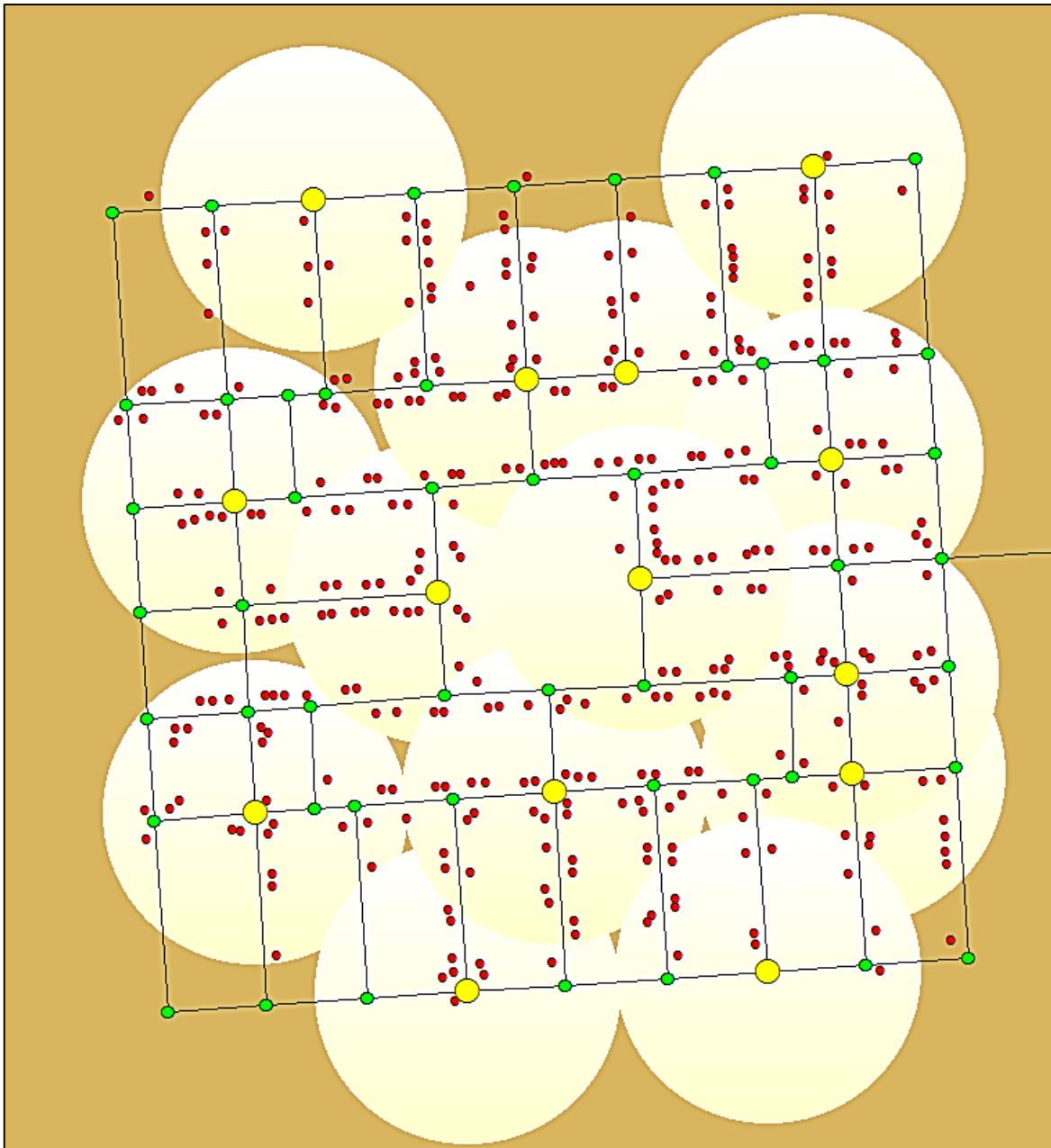
- a) Impedancia = distancia (m)
- b) La gente acude a la instalación
- c) Se permiten vueltas en U (del camión)
- d) El corte de impedancia es 100 m (diámetro de cobertura máxima)
- e) El número de paradas máximo es la solución al problema de minimización de instalaciones

The screenshot displays the ArcGIS Location-Allocation tool interface, specifically the 'Advanced Settings' tab. The 'Problem Type' is set to 'Maximize Coverage'. The 'Facilities To Choose' is set to 20, and the 'Impedance Cutoff' is set to 150. The 'Impedance Transformation' is set to 'Linear'. The 'Impedance Parameter' is set to 1, and the 'Target Market Share (%)' is set to 10. The 'Default Capacity' is set to 1. The 'Problem Type Description' panel on the right explains that this option solves the fire station location problem, choosing facilities such that all or the greatest amount of demand is within a specified impedance cutoff. The 'Settings' panel on the left shows various options for impedance, travel time, and output shape type.

*Figura 25 Configuración del análisis del problema de minimización de instalaciones.
Elaboración propia.*

El resultado es el número de paradas del problema 2.1 que cae dentro del diámetro de impedancia de 100 metros y brindar el servicio de recolección de RSU, pero en este caso se reduce el número de paradas para llegar a cubrir mínimo el 90% de la población de cada localidad que cae en un diámetro de cobertura 100 metros.

En la Figura 26 se aprecia en verde las posibles soluciones a la selección de paradas, en rojo la demanda, en amarillo los puntos solución con su área de cobertura y en negro las vialidades.



*Figura 26 Selección de paradas (amarillo) y área de cobertura de las mismas, San Isidro la Laguna.
Elaboración propia.*

2.4 Revisión de la factibilidad de la solución

Se observa que en el caso 2.1 se obtiene un mayor número de paradas y por lo tanto un mayor tiempo de recolección, esto es debido a que se pretende cubrir toda la población con el servicio de recolección, sin embargo, debido a la dispersión que presentan la mayoría de las localidades de estudio no sería razonable brindar servicio a toda la población debido a que se obtendrían rutas muy largas y con poca eficiencia de recolección de RSU vs tiempo de recolección.

En el caso 2.2 se alimenta el mismo número de paradas, pero el objetivo es minimizar la distancia que camina el usuario para tirar su basura en el camión, es decir, se minimiza la suma de las distancias totales a caminar por los usuarios.

La selección de las potenciales paradas, en la mayoría de los casos, es similar a la solución en el problema 2.1, en este caso los tempos difieren debido a que la demanda cubierta por cada parada no es la misma que en el otro caso.

En el caso 2.3 se propuso un menor número de paradas que en los problemas anteriores con base en ellos, esto es debido a que el número de puntos de demanda cubiertos por algunas paradas es pequeño, es decir, si se hicieran todas las paradas del caso 2.1 ó 2.2, la demanda cubierta (o área cubierta) por parada sería muy poca, en consecuencia la recolección sería tardada y con mayor costo económico.

Lo que se realizó fue seleccionar un número menor de paradas para que se cubriera al menos el 90% de la demanda que caiga en el radio de impedancia (100 metros), lo que permite que la recolección de RSU sea mayor en cada parada debido a la concentración de la misma.

La comparativa entre los métodos de apoyo empleados y el método de solución final se puede apreciar en la Tabla 45 donde se muestran los valores obtenidos para cada método empleado, donde el porcentaje de cobertura, los tiempos de microruta, y la cantidad de kilogramos de RSU recolectados vs tiempo disminuyen.

Una vez obtenidas las paradas solo se verificó que el camión recolector pueda realizar físicamente las paradas.

Caan Lumil						
Minimización de instalaciones	# de paradas	15	paradas	horas	ID's	
	Tiempo de recolección	80	min	1.3		
	Cobertura	100.00%				
Minimización de impedancia	# de paradas	15	paradas			
	Tiempo de recolección	80	min	1.3		
	Cobertura	100.00%				
Maximización de cobertura (V1)	# de paradas	13	paradas			
	Tiempo de recolección	70	min	1.2		
	Cobertura	96%				
Ruta	Tiempo de recorrido	4	min	0.1	Longitud Km	1.6
Maximización de la cobertura (V1)						
TIEMPO TOTAL	74	minutos	1.2	horas		
RECOLECCION	356	Kg/h				
Maximización de la cobertura con base en la demanda atendida (V2)						
Kg de RSU de la localidad	440	Kg				
Promedio de ocupación	5.056	Hab/ID	6	Kg/ID		
Tiempo de recolección	32.80	min	0.55	horas	DIFERENCIA (V1 – V2)	
Tiempo muerto	5.16	min			0.6	horas
TIEMPO TOTAL V2	37	min	0.61	horas	37	minutos
RECOLECCION	717	Kg/h			360	Kg/h
Minimizar instalaciones	Minimizar impedancia		Maximizar cobertura			
		Demanda atendida		Demanda atendida		
Demanda atendida (ID´s)	Tiempo	(ID's)	Tiempo	(ID's)	Tiempo	Tiempo V2
3	5	3	5	6	5	2.4
7	5	7	5	7	5	2.8
8	5	8	5	8	5	3.2
2	5	11	10	3	5	1.2
5	5	8	5	6	5	2.4
6	5	6	5	7	5	2.8
7	5	6	5	4	5	1.6
4	5	7	5	6	5	2.4
3	5	2	5	3	5	1.2
2	5	2	5	5	5	2.0
8	5	3	5	8	5	3.2
6	5	5	5	11	10	4.4
6	5	8	5	8	5	3.2
8	5	4	5		#N/A	0.0
11	10	6	5		#N/A	0.0

Tabla 45 Comparativa entre las soluciones obtenidas en cada problema. Los "ID's" representan las viviendas habitadas o números exteriores con ocupación. Elaboración propia.

3) Ruteo de la selección de paradas de recolección

Una vez establecidas las paradas, se procedió a utilizar el módulo de redes de ARCGIS, para el cual solo deben ser seleccionadas y correr el análisis para determinar la ruta más eficiente³² entre las mismas, en este caso la distancia.

El programa selecciona el mejor recorrido, sólo se deben mantener la parada inicial y final de la ruta, esto se realiza con ayuda del módulo de Network Analyst del software, en las propiedades de la capa, un ejemplo del resultado obtenido se puede visualizar en la Figura 27 y también arroja el itinerario a seguir para el recorrido de la ruta.

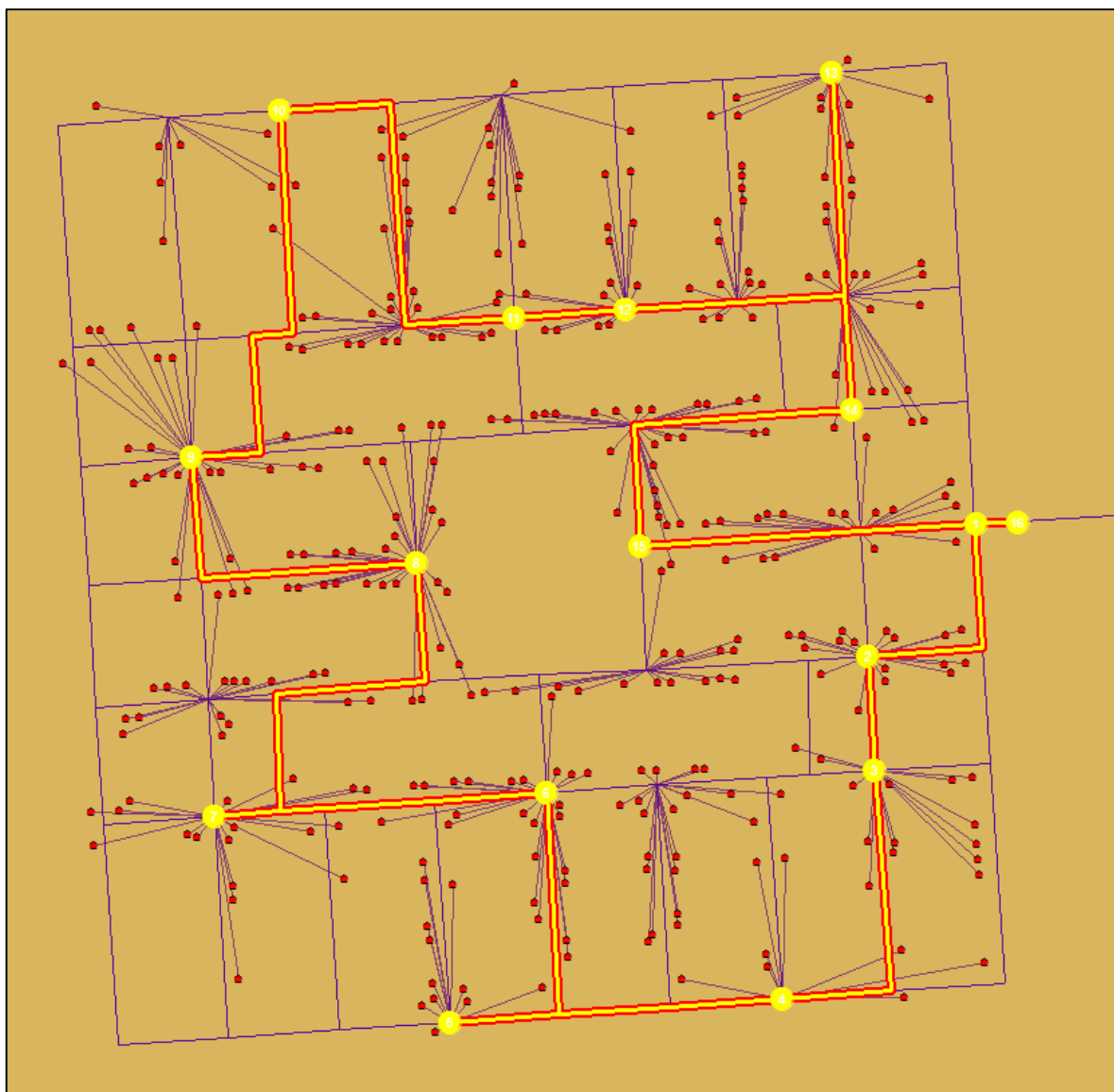


Figura 27 Microruta de recolección de RSU, San Isidro la Laguna. Elaboración propia.

³² Eficiente en términos de distancias, costos, tiempos o cualquier valor de impedancia que sea atribuido a la red.

4.2.1.2 Microruteo Localidades Urbanas

Para el caso de las localidades urbanas (excepto Limones), el desarrollo del diseño de las rutas de recolección se llevó a cabo por medio del principio del problema del cartero chino debido a ser este el problema que se asemeja al tipo de servicio que se presta, recolección por acera.

Para la solución del problema de ruteo se utilizó el software TransCAD ya que es un software especializado en la resolución de problemas de logística y transporte.

La metodología empleada en este apartado se describe en la Figura 28.

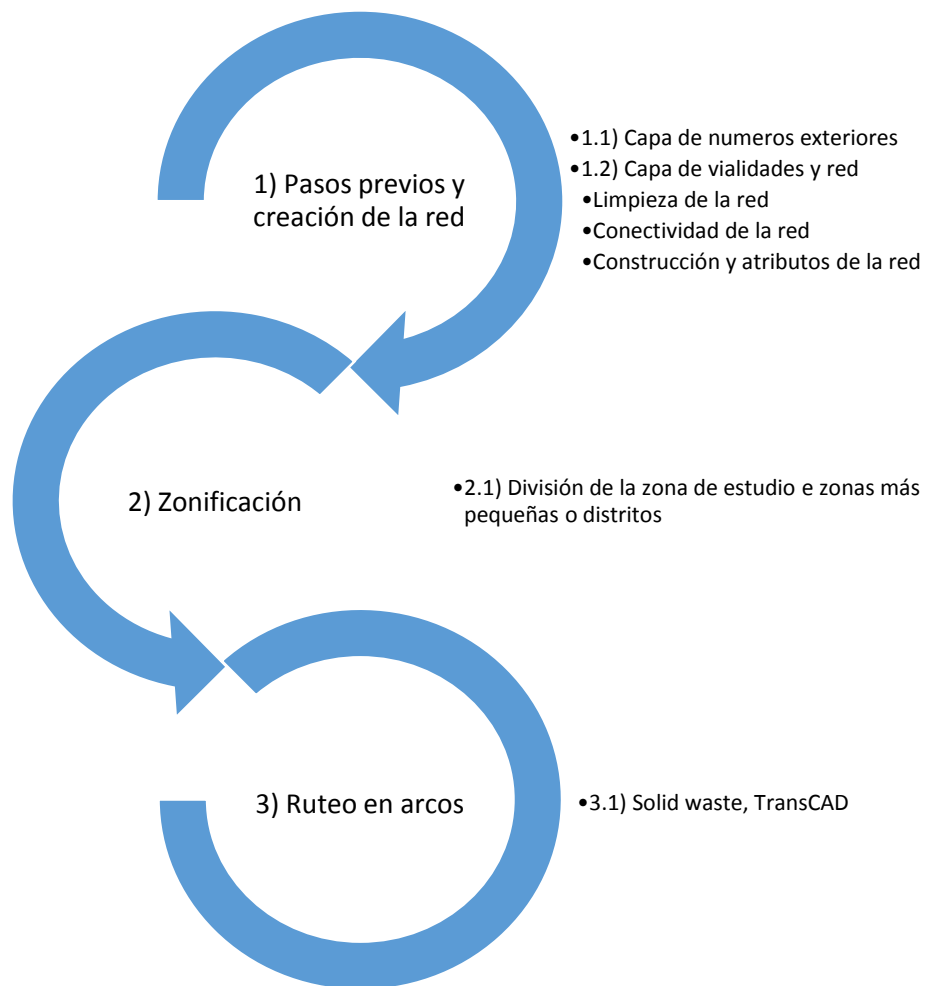


Figura 28 Metodología para el Microruteo de las localidades urbanas. Elaboración propia.

a) Pasos previos y creación de la red

En el caso de la localidad urbana de Bacalar, el INEGI cuenta con una capa de vialidades y números exteriores, los cuales sirvieron como entrada de información para la solución del diseño de rutas de esta localidad.

Se revisaron las capas de vialidades y manzanas proporcionadas por INEGI buscando en ellas conectividad, vialidades en uso, manzanas utilizadas para otros fines distintos al uso de suelo casa-habitación y se les atribuyeron las características necesarias para llevar a cabo el uso de la herramienta de TransCAD, es decir los campos necesarios (ver Figura 30 y Tabla 46).

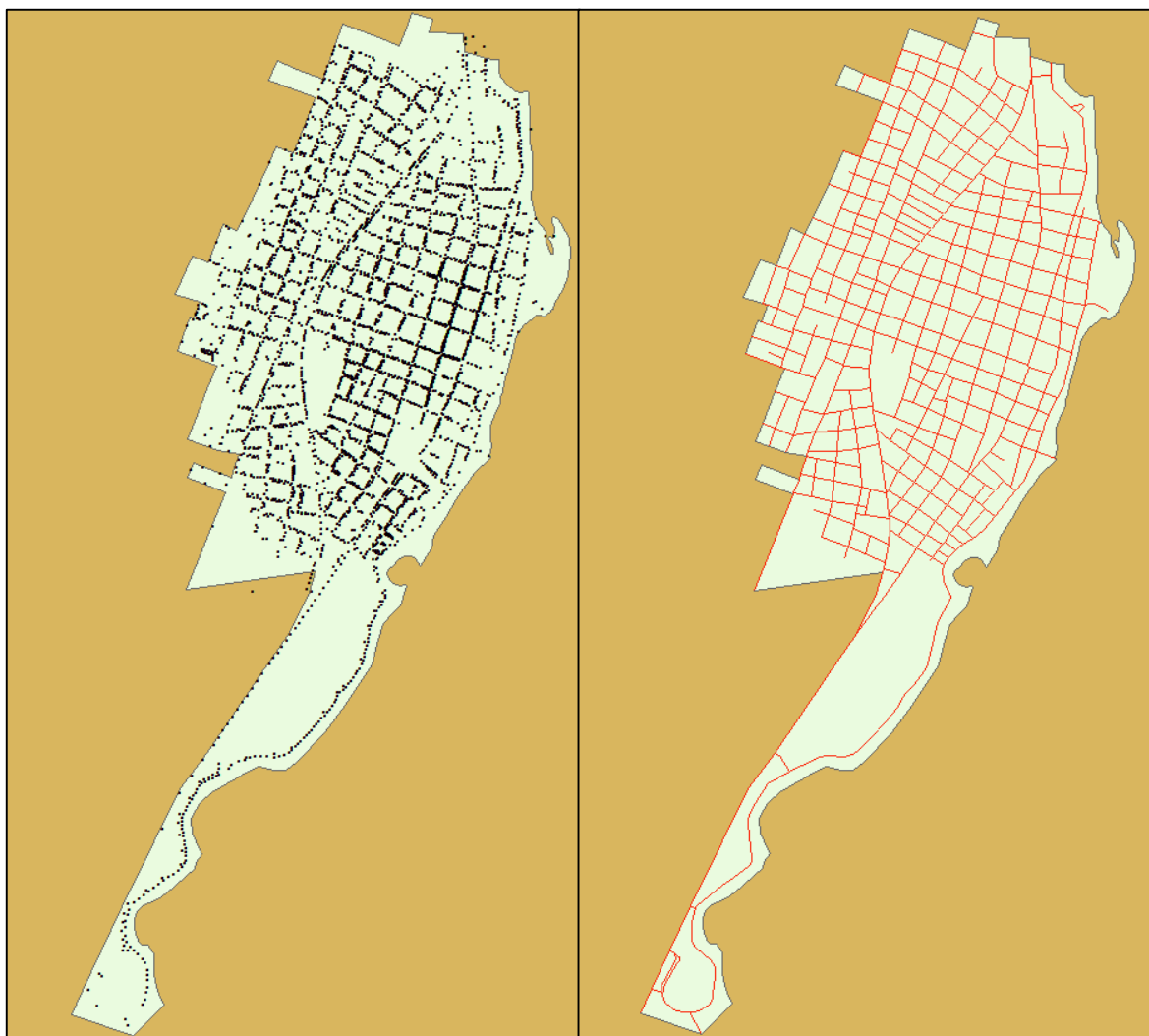


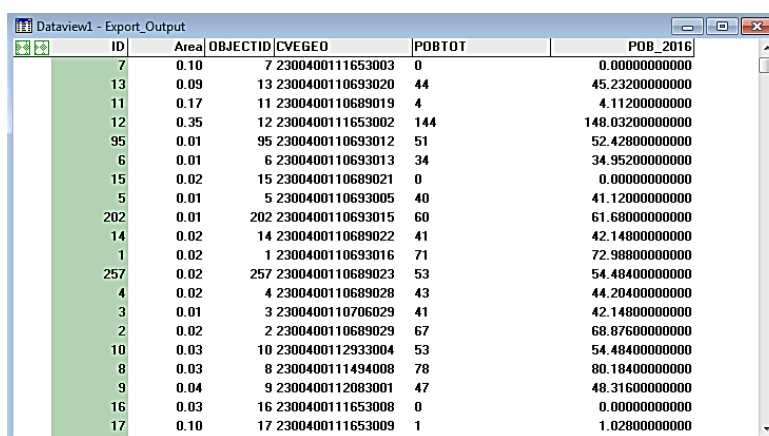
Figura 29 Capas de números exteriores y vialidades, Bacalar. Elaboración propia.

b) Zonificación

La zonificación consistió en dividir el área de estudio en regiones (o distritos) más pequeñas para la prestación del servicio de recolección, debido a que no se podría realizar el servicio en un solo turno de trabajo por el tamaño de la localidad y su generación de RSU.

Para realizar la zonificación se empleó el módulo de “*partición regional*” de TransCAD, con él se puede dividir la zona de estudio con base a población, áreas, longitudes o con cualquier característica común entre distintas áreas.

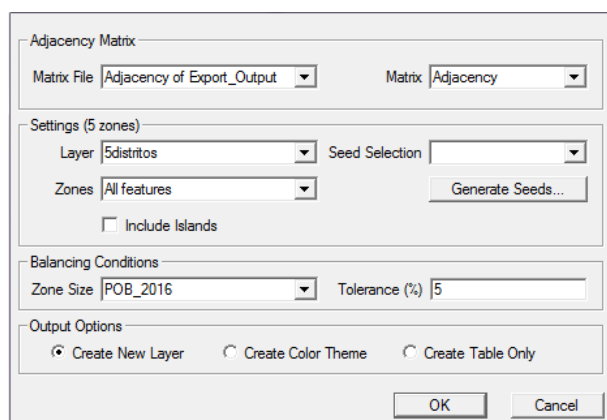
Para ello se utilizó una capa de polígonos vectoriales, los cuales representan las manzanas y tienen un atributo de población, entonces, la partición regional se llevó a cabo con el atributo de la población. Los campos requeridos se pueden observar en la Figura 30.



ID	Area	OBJECTID	CVEGEO	POBTOT	POB_2016
7	0.10	7	2300400111653003	0	0.0000000000
13	0.09	13	2300400110693020	44	45.2320000000
11	0.17	11	2300400110689019	4	4.1120000000
12	0.35	12	2300400111653002	144	148.0320000000
95	0.01	95	2300400110693012	51	52.4280000000
6	0.01	6	2300400110693013	34	34.9520000000
15	0.02	15	2300400110689021	0	0.0000000000
5	0.01	5	2300400110693005	40	41.1200000000
202	0.01	202	2300400110693015	60	61.6800000000
14	0.02	14	2300400110689022	41	42.1480000000
1	0.02	1	2300400110693016	71	72.9880000000
257	0.02	257	2300400110689023	53	54.4840000000
4	0.02	4	2300400110689028	43	44.2040000000
3	0.01	3	2300400110706029	41	42.1480000000
2	0.02	2	2300400110689029	67	68.8760000000
10	0.03	10	2300400112933004	53	54.4840000000
8	0.03	8	2300400111494008	78	80.1840000000
9	0.04	9	2300400112083001	47	48.3160000000
16	0.03	16	2300400111653008	0	0.0000000000
17	0.10	17	2300400111653009	1	1.0280000000

Figura 30 Campos requeridos para la zonificación en TransCAD. Elaboración propia.

Una vez que se tienen los campos necesarios, se configura el software para que lleve a cabo el análisis (Figura 31). El análisis se realizó para distintos números de distritos (o zonas) y se determinó cual era la mejor opción para el ruteo con base en la extensión, kilogramos de RSU y divisiones naturales que se hay en el municipio, finalmente se determinaron 5 distritos y a éstos se les realizó en análisis de ruteo en arcos.



Adjacency Matrix

Matrix File: Adjacency of Export_Output Matrix: Adjacency

Settings (5 zones)

Layer: 5distritos Seed Selection: []

Zones: All features Generate Seeds...

☐ Include Islands

Balancing Conditions

Zone Size: POB_2016 Tolerance (%): 5

Output Options

☒ Create New Layer ☐ Create Color Theme ☐ Create Table Only

OK Cancel

Figura 31 Configuración del análisis de zonificación en TransCAD. Elaboración propia.

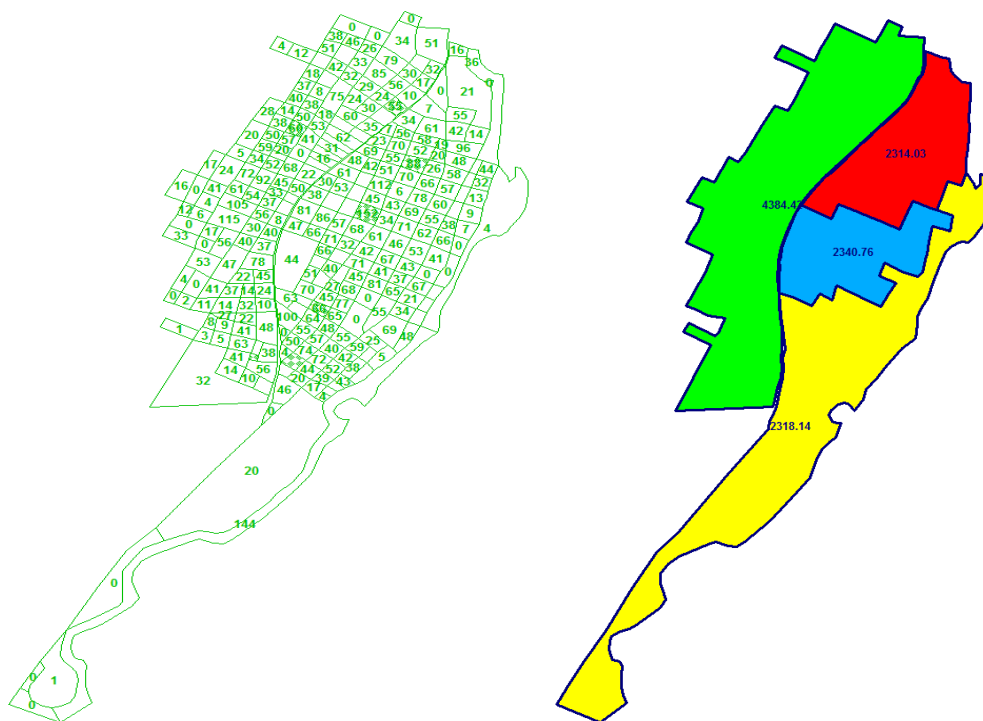


Figura 32 Capa de población por manzana y partición regional de la cabecera municipal de Bacalar. Elaboración propia.

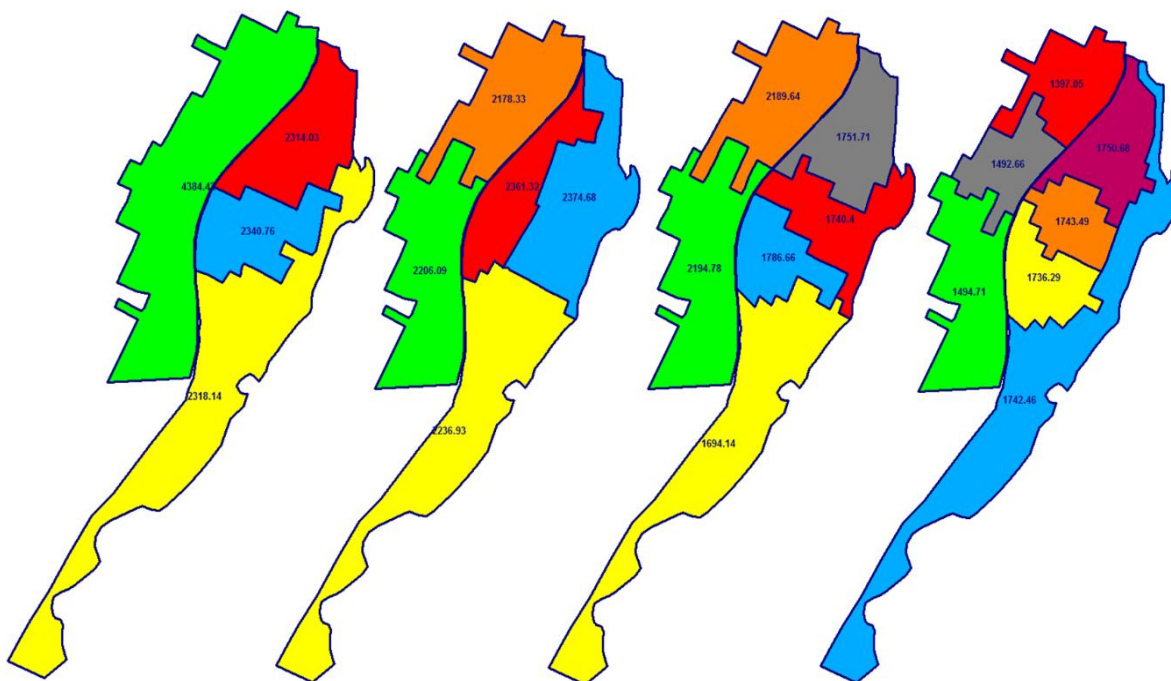


Figura 33 Partición regional para 4, 5, 6 y 7 distritos, respectivamente. Elaboración propia.

c) Ruteo (en arcos)

Una vez obtenida la capa de la partición regional, se utilizó para dar atributos a la red respecto a cómo se realizaría el ruteo, es decir se asignó cada vialidad a un distrito realizar el recorrido y evitar la repetición de las mismas calles en distintos distritos o zonas de recolección.

Esto se realizó por medio de la edición del dataview de los atributos de la red en TransCAD, los campos necesarios para llevar a cabo el ruteo pueden ser vistos en la Figura 34.

ID	Length	Dir	NomVial	[SF AB]	[SF BA]	[SV AB]	[SV BA]	[STime AB]	[STime BA]	Distrito	SType	[Weight AB]	[Weight BA]	[Dead AB]	[Dead BA]
705	0.01	0		--	--	30	30	0.0002	0.0002	--	--	1.00	1.00	0.0002	0.0002
2	0.15	0 23		1	--	5	30	0.0306	0.0051	1	1	3.00	1.00	0.0051	0.0051
3	0.16	0 3		--	1	30	5	0.0054	0.0325	3	1	1.00	2.00	0.0054	0.0054
4	0.14	1 22		1	--	5	--	0.0277	--	3	1	2.00	--	0.0046	--
5	0.10	1 COSTERO		--	--	30	--	0.0356	--	2	--	1.00	--	0.0356	--
6	0.11	0 13		1	--	5	30	0.0212	0.0035	4	1	3.00	1.00	0.0035	0.0035
7	0.08	0 16		1	--	5	30	0.0168	0.0028	4	1	3.00	1.00	0.0028	0.0028
8	0.13	0 15		--	1	30	5	0.0044	0.0264	4	1	1.00	2.00	0.0044	0.0044
9	0.09	0 13		1	--	5	30	0.0186	0.0031	4	1	3.00	1.00	0.0031	0.0031
10	0.10	0 18		1	--	5	30	0.0204	0.0034	4	1	3.00	1.00	0.0034	0.0034
11	0.12	1 7		1	--	5	--	0.0234	--	3	1	2.00	--	0.0039	--
12	0.27	1 1		1	--	5	--	0.0545	--	3	1	2.00	--	0.0091	--
13	0.11	1 5		1	--	5	--	0.0224	--	3	1	2.00	--	0.0037	--
14	0.15	0 21		1	--	5	30	0.0306	0.0051	1	1	3.00	1.00	0.0051	0.0051
15	0.10	0 9		1	--	5	30	0.0203	0.0034	3	1	3.00	1.00	0.0034	0.0034
16	0.14	1 20		1	--	5	--	0.0287	--	3	1	2.00	--	0.0048	--
17	0.12	1 19 LIBRAMIENTO		1	--	5	--	0.0233	--	1	1	2.00	--	0.0039	--
18	0.46	-1 19 LIBRAMIENTO		--	1	--	5	--	0.0924	4	1	--	2.00	--	0.0154
20	1.03	1 307		--	--	30	--	0.0342	--	2	--	1.00	--	0.0342	--
21	0.05	1 COSTERO		1	--	5	--	0.0100	--	2	1	2.00	--	0.0017	--
679	0.27	1 COSTERO		1	--	5	--	0.0549	--	3	1	2.00	--	0.0091	--
681	0.11	1 5		1	--	5	--	0.0223	--	3	1	2.00	--	0.0037	--

Figura 34 Definición de campos y atributos de la red de vialidades. Elaboración propia.

Cada campo representa un atributo de las calles, en la Tabla 46 se explica a detalle el significado de cada uno de ellos, cabe resaltar que estos campos se obtuvieron del manual *Routing and Logistics with TransCAD 4.8*.

Una vez revisada la red y los atributos de cada campo, se procedió a utilizar el módulo de *Solid Waste Collection Routing* de TransCAD, donde se debe realizar una selección de nodos para iniciar el proceso de la ejecución del análisis y seleccionar los campos anteriormente descritos de acuerdo a un proceso preestablecido en el software.

Campo	Significado	Descripción
ID	Identificador único del elemento vectorial	Es solo un número identificador de cada elemento vectorial, ya sea líneas, puntos o polígonos. El programa asigna automáticamente este campo
Length	Longitud del elemento vectorial	Es la longitud del elemento vectorial, en este caso la longitud es lo que mide la línea dibujada, la cual representa las calles o vialidades de circulación, sus unidades pueden ser seleccionadas a conveniencia del usuario
Dir	Dirección del elemento vectorial	Es la dirección de flujo de cada elemento vectorial (líneas/calles/vialidades), debe ser modificado ya que el programa asigna automáticamente flujo en ambos sentidos de las vialidades; 0 – flujo en ambos sentidos de las líneas 1 – flujo en la dirección topológica (como fue dibujado) de la línea -1 – flujo en sentido contrario a la dirección topológica (como fue dibujado) de la línea NULL – no existe sentido alguno en la vialidad
NomVial	Nombre vial del elemento vectorial	Nombre de cada segmento de la vialidad
SF (Service Flag AB - BA)	Bandera de servicio del elemento vectorial	Representa el lado de la calle donde se requiere el servicio de recolección 0/NULL – No se requiere servicio 1 – Sí se requiere servicio
S TIME (Service time AB - BA)	Tiempo de servicio del elemento vectorial	Representa el tiempo que tarda el servicio en cada vialidad. Para el caso analizado (problema del cartero chino) se definió como la longitud de la vialidad entre la velocidad a la que se debe recorrer el arco para brindar el servicio de recolección $S\text{Time} = \text{Length}(\text{km}) / 5 (\text{km/h})$ Evidentemente, la velocidad de recolección se asume con un valor igual a 5 km/h, lo cual está debajo del promedio de la velocidad de recolección obtenida en las observaciones de campo (9 km/h)
Distrito	Valor numérico que representa el distrito al que pertenece cada elemento vectorial (Numérico)	Distrito al que se asignará cada vialidad para su ruteo
SType	Tipo de servicio del elemento vectorial	Tipo de servicio que puede ser prestado al realizar el recorrido de la ruta 0 – no se requiere de servicio 1 – se puede prestar el servicio (SF AB-BA) en ambos lados de la calle con un solo pase por la misma, es decir, las calles no están separadas físicamente 2 – se requiere de servicios separados de recolección, un recorrido por cada lado de la calle para recolectar los RSU, es decir, las calles están físicamente separadas por camellones, aceras, paredes o algo que impide el cruzamiento de la calle para brindar el servicio de recolección
Weight (AB - BA)	Peso del elemento vectorial	Es la prioridad de paso que se le asigna a cada vialidad, de menor a mayor; 0/NULL – si existe la vialidad pero no hay paso 1 – si existe el paso pero no se requiere servicio de recolección 2 – si existe el paso y se requiere recolección en un solo sentido de la calle 3 – si hay paso y se requiere recolección en ambos sentidos de la calle
Dead (deadhead AB - BA)	Tiempo muerto del elemento vectorial	Representa el tiempo muerto de recolección, es decir, es el tiempo que transcurre entre cada intervalo que no existe recolección $\text{Deadhead} = \text{Length} (\text{km}) / 30 (\text{km/h})$ Evidentemente, la velocidad de NO recolección se asume con un valor igual a 30 km/h, lo cual está debajo de la velocidad promedio permitida en las vialidades de la zona (40 km/h)

Tabla 46 Significado de los campos mostrados. Elaboración propia.

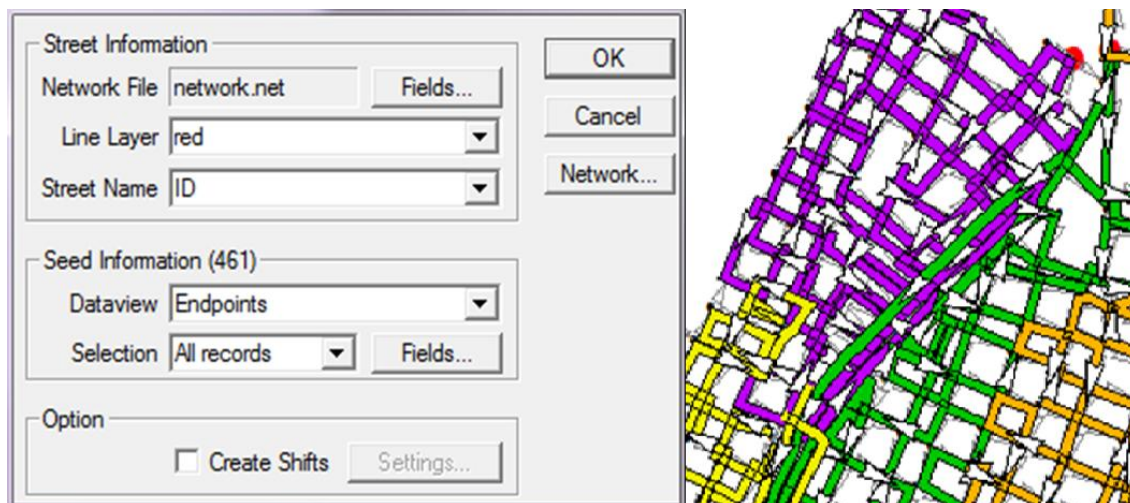


Figura 35 Configuración del análisis para la obtención de rutas y ejemplo de las rutas obtenidas. Elaboración propia.

4.2.2 Macroruteo

Esta etapa consistió básicamente en reunir los resultados de los microruteos anteriormente descritos y asignar los recursos para el completo diseño de las rutas de recolección, esto no pudo ser realizado en un solo paso debido al tipo servicio de recolección que se tiene en las localidades urbanas y al tipo de servicio propuesto de recolección en las localidades rurales, debido a ello se tuvo que realizar los microruteos de la manera anteriormente descrita.

4.2.2.1 Cálculo de recursos

Una parte importante de la cual hasta ahora no ha sido discutida son los recursos con los que cuenta el municipio (2 camiones recolectores y 1 camioneta) y los que se necesitarían para la cobertura de la recolección en la zona de estudio, sin embargo, esto se calculó de la siguiente manera siguiendo el manual de SEDESOL, dando por resultado 5 camiones recolectores, de los cuales dos ya los tiene el municipio y además cuenta con una camioneta para dar el servicio.

$$N_v = \frac{G * P * 7 * Fr * K}{N * C * dh}$$

4.2.2.2 Asignación de recursos

Para realizar esta etapa se utilizó el módulo de *Vehicle Routing* del software mencionado, el cual se encarga de asignar las microrutas de recolección de cada localidad y distrito creado, y agruparlas para llevar a cabo una ruta completa de recolección, esto es, asignar los tiempos de cada microruta para formar una ruta de recolección, el software reconoce este procedimiento como un problema de VRP con ventanas de tiempo, donde:

- a) El modo de recorrido es de recolección (pickup);
- b) Las paradas (o clientes) son cada localidad, por lo tanto los tiempos de parada son los mismo que los tiempos de recolección de cada microrruta;
- c) El depósito (o almacén) es la estación de transferencia;
- d) Las ventanas de tiempo las presenta la estación de transferencia y el horario de servicio en cada localidad está restringido por las mismas
- e) El objetivo es minimizar el tiempo de cada macrorruta

Para ello se creó una red (Figura 37) de toda la zona de estudio, y se le asignó a la misma los campos con los atributos necesarios para la ejecución del software, con esto se obtuvieron los itinerarios completos de cada ruta. Los campos utilizados en cada capa vectorial corresponden a;

Capa de endpoints;

Demanda: kilogramos de RSU generados en cada localidad

Tiempo de servicio: el tiempo de recolección que se emplea en recorrer una microrruta

Tiempo de abertura y cierre: es el tiempo (horas) en el que se puede brindar el servicio de recolección, este se estableció por el horario de abertura y cierre de la estación de transferencia y el horario de trabajo del sitio de disposición final

Capa de vialidades;

Costo: tiempo que se emplea al recorrer una vialidad y velocidad a la que transita el vehículo

ID	Length	Dir	NOMVIAL	TIPOVIAL	[time h]	speed	[tiempo min]
1921	5.88	0	307	Principal	0.098	60	5.88
1925	9.46	0	16	Principal	0.158	60	9.46
1671	0.10	0	Ninguno	Secundaria	0.004	30	0.25
1703	0.16	0	Ninguno	Secundaria	0.007	30	0.40
1714	0.07	0	Ninguno	Secundaria	0.003	30	0.17
1723	0.16	0	Ninguno	Secundaria	0.007	30	0.40
1737	0.16	0	Ninguno	Secundaria	0.007	30	0.39
1926	5.39	0	16	Principal	0.090	60	5.39
10	0.14	0	20	Secundaria	0.006	30	0.34
43	0.08	0	16	Secundaria	0.003	30	0.20
126	0.15	0	21	Secundaria	0.006	30	0.37
152	0.12	0	7	Secundaria	0.005	30	0.28
180	0.01	0	22	Secundaria	0.001	30	0.03
301	0.12	0	19 Libramiento	Principal	0.002	60	0.12

Figura 36 Atributos de la red vial de la zona de estudio. Elaboración propia.



Figura 37 Red vial de la zona de estudio, Municipio de Bacalar. Elaboración propia.

Capítulo 5 Resultados y conclusiones

5.1 Resultados

El resultado de la aplicación de todos los procesos y metodologías anteriormente descritas, es el diseño de las rutas de recolección que se obtuvo, así como la localización de una estación de transferencia.

En los apartados siguientes se describen los resultados obtenidos de la metodología aplicada, en los anexos se pueden visualizar con mayor amplitud la descripción de los mismos. Cabe destacar que se cumplió con lo establecido en los objetivos del proyecto.

5.1.1 Localización de la estación de transferencia (ET)

CENTROIDE	X* Longitud	Y* Latitud
CENTROIDE DE GENERACION DE RSU DE POBLACION (C1)	-88.328914	18.816727
CENTROIDE DE VIALIDADES (C2)	-88.323230	18.819841
CENTROIDE DE GENERADORES (NEGOCIOS) DENUE (C3)	-88.366525	18.711704
1 - CENTRO ABSOLUTO SOBRE ARBOL CON PESOS (C4)	-88.342604	18.761224

Tabla 47 Coordenadas de los vértices que forman la región factible. Elaboración propia.

La localización de la estación de transferencia se podría realizar en un espacio infinito de puntos dentro de la región factible, sin embargo, este resultado está sujeto a las condiciones reales (propias del lugar, por ejemplo que exista carretera para llegar a la ET) y normas tales como las medioambientales y sociales, las cuales establecen que no se puede localizar este tipo de instalaciones en ANP, sitios RAMSAR, cuerpos naturales de agua, zonas propensas a inundaciones y a una distancia mínima de 500 metros de la población.

Tomando en cuenta estas restricciones y visualizando la región factible (Figura 38) se observó que solo existen dos puntos para la localización de la ET (Figura 39), la decisión de localizarla (punto 2) en uno u otro fue la altitud y la accesibilidad a la que se encuentra cada uno de ellos;

- Una zona es mejor a otra cuando menor altitud tenga, debido al riesgo que existe en caso de inundación o lluvia, de que los lixiviados³³ corran sobre el terreno contaminando

³³Lixiviado, líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando

mayormente las tierras o cuerpos de agua que se pudieran encontrar en la zona cuando la altura de la instalación es mayor

- b) La vialidad en el punto 2 es más accesible y queda más cerca del sitio de disposición final, por lo cual se selecciona el punto dos.

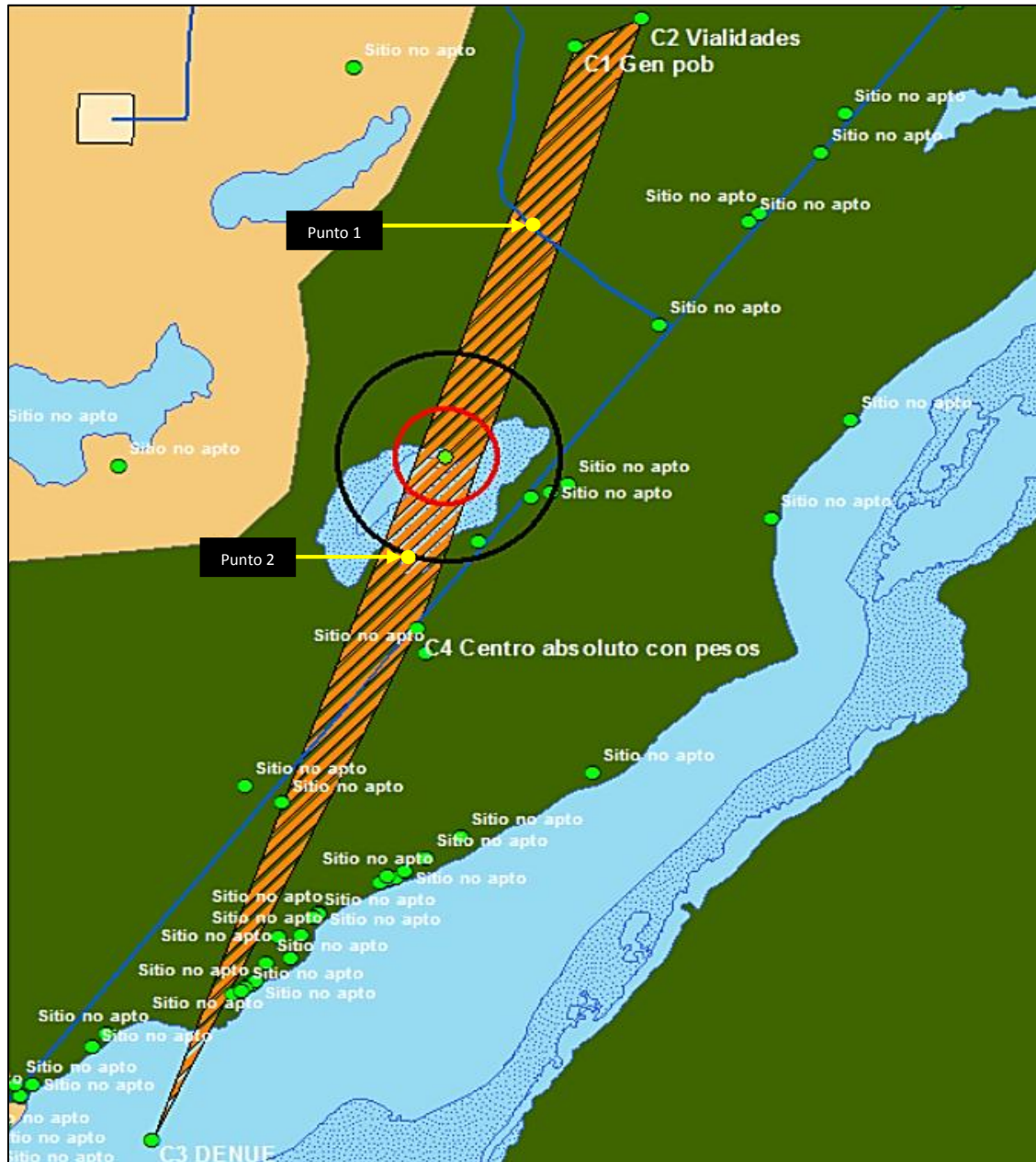


Figura 38 Región factible, sitios no aptos y puntos potenciales para la localización de la estación de transferencia. Elaboración propia.

su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos. Norma Oficial Mexicana NOM-083- SEMARNAT-2003 y Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.

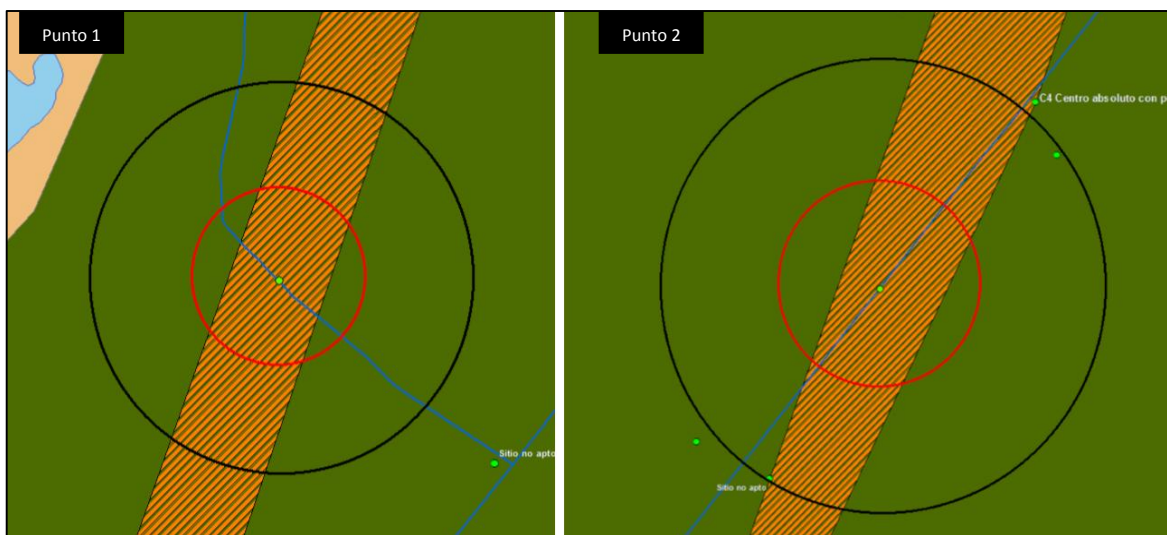


Figura 39 De izquierda a derecha, puntos 1 y 2 para la localización de la estación de transferencia con un radio de 500 (rojo) y 1000 (negro) metros. Elaboración propia.

Localización de la estación de transferencia	
X Longitud	Y Latitud
-88.349773	18.752892

Tabla 48 Coordenadas de la localización de la estación de transferencia (punto 2). Elaboración propia.

5.1.2 Cálculo y asignación de recursos

Este cálculo de recursos está en función de la generación de RSU de la población, de los turnos que pretendan realizar por día, de la capacidad de los camiones recolectores, de los días de trabajo, de la densidad de la basura en las localidades y de la cobertura que se quiera otorgar, básicamente del servicio que se quiera dar, en la Tabla 49 se observa la capacidad que tiene el municipio para la prestación del servicio, en la Tabla 50 se observa el cálculo de los camiones necesarios para cubrir las localidades de estudio lo cual resulta en 5 camiones recolectores, a ello se le sumaría la camioneta que el municipio tiene disponible para la recolección de RSU como recurso “extra”.

CAPACIDAD DE RECOLECCIÓN OFRECIDA POR EL MUNICIPIO			
Recurso	Cantidad	Capacidad (kg)	Capacidad total (Kg)
Camiones	2	6700	13,400
Camioneta	1	1000	1000
Capacidad total			14,400

Tabla 49 Equipo de recolección domiciliaria en el municipio de Bacalar. Elaboración propia.

G	1.009	Producción de residuos (Kg/hab/día)
P	23,339	Población de diseño (habitantes)
N	2	Número de viajes por vehículo por jornada de trabajo (o frecuencia de recolección)
C	6700	Capacidad útil de vehículo (Kg) = cc * fc
	cc	capacidad por camión (Kg) 6700
	fc	factor de compresión (Ton/m3) 0.4746
7 / dh		relación que toma en cuenta los RSU generados entre los días que se trabaja
dh	6	días horarios
Fr	1.135	factor de reserva 1.07 - 1.2 según el estado promedio, edad promedio y mantenimiento de la flotilla
K	1	factor de cobertura, 1 en sectores céntricos, disminuyendo en la periferia
Nv	3	Número de vehículos necesarios o zonas en las que se dividirá en sector
Ton	21,100	Nueva capacidad de recolección del municipio

Tabla 50 Cálculo de recursos necesarios para el servicio de recolección. Elaboración propia.

La cantidad de camiones necesarios para llevar a cabo a recolección en las localidades del municipio de Bacalar es 3 camiones recolectores con una capacidad de 6700 kilogramos comercialmente de 19 a 20 yardas cúbicas (14.5 – 15.3 metros cúbicos) y dos turnos de trabajo por día.

RUTAS					
Cobertura actual	kg generados	Ruta	salida	regreso	Tiempo total (horas)
no	4260	1	600	1029	4.48
no	6584	2	600	1112	5.20
no	6168	3	600	1107	5.12
no	5754	4	600	1014	4.23
si	5114	5	600	1015	4.25
si	5052	6	600	937	3.62
parcialmente	6408	7	600	1056	4.93
Si	5392	8	600	934	3.57
si	5364	9	600	852	2.87
Horas diarias necesarias para recolección de RSU					38.27
Promedio de horas empleadas por ruta de recolección					4.25

Tabla 51 Rutas. Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 51 se necesitan casi 40 horas de trabajo para brindar el servicio de recolección, por lo tanto las opciones son varias y principalmente cambian por los turnos de trabajo y el número de camiones empleados para el mismo, las opciones para realizar la tarea se muestran a continuación (Tabla 52).

	sistema actual	opción 1	opción 2	opción 3	opción 4	opción 5	opción 6
turnos	2	1	2	1	2	1	2
camiones	2	3	3	4	4	5	5
horas laborales	8	8	8	8	8	8	8
horas laborales totales	32	24	48	32	64	40	80
% horas trabajadas	1.20%	1.59%	0.80%	1.20%	0.60%	0.96%	0.48%
kg generados	12959	25048	25048	25048	25048	25048	25048
capacidad de recolección	26800	20100	40200	26800	53600	33500	67000
% de utilización de camión	48.4%	124.6%	62.3%	93.5%	46.7%	74.8%	37.4%

Tabla 52 Selección de camiones y turnos de trabajo. Elaboración propia.

Como se observa las opciones 1, 3 y 6 quedan descartadas la 1 y 3 por la sobreutilización del equipo lo cual ni siquiera es posible ya que las horas disponibles son menos que los que se requiere para la recolección y la 6 por la baja utilización del equipo, la opción 5 a pesar de dar un porcentaje alto de utilización significaría tener parados los camiones durante la mayor parte del día, las opciones 2 y 4 son las más recomendables, la 2 en caso de que se quiera el mayor ahorro posible en cuestión de la compra de camiones y la 4 se recomienda para dar solución a problemas cotidianos como descomposturas, amortiguar el crecimiento de la población, menor uso de los recursos (aumento de vida útil de los camiones), administración de los recursos a tareas especiales (recolección de residuos en parques, jardines, lugares públicos, residuos especiales y limpieza y barrido de calles).

5.1.3 Microrutas

Las microrutas obtenidas en las localidades urbanas y rurales del Municipio de Bacalar se muestran en la Tabla 53, en total se obtuvieron 15 microrutas, 5 con el método de recolección por acera y el resto por parada fija, siendo el primer método con el cual se obtiene una mejor eficiencia en kilogramos de RSU recolectados vs tiempo, 719,4 y 588.9 kilogramos por hora respectivamente, con un promedio general de 632.4 kilogramos por hora.

Localidad	Método de recolección	Población (2016)	Generación de RSU (Kg)	Tiempo de recolección total (h)	Kg recolectados por hora
Bacalar distrito 1	Acera	2206	2226	3.300	669
Bacalar distrito 2	Acera	2237	2257	3.900	574
Bacalar distrito 3	Acera	2375	2396	3.300	720
Bacalar distrito 4	Acera	2361	2383	2.600	908
Bacalar distrito 5	Acera	2178	2198	3.000	726
Limonos	Parada fija	3263	3292	5.020	656
Buenavista	Parada fija	700	706	1.222	578
Chacchoben	Parada fija	871	879	1.674	525
Lázaro Cárdenas	Parada fija	645	651	2.839	619
Caan Lumil	Parada fija	436	440	0.758	580
Miguel Hidalgo y Costilla	Parada fija	809	816	1.443	566
Kuchumatan	Parada fija	1219	1230	2.007	613
Maya Balam	Parada fija	2415	2437	3.933	620
San Isidro la Laguna	Parada fija	1029	1038	1.837	565
Pedro Antonio Santos	Parada fija	595	600	1.059	567

Tabla 53 Microrutas. Elaboración propia.

El detalle de la ruta que se debe seguir en cada localidad se encuentra en el apartado de anexos.

5.1.4 Macrorutas

En total se obtuvieron 9 macrorutas, las cuales se recorren dependiendo del servicio (un día sí y un día no), por lo cual para uno de estos dos días se utiliza un camión menos, el cual puede ser utilizado para brindar servicios especiales, mantenimiento, rol de camiones para mayores tiempos de vida útil de los camiones, utilización en caso de descompostura de algún otro, etc., por lo tanto el itinerario de cada ruta de recolección es el establecido en la Tabla 54 y éstas se seguirán en cada localidad de acuerdo al detalle en el anexo de las microrutas, el tiempo de servicio corresponde al tiempo de recolección total (minutos) de cada microruta, tiempo de apertura 6:00 am.

ROUTE	NAME	SEQUENCE	DUE TIME	ARRIVAL	SERVICE TIME	DEPARTURE	TRAVEL TIME	TOTAL DISTANCE	PICKUP Kg	TOTAL LOAD	STOP TYPE
1	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Pedro Antonio Santos	1	2000	630	47.0	717	30.0	29.99	1200	1200	Pickup
	Chachoben	2	2000	733	89.0	902	16.5	45.14	1758	2958	Pickup
	Lázaro Cárdenas	3	2000	911	46.0	957	8.2	53.31	1302	4260	Pickup
	Estación de Transferencia	4	1800	1029			32.1	85.41		4260	Depot
2	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Limones	1	2000	642	229.0	1031	41.6	41.56	6584	6584	Pickup
	Estación de Transferencia	2	1800	1112			41.6	83.13		6584	Depot
3	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Miguel Hidalgo y Costilla	1	2000	611	66.0	717	11.2	11.17	1632	1632	Pickup
	Kuchumatan	2	2000	737	86.0	903	19.9	30.36	2460	4092	Pickup
	San Isidro la Laguna	3	2000	928	84.0	1052	24.9	54.54	2076	6168	Pickup
	Estación de Transferencia	4	1800	1107			15.0	69.58		6168	Depot
4	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Caan Lumil	1	2000	621	37.0	658	21.2	21.16	880	880	Pickup
	Maya Balam	2	2000	704	163.0	947	5.8	26.26	4874	5754	Pickup
	Estación de Transferencia	3	1800	1014			27.0	52.53		5754	Depot
5	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Bacalar d2	1	2000	610	234.0	1004	10.3	10.30	5114	5114	Pickup
	Estación de Transferencia	2	1800	1015			10.3	20.59		5114	Depot
6	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Bacalar d1	1	2000	609	198.0	927	9.5	9.49	5052	5052	Pickup
	Estación de Transferencia	2	1800	937			9.5	18.98		5052	Depot
7	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Bacalar d5	1	2000	608	180.0	908	8.2	8.16	4996	4996	Pickup
	Buenavista	2	2000	934	64.0	1038	26.0	34.16	1412	6408	Pickup
	Estación de Transferencia	3	1800	1056			17.8	51.99		6408	Depot
8	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Bacalar d3	1	2000	608	198.0	926	8.1	7.94	5392	5392	Pickup
	Estación de Transferencia	2	1800	934			8.1	15.88		5392	Depot
9	Estación de Transferencia	0	1800			600		0.00		0	Depot
	Bacalar d4	1	2000	608	156.0	844	7.9	7.93	5364	5364	Pickup
	Estación de Transferencia	2	1800	852			7.9	15.85		5364	Depot

Tabla 54 Macrorutas. Elaboración propia.

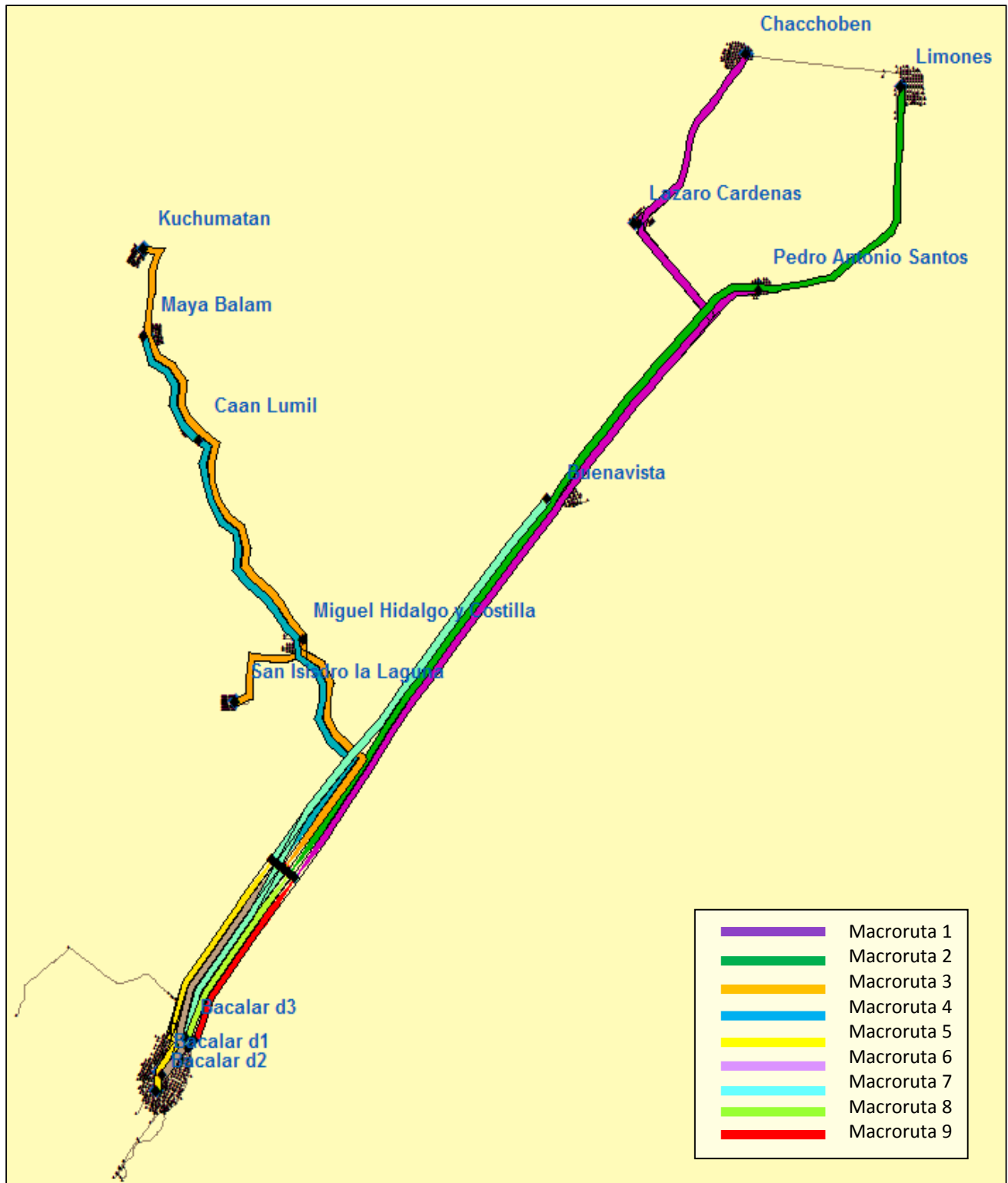


Figura 40 Mapa general de las rutas de recolección de RSU. Elaboración propia.

5.2 Conclusiones y recomendaciones

Existe una infinidad de variantes en el desarrollo de proyectos de este tipo, así como los enfoques que se prefieran en el desarrollo de los mismos, en el presente trabajo éstos fueron detallados al inicio del mismo, por tanto puede que coincidan o no con puntos de vista ajenos al mismo, sin embargo, se puede apreciar que es un sistema de recolección factible y próximo a la realidad en la que se encontraría el mismo, los aprendizajes, recomendaciones e impresiones se describirán a continuación:

- Se cumplió con el objetivo de diseñar el sistema de recolección de RSU.
- Se cumplió con el objetivo de la localización de la estación de transferencia empleando los métodos del centro de gravedad y 1-centro absoluto.
- Se integró el modelado de ruteo CPP TSP por parada y acera con un sistema de información geográfica.
- Se tiene una herramienta para la prestación del servicio de recolección en el municipio de Bacalar.
- El sistema es factible de acuerdo al presupuesto del municipio y a las condiciones particulares del mismo.
- Se implementó el ruteo de cada localidad de acuerdo al tipo de servicio establecido, por parada rurales o por acera urbanas.
- Integración de los distintos tipos de Microruteo para formar macrorutas y brindar el servicio de recolección en las localidades urbanas y rurales.
- Se desarrolló una metodología de análisis la cual puede ser replicada en cualquier municipio.

1. Sobre la información para el desarrollo del proyecto,

Se debe llevar a cabo una tarea más exhaustiva en la generación de información y conocimiento sobre los recursos con los que se cuenta a nivel nacional, no solo en materia de los RSU sino en todo sentido, infraestructura, indicadores de desempeño, actualizaciones de información, etc., con una mejor base en este ámbito, el desarrollo de proyectos sobre el diseño de rutas de recolección es una tarea relativamente fácil de realizar, sin embargo, debido a la falta de información se tuvo que crear la misma con las herramientas que se contó.

2. Sobre las autoridades,

Se debe contar con una mayor ambición por el deseo de contribuir a la sociedad con la ejecución de proyectos realizados en instituciones de alta calidad para el verdadero desarrollo sustentable de los municipios, de la misma manera se propone que se realice una mejor GIRSU ya que en algunas fases es de buena a regular pero en las etapas tratadas no existe atención y si se amplía la cobertura del servicio, se necesita mucha cooperación y comunicación por parte de las autoridades.

3. Sobre los resultados del proyecto,

I. Uso de SIG y modelos matemáticos

El objetivo planteado al inicio del trabajo de tesis se cumplió ya que al aplicar herramientas de tecnología SIG y modelos matemáticos que se seleccionaron para el diseño del sistema de recolección dieron como resultado una propuesta que cumple con las especificaciones propuestas al inicio.

Se puede decir que el sistema es factible dentro de los aspectos y parámetros seleccionados, sin embargo, la teoría dista de la realidad, para poder mejorar el sistema se deberá calibrar con la puesta en marcha del proyecto siguiendo las especificaciones propuestas, esto dependerá tanto de la cooperación de la población así como de las autoridades y encargados de la prestación del servicio, es normal que los resultados varíen un poco y en un principio no se obtengan los resultados teóricos, ya que este tipo de proyectos no se pueden ejecutar a la perfección y dependen mucho de la cooperación de todas las partes mencionadas así como de aspectos inimaginables al momento de prestar el servicio.

Algunos elementos clave para la ejecución de todo tipo de proyectos son los siguientes:

- ✓ La comunicación que permite la propagación de información necesaria para la concientización de la población y la capacitación de los empleados de recolección.
- ✓ La responsabilidad y definición de roles en el sistema de recolección y de todos los aspectos enfocados al desarrollo sustentable del municipio.
- ✓ La organización para llevar a cabo las acciones necesarias para el logro del establecimiento del sistema de recolección.
- ✓ La voluntad y al esfuerzo constante tanto de autoridades como de la población para que el sistema perdure y se utilice.

Parte de las recomendaciones es la ejecución del proyecto ya que con ello se puede solucionar la creación de tiraderos clandestinos a cielo abierto en las localidades donde no se cuenta con el servicio de recolección, por lo tanto se recomienda también la extensión del mismo a más localidades que están en la misma situación.

II. Equipos

Se recomienda la compra de camiones recolectores con la capacidad de 6700 kg, esto no solo es para que se pueda cumplir con la recolección en las localidades, sino para que la duración de proyecto sea mayor, ya que el continuo crecimiento de la población es un factor muy importante en este proyecto, por lo cual contar con una capacidad de recolección mayor permite amortiguar el mismo.

Del diagnóstico de campo se encontró que el encierro de los camiones se realiza en la cabecera municipal, sin embargo, para que éste sistema sea factible se debe tener el lugar de encierro en el mismo lugar que la estación de transferencia por lo tanto al espacio contemplado para la misma se deberá agregar el de encierro. Evidentemente también se recomienda la separación y compactación de los RSU en la ET.

Se recomienda la compra de góndolas con una capacidad de por lo menos 20 toneladas para la recepción de los RSU de los camiones recolectores, la frecuencia del vaciado de los RSU en el sitio de disposición final se realizará cada que la góndola se llene.

Para el sistema de rutas diseñado se observa que debido a la frecuencia de recolección (un día sí y uno no) y el número de rutas obtenido (9), se tiene que en los camiones sobra en un turno de jornada laboral, por lo tanto este extra se puede emplear en la recolección de residuos especiales o mejorar el servicio de barrido y limpieza de lugares públicos, aunado a ello se tiene la camioneta para designarla a otras actividades.

Las opciones para brindar el servicio de recolección son múltiples y dependen directamente del presupuesto que tenga el municipio, anteriormente se comentó la posibilidad de emplear 5 camiones con 1 turno de trabajo, la cual tiene una evidente mejora al duplicar los turnos de trabajo, en consecuencia se pueden emplear solo 3 camiones, sin embargo, existen más opciones de acuerdo con las horas de trabajo laborales y las condiciones particulares que se obtuvieron en el ruteo para la recolección de RSU en el municipio, el máximo ahorro se presenta en las opciones de 3 camiones pero se recomienda hacer el esfuerzo por 4.

III. Distritos y zonas de recolección

Para el caso de 4 distritos las zonas son muy grandes y la prestación del servicio de recolección hubiera resultado en rutas muy largas y no alcanzables a cubrir en un turno, para 6 y 7 distritos las zonas son muy pequeñas, además en el análisis de rutas, las mismas se “traslapan” muchas veces, lo cual resulta en recorrer varias veces una misma calle y esto resulta en recorridos ineficientes y mayores tiempos muertos en cada microruta.

En los tres casos mencionados, las zonas son “no equivalentes”, es decir el análisis de la partición regional arroja resultados con distritos muy dispares en población en consecuencia a la generación de RSU, por lo tanto, se seleccionó la partición regional de 5 distritos ya que ésta es un intermedio entre los otros análisis ya que se minimizan y maximizan sus ventajas y desventajas, además esta zonificación sigue mayormente particiones naturales (calles, camellones, etc.) lo cual es altamente recomendado en el manual de SEDESOL y no se repiten calles en el traslado o recolección del RSU.

4. Resumen de proyecto

Algo que repercute en la ejecución de proyectos municipales son los factores sociales y económicos por lo cual el municipio debe de repartir equitativamente los recursos que le son asignados, por lo tanto en la Tabla 55 se muestra un pequeño resumen de la inversión requerida para llevar a cabo el proyecto, siendo factible el proyecto ya que el presupuesto municipal supera altamente el costo de éste.

Localidades y población beneficiada	Bacalar, Limones, Buenavista, Chacchoben, Lázaro Cárdenas, Caan Lumil, Miguel Hidalgo y Costilla, Kuchumatan, Maya Balam, San Isidro la Laguna, Pedro Antonio Santos	23,339
Cobertura	Por localidad	Más del 90 %
	Municipal	50 %
Inversión	Estación de transferencia	\$ 8,120,000
	Góndola	\$ 2,500,000
	Camión	\$ 2,145,000
	Microruteo y macroruteo	\$ 588,700
	Clausura de tiraderos clandestinos	\$ 8,839,419
	TOTAL	\$ 20,000,000

Tabla 55 Resumen de proyecto (unidad en pesos). Elaboración propia.

5. Trabajo a futuro

Como ya se dijo, el sistema deberá mejorarse conforme se tengan las primeras impresiones en la puesta en marcha y a futuro se deberá modificar para soportar los cambios en la población (hábitos, crecimiento, migración, urbanización, etc.) sin embargo, aquí se mostró un herramienta capaz de tomar en cuenta todos estos factores, con base en ellos se puede desarrollar una plantilla de software para adoptar los cambios y obtener resultados de una manera rápida y eficiente, lo cual pudiera ser un punto a favor para la correcta GIRSU en el municipio de Bacalar y una invitación abierta a los demás municipios de la República Mexicana.

Referencias

- Aceves, R., El problema de la localización de servicios, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2015.
- Agenda de Competitividad de los Destinos Turísticos de México, Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México, 2014.
- Agenda de Competitividad de los Destinos Turísticos de México, Universidad de Quintana Roo, Quintana Roo, México, 2015.
- Agenda de Competitividad Turística del Destino Bacalar (ACDT Bacalar), Secretaría Estatal de Turismo del Gobierno del Estado de Quintana Roo, Quintana Roo, México, 2015.
- Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación, México, Última Reforma 24 de Febrero de 2017 (DOF, 26/09/2014)
- Bosque, J., Gómez, M., Rojas, P., Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: ventas derivadas de la integración de modelos de localización – asignación y SIG, Cuadernos Geográficos, 39 (2006-2), 53-68.
- Bosque, J., Gómez, M., Rodríguez, V., Rodríguez, E., Vela, A., Días, A., (2009), Localización de centros de tratamiento de residuos, una propuesta metodológica basada en SIG, Madrid, España.
- Carro, R., Gonzáles, D., Localización de Instalaciones, Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.
- Censo de Población y Vivienda 2010, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 2010.
- Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 2017.
- Dene, L., Solid Waste Collection Vehicle Route Optimization for the City of Redlands, California, University of Redlands.
- Diagnóstico de Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos, Bacalar, Quintana Roo, México, 2015.
- Diagnóstico del sector recolección y disposición final de los residuos sólidos urbanos. Banco de Proyectos Municipales, Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS), Municipio de Bacalar, Quintana Roo. 2015.
- Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México, 2016.
- El medio ambiente en México, Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano - Marginadas, Secretaría de Desarrollo Social, 2013 - 2014.
- Encuesta Intercensal 2015, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 2016.
- Estaciones de Trasferencia de residuos sólidos en áreas urbanas, Instituto Nacional de Ecología, Distrito Federal, México.
- Conjunto de Datos Vectoriales de Carreteras y Vialidades Urbanas Edición 1.0 (Distribución por Entidad Federativa), Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2016.
- Guerrero, C., (2007), Un modelo multicriterio de localización de centros no deseados con pesos, Sevilla España, ISBN-13: 978-84-690-4948-8.
- Gutiérrez, F., (2008), Análisis del sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el Centro Histórico de Morelia, aplicando Sistemas de Información Geográfica, (Tesis de maestría), Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Heryelin, M., Chirinos, S., La Basura, el Ambiente y la Educación Ambiental desde la Complejidad, (Tesis de Licenciatura), Facultad de Humanidades y Educación, Escuela de Artes, Universidad Central de Venezuela.

INEGI. Residuos Sólidos Urbanos. Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2013. Tabulados básicos.

Jaramillo, J. Gestión Integral de los residuos sólidos municipales – GIRSM. Seminario Internacional Gestión Integral de Residuos y Peligrosos, Siglo XXI Medellín. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos del estado de Quintana Roo, Quintana Roo, México, 17 de diciembre de 2007.

López, N., Propuesta de un programa para el manejo de los residuos sólidos en la plaza de mercado de Cerete, Córdoba, (Tesis de Maestría), Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, Pontificada Universidad Javeriana.

Métodos de proyección de población, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), México.

Osorio, E., (2011), Gestión sistémica de residuos sólidos (papel y cartón) en una Institución de educación superior, (Tesis de Maestría), Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Nacional Politécnico, México.

Plan de Desarrollo Municipal 2013 – 2016, H. Ayuntamiento de Bacalar, Quintana Roo, México, 2013

Proyecciones de la población de México 2010 - 2050, Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2015.

Quirós, A., López, M., Montiel, L., Martínez, G., Alcatraz, A., (2012), Modelo matemático del problema del agente viajero para encontrar la ruta óptima de distribución, Instituto Tecnológico de Sonora, Sonora, México.

Recolección de residuos sólidos urbanos, Secretaria de Desarrollo Social, Residuos, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Sakurai, K., Diseño de las rutas de recolección de residuos sólidos, Área de Residuos Sólidos, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.

Zahler, D., (2009), The Black Death, Minneapolis: Twenty-First Century Books.

Otras fuentes de información consultadas

EHP Environmental Health Perspectives.

OPS organización panamericana de la salud.

Residuos sólidos urbanos, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)

Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT).

Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)

Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA)

Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda (SEDUVI)

Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA)

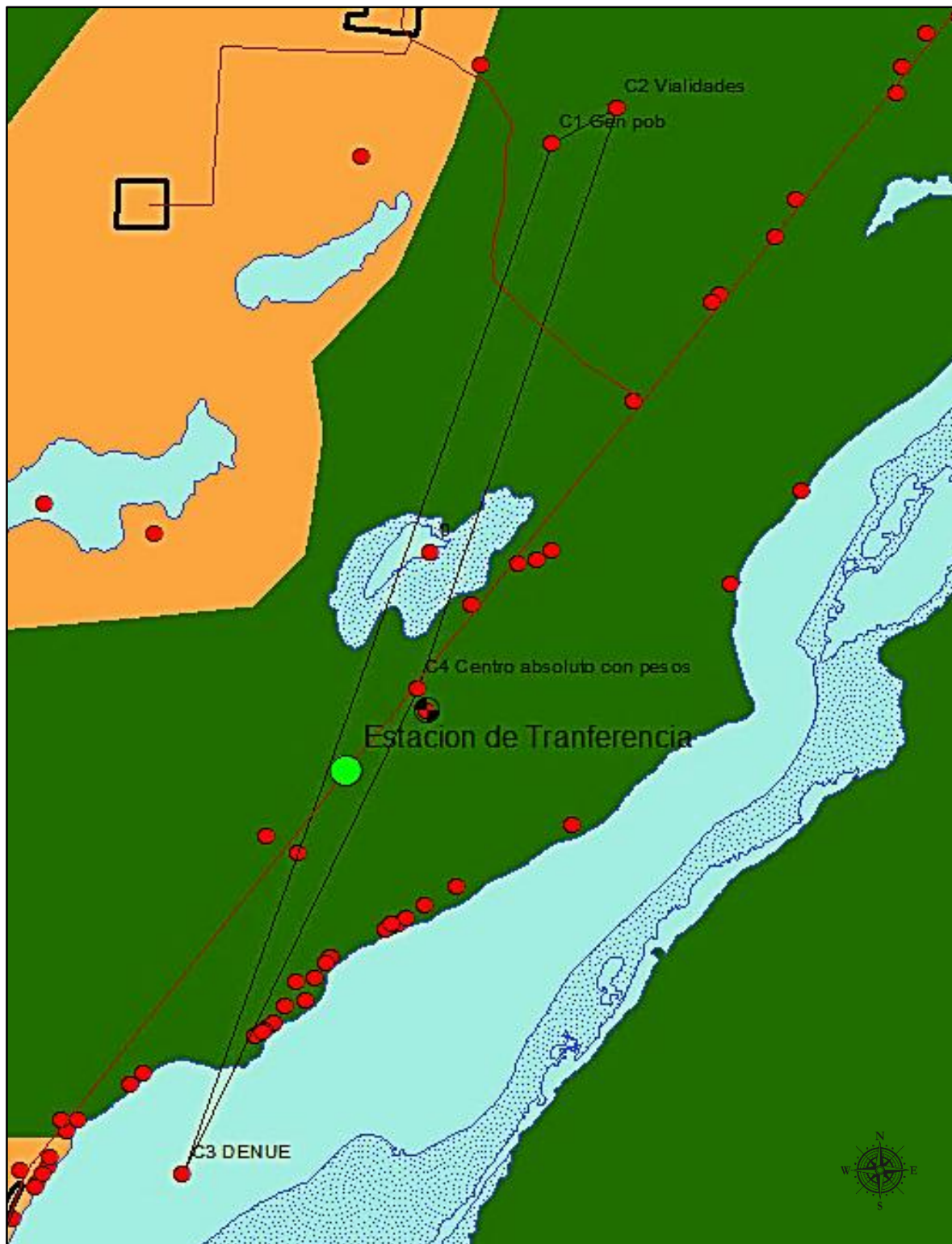
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)

Secretaría de Turismo (SECTUR).

Sistema Nacional de Información Geográfica y Estadística (SINEG)

Anexos

Localización de la estación de transferencia



Microrutas

Simbología



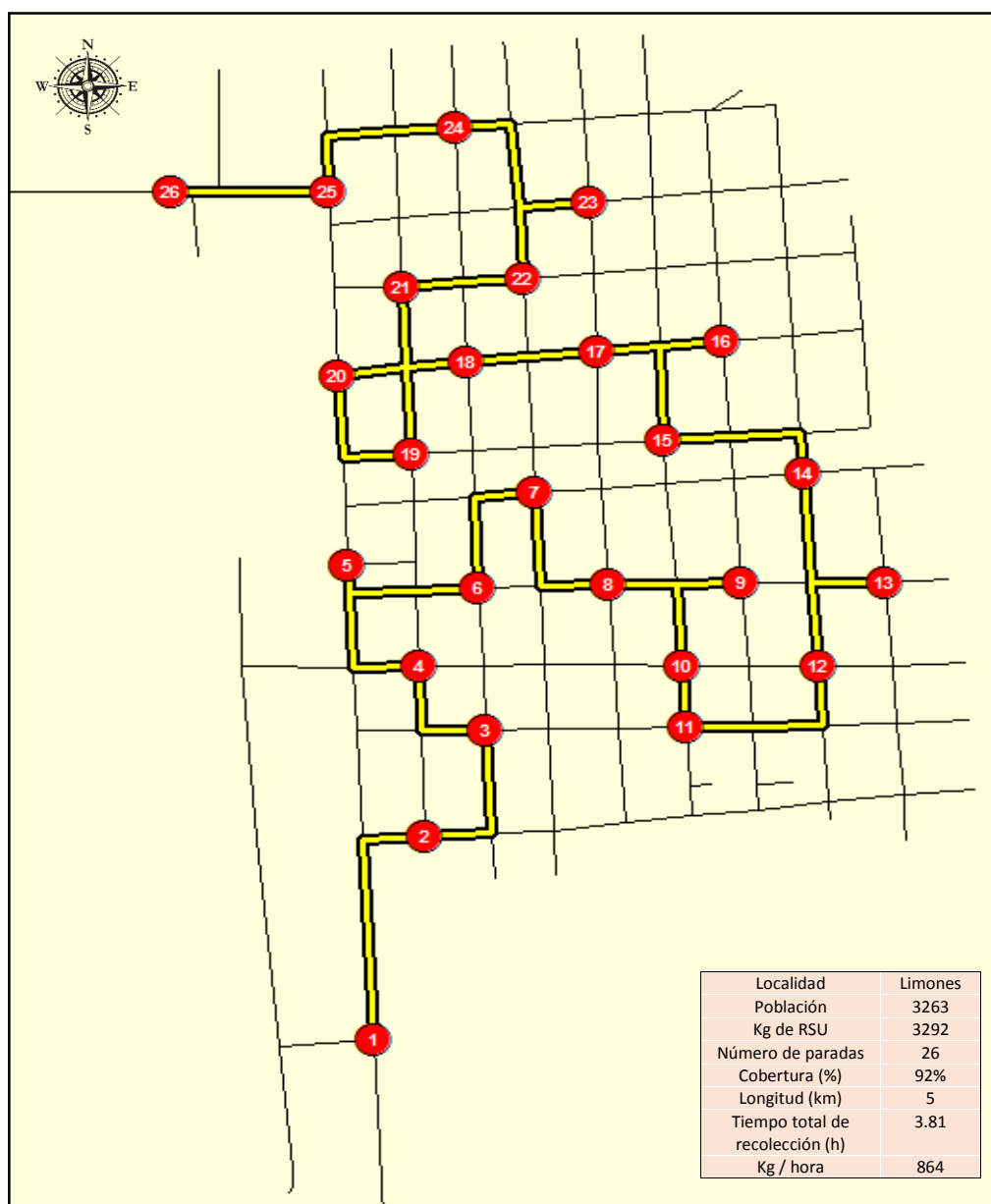
Microruta

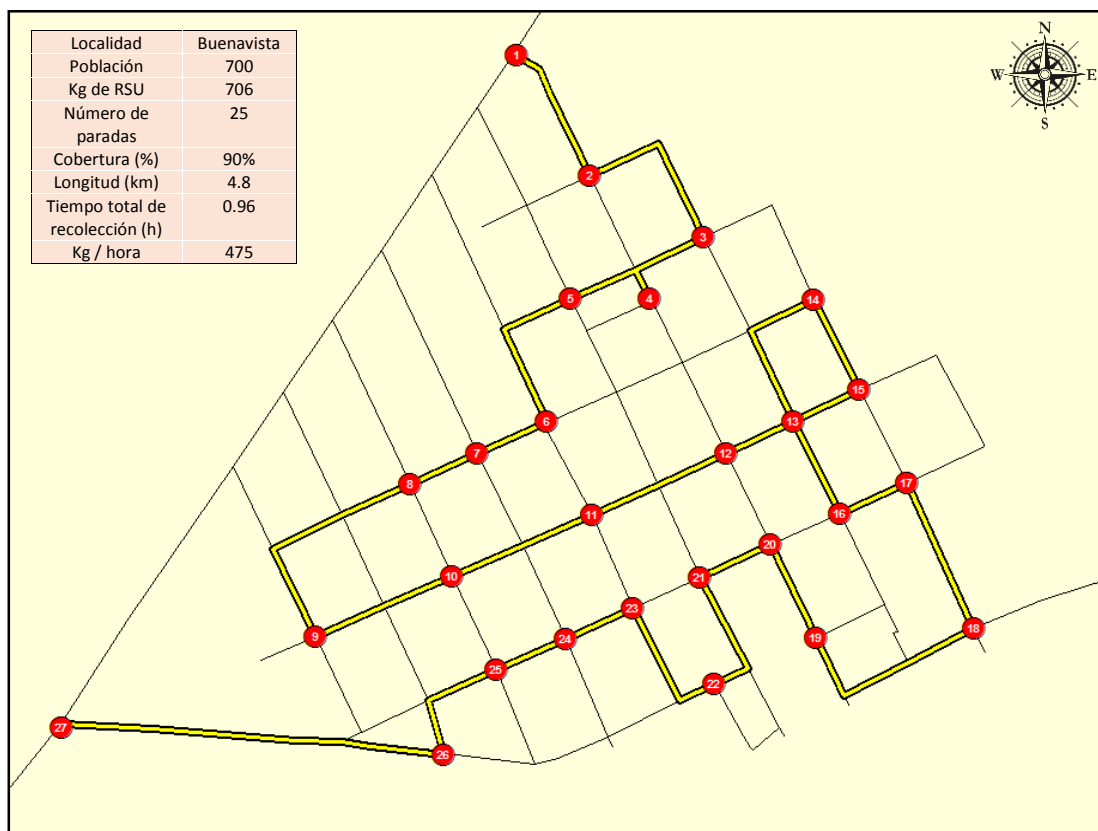
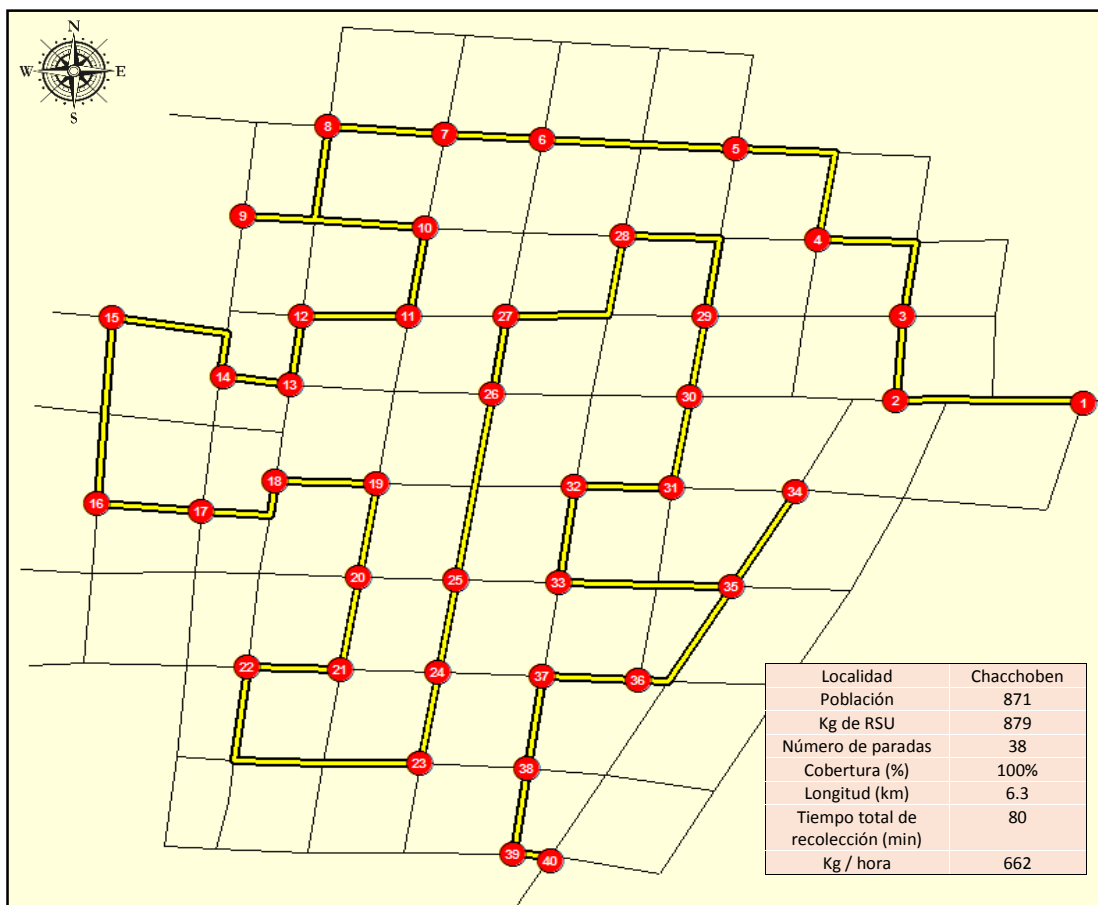


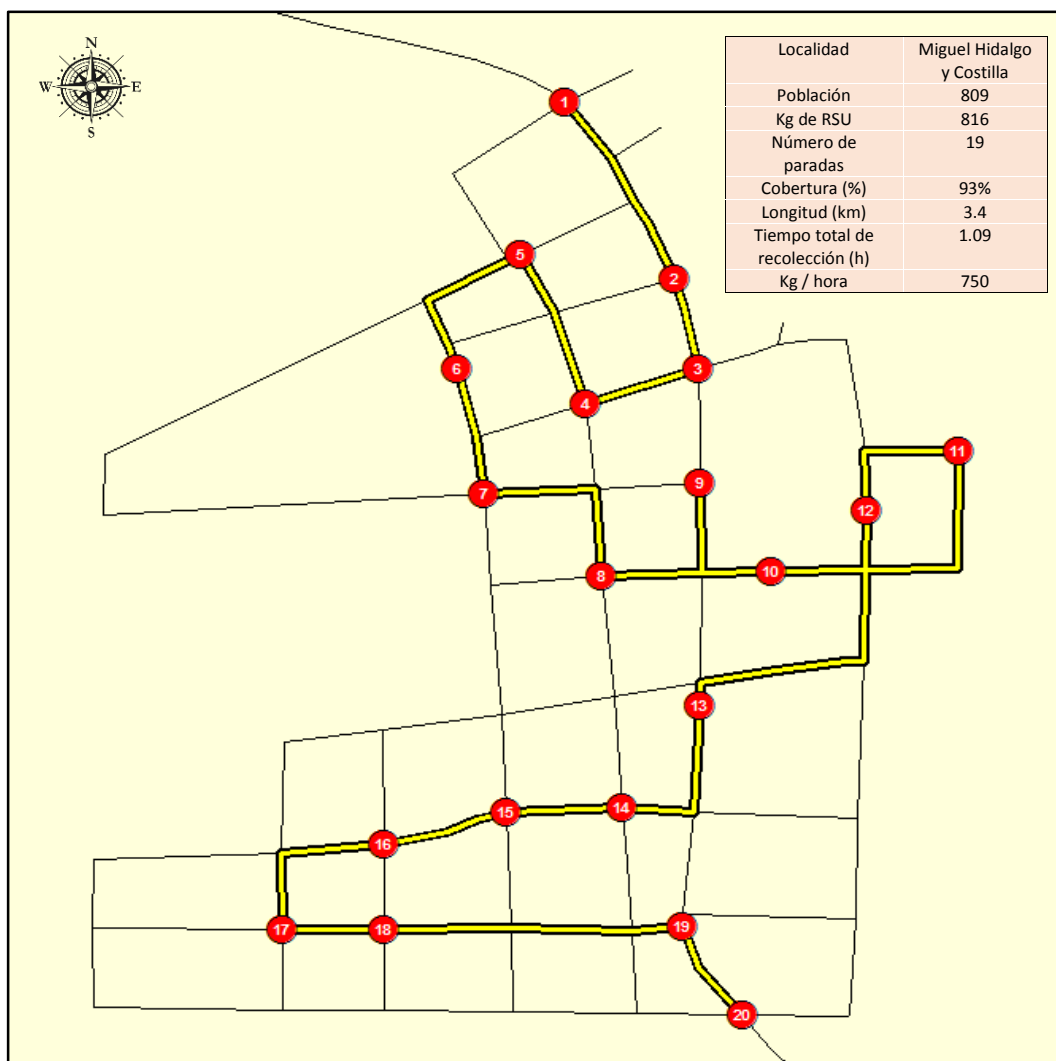
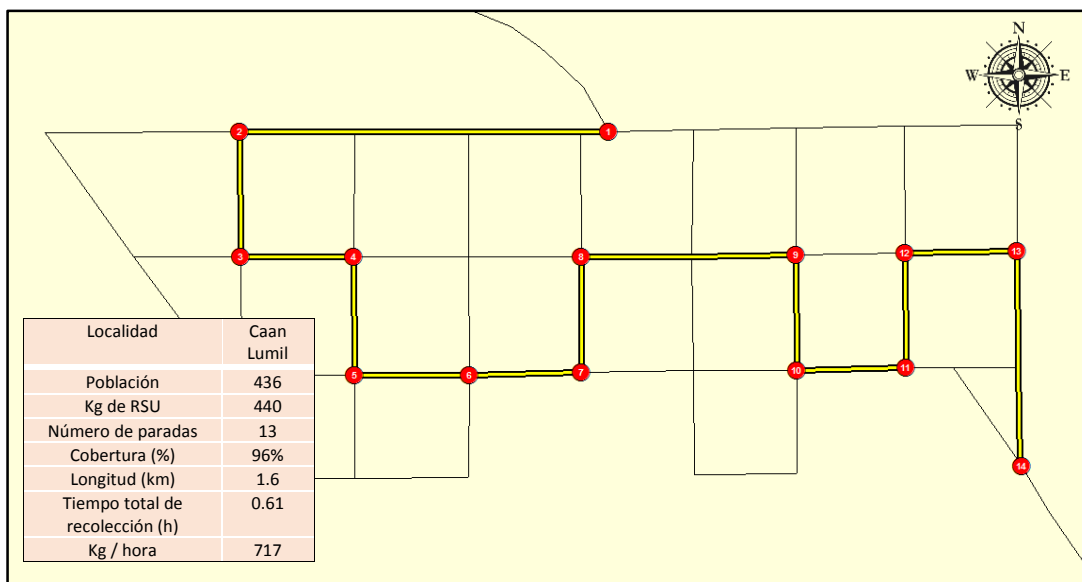
Vialidades

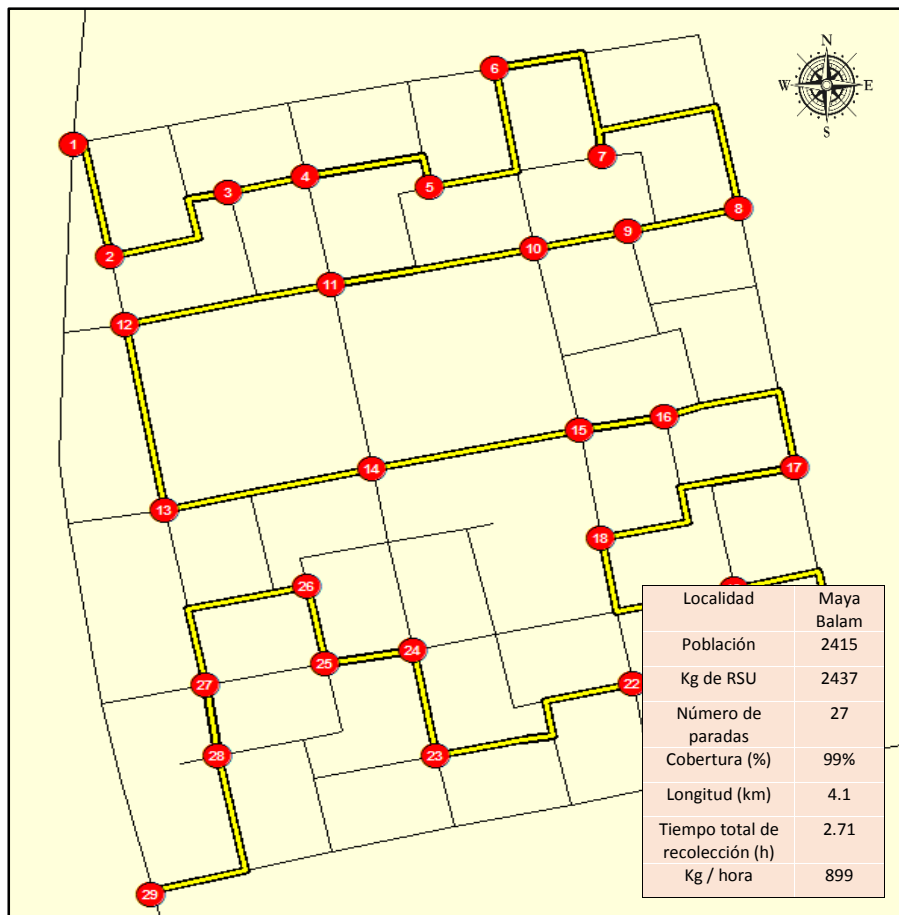
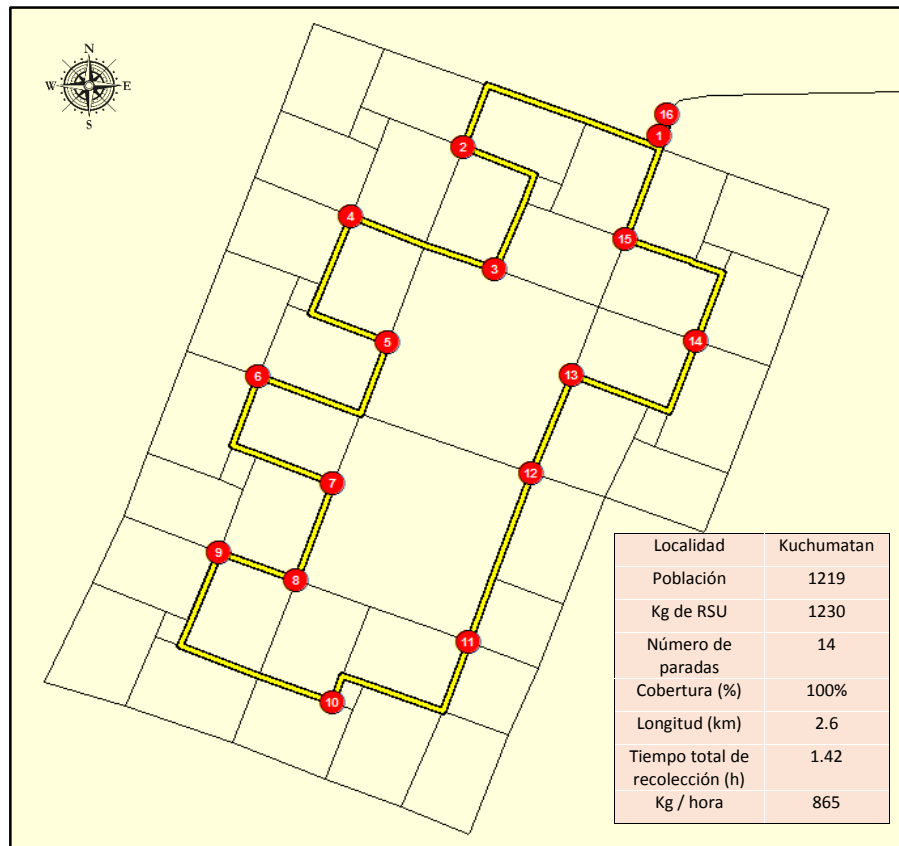


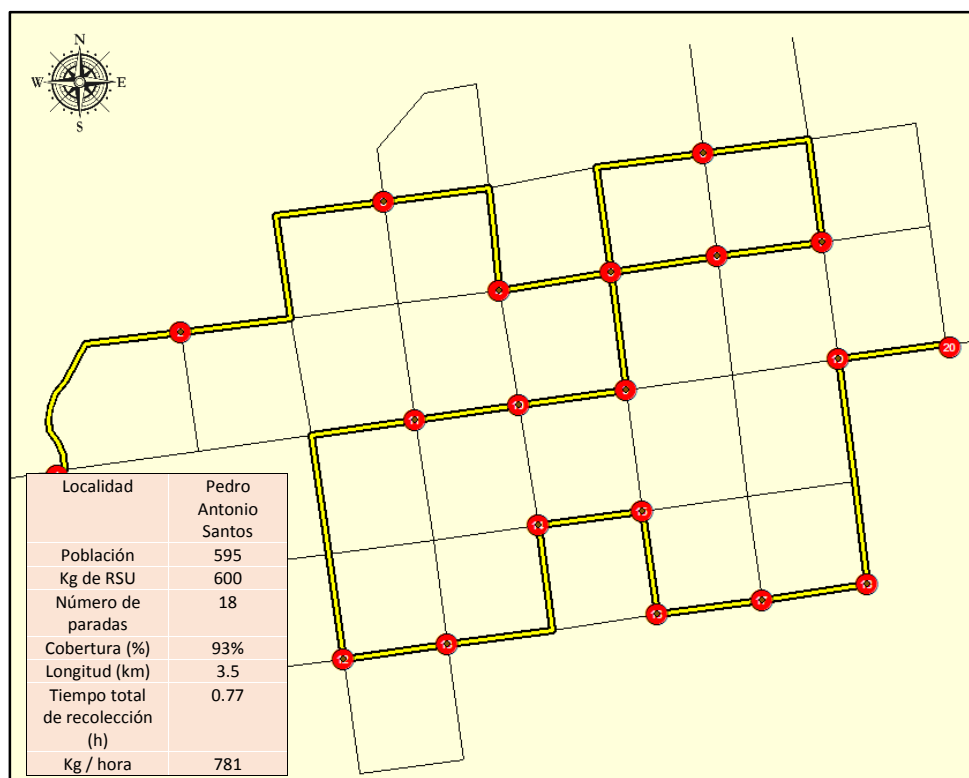
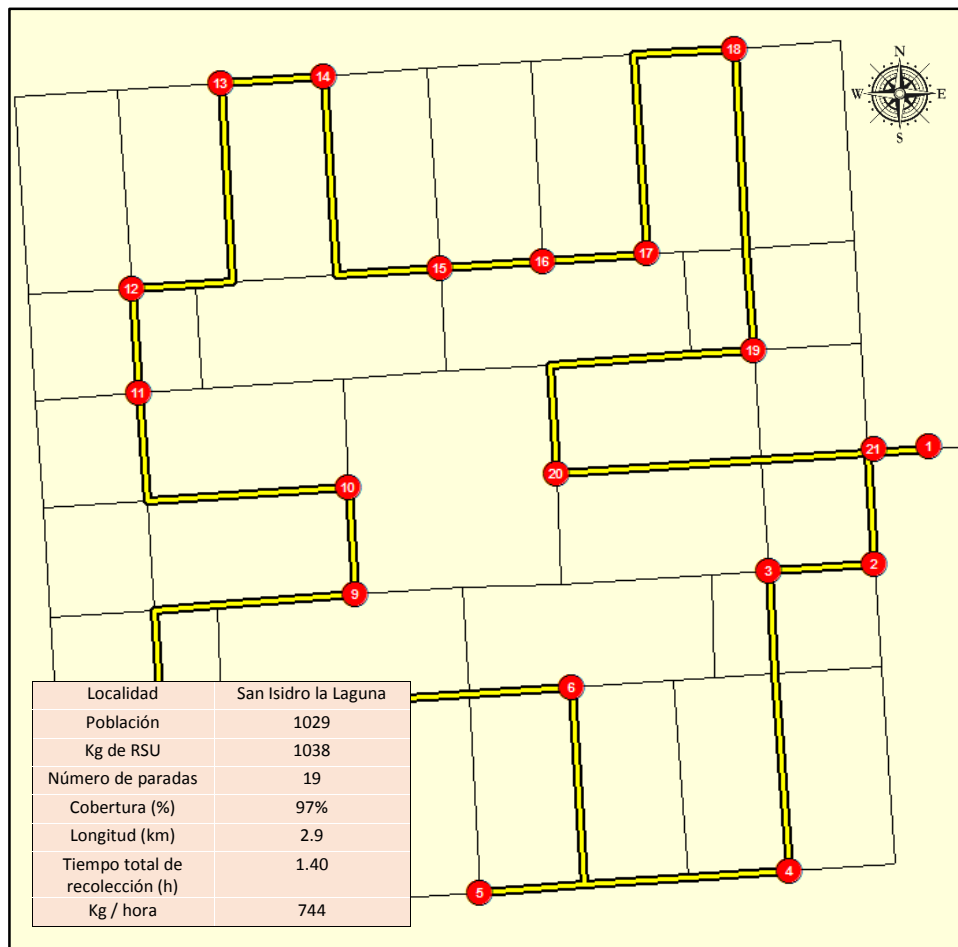
Parada, con su respectivo orden

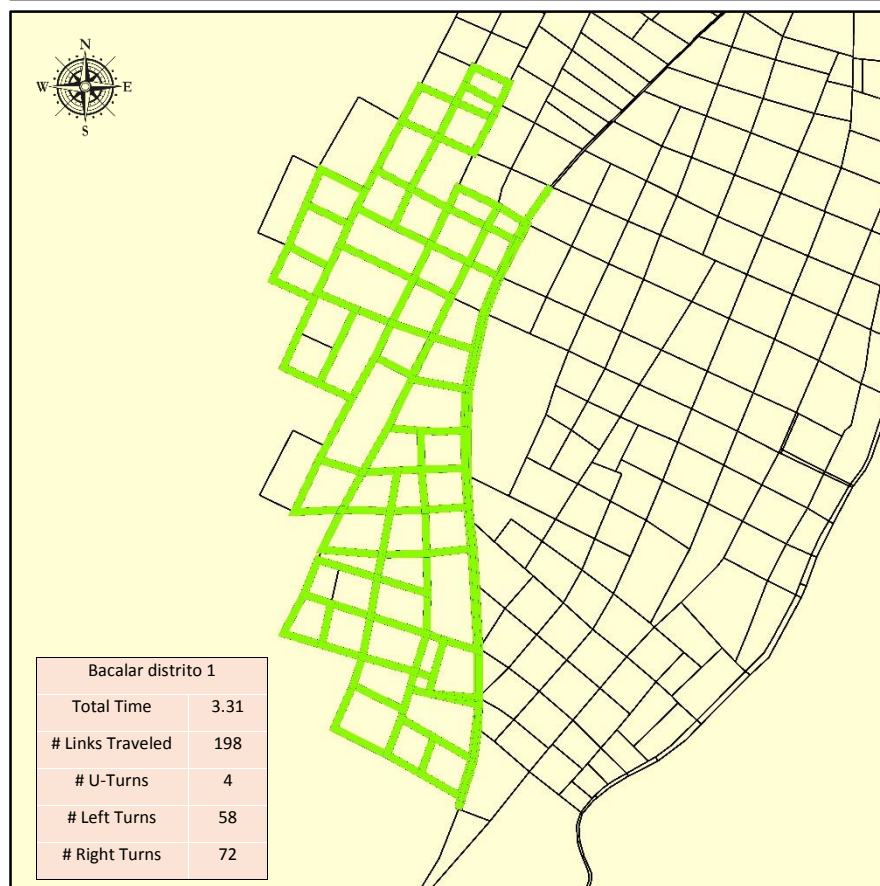
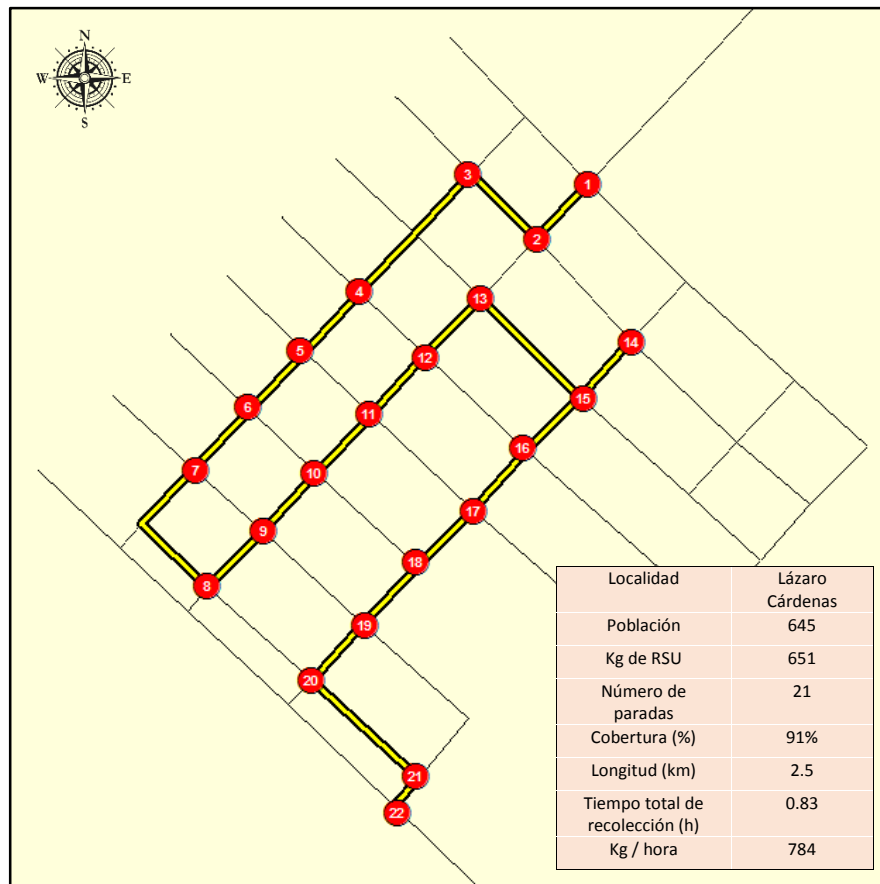


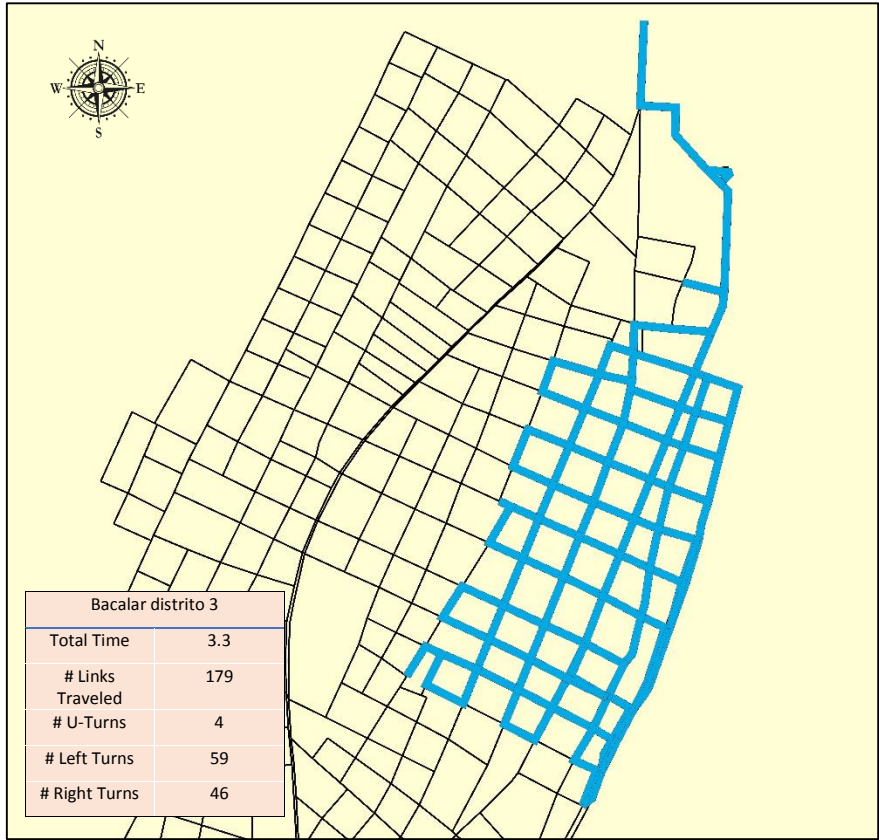
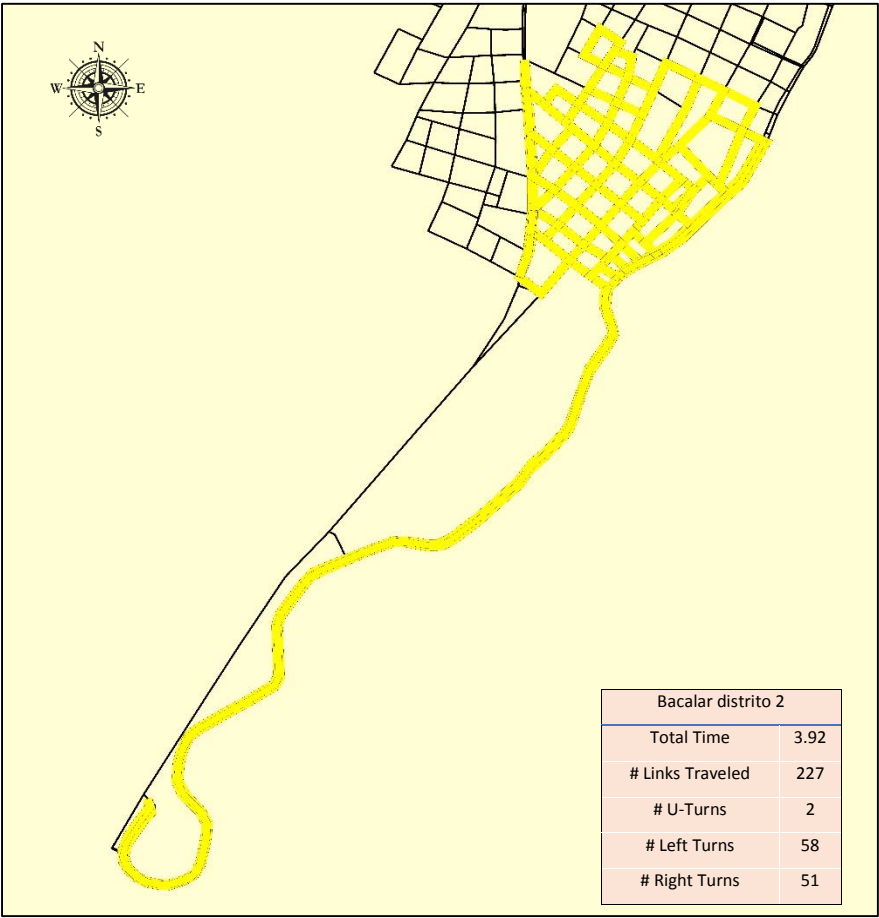


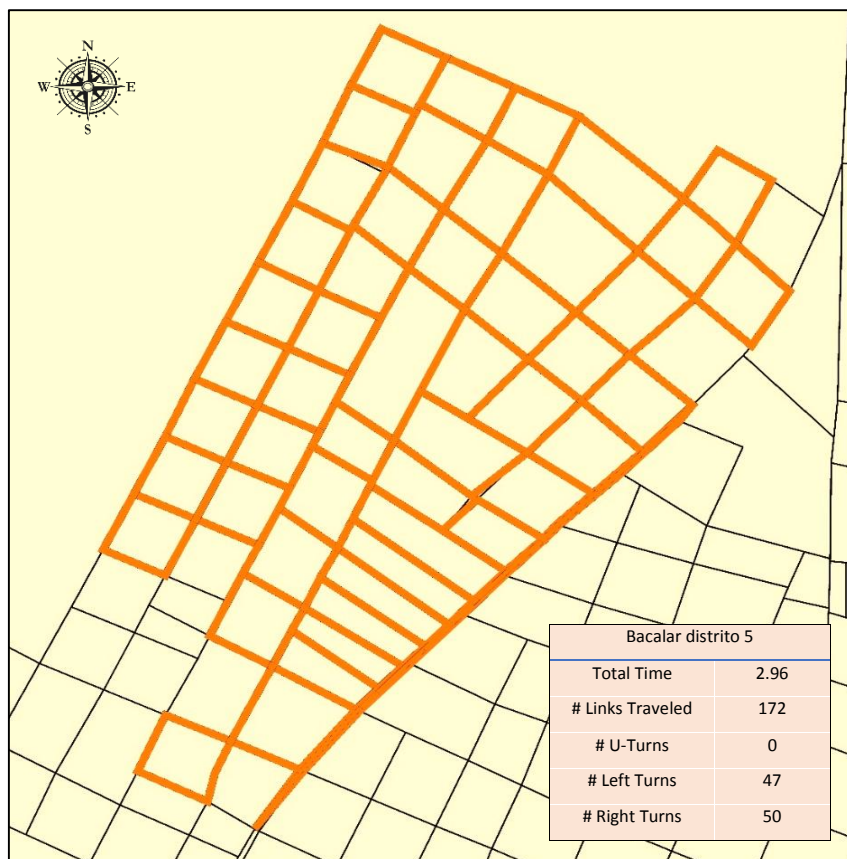
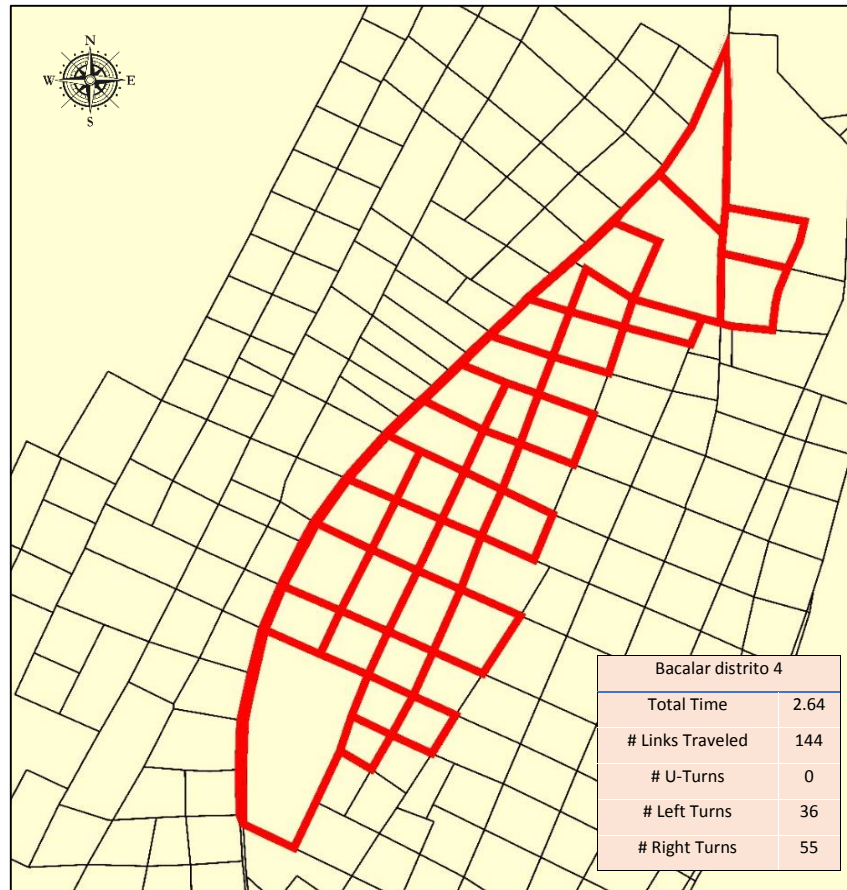












Macrorutas

ROUTE	STOP	NAME	SEQUENCE	OPEN_TIME	DUE_TIME	ARRIVAL	SERVICE_TIME	DEPARTURE	TRAVEL_TIME	TOTAL_DISTANCE	PICKUP	TOT_LOAD	STOP_TYPE
1	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	1158	Pedro Antonio Santos	1	600	2000	630	47.0	717	30.0	29.99	1200.000	1200.00	Pickup
	689	Chacchoben	2	600	2000	733	89.0	902	16.5	45.14	1758.000	2958.00	Pickup
	808	Lázaro Cárdenas	3	600	2000	911	46.0	957	8.2	53.31	1302.000	4260.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	4	600	1800	1029			32.1	85.41		4260.00	Depot
2	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	919	Limones	1	600	2000	642	229.0	1031	41.6	41.56	6584.000	6584.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	2	600	1800	1112			41.6	83.13		6584.00	Depot
3	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	1085	Miguel Hidalgo y Costilla	1	600	2000	611	66.0	717	11.2	11.17	1632.000	1632.00	Pickup
	719	Kuchumatan	2	600	2000	737	86.0	903	19.9	30.36	2460.000	4092.00	Pickup
	1228	San Isidro la Laguna	3	600	2000	928	84.0	1052	24.9	54.54	2076.000	6168.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	4	600	1800	1107			15.0	69.58		6168.00	Depot
4	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	616	Caan Lumil	1	600	2000	621	37.0	658	21.2	21.16	880.000	880.00	Pickup
	1018	Maya Balam	2	600	2000	704	163.0	947	5.8	26.26	4874.000	5754.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	3	600	1800	1014			27.0	52.53		5754.00	Depot
5	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	285	Bacalar d2	1	600	2000	610	234.0	1004	10.3	10.30	5114.000	5114.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	2	600	1800	1015			10.3	20.59		5114.00	Depot
6	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	252	Bacalar d1	1	600	2000	609	198.0	927	9.5	9.49	5052.000	5052.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	2	600	1800	937			9.5	18.98		5052.00	Depot
7	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	167	Bacalar d5	1	600	2000	608	180.0	908	8.2	8.16	4996.000	4996.00	Pickup
	585	Buenavista	2	600	2000	934	64.0	1038	26.0	34.16	1412.000	6408.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	3	600	1800	1056			17.8	51.99		6408.00	Depot
8	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	418	Bacalar d3	1	600	2000	608	198.0	926	8.1	7.94	5392.000	5392.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	2	600	1800	934			8.1	15.88		5392.00	Depot
9	1235	Estación de Transferencia	0	600	1800			600		0.00		0.00	Depot
	263	Bacalar d4	1	600	2000	608	156.0	844	7.9	7.93	5364.000	5364.00	Pickup
	1235	Estación de Transferencia	2	600	1800	852			7.9	15.85		5364.00	Depot

