

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DISEÑO DE UN PROCESO LOGÍSTICO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS
ORGÁNICOS PARA SU POSTERIOR VALORIZACIÓN BAJO LOS PRINCIPIOS DE
ECONOMÍA CIRCULAR

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado de Ingeniería Industrial para optar por el grado y título de Maestría Profesional en Ingeniería Industrial con énfasis en Manufactura y Calidad

MÓNICA CUNNINGHAM LAUREANO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2021

DEDICATORIA

Dios y mi familia.

AGRADECIMIENTOS

Primero, agradecer a Dios y mi familia por convertirse en mi soporte durante el desarrollo de mi vida personal y profesional.

Al Comité Asesor del Proyecto de Graduación por brindarme apoyo en la ejecución, seguimiento y ayuda para finalizar esta etapa académica.

Al personal de la Municipalidad de Goicoechea por la información brindada y la ayuda en todo aspecto especialmente a don Gustavo Herrera y don Ronald Céspedes, así como a todos los expertos en sus áreas que tomaron el tiempo para llenar la encuesta y contestar las consultas.

Todos mis compañeros con lo que compartí 4 años valiosos de aprendizaje y que me brindaron ayuda, amistad y tiempo.

“Este trabajo final de investigación fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Industrial de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Ingeniería Industrial con énfasis en Manufactura y Calidad”.

PhD. Bárbara Cristina Miranda Morales
**Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado**

MSc. Marco Arias Vargas
Profesor guía

MSc, Enrique León Parra
Lector

Dra. Cindy Torres Quirós
Lectora

MBA Ileana Aguilar Mata
Directora del Programa de Posgrado en Maestría Profesional en Ingeniería

Mónica Cunningham Laureano
Sustentante

TABLA DE CONTENIDOS

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Hoja de Aprobación	iv
Tabla de Contenidos	v
Resumen.....	viii
Lista de Tablas	x
Lista de Figuras.....	xii
CAPÍTULO I	1
El problema y su importancia	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación de la problemática	2
1.3 Problema.....	5
1.4 Objetivo General y objetivos específicos.....	5
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
1.5 Factibilidad del proyecto de investigación.....	6
1.6 Alcance de la investigación.....	6
1.7 Limitaciones	7
1.8 Recursos Disponibles	7
1.9 Aportes y beneficios esperados de la investigación	7
CAPÍTULO II	9
Marco teórico Referencial	9
2.1 Referencia contextual	9
2.1.1 Manejo de residuos orgánicos en el mundo.....	10
2.1.2 Manejo de residuos orgánicos en el contexto de la pandemia de COVID-19	13
2.1.3 Manejo de residuos orgánicos en Costa Rica	14
2.1.4 Recolección de residuos orgánicos	22
2.2 Referencia teórica.....	25

2.2.1 Logística inversa.....	25
2.2.2 Gestión de residuos.....	26
2.2.3 Modelos de ubicación de plantas.....	31
2.2.4 Problemas de ruteo.....	36
2.2.5 Ruteo de transporte de residuos.....	38
2.2.6 Proceso de toma de decisiones multicriterio.....	41
2.2.7 Herramienta de jerarquización (AHP).....	42
2.2.8 Cálculo de huella de carbono.....	45
2.3 Referencia conceptual.....	48
2.3.1 Economía lineal.....	48
2.3.2 Economía circular.....	49
2.3.3 Logística verde.....	51
2.3.4 Residuos orgánicos.....	52
2.3.5 Valorización de residuos.....	54
CAPÍTULO III.....	57
Metodología.....	57
3.1 Tipo de investigación.....	57
3.2 Definición de los elementos de estudio.....	57
3.3 Diseño instrumental.....	58
3.4 Metodología de análisis de la información recolectada.....	59
3.5 Metodología de validación.....	59
CAPÍTULO IV.....	60
Análisis de Resultados.....	60
4.1 Diagnóstico.....	60
4.2 Diseño del proceso.....	70
4.3 Validación del proceso.....	86
Capítulo V.....	96
DISCUSIÓN.....	96
5.1 Lecciones aprendidas.....	102
5.2 El gran aporte a la academia.....	103

CAPÍTULO VI	104
Conclusiones y Recomendaciones.....	104
CAPÍTULO VII.....	107
Bibliografía	107
Anexos	113
Anexo 1. Análisis jerárquico	113
Anexo 2. Ruteo coN el programa optimoroute.....	121

RESUMEN

La economía circular es un modelo económico actual que potencia el uso de herramientas ingenieriles en la creación, modificación y transformación de los sistemas de manufactura con el objetivo de mejorar la sostenibilidad de los procesos y productos. En este trabajo, se estudia el proceso de recolección de residuos orgánicos, el cual representa una etapa de un gran sistema de gestión de residuos y que impacta nuestras comunidades en los aspectos sociales, económicos y ambientales.

Este trabajo final propone un proceso logístico de recolección de residuos orgánicos, necesario para lograr la posterior valorización en una ubicación final que permita mejorar la eficiencia actual y una disminución en el impacto ambiental negativo provocado por los residuos enviados al relleno sanitario.

El título del proyecto involucra la palabra proceso porque pretende establecer una secuencia de pasos necesarios para lograr el establecimiento de un resultado. Esto incluye, proponer una nueva ubicación donde se puedan valorizar los residuos, un análisis de los distritos o zonas donde sería factible emprender con una recolección selectiva. Y, además, el área de ubicación de un terreno adecuado para procesar los desechos y, por último, la ruta del camión recolector.

En este trabajo, se utiliza un análisis jerárquico como metodología de análisis multicriterio para la toma de decisiones complejas y así, poder cuantificar factores mínimos para el establecimiento de la escogencia de un lugar apropiado para implementar este proceso que como mínimo deberían incluir: tamaño, cantidad de población/residuos, existencia de programas asociados y nivel socioeconómico. Con ayuda de diferentes expertos en el área ambiental, también se logra recopilar otros factores que se deberían tomar en cuenta en cada una de las municipalidades o establecimientos públicos o privados interesados en lograr una recolección selectiva.

Posteriormente, se utiliza una aplicación (Optimoroute) para obtener una posible ruta adicional de residuos orgánicos y se validó realizando un recorrido propuesto, la aplicación utiliza el problema del agente viajero y algoritmos propios de la empresa Optimoroute Inc.

Adicionalmente, se mide la huella de carbono corroborando la mejora de hasta un 85% si estos residuos no son enviados a un relleno sanitario. Por otro lado, la disminución de los costos es proporcional a la cantidad de residuos que pueden ser recolectados selectivamente y no trasladados al vertedero. Comprobando que es necesario el enfoque en los gobiernos locales en la promoción de la reducción, recuperación y revalorización de los desechos a pesar, de que la situación del país hace realmente difícil el involucramiento de la población en el tema, esto requiere sensibilización y educación. El tema de capacitación y el análisis técnico del tipo de valoración, dimensiones e ingeniería de éste no forman parte del alcance de este trabajo.

Se recomienda como parte de este proyecto, involucrar a otros estudiantes mediante futuros proyectos de graduación, en el estudio de sensibilizar a de la población, caracterización química de los residuos y factibilidad técnica-financiera de un centro de valoración de residuos orgánicos, ya que estos temas como se observa más adelante son especialmente valiosos para el país y la Universidad de Costa Rica.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de segregación de los residuos.....	23
Tabla 2. Clasificación y usos en el diseño de rutas.....	36
Tabla 3. Tipos de VRP para la recolección de residuos	39
Tabla 4. Potencial de calentamiento para dióxido de carbono, metano y dióxido de nitrógeno	46
Tabla 5. Factores de emisión CO ₂ para la gasolina y diésel.	46
Tabla 6. Factores de emisión CH ₄ y NO ₂ para la gasolina y diésel	47
Tabla 7. Factores de emisión CH ₄ y NO ₂ para la gestión de residuos	47
Tabla 8. Costo del impacto de los residuos orgánicos por aspecto.....	53
Tabla 9. Cálculo de los beneficios económicos para la valorización	56
Tabla 10. Metodología para el diseño instrumental.....	58
Tabla 11. Rutas de recolección de la Municipalidad de Goicoechea	63
Tabla 12. Rutas de recolección de la Municipalidad de Goicoechea por camión	66
Tabla 13. Resumen de huella de carbono provocada por los residuos orgánicos y el transporte de las rutas de recolección actual.....	68
Tabla 14. Factores contribuyentes para el desarrollo de una ruta selectiva de residuos orgánicos	74
Tabla 15. Resultado de la importancia de cada uno de los factores según el criterio de expertos	74
Tabla 16. Distancias recorridas para las rutas a los diferentes posibles centros de valorización para los residuos de la Feria del Agricultor	83
Tabla 17. Distancias recorridas para las rutas a los diferentes posibles centros de valorización para los residuos de la Mata de Plátano	86
Tabla 18. Horarios y capacidad de los camiones	89
Tabla 19. Mejora en la huella de carbono con la propuesta de una ruta en el sector de Mata de Plátano.....	91
Tabla 20. Mejora en la huella de carbono con la propuesta de una ruta para la recolección de residuos de la Feria del Agricultor.....	93
Tabla 21. Comparación del impacto de la huella de carbono por residuos y por consumo de combustible.....	93
Tabla 22. Proceso, indicadores y metas	95
Tabla A1. Expertos que contestaron la encuesta para el AHP.....	114
Tabla A2. Matriz principal del AHP.....	117
Tabla A3. Matriz de la comparación del índice de desarrollo social.....	117
Tabla A4. Matriz de la comparación de la cantidad de población.....	118
Tabla A5. Matriz de la comparación de programas de reciclaje.....	118

Tabla A6. Matriz de los tamaños de distrito.....	118
Tabla A7. Datos de IDS por distrito con la respectiva escala propuesta.	119
Tabla A8. Datos de cantidad de población por distrito con la respectiva escala propuesta.	119
Tabla A9. Datos de tamaño por distrito con la respectiva escala propuesta.	120
Tabla A10. Datos de cantidad de programas de reciclaje con la respectiva escala propuesta	121
Tabla A11. Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Purral	122
Tabla A12. Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Rancho Redondo	125
Tabla A13. Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en el sector rural de Mata de Plátano	128
Tabla A14. Resultado del ruteo de la Feria del Agricultor hacia la ubicación en el sector rural de Mata de Plátano.....	131
Tabla A15. Resultado del ruteo de la Feria del Agricultor hacia la ubicación en Purral	131
Tabla A16. Resultado del ruteo de la Feria del Agricultor hacia la ubicación en el sector rural de Rancho Redondo	131
Tabla A17. Datos de longitud y latitud de la ruta propuesta, resaltando los puntos que se encuentran en la ruta actual 5.1.	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gases de efecto invernadero de Costa Rica según el inventario nacional para el 2012 en el sector residuos	3
Figura 2. Composición de los residuos en diferentes partes del mundo.....	11
Figura 3. Tratamiento y disposición de residuos en diferentes partes del mundo.....	12
Figura 4. Porcentajes de cobertura del servicio de recolección de residuos por cantón.	15
Figura 5. Porcentajes de residuos recuperados mediante recolección selectica por los gobiernos locales.....	16
Figura 6. Jerarquización en la gestión integral de residuos	17
Figura 7. Proceso de recolección de residuos sólidos ordinarios	20
Figura 8. Ejemplo de tipos de camiones para la recolección y recuperación de residuos	22
Figura 9. Variables logísticas dentro de los proyectos logísticos de recolección de residuos	25
Figura 10. Factores que afectan el rendimiento del sistema de gestión de residuos	27
Figura 11. Factores que afectan el desempeño del sistema de gestión de residuos.....	28
Figura 12. IDS 2017	29
Figura 13. Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP	44
Figura 14. Fases del modelo económico lineal.....	48
Figura 15. Categorías de separación de tipos de residuos basados en la norma INTE12-12-01-08-2011	52
Figura 16. Cantón de Goicoechea.....	60
Figura 17. Ruta actual desde el Plantel Municipal al relleno sanitario	69
Figura 18. Diseño de un proceso en ingeniería.....	71
Figura 19. Análisis de los factores mayormente contribuyentes con la disposición de las comunidades a separar los residuos en la fuente	72
Figura 20. Resultados de la importancia de los distritos	75
Figura 21. Proceso genérico para otras instituciones.....	76
Figura 22. Ubicación ideal del centro de valorización si se recogiera todo el volumen del cantón.....	76
Figura 23. Posible ubicación de un terreno para valorización de los residuos orgánicos de todos los distritos.....	77
Figura 24. Posible ubicación del centro de valorización si se recogiera sólo el volumen de residuos orgánicos de Mata de Plátano	77
Figura 25. Información de la aplicación de Optimoroute.....	79
Figura 26. Longitud y latitud en Optimoroute.....	79

Figura 27. Características del conductor en la aplicación Optimoroute.....	80
Figura 28. Generación de la ruta en la aplicación Optimoroute.....	80
Figura 29. Ruta propuesta de la Feria del Agricultor a una ubicación en el sector Rancho Redondo.....	81
Figura 30. Ruta propuesta de la Feria del Agricultor a una ubicación en el sector de Mata de Plátano.....	82
Figura 31. Ruta propuesta de la Feria del Agricultor a una ubicación en el sector de Purral.....	83
Figura 32. Ruta propuesta de la recolección de Mata de Plátano a una ubicación en el sector rural del distrito.....	84
Figura 33. Detalle de la ruta propuesta de la recolección de Mata de Plátano a una ubicación en el sector rural del distrito puntos 1-34.....	84
Figura 34. Detalle de la ruta propuesta de la recolección de Mata de Plátano a una ubicación en el sector rural del distrito puntos 54-95.....	85
Figura 35. Ruta propuesta de la recolección de Mata de Plátano a una ubicación en Rancho Redondo.....	85
Figura 36. Ruta propuesta de la recolección de Mata de Plátano a una ubicación en Purral.....	86
Figura 37. Seguimiento de la ruta propuesta, piloto.....	87
Figura 38. Rutas en los sectores de Mata de Plátano y Rancho Redondo.....	85
Figura 39. Proceso de recolección de residuos orgánicos propuesto.....	94
Figura 40. Indicadores ambientales a fomentar en los gobiernos locales.....	96
Figura A1. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre la cantidad de población y el tamaño del distrito.....	114
Figura A2. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre la cantidad de población y el nivel socioeconómico de la población.....	115
Figura A3. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre la cantidad de población y la existencia de programas similares.....	115
Figura A4. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre el tamaño del lugar y el nivel socioeconómico de la población.....	116
Figura A5. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre el tamaño del lugar y la existencia de programas similares.....	116
Figura A6. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre el nivel socioeconómico de la población y la existencia de programas similares.....	117
Figura A7. Comparación de los datos de IDS con una escala propuesta.....	119
Figura A8. Comparación de los datos de cantidad de población con una escala propuesta.....	120
Figura A9. Comparación de los datos de tamaño de distrito con una escala propuesta.....	120
Figura A10. Comparación de la cantidad de programas similares (reciclaje) con una escala propuesta.....	121



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Monica Cunningham Laureano, con cédula de identidad 114460253, en mi condición de autor del TFG titulado Diseño de un proceso logístico de recolección de residuos orgánicos para su posterior valorización bajo los principios de economía circular

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA Y SU IMPORTANCIA

En este capítulo, se detallan los temas que son requisito para la formulación del problema y los objetivos correspondientes.

1.1 ANTECEDENTES

Actualmente, el modelo económico lineal no se ajusta a las necesidades, ya que no considera los impactos al medio ambiente generados por la producción de residuos, entonces las respuestas a este modelo tradicional se generan a partir de la economía circular.

La economía circular nació alrededor de los años setenta con el concepto de no desechar nada, sin embargo, ha resultado en una descripción reciente de un sistema económico que se basa en un modelo de negocio que reemplaza el “final de la vida” utilizando conceptos de reúso, reciclaje y recuperación de materiales en producción, distribución y operación con el fin de obtener un desarrollo sostenible (Hodkinson, 2018).

Este modelo hace énfasis en ciclos técnicos y biológicos, como por ejemplo materiales, como el algodón o la madera, que están diseñados para reintegrarse en el sistema a través de procesos como el compostaje y la digestión anaeróbica. Y, por otro lado, los ciclos técnicos en los cuales, la ingeniería cumple un papel fundamental, donde se recuperan y restauran productos, componentes y/o materiales (Varela Menéndez, 2018).

Dentro del modelo descrito están los residuos orgánicos los cuales representan alrededor del 50 % de los residuos sólidos urbanos y que actualmente son desechados en rellenos sanitarios, ocasionando situaciones de tipo ambiental, por lo que, según Beancourt y Beancourt (2016), la mejor forma de aprovecharlos y minimizarlos es a través de técnicas de transformación física, química y biológica siempre que sean económicamente viables, técnicamente posibles y ambientalmente sustentables. Así también, según Chongrak y Thammarat (2017), los residuos orgánicos deberían ser vistos como residuos valorizables que

pueden ser transformados en una oportunidad económica con una ventaja para el medio ambiente.

Para lograr la recuperación de los residuos, una definición de logística inversa muy adecuada de Dekker et al. (2004), se refiere a la logística que supone la integración de los productos usados y obsoletos de nuevo a la cadena de suministro como recursos valiosos. Por ello, la logística inversa tiene un potencial significativo respecto al monitoreo ambiental de los sistemas de transporte, procesos de residuos reciclables, control y minimización de la contaminación y ahorro de energía, pues se refiere a la gestión de productos y de información desde el punto de consumo hasta el de origen o de eliminación.

1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Para el 2016 en Costa Rica se generaban aproximadamente 4 000 toneladas de residuos ordinarios diarias, de los cuales un 80% era vertido en rellenos sanitarios. Es por ello, que instituciones públicas y privadas están interesadas en los esfuerzos para mejorar la gestión de residuos sólidos. Sin embargo existe la carencia de una estructura adecuada para el manejo dentro de las municipalidades que permita una de recogida, revalorización, disposición y reciclaje eficaces y eficientes, dando paso a la necesidad de utilizar herramientas metodológicas de ingeniería para evaluar, analizar y mejorar este sistema (Ministerio de Salud, 2016).

Según el inventario de gases de efecto invernadero (GEI) del país, realizado por el Instituto Meteorológico Nacional en el 2015, indica que un 19,15% del total del inventario representados en CO₂ equivalente es debido en su totalidad a los residuos, un 61% proviene de residuos sólidos y casi la mitad se debe a residuos orgánicos, como se observa en la Figura 1. Por ello, este tipo de desechos toman relevancia con un segmento importante en la generación de GEI en el país y, por lo tanto, es importante la búsqueda de soluciones ambientales que contrarresten estos efectos y para ello, se requiere un sistema de recogida adecuada que permita la posterior valorización que a su vez reduzca el impacto generado por los desechos en un relleno sanitario.

Porcentaje de toneladas de CO₂ equivalente para el sector residuos

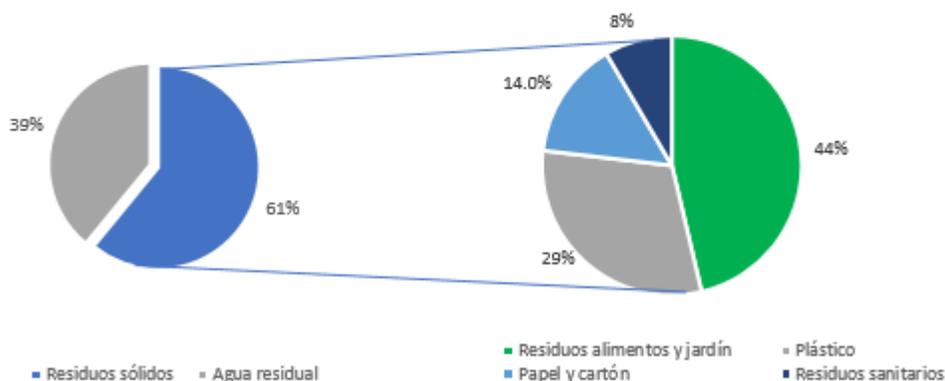


Figura 1. Gases de efecto invernadero en toneladas de CO₂ equivalente de Costa Rica según el inventario nacional para el 2015 en el sector residuos.

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2020)

A pesar de la existencia de la Ley para la Gestión Integral de Residuos la implementación integral, el grado y velocidad con que se realicen los cambios están determinados por factores culturales, económicos y sociales. A raíz de las fallas institucionales en la implementación de la estructura institucional y la creación de infraestructura, es evidente que el avance en la protección de la salud y el ambiente están siendo perjudicado gravemente (Martínez y Zuñiga, 2012).

Según el informe de auditoría acerca de la gestión de la municipalidades en materia de residuos realizado en el 2016, en la medida en que el servicio de recolección de residuos ordinarios sea más eficiente, se logrará avanzar hacia una mejor calidad ambiental en los cantones, comunidades más limpias, una ciudadanía mejor educada en materia de residuos, el desarrollo de oportunidades de negocio en la valorización de los residuos ordinarios, una disminución en la cantidad de residuos que se envían a rellenos y vertederos y un servicio de recolección de residuos financieramente sostenible (Contraloría General de la República, 2016).

A pesar de que existen valiosos esfuerzos orientados a recolectar los residuos de manera selectiva por parte de algunas municipalidades, el acceso y la frecuencia de un servicio que

le garantice a los ciudadanos una recolección de este tipo sigue siendo limitado, ya que en la mayoría de gobiernos locales la recolección selectiva no se realiza, se carecen de datos para demostrar el avance, solo ofrecen campañas de recolección ocasionales o los porcentajes de recuperación de residuos son poco significativos. Estas situaciones incidieron para que, en el año 2014, el porcentaje nacional de recuperación de residuos municipales destinados al reciclaje y compostaje, no superara un 1,26%, es decir, de 961,5 mil toneladas recolectadas en ese año, se recuperaron para la valorización 12,1 mil toneladas y las restantes 949,4 mil toneladas, se enviaron a rellenos sanitarios y vertederos municipales. Esto provoca que se desperdicien los residuos como recurso económico, un agotamiento más acelerado de los sitios de disposición final, incrementos en el costo del servicio de disposición de residuos hasta de un 118%, el desaprovechamiento de oportunidades de empleo, impacto al ambiente por una disposición no sostenible y se continúe motivando a los habitantes a enviar sus residuos mezclados en una bolsa (Contraloría General de la República, 2016).

Asimismo, en la Estrategia Nacional de Recolección, Recuperación y Valorización de residuos se menciona la importancia de un sistema logístico eficiente de recolección de residuos el cual, debe ser diseñado poniendo en práctica el mejor uso de los recursos disponibles, así también, hace mención a las debilidades en el diseño de rutas de recolección, la tecnología de los camiones recolectores y el extenso recorrido realizado (Ministerio de Salud, 2016).

Lo expresado en el décimo noveno informe Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible incluye que no hay noción de la dimensión de los costos de transporte asociados a la recolección de los residuos sólidos, la mayoría de los municipios no cuentan con estudios técnicos de los tiempos de operación reales de los camiones, desconocen con detalle las rutas, los horarios, no tienen idea del costo de la ruta, se sabe el monto total del uso de combustibles pero se desconoce la eficiencia del uso del mismo. Adicionalmente, es común encontrar muchos camiones varados y con problemas de operación. Existe una incertidumbre alrededor de la planificación y elaboración de índices e indicadores de gestión.

La importancia de la Ingeniería Industrial en el estudio de procesos logísticos y ambientales se basa en este caso, en el uso de herramientas como diseño de sistemas que permita el mapeo,

planificación, implementación y control de los procesos, como instrumentos esenciales para la mejora y mejor, si se trata de una combinación de disciplinas con la economía circular.

En resumen, la relación de la búsqueda de sostenibilidad y la ingeniería brinda como resultado el desarrollo de mejoras, en esta ocasión, estableciendo procesos que permitan en un futuro mitigar el impacto ambiental de los residuos orgánicos mezclando los conceptos modernos de economía circular con logística inversa aplicada directamente en entidades de impacto directo para el país como lo son las municipalidades.

1.3 PROBLEMA

En Costa Rica, el proceso de recolección de residuos urbanos municipales no contribuye con la posterior valorización de los residuos orgánicos lo que implica cargas significativas al medio ambiente, que lo impactan de forma negativa, y esto representa un costo elevado para los gobiernos locales dado el monto que se debe pagar por cada tonelada trasladada al relleno sanitario.

1.4 OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.4.1 Objetivo general

Proponer un proceso logístico de recolección de residuos orgánicos para su posterior valorización con un enfoque de economía circular, con el uso de herramientas de ingeniería, con la finalidad de disminuir el impacto ambiental y los costos asociados.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar la gestión de la recolección de residuos orgánicos municipales con el fin de obtener el estado actual del manejo de estos en el sector en estudio.
- Diseñar el proceso logístico para la recolección de residuos orgánicos para su posterior valorización alineado a la estrategia país con el fin de lograr una mejora en el ámbito económico y ambiental.

- Validar el diseño del proceso de recolección realizando un piloto del recorrido propuesto y corroborando con el uso de indicadores ambientales y medición económica para verificar la mejora.

1.5 FACTIBILIDAD DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Este proyecto de investigación busca proponer un proceso logístico de recolección de residuos orgánicos para satisfacer una necesidad real del país para los gobiernos locales e individuos de la sociedad costarricense.

Se cuenta con el apoyo de la Municipalidad de Goicoechea para la elaboración del proyecto.

Desde el 2016, la estudiante postulante de la maestría ha estado vinculada con sistemas de gestión ambientales como ISO 14001 e INTE B5 Carbono Neutro. Además, cuenta con conocimientos en el ámbito de sistemas de tratamiento y disposición de residuos sólidos, por otro lado, se cuenta con una amplia experiencia por parte del equipo director en el área de logística y mejora de procesos.

Es importante señalar que el proyecto se realiza tomando como referencia las rutas de recolección dentro de la Municipalidad de Goicoechea y características de los distritos de estas, parte del análisis podrá ser replicado en otras municipalidades del país.

1.6 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El proyecto se centrará en la propuesta del diseño de un proceso logístico necesario para la recolección de residuos orgánicos para su posterior valorización en el sector de la Municipalidad de Goicoechea, donde se definirá la ubicación y ruta propuesta mediante la realización del objetivo específico uno y dos anteriormente descritos. El proceso diseñado será determinado por variables logísticas que permitan la factibilidad de la ruta de recolección de una cantidad determinada de residuos orgánicos para su posterior uso.

No forman parte de esta investigación los residuos producidos por empresas o comercios que estén fuera del alcance de la recolección de los residuos municipales. Además, se incluyen los residuos procedentes del mantenimiento de parques y jardines, tales como las hojas, la

hierba cortada y los restos de la tala de árboles, y los procedentes de servicios de limpieza de calles y mercados, como, por ejemplo, el contenido de las papeleras y los residuos del barrido de calles, excepto materiales como arena, roca, fango o polvo (Directiva de la Unión Europea, 2018).

Igualmente, no forma parte de este proyecto el proceso involucrado en la separación de la fuente, almacenamiento y valorización, aunque para este último, se toma principalmente el compostaje como base, ya que, la Municipalidad en cuestión tiene proyectos relacionados a la producción de abono orgánico.

1.7 LIMITACIONES

Una limitante es la falta de información específica de las rutas de recolección con la que cuenta la Municipalidad, no se cuenta con la digitalización de las rutas actuales.

1.8 RECURSOS DISPONIBLES

Se cuentan con recursos informáticos necesarios para realizar el proyecto final de graduación, así también apoyo de un miembro del Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM), que se considera fundamental por el interés, en el desarrollo de la investigación.

La Municipalidad de Goicoechea brindará soporte en la facilitar la información requerida del sistema de gestión ambiental actual.

1.9 APORTES Y BENEFICIOS ESPERADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El principal aporte es el análisis propio del proceso de recolección de residuos orgánicos, que resulte en un menor impacto ambiental dada la ubicación de un lugar para su valorización.

Adicionalmente, se identifican los siguientes aportes y beneficios como producto de este proyecto.

- Económicos: Generar una propuesta que disminuya el impacto económico de los residuos orgánicos trasladados al relleno sanitario.
- Ambientales: Proponer un proceso que disminuya el impacto ambiental provocado por los residuos orgánicos que son transportados al relleno sanitario.
- Sociales: Para la Universidad de Costa Rica es importante el apoyo a temas relacionados a la sostenibilidad ambiental y su concientización en este caso, relacionado con el manejo de residuos orgánicos.

El proyecto desarrolla habilidades y conocimiento en la temática de logística inversa, modelos de ubicación y ruteo, valorización dentro de la economía circular para brindar soluciones a la recogida de los residuos orgánicos y adicionalmente, mitigar impactos ambientales.

Además, facilita la aplicación de herramientas propias de la Ingeniería Industrial que permitan el mapeo de un sistema desde el punto de vista ambiental y de proceso.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Este capítulo brinda las bases teóricas de referencia para la elaboración del trabajo final de graduación, desarrollando el contexto y conceptos fundamentales que permitan el diseño del proceso logístico.

2.1 REFERENCIA CONTEXTUAL

Según el nuevo informe del Banco Mundial titulado “*What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*” se subraya que la gestión de los residuos sólidos suele subestimarse, sobre todo en los países de ingreso bajo. Mientras que en los países de ingreso alto se recupera más de un tercio de los desechos por medio del reciclado y el compostaje, en los países en vías de desarrollo solo se recicla un 4 % de los desechos. Además, se estima que el volumen de desechos en el 2016 generó un 5% de las emisiones de gases de efecto invernadero mundiales (Banco Mundial, 2018).

Según Silpa Kaza (2018), los desechos no recogidos y mal eliminados tienen un impacto significativo en la salud pública. El costo de abordar ese impacto es mucho más elevado que el de elaborar y hacer funcionar sistemas sencillos y adecuados de gestión de desechos.

La gestión de los residuos es un tema complejo donde intervienen muchos factores, la estrategia de la Unión Europea se fundamenta en una serie de principios sólidos, estos se concretaron en la estrategia general comunitaria sobre residuos de 1996 (Comisión Europea, 2000):

- Principio de prevención: la producción de residuos tiene que reducirse y, cuando sea posible, evitarse.
- Principio de precaución: tienen que anticiparse todos los problemas potenciales.
- Principio de proximidad: los residuos deben eliminarse lo más cerca posible de su origen.

2.1.1 Manejo de residuos orgánicos en el mundo

Europa

La Unión Europea (UE) ha reconocido durante mucho tiempo los riesgos derivados de los residuos orgánicos. En línea con la estrategia temática de prevención y reciclaje de residuos (COM 2005 (666) final: “*Themathic Strategy on the prevention and recycling of waste*”) y la Directiva sobre residuos (2008/98/ CE), la Comisión Europea tomó medidas en una propuesta legislativa acerca de residuos orgánicos. Otro paso en ese proceso es el “*Green Paper*” (Artículo Verde) de la gestión de los residuos orgánicos en la UE, seguida de una Comunicación de la Comisión sobre los pasos futuros en materia de estos desechos (Interreg Europe, 2017).

Además, la Comisión Europea adoptó en 2014 una propuesta legislativa y un anexo a los objetivos relacionados con los residuos en la Directiva de vertederos 1999/31 / CE, así como el reciclaje y otros objetivos relacionados en la Directiva marco de residuos de la UE 2008/98 / CE. A continuación, algunas de las propuestas legislativas en el plenario el 14 de marzo de 2017 del Parlamento Europeo, en aspectos relacionados con los residuos orgánicos:

- El objetivo de un 70% de reciclaje de residuos municipales.
- Recolección separada obligatoria para los principales flujos de residuos, incluidos los residuos orgánicos.
- Recolección separada en la fuente de residuos orgánicos e introducción de códigos de residuos europeos para estos.
- Introducción del objetivo de reducción de residuos alimentarios de la UE de un 30% para 2025 y de un 50% para 2030.

En 2005, se generó un promedio de 520 kg de residuos urbanos per cápita en la Unión Europea, para el 2020 se espera que la cifra aumente en 562 kg. Si se considera correcta esta predicción, se generarán 290 millones de toneladas en 2020, de las cuales un 36% serán residuos orgánicos, y como tal, la cantidad aumentaría a 104.4 millones de toneladas (Hettiarachchi, Meegoda, y Ryu, 2018). Lo anterior, conlleva a una cantidad significativa para lo cual se espera que la tecnología y número de instalaciones para este tipo de residuos mejoren.

Las opciones de gestión para los residuos orgánicos incluyen la prevención en la fuente, recolección, digestión anaerobia, compostaje, incineración y vertido, pero se depende de condiciones locales como la densidad de población, la infraestructura y el clima, así como en los mercados para energía y compost. En la UE se producen anualmente entre 118 y 138 millones de toneladas de residuos orgánicos, de los cuales solo alrededor de un 25% se recicla efectivamente en compost y digestato de alta calidad. Aunque hay un incremento en el reciclaje de materiales, las mejoras en el reúso de residuos orgánicos son modestas. Esto puede deberse a la ausencia de la obligación a nivel de la UE de reciclar los residuos orgánicos, así como la ausencia de calidad, estándares o criterios de finalización de residuos para el compost generado (Interreg Europe, 2017).

América Latina y el Caribe

Aproximadamente 3,5 millones de toneladas de residuos se generan diariamente en el mundo, la distribución de este volumen depende del estado de desarrollo de la población, según la OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) casi un 13% de los desechos mundiales son generados en América Latina y el Caribe y más de un 50% son residuos orgánicos (Figura 3):

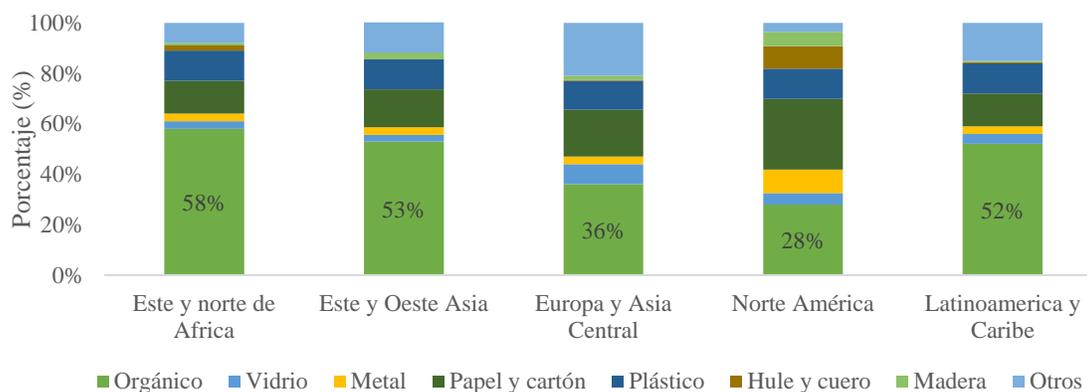


Figura 2. Composición de los residuos en diferentes partes del mundo.

Fuente: Kaza et al., (2018).

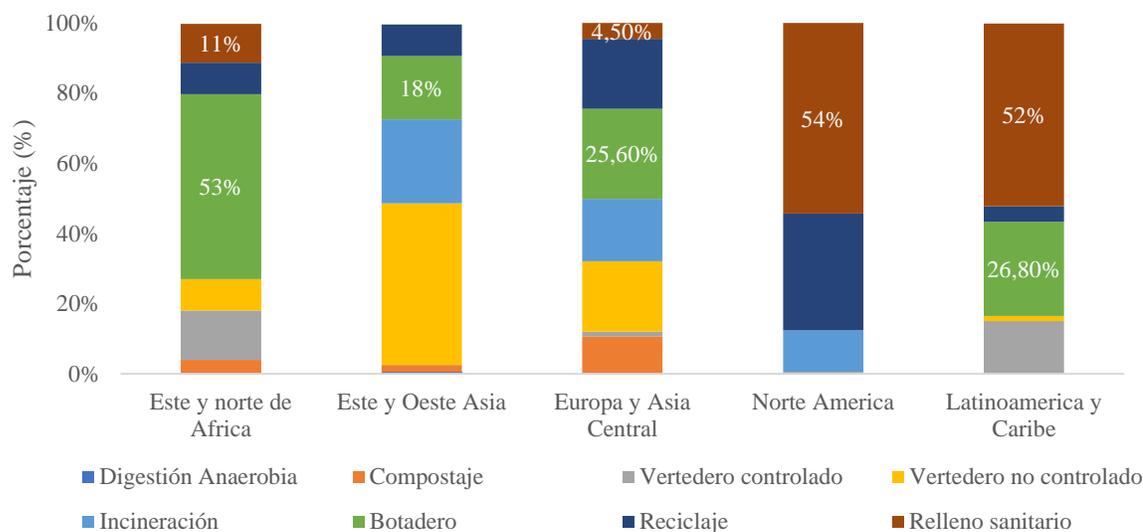


Figura 3. Tratamiento y disposición de residuos en diferentes partes del mundo.

Fuente: Kaza et al., (2018).

La región de América Latina y el Caribe está formada por 42 países, esta tenía una población de 638 millones en 2016. Los sistemas de residuos sólidos en la región están en proceso de modernización, aunque las prácticas varían según el nivel de ingresos. Desde una perspectiva política, la mayoría de los países y ciudades tienen al menos un mecanismo regulatorio establecido para orientar las actividades de gestión de residuos (Kaza et al., 2018).

La cobertura de recolección de residuos es bastante alta para América Latina y la región del Caribe en comparación con las tendencias mundiales. A nivel urbano, alrededor de un 85 por ciento de los residuos se recolectan. Los sistemas en América Latina y el Caribe son puerta a puerta y diferentes ciudades poseen estaciones de transferencia antes de la disposición final con el fin de mejorar la recuperación de materiales. Por otra parte, la distancia recorrida entre los centros de las ciudades y la disposición final van desde los 4 hasta los 62 kilómetros. Más de dos tercios de los residuos en América Latina y el Caribe se disponen en algún tipo de relleno sanitario, aunque algunos pueden ser vertederos bien manejados, más de la mitad de los residuos se eliminan en rellenos sanitarios con algunos

controles ambientales que reflejan el enfoque regional en métodos de eliminación sostenibles (Kaza et al., 2018).

Muchos sistemas están surgiendo en toda la región, aunque la implementación varía según el país. Muchas ciudades se centran en la recuperación de residuos; por ejemplo, ciudades como Montevideo, Bogotá y Medellín, reciclan más del 15 por ciento de los residuos. Adicionalmente, ciudades como Ciudad de México, México y Rosario, hacen compost a más del 10 por ciento de los residuos. La recolección de gases en vertederos se ha convertido en el principal mecanismo de recuperación de energía a partir de residuos en América Latina y el Caribe (Kaza et al., 2018).

2.1.2 Manejo de residuos orgánicos en el contexto de la pandemia de COVID-19

La pandemia de la enfermedad coronavirus (COVID-19) ha provocado un abrupto colapso de las cadenas de gestión de residuos. La gestión segura de los desechos médicos y domésticos es crucial para contener con éxito la enfermedad. La mala gestión también puede conducir a un aumento de la contaminación ambiental. Todos los países que se enfrentan a un exceso de desechos deberían evaluar sus sistemas de gestión para incorporar la preparación para los desastres y la capacidad de recuperación (You, Sonne, y Sik Ok , 2020).

Las medidas destinadas a reducir el contacto social, incluido el cierre de restaurantes, bares, cafés y varias oficinas, hacen que muchas personas trabajen y cocinen en casa. El comportamiento de los consumidores ha cambiado. Uno de los retos que esto conlleva es el aumento de los volúmenes de residuos domésticos diarios. Durante la crisis del coronavirus, los consumidores pueden preferir comprar alimentos envueltos en plástico como una precaución higiénica más, entre otras medidas. Así pues, el reciente énfasis en la reducción y eliminación de residuos ha quedado atrás durante el camino de la crisis, pasando a un segundo plano las preocupaciones acerca de la sostenibilidad (Kumar y Rasquin, 2020).

Al menos en el sector de la gestión de desechos, la crisis es un revés para la sostenibilidad. Con la priorización de la higiene y la seguridad durante la pandemia, y la dependencia de los servicios de entrega en línea debido a las normas de distanciamiento social, el consumo

concienzado ha pasado a un segundo plano, y la atención a los hábitos sostenibles (Kumar y Rasquin, 2020).

Aunque es muy difícil hacer cambios sistémicos de gran alcance en pro de la sostenibilidad mientras dure una pandemia, las recientes perturbaciones en la industria de la gestión de desechos han puesto de relieve esferas a las que se debe dar prioridad para la participación futura y la formulación de políticas a largo plazo (Kumar y Rasquin, 2020).

El proyecto de graduación busca generar una propuesta que permita servir de base a los cambios que se requieren en las instituciones gubernamentales en torno a la gestión de residuos que contribuyan a alcanzar la carbono neutralidad y sostenibilidad. A pesar de que la pandemia ha cambiado la rutina diaria de la mayoría de las personas, la importancia de una gestión de desechos correcta, queda intacta, por ello los esfuerzos en mejorar este proceso deben mantenerse y optimizarse, como se comprueba más adelante con este proyecto.

2.1.3 Manejo de residuos orgánicos en Costa Rica

El manejo general de los desechos sólidos en Costa Rica se basa en iniciativas personales o comunales y no en una actividad de modelo de desarrollo. No existe un plan integral para el manejo de los desechos que permita disminuir los vertederos privados que a la larga serán insostenibles (Soto, 2011).

Según la Contraloría General de la República (2016) en una auditoría realizada a los 81 gobiernos locales, la cobertura del servicio de recolección de residuos municipales es mayor en los cantones ubicados en el área central del país o Gran Área Metropolitana y menores, por lo general, en las zonas periféricas que se ubican fuera de esa área. Las situaciones más críticas se presentan en 23 gobiernos locales, cuya cobertura del servicio municipal es menor a un 50% de las viviendas totales. Así también, 46 municipalidades brindan el servicio de recolección directamente, 24 lo prestan mediante el contrato con un tercero y 11 proveen el servicio con una combinación de las dos formas citadas anteriormente.

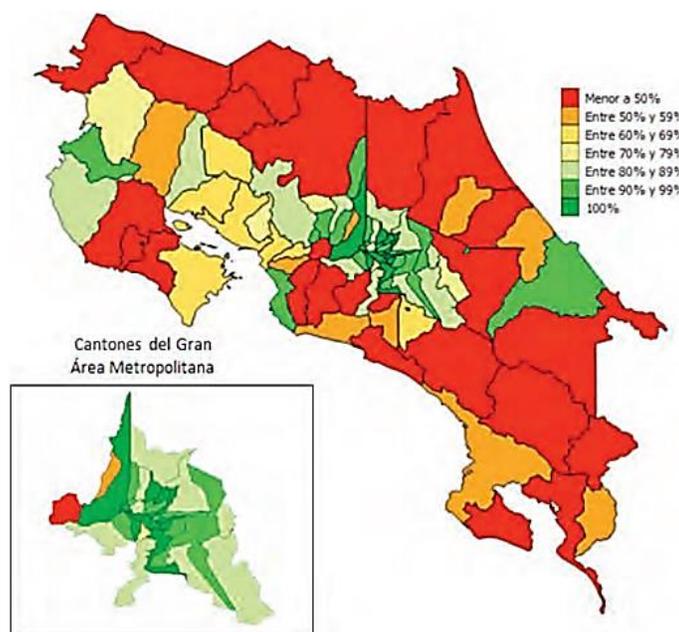


Figura 4. Porcentajes de cobertura del servicio de recolección de residuos por cantón.

Fuente: Contraloría General de la República, (2016).

En el año 2014, los 81 gobiernos locales destinaron $\$34\,660\,000\,000$ a las labores relacionadas con la recolección de residuos ordinarios, lo cual representó alrededor de un 10% de los presupuestos totales que ejecutaron para ese año. Y el costo por dar mantenimiento a la flota de camiones recolectores de basura en todo el país aumentó en prácticamente un 100 por ciento entre 2010 y 2014, donde en el 2010 se destinó $\$537\,312\,703$ y para 2014 la cifra se elevó a $\$1\,075\,971\,182$. Cerca de un 50 por ciento de los vehículos están en mal estado y muchos de ellos poseen una antigüedad mayor a 10 años. Además, debido al mal diseño de las rutas que impide dar un servicio eficiente, los camiones sufren desperfectos con mayor frecuencia (Contraloría General de la República, 2016).

En la Figura 5, se puede apreciar que 29 gobiernos locales no realizan una recolección selectiva de ningún tipo. Además, se observa que en 14 de ellos no se tienen datos sobre los porcentajes de recuperación de residuos. Por otro lado, a nivel nacional predominan en las

municipalidades los porcentajes de recuperación de residuos menores a un 6% (25 cantones en amarillo y 8 en verde claro) (Contraloría General de la República, 2016).

Existen algunos factores que no han permitido a la mayoría de los gobiernos locales evolucionar hacia una efectiva y eficiente recolección selectiva de los residuos valorizables, esto vinculado con el hecho de que los esfuerzos y recursos siguen enfocados, en mayor medida, en la recolección tradicional, sea aquella basada en recoger los residuos mezclados para ser enviados luego a los sitios de disposición final (Contraloría General de la República, 2016).

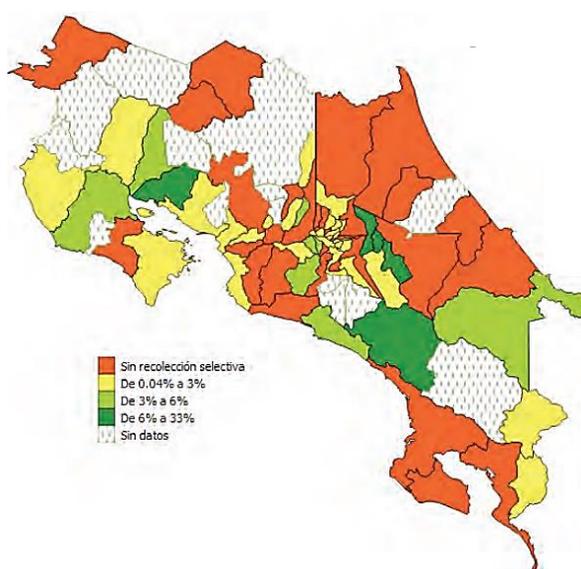


Figura 5. Porcentajes de residuos recuperados mediante recolección selectiva por los gobiernos locales.

Fuente: Contraloría General de la República (2016).

A pesar de observar un panorama desalentador es posible rescatar que, en los últimos años, muchos grupos se han organizado para manejar de una mejor forma los desechos, pero sin integrar del todo, el concepto de jerarquía de manejo de los residuos (prevención, disminución, reutilización, reciclaje, tratamiento y disposición) (Soto, 2011).

Y el nuevo reto consiste en fomentar la recolección de los residuos en bolsas separadas, educar y capacitar a la población para que cumpla su parte en la separación de sus residuos, utilizar sistemas alternativos de recolección, llevar los residuos valorizables a centros de

recuperación y de compostaje y establecer convenios con organizaciones comunales y privadas (Contraloría General de la República, 2016).

Ley de Gestión Integral de Residuos N°8839 (GIR)

Según Soto (2012), antes de la Ley de Gestión Integral de Residuos (GIR), las municipalidades realizaban labores de recolección y disposición en atención a emergencia, no se daba una planificación a largo plazo, por lo que la ley ayudó a reforzar los instrumentos necesarios para ordenar el sector. La ley indica la responsabilidad de los gobiernos locales de la gestión de los residuos generados en su cantón y a todos los actores que intervienen en el ciclo de vida útil del producto cuando se convierten en residuos (Ministerio de Salud, 2016).

La GIR en el artículo 4, establece el orden jerárquico de los residuos, en la cual se pueden distinguir 6 etapas (Figura 7), el proyecto de graduación se centra en el proceso de recogida, sin embargo, es sumamente importante tener claro la jerarquización ya que corresponden dentro del proceso logístico a las ubicaciones finales o sitios de transferencia que se van a utilizar dependiendo de la gestión que se les da a los residuos. Como el nombre del proyecto indica, se pretende con el diseño del proceso de recolección de residuos orgánicos hacia una posterior valorización de estos, lo cual puede requerir tratamiento y disposición posterior, pero están fuera del alcance de este trabajo.

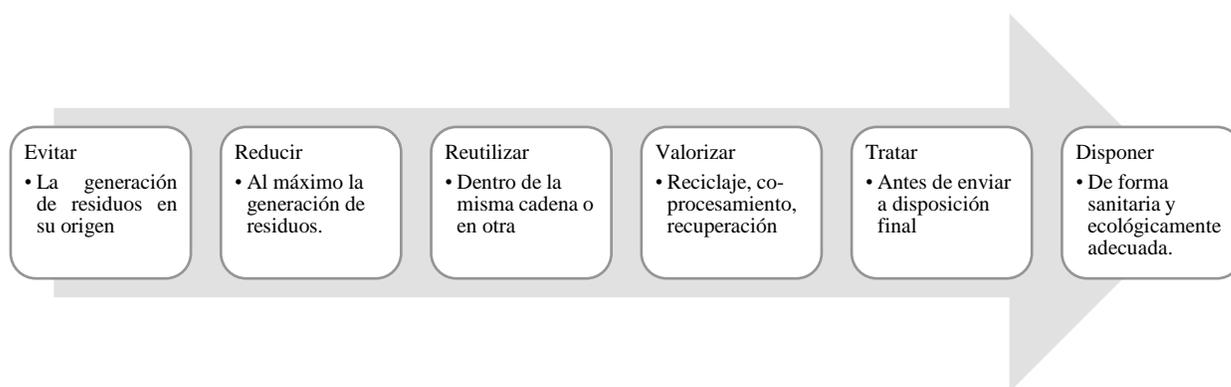


Figura 6. Jerarquización en la gestión integral de residuos.

Fuente: Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica (2010).

Reglamento general a la Ley para la Gestión Integral de Residuos

El reglamento tiene el objetivo de regular la gestión de los residuos a nivel nacional, con el fin de asegurar la Ley 8839 y prevenir riesgos sanitarios, proteger y promover la calidad ambiental, la salud y el bienestar de la población. Declara de interés público y nacional el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos, así como las acciones estratégicas necesarias para su adecuada ejecución.

Las municipalidades son responsables de la gestión integral de residuos generados en su cantón, deben elaborar e implementar en forma participativa un Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos, en concordancia con las políticas nacionales afines y el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos. La Municipalidad podrá realizar los ajustes necesarios según las necesidades del cantón (Decreto No. 37567-S MINAET-H, 2013).

Plan de Descarbonización 2050

El plan de descarbonización de la economía de Costa Rica para el 2050 menciona como objetivo el desarrollar un sistema de gestión integrada de residuos basado en la separación, reutilización, revalorización y disposición final de máxima eficiencia y bajas emisiones, adicionalmente, presenta metas para los años siguientes (MINAE, 2019).

- **2022:** se contará con la Estrategia y Plan Nacional de Mejores Opciones Tecnológicas para reducir las emisiones de metano por residuos orgánicos.
- **2030:** Costa Rica tendrá una cultura ciudadana y empresarial orientada a una menor generación, de residuos y a un exitoso manejo de estos.
- **2050:** 100% del territorio contará con soluciones para la recolección, separación, reutilización y disposición de residuos.

Según la agenda de cumplimiento en el 2019, se logra la creación del Plan Nacional de Compostaje con meta para llevar a cero la cantidad de materia orgánica en rellenos sanitarios. Por otro lado, la Estrategia NAMA residuos trabaja en jerarquizar la gestión de residuos orgánicos domiciliarios e industriales.

Además, se destaca que 12 municipalidades cuentan con acciones de compostaje en sus territorios, bajo diferentes esquemas de negocios (San José, Montes de Oca, Curridabat, Desamparados, La Unión, San Rafael de Heredia, Zarcero, Alvarado, Alajuela, Santo Domingo, Jiménez y Palmares.) (Gobierno de Costa Rica, 2019).

Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos 2016-2021 (ENSRVR)

En el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos 2016-2021 es donde se establece la estrategia, la cual se compone de cinco ejes temáticos en el ámbito nacional (Ministerio de Salud, 2016):

1. Mecanismos para armonizar el sistema de separación de residuos.
2. Mecanismos para armonizar el sistema de recuperación de residuos.
3. Fortalecimiento del sector de recuperadores y recuperadoras.
4. Bolsa virtual para la comercialización de residuos valorizables.
5. Herramienta para la valorización de los residuos (ciclo de vida de los productos y materiales).

Con respecto a los sistemas logísticos la estrategia menciona las debilidades en el diseño de las rutas de recolección, casi la mitad de los camiones recolectores municipales no se encuentran en óptimas condiciones, y el extenso recorrido realizado en el transporte de los residuos hasta los sitios de disposición final por algunas municipalidades son factores que tienen repercusiones en la eficiencia, continuidad y la cobertura del servicio de recolección. Así también, indica que la mayoría de las municipalidades no han demostrado que el servicio de recolección se apegue a los principios de eficiencia y eficacia orientado a mejorar los costos y a evitar que se sigan desperdiciando el valor de los residuos ordinarios (Ministerio de Salud, 2016).



Figura 7. Proceso de recolección de residuos sólidos ordinarios.

Fuente: Contraloría General de la República (2016).

La estrategia menciona que para tener un sistema de recolección de residuos es necesario diseñar y poner en práctica rutas de recolección que permitan la optimización de los recursos disponibles (flotilla vehicular, personal, combustibles, entre otras). De forma que se recomienda diseñar las rutas mediante los siguientes pasos (Ministerio de Salud, 2016):

1. Dividir el área del cantón en sectores considerando:
 - a. El área de la zona a servir.
 - b. La densidad de la población.
 - c. El índice de generación de residuos per cápita.
2. Diseñar las rutas de recolección para cada sector considerando:
 - a. El lugar del parqueo de los vehículos recolectores.
 - b. El lugar de disposición final de los residuos o el centro de acopio al cual se llevarán.
 - c. Los sentidos de circulación.
 - d. La hora de mayor tráfico.
 - e. El estado de las vías.
 - f. El tipo de rutas de peine (ambos lados de las vías a la misma hora, recomendado para lugares cortos con baja densidad de población) o de doble peine (de un lado de la vía y luego del otro, recomendado para alta densidad de población).

Para sitios de difícil acceso (pendientes, ancho de la vía y calles) es obligación de los generadores crear las condiciones adecuadas para una recolección adecuada por parte del ente encargado. Se sugiere la colocación de uso colectivo a la orilla de la entrada o calle principal, con tapas superiores de un material duradero que resguarden los residuos de las inclemencias del tiempo y/o puertas laterales para que los operarios recolectores puedan extraer fácilmente los residuos. La limpieza de estos contenedores es responsabilidad de los usuarios del servicio (Ministerio de Salud, 2016).

Así también la ENSRVR establece que la cantidad de rutas a realizar queda a criterio de la organización encargada de la recolección, pero se recomienda tener al menos 3 rutas definidas en concordancia con las categorías establecidas en el primer componente de esta estrategia:

1. Ruta para residuos valorizables: envases, papel y cartón.
2. Ruta para los residuos ordinarios.
3. Ruta para residuos orgánicos.

Para la recolección diferenciada por tipo de residuos la estrategia nacional recomienda los siguientes pasos, veáse Figura 8:

1. Continuar usando la flotilla de camiones compactadores para los residuos ordinarios.
2. Un camión con cajuela cerrada con separadores o un camión de cajuela abierta, pero cubierto con una lona para los residuos valorizables, de forma que se evite el daño o la dispersión del material por lluvia o viento.
3. Un camión con cajuela cargado de recipientes plásticos para los residuos orgánicos, los recipientes cumplen la función de evitar el vertido de lixiviados durante el transporte al centro de procesamiento.



Figura 8. Ejemplo de tipos de camiones para la recolección y recuperación de residuos.

Fuente: Ministerio de Salud (2016).

2.1.4 Recolección de residuos orgánicos

La falta de separación de fuentes es uno de los mayores desafíos que enfrenta la gestión de residuos especialmente en países en vías de desarrollo. Con la introducción de límites legales, muchos países (por ejemplo, Alemania y Países Bajos) han tenido éxito en limitar los productos orgánicos que entran en incineradores o vertederos. Los países en desarrollo carecen de la infraestructura para aplicar tales sistemas por lo que las autoridades deben coordinar sus planes para crear conciencia. De tal forma, que lo que puede funcionar son incentivos y aquellos que lleven lo orgánico a un centro de recolección deben ser recompensados por su acción (Hettiarachchi, Meegoda, y Ryu, 2018).

Las formas de recolección de residuos son muy diferentes entre países y entre municipios locales. Las formas más conocidas de separación de residuos en varios países son los contenedores, contenedores públicos y bolsas de plástico.

La recolección puerta a puerta de los residuos es el método más común según Singht y Livina (2015) hay una relación del grado de reciclaje o utilización posterior de los residuos, la cual es dependiente del grado de separación que se les proporcione a los residuos. En la Tabla 1, se muestran algunos ejemplos de recogida selectiva y segregación por fracciones valorizables:

Tabla 1. Tipos de segregación de los residuos (Gallardo , Prades, y Colomer, 2012)

Sin segregación	 Totalidad de residuos orgánicos
Dos fracciones	 Residuos mixtos y orgánicos
Tres fracciones	 Residuos mixtos, orgánicos y ligeros
Separación específica	 Residuos mixtos y específicos

El principal objetivo de la recogida selectiva de la fracción orgánica de los residuos urbanos es la conversión en compost de alta calidad. Este material puede ser utilizado como fertilizante para la agricultura, trabajos de restauración de jardinería o paisajismo. Una de las mayores dificultades para establecer un sistema de recolección separado es el diseño de la precolección, para que sea lo más conveniente posible para los ciudadanos y no demasiado costoso para los ciudadanos y la municipalidad, pues un factor crítico es el porcentaje de materiales que acompañan a la fracción orgánica.

Algunos aspectos que dependen de la participación pública son la cantidad de residuos recolectados y su calidad, de ahí que representen un reto para la cultura costarricense. Lo primero justifica la existencia del sistema y lo segundo lo impide. Como se describió anteriormente, la prerrecolección es esencial y consiste en la separación en un contenedor de desechos orgánicos, preferiblemente en bolsas compostables, como las de almidón de maíz. Para minimizar la cantidad de materiales no deseados que aparecen en los contenedores son necesarias las campañas iniciales y mantenimiento de la información. Por lo que realizar una prueba piloto es bastante útil, con el fin de adquirir experiencia y desarrollar el servicio al resto de la ciudad (Gallardo , Prades, y Colomer, 2012).

Para aumentar la cantidad recaudada y alcanzar más puntos de generación, la colección del material también se puede organizar según su origen (Marrero, 2010):

- Hogar (cáscaras de frutas y verduras, restos de comida, restos de pescado, huesos de carne y desperdicios, alimentos en mal estado, esquejes de césped, pequeñas podas, etc.), restaurantes, bares, colegios y edificios públicos.
- Residuos de mercados, comercios y servicios.
- Residuos de parques, jardines y cementerios.

Contar con un sistema de recolección separado para la fracción orgánica de residuos urbanos posee diferentes ventajas (Gallardo , Prades, y Colomer, 2012):

- Costes reducidos del tratamiento posterior del compost (refinación del compost).
- Minimiza el problema de los lixiviados. Hay disponibles contenedores biocompartimentados, lo que permite ahorrar durante la recolección posible.

La construcción de uno o más depósitos de entrega centralizados es generalmente el método menos costoso disponible para los municipios grandes y pequeños para la recolección de desechos orgánicos. Sin embargo, rara vez capturan más de un 50% de los materiales disponibles. Por otro lado, en lugar de proporcionar uno o dos lugares de entrega centralizados más grandes, un municipio puede elegir proporcionar varios sitios de entrega más pequeños ubicados a nivel de vecindario en toda la comunidad. Esto permite que los sitios estén ubicados más cerca de los generadores de desechos, lo que los hace más cómodos de usar. Teóricamente, el mayor nivel de conveniencia debería resultar en una mayor tasa de participación y un mayor desvío que un programa basado en depósitos de entrega. Sin embargo, existe una experiencia limitada con los sitios de recolección de residuos orgánicos de la comunidad. Dado que los contenedores son pequeños, se deben vaciar con frecuencia (por ejemplo, de dos a cuatro veces por semana) para evitar que se desborden y se vuelvan desagradables. También se requiere una mayor frecuencia de recolección para evitar los olores (Environment Canada, 2013).

2.2 REFERENCIA TEÓRICA

2.2.1 Logística inversa

La logística inversa gestiona problemas como la remanufactura, restauración, reciclaje o eliminación para utilizar los recursos de manera efectiva. Existen diferentes definiciones para este concepto, entre ellas, el proceso de planificación, implementación y control del flujo eficiente y rentable de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recapturar valor o disposición adecuada además abarca una amplia gama de actividades dentro y fuera de la logística, que incluyen: devolución de productos, reducción de fuentes, reciclaje, distribución de materiales, reutilización de material, eliminación de residuos y restauración, reparación y refabricación (Nylund, 2012).

La logística para la recolección de desechos municipales agrupa los flujos de materiales (planificación de rutas de recolección de desechos sólidos), coordinando los recursos utilizados (equipos de recolección y recursos humanos) y demanda requerida (cantidad de desechos sólidos a recolectar) para asegurar un nivel determinado de servicio al menor coste posible. Una de las actividades principales corresponde al diseño de planificación de rutas a través de métodos que permitan mejorar la recolección logrando optimizar los residuos (Flores, Guardado, y Romero, 2008).

Algunas de las variables a considerar en los procesos de logística de recolección se muestran en la Figura 9 (Flores, Guardado, y Romero, 2008).



Figura 9. Variables logísticas dentro de los proyectos logísticos de recolección de residuos.

Fuente: propia (2020).

En los sistemas de logística inversa, una de las características principales es el grado de incertidumbre presente, en especial para la recolección de residuos. La incertidumbre se ve afectada por diferentes fuentes generadores (Córdoba, 2014):

- Incertidumbre cuantitativa: el desconocimiento de la cantidad de residuos a recuperar, es importante recalcar que se supone un incremento del volumen de entrada mediante la implementación de sistemas de bonificación.
- Incertidumbre cualitativa: desconocer el nivel de calidad del residuo, en el caso de los desechos orgánicos, básicamente representa el riesgo de mezcla con otro tipo de desechos.
- Incertidumbre temporal: el momento y el tiempo que en el que se recolectan, asimismo el tiempo que transcurre después de ser generados.
- Incertidumbre espacial o de localización: es menos problemática que las anteriores, pues la ubicación se puede establecer dependiendo de las variables que se consideren pertinentes ya sea costo, distancia, entre otras.

2.2.2 Gestión de residuos

Un sistema de gestión de residuos corresponde a las actividades que involucran diferentes aspectos técnicos, económicos, legislativos, administrativos que permiten asegurar un buen manejo de estos desde su generación hasta su disposición final.

Existen diferentes factores reportados en la literatura que afectan el desempeño de los sistemas de gestión de residuos, estos se encuentran descritos en la Figura 10.

Para el caso de este trabajo final es posible observar que en la separación de los residuos los factores sociales, las campañas ambientales y la disponibilidad de recolección es muy importante. Así mismo, la planificación de rutas y el transporte es fundamental para que este se desarrolle de la mejor forma. (Abarca, Maas, y Hogland, 2015).

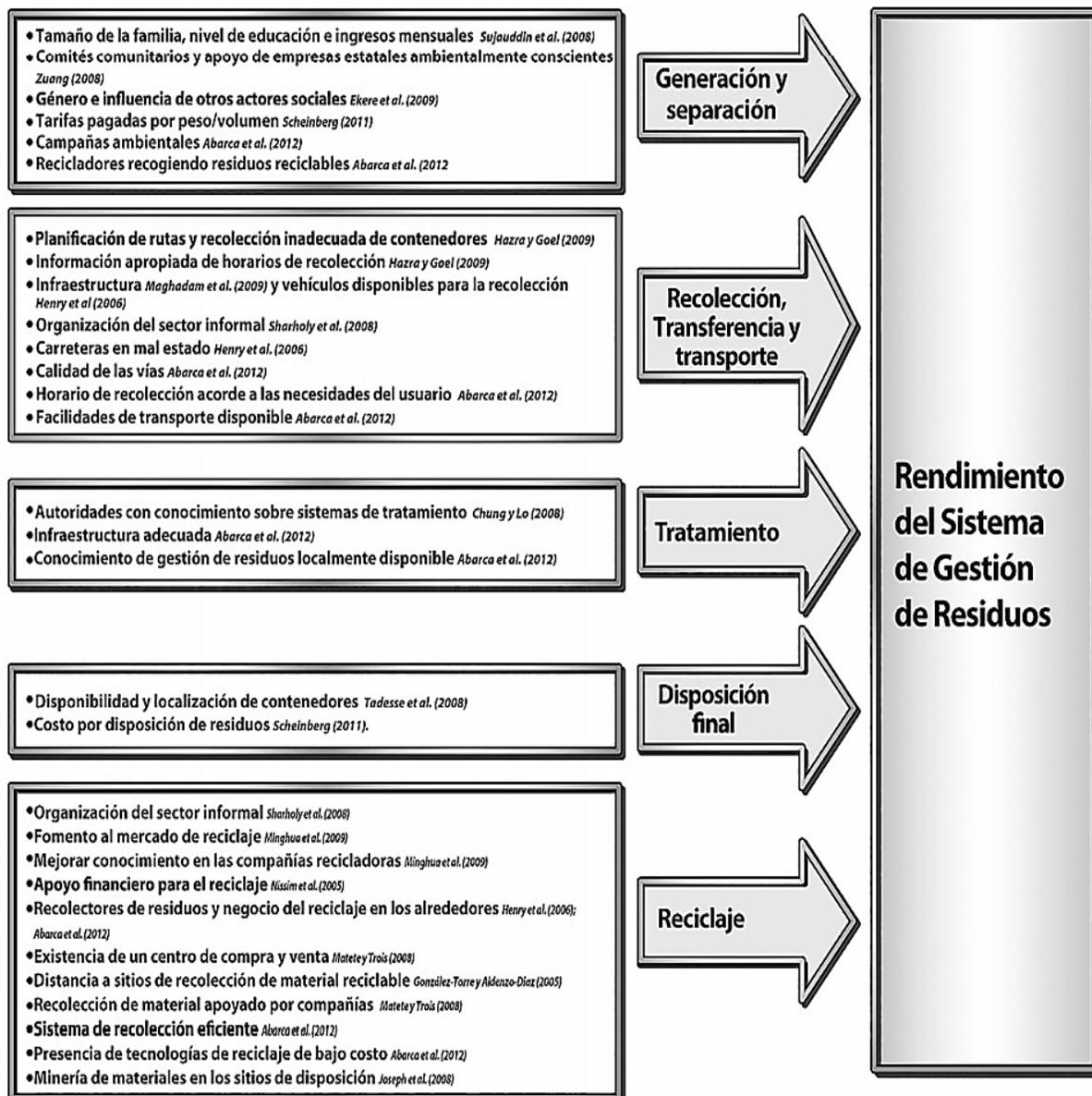


Figura 10. Factores que afectan el rendimiento del sistema de gestión de residuos.

Fuente: Abarca, Maas, y Hogland (2015).

Adicionalmente, en la Figura 11 se exponen algunas soluciones para la mejora del desempeño de la gestión de residuos que a la vez se relaciona con los factores anteriormente descritos.

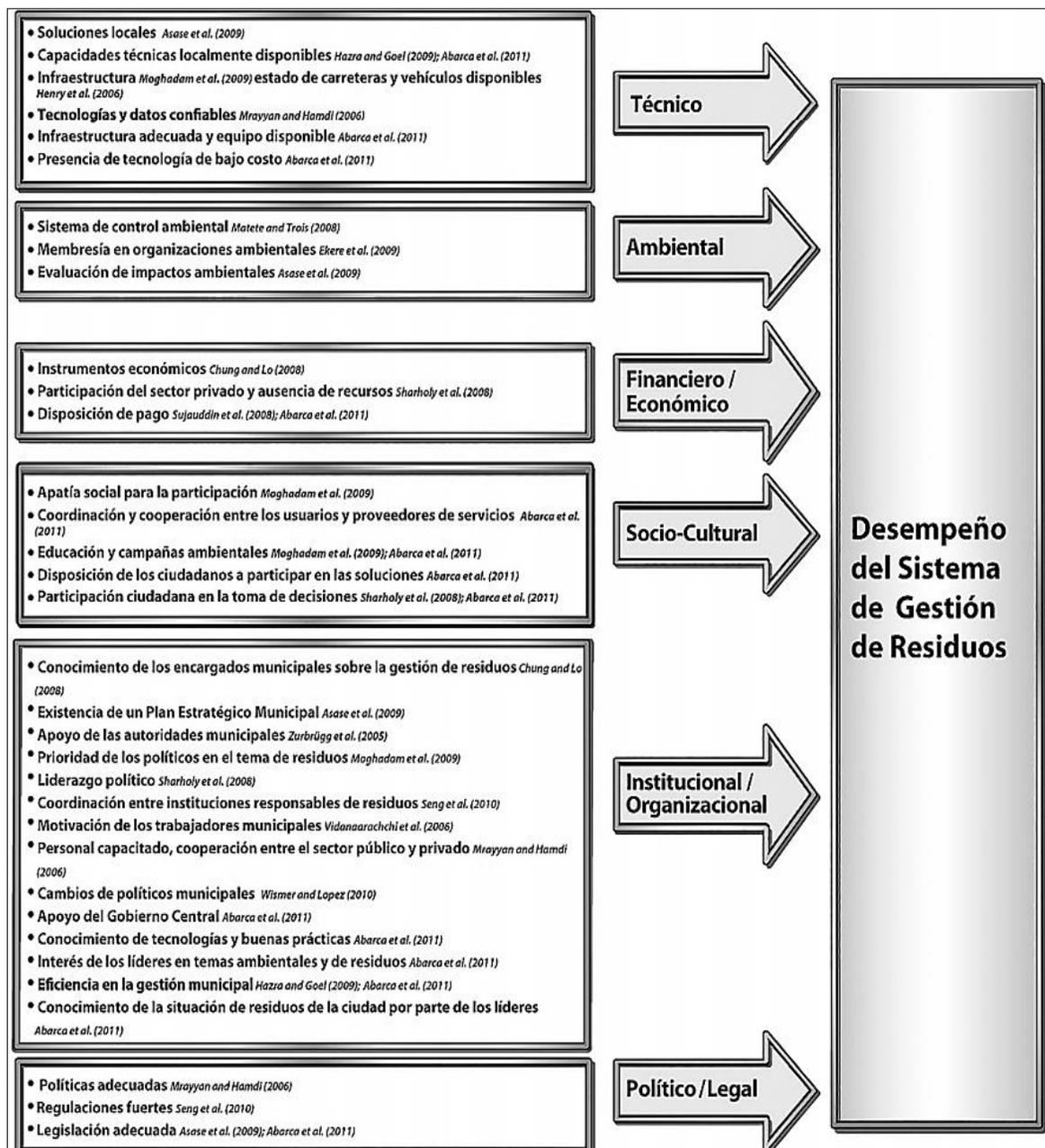


Figura 11. Factores que afectan el desempeño del sistema de gestión de residuos.

Fuente: Abarca, Maas, y Hogland (2015).

El contexto en el que se desenvuelven las personas puede actuar como medio facilitador o inhibidor para que se lleve cabo una conducta ambiental. Para la conducta de separación de residuos hay un factor fuertemente asociado con la frecuencia con que se realiza una acción ambiental, la percepción de que en la comunidad de residencia exista un lugar donde se

facilite la valoración. Es decir, el contar con lugares donde las personas puedan llevar los residuos valorizables y la comunicación y accesibilidad de estos. También se encuentra que, a mayor nivel socioeconómico, mayor es la frecuencia de separación de desechos (Solís, 2010). En el caso de este proyecto, se utiliza el índice de desarrollo social, el cual se encuentra determinado por diferentes variables sociales, entre ellas educación, economía, salud, seguridad y participación electoral. Este indicador se mide por distrito y tiene como objetivo contribuir con la asignación y la reorientación de recursos del Estado costarricense (Ministerio de Planificación y Política Económica, 2017).



Figura 12. IDS 2017.

Fuente: Ministerio de Planificación y Política Económica (2017).

La sensación de incomodidad de realizar la separación de residuos sólidos también sobresale como un factor asociado a la frecuencia con que se realiza esa conducta ambiental. Otros factores en menor medida son el sentimiento de responsabilidad y la información que poseen las personas sobre cómo realizar la acción ambiental (Solís, 2010).

Acerca del sentimiento, se puede explicar con que los consumidores realicen la segregación de residuos, basados en el conocimiento del impacto que generan los desechos al medio ambiente. Existen 4 tipos de consumidores (Kirakozian, 2014):

- Consumidor verde: actúa para preservar el planeta.
- Consumidor azul: está interesado en el medio ambiente, pero no recicla porque las otras personas no lo hacen o lo realizan incorrectamente.
- Consumidor amarillo: no le interesa el medio ambiente y tampoco le importa si las otras personas saben sobre el tema.
- Consumidor rojo: no está convencido en que segregar los residuos sea importante ni tampoco le interesan los temas medioambientales.

La influencia de la introducción de un tipo de política difiere de cada consumidor, ya que algunos van a reaccionar mejor a la información de cómo separar los residuos o a los incentivos.

Mejoras en la gestión de residuos orgánicos

Es común escuchar acerca de programas de reciclaje y reutilización para diferentes tipos de residuos como plástico, vidrio, papel, entre otros, sin embargo, no se escucha nada acerca de programas de retribución para la mayor fracción de residuos. Para esto hay varias razones entre ellas el desorden que incluye olor, lixiviado y el gas producido en la degradación, los riesgos para la salud y la dificultad de almacenamiento (Hettiarachchi, Meegoda, y Ryu, 2018).

Según Hitterachi (2018), realizar un programa de retribución por desechos orgánicos es una tarea difícil de alcanzar, ya que se debe incluir instrumentos de política y los problemas anteriormente mencionados. La capacitación que puedan recibir las personas para separar sus desechos ayuda a gestionar eficazmente los residuos. Este modelo puede funcionar mejor si lo adoptan los municipios, donde ya tienen infraestructura y personal para la gestión de residuos: esto puede reducir los costos adicionales considerablemente.

En 2005, el municipio de Cajicá en Colombia desarrolló un programa piloto de compostaje. Esto requirió la separación de residuos orgánicos en la fuente. Por lo tanto, en paralelo,

también lanzaron un programa de conciencia para alentar a los ciudadanos de Cajicá a clasificar y reciclar sus residuos. Basado en los resultados positivos observados durante el programa piloto, en 2008, lanzaron un compostaje a largo plazo programa llamado "Programa de Contenedores Verdes", que ha tenido mucho éxito y se ha ejecutado sin problemas desde entonces. Este trata principalmente sobre la distribución de contenedores (verde en color) de forma gratuita para la separación de fuentes de residuos orgánicos, que el municipio recoge una vez por semana. La recolección es realizada por el mismo personal de gestión, lo que ha ayudado a la Municipalidad a mantener el costo (extra) al mínimo (información basada en comunicaciones personales con el municipio de Cajicá). Además de los contenedores, el personal capacitado del municipio visita cada hogar cada dos meses para distribuir una sustancia llamada "bokashi", que es una mezcla de efectivo microorganismos que cuando se mezclan con desechos orgánicos, ayuda a iniciar el proceso de compostaje (Hettiarachchi, Meegoda, y Ryu, 2018).

Similar a este proyecto, la Municipalidad de Goicoechea posee un proyecto en desarrollo relacionado con la entrega de composteras a un sector de la población que permita la gestión de los desechos orgánicos en la fuente.

2.2.3 Modelos de ubicación de plantas

Los problemas de ubicación de una planta pueden clasificarse en una variedad de formas incluyendo el número de nuevas instalaciones que serán ubicadas, el espacio solución, el criterio utilizado para determinar la ubicación, el tamaño de la instalación o instalaciones y la medida de distancia usada en el modelo (Tompkins et al., 2011).

Cuando un problema de ubicación de una planta es categorizado sobre la base de las distancias entre instalaciones se utilizan frecuentemente medidas de distancia (Tompkins et al., 2011):

- Distancia rectilínea cuando las distancias se miden a lo largo de trayectorias ortogonales (o perpendiculares) entre sí. Matemáticamente, la distancia rectilínea entre dos puntos (x,y) y (a,b) es igual a $|x-a| + |y-b|$, la suma de las diferencias absolutas en las coordenadas.

Este problema se denota de la siguiente manera:

$X = (x, y)$ la ubicación de la nueva planta

$P_i = (a_i, b_i)$ la ubicación de una planta existente i , $i = 1, 2, \dots, m$

w_i una ponderación asociada con el viaje entre la planta nueva y la existente i

$d(X_i, P_i)$ la distancia entre la planta nueva y la planta existente i

En un modelo rectilíneo, las distancias se miden mediante la suma de la diferencia absoluta de las coordenadas, es decir:

$$d(X, P_i) = |x - a_i| + |y - b_i|$$

Por lo tanto, el problema de la ubicación minisuma, tipo de modelo matemático, se formula así:

$$\text{Minimizar } f(x, y) = \sum_{i=1}^m w_i |x - a_i| + \sum_{i=1}^m w_i |y - b_i|$$

- Distancia rectilínea en donde las distancias se miden sobre la trayectoria en línea recta entre dos puntos. Matemáticamente, la distancia en línea recta entre dos puntos, (x, y) y (a, b) es igual a $[(x-a)^2 + (y-b)^2]^{1/2}$, la longitud de la hipotenusa del triángulo formado por los tres puntos coordinados: (x, b) , (x, y) y (a, b) .

$$\text{Minimizar } f(x, y) = \sum_{i=1}^m w_i (x - a_i)^2 + (y - b_i)^2$$

Tomando las derivadas parciales de $f(x, y)$ con respecto a “ x ” y “ y ” se igualan a cero y se resuelven, resultando la solución única siguiente:

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^m w_i a_i}{\sum_{i=1}^m w_i}$$

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^m w_i b_i}{\sum_{i=1}^m w_i}$$

Las ecuaciones anteriores, son los promedios ponderados de las coordenadas respectivas de las plantas existentes. La solución óptima al problema de la gravedad es, de hecho, el centro de gravedad o posición del centroide (Tompkins, White, Bozer, y Tanchoco, 2011).

Existen por otro lado una amplia variedad de métodos existentes, que se clasifican en tres grandes grupos de modelos: modelos de cobertura, modelos de centro y modelos de media. Los modelos de cobertura ubican instalaciones para cubrir la demanda o necesidades de un

número fijo de lugares existentes; estos se aplican en la ubicación de instalaciones públicas como hospitales, escuelas, parques etc.

La formulación tradicional de ‘*Set covering*’ problema es la siguiente (Tapia, 2014):

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^n X_i$$

s.a

$$\sum_{i \in N_j} X_i \geq 1 \quad \forall i = 1 \dots n$$

$$X_i \in [0,1]$$

Donde:

Z= Número de servidores en el sistema

X_i = variable de decisión que da cuenta si el servidor se localiza (1) o no (0) en i

N_j = venciencia de la demanda j, que se define como todos los posibles servidores i que están a una distancia (D_{ij}) menor que un límite S fijo

$N_j = [i / D_{ij} \leq S]$ venciencia de la demanda j

La función objetivo es minimizar los servidores a instalar, con las restricciones que al menos un servidor instalado reciba toda la demanda y la integralidad de la variable de decisión. (Tapia, 2014).

Los modelos de centro localizan un número p de instalaciones en los nodos de una red con el fin de minimizar la distancia entre esos nodos y una instalación. Finalmente, los modelos de media localizan p instalaciones en los vértices de una red y asignan la demanda a cada uno de ellos con el fin de minimizar la distancia total ponderada entre las instalaciones y los centros de demanda; este tipo de problemas se aplican en situaciones que implican el transporte de carga (Sarache Castro, y Morales, 2016).

$$\text{Min } w$$

s.a

$$\begin{aligned}
 w &\geq \sum_j d_{ij} y_{ij} \quad \forall i \\
 y_{ij} &\leq x_j \quad \forall i, j \\
 \sum_j x_j &\leq p \\
 \sum_j y_{ij} &= 1 \quad \forall i \\
 x_j, y_{ij} &\in \{0,1\} \quad \forall i, j
 \end{aligned}$$

Donde, (Tapia, 2014)

w = máxima distancia demanda-instalación asignada

y^{ij} = 1 si instalación j asignada a demanda i , (la más cercana), 0 si no

d_{ij} = distancia mínima de i a j

x_i = 1 si se localiza una instalación j , 0 si no

Minisum rectilíneo

Este modelo permite minimizar la distancia entre el punto de abastecimiento y los de demanda con mediciones de distancia basados en tramos perpendiculares, siendo este el más apropiado de los modelos existentes, si es que se busca hallar la ubicación óptima de un centro de distribución dentro de una ciudad. A este modelo también se le conoce como de mediana. El algoritmo del modelo trabaja por separado cada una de las dimensiones en el plano cartesiano por separado. Los pasos, en resumen, son los siguientes: (Dueñas, 2007)

- A cada punto de demanda se le asigna tanto una coordenada geográfica en un plano cartesiano, así como un peso o importancia.
- Se obtiene el peso total.
- Se recorre el eje de las abscisas de izquierda a derecha hasta llegar al punto de demanda con peso acumulado igual o mayor a la mitad del peso total, esa es la coordenada óptima en el eje de las abscisas.

- Se realiza el mismo procedimiento en el eje de las ordenadas, obteniendo la ubicación óptima del punto de abastecimiento.

Matemáticamente, el modelo es el siguiente: (Dueñas, 2007)

La función objetivo:

$$\text{Minimizar } f(X) = \sum_{i=1}^m w_i d(X, P_i)$$

En donde:

- $X = (x,y) =$, es la nueva ubicación del punto de abastecimiento.
- $d(X,P_i) = |x-a_i| + |y-b_i|$,es la distancia entre el nuevo punto de abastecimiento y el punto de demanda i.
- w_i es el peso asociado con el número de viajes entre el nuevo punto de abastecimiento y el punto de demanda i.
-

Minisum Euclideano

El objetivo es minimizar la suma de una serie de costos en los cuales se incurre por la decisión de una localización. Donde: (Acosta Chávez y Acosta Chávez, 2015)

- $X = (x, y)$: Nueva localización
- $P_i = (a_i, b_i)$: Coordenadas de cada instalación existente
- W_i : Peso (demanda o carga) de cada instalación i hacia X
- M: Número de instalaciones existentes

$$\text{Minimizar } f(x, y) = \sum_{i=1} w_i (\sqrt{(x - a_i)^2 + (y - b_i)^2})$$

Cada instalación del cliente hala según su peso, donde el “nudo cae” es la localización de la instalación.

Cada solución va a estar dentro del “polígono de cubrimiento”. Si un punto (“cliente”) tiene la mitad o más del peso total, la instalación se ubicará en su lugar. Se pueden encontrar

soluciones en x y y por separado. La solución se halla derivando la función de costos totales e igualándola a cero. (Acosta Chávez y Acosta Chávez, 2015)

2.2.4 Problemas de ruteo

El problema de ruteo de vehículos (VRP) es un problema clásico de optimización combinatoria con múltiples aplicaciones. Los componentes fundamentales del VRP, son: la red de carreteras, los clientes, los depósitos, los vehículos y los conductores. Para hacer diferentes versiones de este problema se pueden interrelacionar diferentes restricciones y situaciones con objetivos particulares.

Tabla 2. Clasificación y usos en el diseño de rutas. (Santiago, 2017)

Cobertura de arcos	El problema del cartero chino (CPP)	Recorre todos los caminos solo una vez minimizando costos y/o distancias cubriendo los arcos.
Cobertura de nodos	El problema del viajante de comercio o agente viajero (TSP)	Recorre N ciudades pasando por ellas sólo una vez, minimizando costos y distancias, cubriendo nodos.
	Problema de enrutamiento de vehículo (VRP)	Recorre un conjunto de rutas que comienzan y terminan en un depósito (nodos), de manera que cada cliente es visitado al menos una vez sin violar ciertas restricciones de capacidad y/o tiempo, buscando que el conjunto de rutas creadas proporcione una longitud total recorrida mínima.

A continuación, una breve explicación del Problema del Agente Viajero – TSP (Travelling Salesman Problem), el objetivo es encontrar un recorrido completo que conecte todos los nodos de una red, visitándolos tan solo una vez y volviendo al punto de partida, y que además minimice la distancia total de la ruta, o el tiempo total del recorrido.

Este tipo de problemas tiene gran aplicación en el ámbito de la logística y distribución, así como en la programación de curvas de producción.

El problema del agente viajero tiene una variación importante, y esta depende de que las distancias entre un nodo y otro sean simétricas o no, es decir, que la distancia entre A y B sea igual a la distancia entre B y A, puesto que en la práctica es muy poco probable que así sea (López, 2019).

La cantidad de rutas posibles en una red está determinada por la ecuación:

$$(n-1)!$$

Es decir que en una red de 5 nodos la cantidad de rutas probables es igual a $(5-1)! = 24$, y a medida que el número de nodos aumente la cantidad de rutas posibles crece factorialmente. En el caso de que el problema sea simétrico la cantidad de rutas posibles se reduce a la mitad, es decir:

$$((n-1)!)/2$$

Lo cual significa un ahorro significativo en el tiempo de procesamiento de rutas de gran tamaño.

La complejidad del cálculo del problema del agente viajero ha despertado múltiples iniciativas por mejorar la eficiencia en el cálculo de rutas. El método más básico es el conocido con el nombre de fuerza bruta, que consiste en el cálculo de todos los posibles recorridos, lo cual se hace extremadamente ineficiente y casi que se imposibilita en redes de gran tamaño. También existen *heurísticos* que se han desarrollado por la complejidad en el cálculo de soluciones óptimas en redes robustas, es por ello que existen métodos como el vecino más cercano, la inserción más barata y el doble sentido. Por último, se encuentran los algoritmos que proporcionan soluciones óptimas, como el método de branch and bound (ramificación y poda), que trabaja el problema como un algoritmo de asignación y lo resuelve por medio del método simplex (López, 2019).

El algoritmo del vecino más cercano es una heurística más sencillas utilizada en los problemas de ruteo, esta heurística consiste en juntar un conjunto de nodos con base a la cercanía de su ubicación en un espacio, relacionándolos de forma secuencial a partir de un nodo de partida o inicio y eligiendo el nodo más cercano al actual ignorando al grupo de nodos que ya forman parte del sistema, el proceso termina cuando ya se han agregado todos los nodos a la ruta y el ciclo volviendo al nodo inicial. Su definición matemática se representa

generando un valor l , al conjunto de soluciones factibles 23 para el VRPTW, y c a una función de costo. l Es finito, pero extremadamente grande. El objetivo es encontrar una solución s^* para la cual: $c(s^*) \leq c(s)$ para $s \in l$ (Toth y Vigo, 2002).

2.2.5 Ruteo de transporte de residuos

Para recolección de residuos, las organizaciones necesitan recuperar los desechos del punto de recogida y enviarlos a las instalaciones de tratamiento o de utilización, esto da cabida al estudio del enrutamiento de los camiones recolectores de los residuos sólidos municipales. Normalmente se deben recolectar muchos puntos de recolección para ser enviados a la instalación apropiada (típicamente sólo un destino), esto representa un problema para la logística inversa, donde muchos puntos deben ser recolectados en uno solo o muy pocos puntos de entrega, es por ello que se presentan algunas fuentes de complejidad y poca visibilidad, elección de la mejor instalación para tratamiento, restricciones de la ventana de tiempo y la mezcla de empresas privadas y públicas en el proceso (Han & Ponce, 2015). Específicamente, las ventanas de tiempo afectan debido a que el camión recolector hace múltiples paradas durante una ruta, ese tiempo (inicio y final) no es un valor constante, es decir, depende de la cantidad de basura que haya y la rapidez de los recolectores.

Hay diferentes tipos de recolección los cuales, son esenciales para la definición de la ruta para llevar a cabo la recolección (Gallardo, Prades, y Colomer, 2012):

- El sistema puerta a puerta: los contenedores están ubicados en cada puerta, patio o alguna zona accesible desde la vivienda o edificio donde la distancia que tiene el ciudadano para depositar los residuos es mínima.
- El sistema recolección en la acera: los puntos de depósito ya no están ubicados en la puerta, sino entre 50 o 60 metros. Los ciudadanos no tienen que viajar muy lejos y la aceptación es buena, se utiliza en ciudades con alta densidad poblacional.
- El sistema de puntos de bajada: los puntos de recolección se ubican a distancias mayores para reducir los costos de gestión. Las áreas pueden tener un rango de entre 100 y 300 metros. El sistema se basa en la disposición de los ciudadanos en viajar distancias más largas a pie. Generalmente, utilizado en residuos reciclables.

- Depósito a nivel de establecimiento: algunos establecimientos (tiendas, instituciones públicas, etc.) colaboran en la recolección separada de algunos tipos de residuos, particularmente peligrosos como baterías o lámparas fluorescentes.
- Depósito a nivel de instalaciones. Los puntos de depósito están ubicados en instalaciones alejadas del residencial. Estas instalaciones se denominan "puntos limpios". Son capaces de recoger de forma selectiva todos los tipos de residuos, especialmente aquellos que no se recogen en otros niveles.

El transporte de desechos consiste típicamente en una flota de vehículos, paradas, instalaciones de eliminación, el depósito y varios contenedores de recolección o puntos de recolección. La complejidad de este proceso depende de diferentes características, como diferentes tipos de vehículos, número de instalaciones de eliminación (individuales o múltiples), diversos tipos de restricciones, el intervalo de tiempo o la capacidad del vehículo referida a los servicios al cliente, revelando diferentes modelos de enrutamiento como se observa en la Tabla 3 (Golden et al., 2002).

Tabla 3. Tipos de VRP para la recolección de residuos. (Golden et al., 2002)

Clasificación	Tipo de residuo	Tipo de contenedor	Ubicación	Tipo de problema
Residencial	Residuos domésticos	Contenedores	Calle	Ruteo por arcos
Comercial	Residuos comerciales	Grandes contenedores	Comercial	Ruteo por nodos
“Roll on Roll off”	Residuos de construcción	Grandes “trailers” o contenedores	Sitios de construcción	Ruteo de nodos y bins empacados

Específicamente para los residuos domésticos, los cuales son colocados a lo largo de la calle en diferentes tipos de contenedores se utiliza según Golden et al (2002) el ruteo por arcos y es resuelto por diferentes investigadores de forma que la locación de los clientes no es requerida. Respecto a estos modelos, Tung y Pinnoi (2000) resuelven un problema de enrutamiento y programación de vehículos del mundo real restringido por múltiples ventanas de tiempo y tiempos de llegada mínimos para cada sitio, así como la capacidad

limitada del vehículo y la hora de operación con mejoras tanto en el costo total y el número de vehículos utilizados y Faccio et al. (2011), introdujo un modelo innovador de enrutamiento de vehículos con una aplicación en una ciudad italiana de aproximadamente 100,000 habitantes.

Los resultados muestran que el modelo aporta una mejora económica y factible en términos de alimentos perecederos, integrando los datos presentados de trazabilidad en tiempo real con las condiciones físicas de los artículos transportados. Bonomo et al. (2012), propuso un método que utiliza técnicas de investigación de operaciones para optimizar las rutas de los vehículos de recolección de residuos, analizaron el ejemplo de una ciudad en Buenos Aires. La aplicación del método propuesto tuvo un ahorro de más de \$ 200 000 por año.

Numerosa literatura relacionada a la optimización de los sistemas de recolección recomienda la aplicación del ruteo por arcos capacitado (CARP), para el tratamiento de residuos residenciales, sin embargo un extenso análisis de la literatura en los últimos tres años evidenció que la metodología de mayor aplicación para estos casos fue el Sistema de información geográfica (ArcGIS) con su complemento Network Analyst que básicamente consiste en procedimientos metaheurísticos para el tratamiento del VRP de ruteo por nodos, demostrando significativas optimizaciones en las rutas vehiculares en todos los casos analizados (Herrera et al., s.f).

Problemas del proceso de recolección

Algunos problemas generales en la recolección y transporte de residuos se encuentran los siguientes (Ministry of Government and Provincial Councils, 2008):

- Almacenamiento / descarga de basura deficiente. Por ejemplo, la basura ha sido descargada en la carretera o en contenedores públicos, los trabajadores deben volver a cargarla en los vehículos de recolección. A menudo, se tarda más de 20 minutos en transferir el contenido de un contenedor de concreto completo a un camión.
- Transferencia inadecuada de residuos realizados a mano los cuales, se caen y deben reprocesar.

- Los costos de recolección son altos y los niveles de servicio son bajos. El 30% -70% de la población urbana es a menudo infrecuente (menos de una vez por semana en el área rural).
- Mala gestión laboral y supervisión. Cooperación inadecuada de los ciudadanos con los programas y los métodos de recolección.
- Tipo y tamaño inadecuado de los vehículos de recogida.
- Rutas no racionales para el servicio de recogida. Fallo al optimizar la productividad del vehículo al seleccionar el tamaño de la tripulación y la duración del turno adecuados.
- Capacidad inadecuada de contenedores en los puntos de recolección comunales.
- Largos tiempos de inactividad del vehículo debido a un mantenimiento / reparación deficiente del equipo.
- Largos tiempos de transporte para eliminar sitios conectados.
- Las duras condiciones de conducción en el vehículo causan daños.
- Contaminación causada por el uso de combustibles fósiles y gases de efectos invernadero, especialmente de vehículos en mal estado.

2.2.6 Proceso de toma de decisiones multicriterio

De acuerdo a la naturaleza y características del problema a resolver, existe una gran variedad de técnicas pertinentes para la formulación y solución del mismo. El análisis de decisión multicriterio MCDA (*Multi Criteria Decision Analysis*) se puede definir como un conjunto de metodologías que facilitan el proceso de toma de decisiones, utilizando criterios de decisión, en los casos que los criterios son varios o existen criterios en conflicto. El objetivo fundamental es ayudar a seleccionar y jerarquizar de acuerdo a su importancia las diferentes alternativas finitas (en el caso discreto), planteadas para la solución de un problema determinado, sustentando la decisión en un conjunto de criterios que tienen importancia para la decisión final y que han sido establecidos técnicamente. (Rivera Monsalve & Fredy Rojas , 2019)

Según Rezae (2015), en una revisión de 80 artículos relevantes se ha encontrado que el método análisis jerárquico (AHP) y PROMETHE son los más utilizados respecto a

problemas de reciclaje, gestión de residuos, general, la refabricación, la reutilización, el diseño y el desmontaje.

2.2.7 Herramienta de jerarquización (AHP)

El análisis jerárquico (AHP) es una herramienta desarrollada por Thomas L. Saaty (The Analytic Hierarchy Process, 1980) comúnmente utilizada para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión (Hurtado & Bruno, 2005).

El Proceso Analítico Jerárquico es una teoría general sobre juicios y valoraciones que, basada en escalas de razón, permite combinar lo científico y racional con lo intangible para ayudar a sintetizar la naturaleza humana con lo concreto de nuestras experiencias capturadas a través de la ciencia. Gran parte de nuestro conocimiento y comportamiento puede explicarse en términos de comparaciones relativas expresadas en forma de ratios. De hecho, los aspectos intangibles a los que por el momento no se les puede asignar directamente un valor numérico, pueden ser medidos relativamente y tener sentido en función de otras cosas que forman nuestro sistema de valores y entendemos mejor (misión, criterios y subcriterios). (Moreno, 2021)

El método consiste en los siguientes pasos: (Rositas y Mendoza, 2013)

1. Definir el problema que en un principio carece de estructura, declarar y anotar claramente los objetivos y logros buscados.
2. Desagregar el problema e integrarlo dentro de una estructura jerárquica con elementos de decisión, esto es, criterios y alternativas.
3. Formar matrices de comparación y aplicar comparaciones apareadas entre los elementos de decisión.
4. Usar el método de “*eigenvalues*” para estimar los pesos o ponderaciones relativas de los elementos de decisión

5. Verificar la consistencia de las matrices para asegurarnos de que los juicios de los elementos de decisión son consistentes.
6. Agregar las ponderaciones relativas de los elementos de decisión para obtener el ordenamiento o jerarquización global de las alternativas.

El Proceso Analítico Jerárquico proporciona escalas de razón que capturan la realidad percibida y es diferente de una asignación y normalización arbitraria de números. Y además posee las siguientes características (Moreno, 2021):

- Utiliza jerarquías (en general redes) para formalizar el modelo mental en el modelo estructural asociado. La utilización de jerarquías y redes es algo inherente a las neuronas del cerebro (descomponer un problema complejo en partes más sencillas).
- Utiliza conglomerados para integrar lo muy pequeño con lo muy grande. Respondiendo a consideraciones psicológicas, los elementos incluidos en cada conglomerado deben ser del mismo orden de magnitud (los individuos son más precisos al comparar elementos de la misma magnitud), y su número estar acotado por el conocido como número mágico de Miller, 7 ± 2
- Utiliza comparaciones pareadas al incorporar las preferencias de los actores entre elementos. Esta forma de incorporar las preferencias (medidas relativas), necesaria al trabajar con aspectos intangibles, ha sido extendida al caso de los tangibles. En este sentido, siguiendo la práctica del ser humano, se suele tomar como unidad de referencia el elemento que posee el atributo en menor grado, y se pregunta con qué importancia, preferencia o verosimilitud el elemento que posee el atributo en mayor grado domina al otro. Evidentemente, conforme a la inclusión de juicios seguida, la matriz de comparaciones pareadas es recíproca.
- Utiliza la escala fundamental propuesta por Saaty $\{1,3,5,7,9\}$ para incorporar los juicios o valoraciones del decisor. Esta escala, estrictamente positiva, permite eliminar las ambigüedades que el ser humano tiene al comparar elementos en la proximidad del cero o del infinito.
- Se utiliza el método del autovector principal por la derecha para obtener las prioridades locales; el principio de composición jerárquico para calcular las

prioridades globales y una forma lineal multiaditiva para obtener las prioridades totales. Además, a diferencia de otras técnicas multicriterio, AHP permite, dentro del propio proceso de resolución, evaluar analíticamente (matemáticamente) la consistencia del decisor a la hora de emitir los juicios.

Las ventajas de las herramientas ante otros métodos de decisión son:

- Presentar un sustento matemático.
- Permitir desglosar y analizar un problema por partes.
- Permitir medir criterios cuantitativos y cualitativos mediante una escala común.
- Generar una síntesis y dar la posibilidad de realizar análisis de sensibilidad.

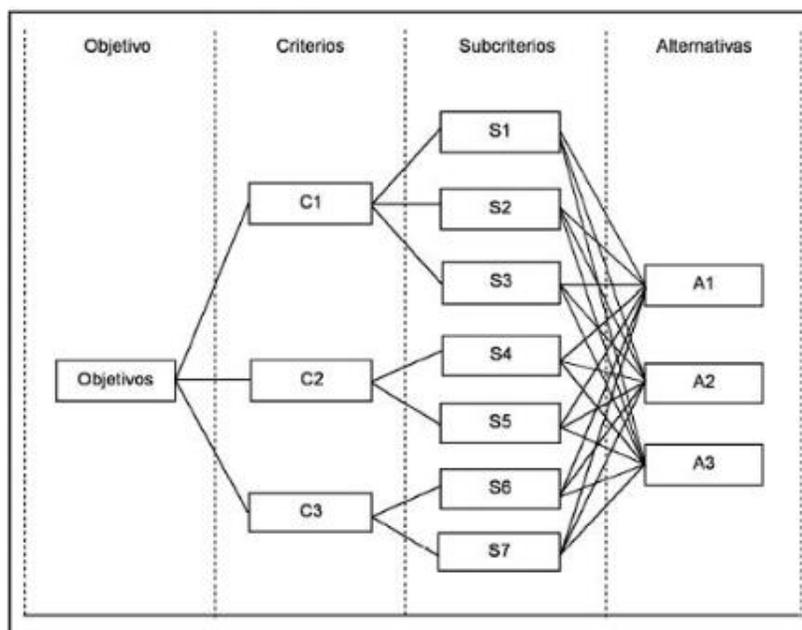


Figura 13. Modelo jerárquico para la toma de decisiones con el AHP.

Fuente: Berumen y Llamazares (2007).

Dado que la técnica AHP no permite múltiples valoraciones es necesario tener una matriz con las valoraciones consensuadas del juicio de expertos, existen múltiples métodos para llevar a cabo esta medición, sin embargo, se recomienda utilizar una valoración individual para evitar el sesgo de opiniones y la dificultad de llegar a un consenso. Para ello, según

Saaty y Aczél, la media geométrica cumple con la capacidad de obtener un valor consensuado que cumpla con satisfacción la propiedad recíproca. En contraste, si se utiliza la media aritmética, esta propiedad no se mantiene. A manera de ejemplo, supongamos que con la media aritmética la media de dos juicios con valores de 7 y 9 resultaría en 8, cuyo valor recíproco es $1/8$, pero en el otro lado de la matriz obtendríamos un valor de $(1/7 + 1/9)/2 = 8/63$ lo que difiere del valor esperado de $1/8$ para mantener la matriz recíproca. Por otra parte, utilizando la media geométrica, la síntesis de estos dos juicios sería $\sqrt{7 \cdot 9} = 3\sqrt{7}$, y en el otro lado de la matriz el inverso estaría dado por $\sqrt{1/7 \cdot 1/9} = \sqrt{7/21}$, que es el mismo valor del recíproco esperado $1/\sqrt{7 \cdot 9} = \sqrt{7/21}$ (Mendoza, et al., 2019).

Finalmente, calculamos un nuevo vector de prioridad consensuado obtenido para cada criterio, y se conforma una matriz de prioridad, la cual se multiplica con el vector de prioridad obtenido. El resultado final, será un vector denotado como vector de prioridad de las alternativas, el cual constituye la solución del problema (Mendoza, et al., 2019).

2.2.8 Cálculo de huella de carbono

La huella de carbono se define como la cantidad total de GEI emitidos (directa e indirectamente) a la atmósfera medidos en kilogramos o toneladas CO₂ equivalente, que es el parámetro estándar o unidad base para reportar el resultado final, emitidos por persona, o asociados a las actividades productivas y de consumo de nuestra sociedad, tales como el transporte, la minería, la generación eléctrica, la agricultura, la producción de bienes de consumo, etc (Montes de Oca y Arce, 2011).

La preocupación internacional por las consecuencias adversas del cambio climático ha motivado a las organizaciones e instituciones a tomar medidas para conocer a fondo la dinámica de los gases de efecto invernadero, siendo la huella de carbono uno de los indicadores reconocidos mundialmente para comprender esa dinámica (Montes de Oca y Arce, 2011).

Para la medición de la huella se utilizan factores de emisión, que corresponden al coeficiente que relaciona los datos de actividad con la cantidad del compuesto químico (relacionados

directamente con los gases de efecto invernadero). En Costa Rica los factores de emisión están dados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), el cual los ordena de acuerdo con los principales sectores contribuyentes de GEI. En el caso de que para ciertos datos no exista el factor de emisión dado por el IMN, también existen bases de datos a nivel internacional que reportan los factores de emisión necesarios. El Potencial de Calentamiento Global (PCG) es el encargado de convertir las emisiones asociadas a cada una de las actividades en una cifra equivalente en toneladas de dióxido de carbono (CO₂ equivalente) (Sandí, 2018). A continuación, los potenciales de calentamiento para dióxido de carbono, metano y dióxido de nitrógeno.

Tabla 4. Potencial de calentamiento para dióxido de carbono, metano y dióxido de nitrógeno. (Instituto Meteorológico Nacional , 2020)

Gas	Potencial de calentamiento: Horizonte 100 años
CO ₂	1
CH ₄	21
NO ₂	310

Para este proyecto se utiliza únicamente un aproximado de la medición actual de las toneladas de CO₂ equivalente utilizado por los camiones de recolección y el impacto de los residuos orgánicos en el relleno sanitario, posible compostaje o generación de energía; para obtener un panorama de los impactos del proceso logístico de recolección de los desechos orgánicos.

En seguida, los factores de emisión según el Instituto Meteorológico de Nacional de Costa Rica para el transporte con gasolina y diésel, así como para la gestión de residuos sólidos.

Tabla 5. Factores de emisión CO₂ para la gasolina y diésel. (Instituto Meteorológico Nacional , 2020)

Fuente	Factor de emisión kg CO ₂ /L combustible
Gasolina	2,231
Diésel	2,613

Tabla 6. Factores de emisión CH₄ y NO₂ para la gasolina y diésel. (Instituto Metereológico Nacional , 2020)

Fuente	Factor de emisión g CH₄/L combustible	Factor de emisión g N₂O/L combustible
Gasolina sin catalizador	1,176	0,116
Gasolina con catalizador	0,907	0,283
Diesel sin catalizador	0,149	0,154

Tabla 7. Factores de emisión CH₄ y NO₂ para la gestión de residuos. (Instituto Metereológico Nacional , 2020)

Fuente	Factor de emisión g CH₄/kg de residuos sólidos	Factor de emisión g N₂O/ kg de residuos sólidos
Relleno Sanitario	58,1	-
Compost	4	0,3
Biodigestores	2	-

2.3 REFERENCIA CONCEPTUAL

2.3.1 Economía lineal

Después de la Revolución Industrial y los posteriores 150 años se han experimentado cambios en el sistema económico dando paso del capitalismo industrial al financiero, manteniendo un modelo de producción y consumo lineal (Varela Menéndez, 2018).

En las etapas de industrialización de los países desarrollados, el concepto dominante de economía lineal no tenía serias limitaciones. Las materias primas estaban fácilmente disponibles y eran de bajo precio, las tecnologías se habían mejorado y optimizado y el concepto de economía lineal era el modelo de crecimiento. Este crecimiento se manifestó en el crecimiento de la producción, empleo, nivel de vida, ciudades y demanda de todo tipo de bienes (Drijaca, 2015).

Modelo por el que cualquier tipo de bien es producido partiendo de unas determinadas materias primas, para luego ser vendidos, utilizados y posteriormente desechados (Varela Menéndez, 2018).



Figura 14. Fases del modelo económico lineal.

Fuente: Drijaca (2015).

Este sistema lineal no es sostenible, pues conlleva el aumento “perpetuo” de la intensidad material y energética y el crecimiento del consumo, siendo esto incompatible con un mundo de recursos limitados.

Problemas y limitaciones del modelo lineal:

- Creciente escasez y sobreexplotación de recursos
- Contaminación
- Plastificación de los océanos

- Producción de alimentos
- Desertificación
- Incremento de la pobreza y la brecha entre los países del norte y del sur y otros problemas sociales

2.3.2 Economía circular

La economía circular se presenta como un nuevo concepto de gestión de residuos que surgió como una reacción a la crisis económica y ambiental en 2008, relacionada con la explotación máxima de los recursos materiales utilizados. El concepto de economía circular se ha vuelto cada vez más presente, incluso inevitable, porque se ha integrado en las regulaciones europeas que deben ser aplicadas por todos los estados miembros de la UE y candidatos de tal manera que se implementen en su marco institucional nacional y se implementen (Drijaca, 2015).

Principios de la economía circular

La economía circular descansa sobre los tres principios descritos a continuación (Espaliat, 2017):

Principio 1: Preservar y mejorar el capital natural, controlando las reservas finitas, equilibrando los flujos de recursos renovables, desmaterializando la utilidad y ofreciendo utilidad de forma virtual siempre que sea posible. Cuando se necesitan recursos, el sistema circular los selecciona de forma sensata los procesos y tecnologías que utilizan recursos renovables o de mayor rendimiento siempre que sea viable.

Principio 2: Optimizar el rendimiento de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias procurando su máxima utilidad en todo momento, tanto en los ciclos técnicos como biológicos. Esto implica diseñar para refabricar, reacondicionar y reciclar para mantener los componentes técnicos y materias circulando, contribuyendo de este modo a optimizar la economía. Los sistemas circulares utilizan bucles internos más reducidos como ocurre, por ejemplo, a la hora de priorizar el mantenimiento o la reparación antes de proceder al reciclaje cuando ello resulta posible, preservando y recuperando energías latentes y otros activos productivos.

Los sistemas circulares maximizan también el número de ciclos consecutivos aumentando la vida útil de los productos y favoreciendo la reutilización. A su vez, compartir recursos incrementa el grado de utilización de productos y de reutilización de subproductos y residuos valorizables.

Los sistemas circulares promueven también que los nutrientes biológicos vuelvan a entrar en la biosfera de forma segura, para que su descomposición genere materias valiosas susceptibles de ser incorporadas a un nuevo ciclo. En el ciclo biológico, característico de las actividades agrícolas, ganaderas y pesqueras, los productos están “diseñados” naturalmente para ser consumidos o metabolizados y para regenerarse dando lugar a nuevos recursos. En el caso de las materias biológicas, la esencia de la creación de valor consiste en la oportunidad de extraer valor adicional de los productos y materias mediante su paso en cascada por sucesivas etapas y aplicaciones. Cuando se trata de optimizar los ciclos técnicos, lo oportuno es intentar “imitar” los mecanismos de los ciclos naturales.

Principio 3: Promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando del diseño los factores negativos externos. Esto incluye evitar, o al menos reducir, los posibles daños en ámbitos, tales como la alimentación, la movilidad, la educación, la sanidad y el ocio, y controlar adecuadamente otros factores externos de importancia, tales como el uso del suelo, la contaminación del aire y del agua o el vertido de sustancias tóxicas.

Indicadores de economía circular

Existen indicadores de economía circular relacionados con los residuos,

- Cantidad de residuos orgánicos producidos por año por cápita: El “Pacto Nacional para Combatir el Desecho de Alimentos” de Francia (*Pacte National de lutte contre le gaspillage alimentaire*), en mayo de 2013, proporciona la siguiente definición: cualquier alimento destinado al consumo humano que se pierde o se desecha en cualquier etapa del ciclo alimentario constituye un desperdicio de alimentos. El desperdicio de alimentos es un sello distintivo de la economía lineal, causando desperdicio de recursos (materias primas, agua y energía). Este indicador se encuentra entre los objetivos establecidos por los Objetivos de desarrollo sostenible de las

Naciones Unidas para 2030 (SOeS, 2017). Para la UE deber estar en un valor aproximado de 173 kg/per cápita al año (Banaitė y Tamošiūnienė, 2016).

- Porcentaje de residuos reciclables del total de residuos generados: se pretende que sea un 65% para el 2030, según la Unión Europea (Banaitė y Tamošiūnienė, 2016).
- Cantidad enviada al relleno sanitario en tonelada/año: De acuerdo con la jerarquía de métodos de procesamiento de residuos establecida en la Directiva 2008/98 / CE de la Comisión Europea, el uso de vertederos es el método menos deseable de eliminación de desechos, junto con la incineración sin recuperación de energía. El relleno sanitario constituye un desperdicio de recursos que de otro modo podrían haber sido reciclados, e impide el desarrollo de una economía circular, por lo tanto debería ser menor a un 28%. (SOeS, 2017).

2.3.3 Logística verde

La logística verde es la gestión logística que tiene el objetivo de reducir el impacto ambiental negativo, así el concepto de que la economía circular promueve la logística verde se fomenta a partir de la optimización, estructura industrial avanzada, baja contaminación en el proceso de logística, desarrollo de reciclaje, recuperación y producción de nuevos productos con base en residuos (Nylund, 2012).

Lo que se conoce por "logística verde" representa la convergencia de varias líneas de investigación que comenzaron en diferentes momentos en los últimos 40 años. Las categorías son: la reducción de las externalidades del transporte de carga, logística de la ciudad, logística inversa, estrategias ambientales corporativas hacia la logística y gestión de la cadena de suministro verde. Esto amplía la triple clasificación de la investigación de logística verde adoptada por Abukhader y Jonsson (2004), que comprendía en su momento la evaluación ambiental, logística inversa y cadenas de suministro verdes. (McKinnon, Cullinane, Browne, y Whiteing, 2010).

2.3.4 Residuos orgánicos

La definición de los residuos orgánicos se obtiene de la ENSRVR donde, se incluyen en esta categoría los residuos compostables, de origen vegetal: restos de alimentos, frutas, verduras, cáscaras y residuos de jardín. Se excluyen los restos de alimentos de origen animal. Este tipo de desechos se encuentra dentro de la categorización realizada por la INTE12-12-01-08-2011 como se muestra en la Figura 15.



Figura 15. Categorías de separación de tipos de residuos basados en la norma INTE12-12-01-08-2011.

Fuente: Ministerio de Salud (2016).

Los restos de alimentos o su desperdicio representa una proporción significativa del material orgánico que se encuentra en los desechos residenciales. Puede ser generado por el post consumo y proveniente de cocinas residenciales y comerciales o preconsumidor, proveniente de agentes de distribución y minoristas (es decir, transportistas y supermercados). El desperdicio de alimentos tiene un alto contenido de humedad, lo que puede llevar a la generación de lixiviados y olores durante la manipulación y el procesamiento. Los productos de papel sucios (toallas de papel, servilletas, cartón sucio o encerado, papel de periódico sucio y tejidos) en ocasiones se incluyen como parte del desperdicio de alimentos ya que, son fácilmente degradables y sirven como absorbentes durante la recolección (Environment Canada, 2013).

Por otro lado, los desechos de hojas y jardines consisten en hojas, malezas, arbustos y podas de árboles pequeños, la mayoría de las veces son suficientemente pequeños como para que no requiera trituración o trituración antes de ser procesado a través de compostaje o digestión anaeróbica. Es una materia prima muy limpia y libre de contaminantes, sin embargo pueden contaminarse con bolsas de plástico, desechos de mascotas, tierra, rocas y contenedores de fertilizantes (Environment Canada, 2013).

Impactos ambientales, sociales y económicos

Los costos económicos, ambientales y sociales anuales totales de los residuos para la economía global se encuentran en el orden de \$ 2,6 billones de dólares aproximadamente, las cifras atribuidas a cada aspecto se muestran en la tabla a continuación (Jain et al., 2018).

Tabla 8. Costo del de los residuos orgánicos por aspecto. (Jain et al., 2018).

Aspecto	Costo (dólares)
Económico	1 trillón
Ambiental	700 billones
Social	900 billones

Por lo tanto, es importante convertir este valioso recurso en una enmienda del suelo y fertilizante a través de prácticas de recolección, transporte, tratamiento y manejo eficientes. La descomposición anaeróbica de estos materiales en un vertedero conduce a la generación de metano, que a su vez se puede liberar a la atmósfera si no hay controles en su lugar. La descomposición de los residuos orgánicos también aumenta la producción de lixiviados y olores pútridos. Además de disminuir las molestias en los vertederos, varios otros beneficios ambientales y sociales están asociados con el desvío de vertederos (Environment Canada, 2013).

El agua superficial se contamina por la basura que tiramos en ríos y cañerías. En los lugares donde se concentra basura se filtran líquidos, conocidos como lixiviados, que contaminan el agua del subsuelo de la que, en nuestra ciudad, todos dependemos. Cabe aclarar que en los rellenos sanitarios los lixiviados no contaminan el agua ni el suelo porque están controlados y debidamente tratados. La descarga de la basura en arroyos y canales o su abandono en las vías públicas también trae consigo la disminución de los cauces y la obstrucción, tanto de estos como de las redes de alcantarillado. En los periodos de lluvias, provoca inundaciones que pueden ocasionar la pérdida de cultivos, de bienes materiales y, lo que es más grave aún, de vidas humanas. Así también, la presencia de aceites, grasas, metales pesados y ácidos, entre otros residuos contaminantes, altera las propiedades físicas, químicas y de fertilidad de

los suelos. Los residuos orgánicos deterioran la calidad del aire que respiramos, tanto localmente como en los alrededores, a causa de las quemas y los humos, que reducen la visibilidad, y del polvo que levanta el viento en los periodos secos, ya que puede transportar a otros lugares microorganismos nocivos que producen infecciones respiratorias e irritaciones nasales y de los ojos, además de las molestias que dan los olores pestilentes.

La mala gestión de los residuos tiene efectos perjudiciales para la salud pública (por la contaminación ambiental y por la posible transmisión de enfermedades infecciosas vehiculizadas por los roedores que los habitan) y degradación del medio ambiente en general, además de impactos paisajísticos. Asimismo, la degradación ambiental conlleva costos sociales y económicos, tales como la devaluación de propiedades, pérdida de la calidad ambiental y sus efectos en el turismo (Grupo de Investigación de Economía Ecológica, 2016).

2.3.5 Valorización de residuos

La valorización de residuos es el proceso de conversión de residuos en materiales o productos más útiles, incluyendo productos químicos otros materiales y combustibles. Este concepto existe hace bastante tiempo, pero ha regresado a nuestra sociedad con alto interés debido al rápido agotamiento de los recursos naturales, aumento de residuos y vertederos en todo el mundo y la necesidad de mayor sostenibilidad y rentabilidad en la gestión de residuos (Ameil et al., 2013).

Según la Comisión Europea (2011), algunos de los procesos de valorización de residuos orgánicos son el compostaje, digestión anaerobia, combinación de digestión anaerobia y compostaje del digestato, digestión aerobia y desnitrificación.

Se han desarrollado tecnologías de tratamiento biológico para capturar todo el potencial de los residuos orgánicos desviados de los vertederos. Las tecnologías de compostaje y digestión anaeróbica se adaptaron a las características específicas de la fracción orgánica de la corriente de residuos sólidos municipales (Environment Canada, 2013).

Para este trabajo final de graduación, el compostaje es una de las opciones de valorización previamente exploradas por la Municipalidad. El compostaje constituye un proceso clave en

la jerarquía de residuos y tiene un papel importante en la reducción del volumen de residuos sólidos municipales biodegradables destinados a vertedero. El compostaje es un proceso biológico que convierte desechos orgánicos heterogéneos en sustancias similares a humus por parte de poblaciones microbianas mixtas bajo condiciones óptimas controladas de humedad, temperatura y aeración. Mediante el compostaje de los residuos orgánicos se descomponen y estabilizan en un producto que se puede usar como acondicionador y abono para el suelo. A continuación, características de los dos tipos fundamentales de compostaje (Atalia, Buha, Bhavsar, y Shah, 2015):

- **Aerobio:** La descomposición de los desechos orgánicos en presencia de oxígeno, los productos de este proceso incluyen CO_2 , NH_3 , agua y calor. Esto puede ser usado para tratar cualquier tipo de desperdicio orgánico, pero efectivo. Se requiere la mezcla correcta de ingredientes y condiciones. Estos incluyen contenidos de humedad de alrededor 40-60% y relaciones de carbono a nitrógeno (C / N) de 25-30:1. Cualquier variación significativa inhibe la degradación. En general, la madera y el papel proporcionan una fuente importante de carbono, mientras que los lodos de depuradora y el desperdicio de alimentos proporcionan el nitrógeno. Para garantizar un suministro adecuado de oxígeno en todo momento, la ventilación de los residuos ya sea forzada o pasiva es esencial.
- **Anaerobia:** El compostaje es la descomposición de los desechos orgánicos en ausencia de oxígeno, siendo los productos metano (CH_4), CO_2 , NH_3 y trazas de otros gases y ácidos orgánicos. El compostaje anaerobio se utiliza tradicionalmente para compostar estiércol animal y lodos de aguas residuales humanas, pero recientemente se ha vuelto más común que algunos residuos sólidos municipales (RSU) y residuos verdes se traten de esta manera.

Sin embargo, cabe destacar que existen otros medios para valorizar los residuos orgánicos. Entre ellos, la biodigestión anaerobia que es un proceso biológico de degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno, que ocurre naturalmente en pantanos (gas de pantano), descongelamiento del permafrost, rellenos sanitarios y ciertos sitios en el fondo del mar (hidratos de metano). Produce materia prima degradada y biogás formado principalmente por metano (CH_4 – gas combustible), dióxido de carbono (CO_2 – gas inerte), y trazas de gas

sulfhídrico (H_2S), oxígeno (O_2), hidrógeno (H_2), vapor de agua (H_2O), aire y compuestos orgánicos volátiles (COV). Dependiendo del sustrato sobre el que se alimenta una planta de biogás, el contenido de metano fluctúa de un 40% al 65%; para que el biogás pueda tener aplicaciones como combustible para generación eléctrica, debe contener más de un 45% de metano. Su poder calorífico varía entre 15 y 18 MJ/m³, según la presencia del metano en el biogás. (Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador, 2020)

Según el Ministerio de Ambiente de Ecuador y otras instancias de América Latina, se recomienda que para una cantidad de 30-50 toneladas de residuos diarios, es posible una planta de baja inversión con una sección de compostaje tradicional o tecnificado. Para una cantidad entre 50 y 150 toneladas diarias, se recomienda biodigestión para la generación de energía eléctrica y térmica para autoconsumo con una sección de compostaje tecnificado para los lodos biodigestados. Por otro lado, una gran inversión, para más de 150 toneladas diarias, entre 3 y 15 hectáreas con biodigestión para la generación de energía eléctrica y venta de excedentes, así como compostaje tecnificado.

Por otro lado, los cálculos por ingresos de la valorización de puedan calcular como se muestra en la Tabla siguiente.

Tabla 9. Cálculo de los beneficios económicos para la valorización.

Productos	Ingresos económicos
Energía eléctrica	kWh/mes * tarifa (colón/ kWh)
Compost	kg compost x precio de venta (colón/kg)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología del trabajo final de graduación, a partir de la propuesta de diseño para resolver la problemática planteada.

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es mixta, pues incluye diferentes análisis cuantitativos y cualitativos. El enfoque cuantitativo brinda la posibilidad de generalizar los resultados más ampliamente y facilita la comparación, por otro lado, el enfoque cualitativo proporciona profundidad a los datos, dispersión y riqueza interpretativa (Hernández et al., 2010); asimismo, la metodología cuenta con una mezcla de investigación correlacional y descriptiva. La investigación descriptiva tiene como objetivo la medición o recolección de información de manera independiente y conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, por lo que busca especificar características de cualquier fenómeno que se analice. La investigación correlacional, por otra parte, asocia las variables mediante un patrón, cuantifican y analizan la vinculación (Hernández et al., 2010).

3.2 Definición de los elementos de estudio

Los elementos de estudio del trabajo se dividen principalmente en:

1. Evaluación del proceso de recolección de residuos actual de la Municipalidad que incluirá los elementos que se utilizan para llevar a cabo la recolección, así como un análisis del sector y el análisis por medio de una jerarquización que permita la limitación del alcance.
2. Diseño del proceso logístico se basará en las variables previamente definidas con el objetivo de lograr una propuesta de proceso que contemple la interacción y restricciones de estas, se llevará a cabo, con la ayuda de un sistema de ubicación geográfica y software adecuado.

3. La validación del proceso propuesto será mediante el seguimiento de la ruta propuesta. Así también, se utilizarán indicadores ambientales y económicos para confirmar la mejora del proceso propuesto.

3.3 Diseño instrumental

La investigación busca diseñar un proceso logístico de recolección de residuos orgánicos de modo que se propicie la posterior valorización de estos, generando un beneficio ambiental, y a la vez, económico y social.

Tabla 10. Metodología para el diseño instrumental.

Elemento de estudio	Análisis de información	Herramientas
Evaluación del proceso de recolección	<p>Búsqueda de información del proceso actual de recolección.</p> <p>Análisis de los datos proporcionados por la municipalidad respecto a la gestión actual.</p> <p>Análisis del sistema actual de recogida.</p> <p>Definición del área específica dentro del sector de estudio.</p> <p>Identificación de las variables logísticas de la red actual y las requeridas para el diseño del proceso.</p>	<p>Mapeo y análisis de procesos</p> <p>Indicadores actuales ambientales y económicos.</p> <p>Proceso analítico jerárquico (AHP)</p> <p>Descripción de rutas actuales</p>
Diseño del proceso logístico	<p>Definición del tipo de recolección.</p> <p>Análisis de lo obtenido con el proceso analítico jerárquico.</p> <p>Diseño del proceso logístico de recolección de residuos orgánicos.</p>	<p>Sistema de información geográfica</p> <p>Diagramación de procesos</p> <p>Modelos de ubicación de planta</p> <p>Análisis y planificación de rutas.</p> <p>Optimoroute</p>
La validación del proceso logístico	<p>Análisis de los resultados obtenidos por medio de una prueba piloto de la logística de la ruta obtenida y confirmación mediante los indicadores ambientales y económicos.</p>	<p>Piloto de la ruta obtenida.</p> <p>Cálculo de mejora en huella de carbono aproximado.</p>

3.4 Metodología de análisis de la información recolectada

El análisis de la información recopilada en la investigación se lleva a cabo mediante las herramientas descritas en la tabla anterior.

En este diseño se incorporan los conceptos de economía circular y ruteo de transporte en logística inversa para lograr obtener la ubicación y logística del flujo de los desechos con el fin de disminuir la cantidad que en la actualidad tiene como destino final el relleno sanitario.

La investigación al ser de tipo mixta (cuantitativa y cualitativa) tienen diversas técnicas de recolección de datos, entre los que se puede mencionar: investigaciones, encuestas, visitas de campo. La información cualitativa y cuantitativa se documenta en el capítulo 4 de este trabajo de investigación, por medio del diagnóstico de la situación actual y los resultados. A partir del capítulo 5 se analiza los datos por medio de la discusión.

3.5 Metodología de validación

La validación del diseño propuesto se realiza por medio de una prueba piloto de la ruta propuesta para ver la factibilidad del proceso creado, para comprobar que la ruta propuesta es posible. Además, se confirma con la comparación de los indicadores económicos y ambientales (huella de carbono) del proceso actual y el propuesto, así como el aval de la Municipalidad.

La validación del proceso pretende afirmar que la generación de una ruta de recolección única para residuos orgánicos es necesaria, factible y beneficiosa para la comunidad y la Municipalidad.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Diagnóstico

4.1.1 Gestión del proceso actual

Descripción del cantón

El cantón de Goicoechea es el cantón número ocho de la provincia de San José, se ubica bajo las coordenadas geográficas dadas por 09°57'31" latitud norte y 83° 59'26" longitud oeste. La anchura máxima es de veinte kilómetros, en dirección noreste a suroeste desde la naciente del río Durazno hasta el puente sobre el río Torres, carretera Nacional No.5, que va de ciudad de San José a la de San Juan de Tibás. (Municipalidad de Goicoechea, 2019)

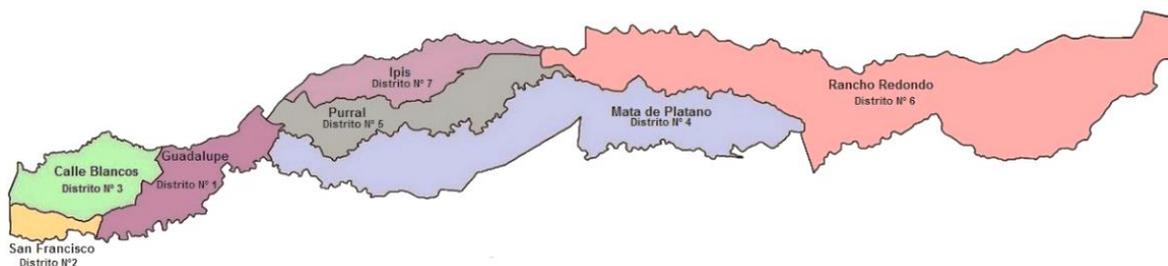


Figura 16. Cantón de Goicoechea.

Fuente: Municipalidad de Goicoechea (2019).

A continuación, se detalla información de cada uno de los distritos del cantón (Municipalidad de Goicoechea, 2019):

- Distrito 1ro Guadalupe: Considerado el corazón del cantón donde se concentra la mayor actividad, siendo el de mayor influencia a nivel comercial por su cercanía con la ciudad capital. Abarca una extensión de 2,48 km², con una población de 23 909 habitantes.

Se observa en la parte oeste del distrito una concentración de servicios y comercio. En el sector este del distrito se pueden observar una caracterización de servicios públicos y privados como clínicas, servicios médicos, legales, de arquitectura, centros comerciales e industriales. Entre sus barrios se encuentran Los Árboles, Colonia del Río, El Alto (parte), Fátima, Independencia, Jardín, Magnolia, Maravilla, Margarita, Minerva, Moreno Cañas, Orquídea, Pilar Jiménez, Rothe, San Gerardo, Santa Cecilia, Santa Eduvigis, Santo Cristo, Unión y Yurusti.

- Distrito 2do San Francisco: Es en su mayoría residencial, aunque ha desarrollado el aspecto turístico, comercial y bancario muy importante. Posee una extensión de 0,50 km² y 2 612 habitantes. Entre sus barrios se encuentran el Carlos María Ulloa, San Francisco (centro) y Tournon.
- Distrito 3ro Calle Blancos: En este se concentra la mayor parte de la actividad industrial del cantón, principalmente en la parte oeste en los barrios San Gabriel, La Concreteira, Progreso y Calle Blancos, por otra parte, los servicios y comercio privado se concentran en las zonas residenciales y en las principales vías del distrito. Abarca una extensión de 2,39 km² con una población de 19 581 habitantes. Algunos barrios que posee son Calle Blancos (centro), Ciprés, Encanto, Esquivel, Montelimar, Pinos, San Antonio, San Gabriel, Santo Tomás y Volio.
- Distrito 4to Mata de Plátano: Mantiene una fuerte producción agrícola, como es el caso del café, aunque se está desarrollando una gran actividad urbanística. Gracias a esto se puede observar el desarrollo de servicios privados y locales comerciales típicos de zonas residenciales, concentrándose en la parte oeste del distrito, que es donde se da una mayor concentración de urbanizaciones, por otro lado, en la parte este, aún dominan las actividades agropecuarias. Tiene una extensión territorial de 7,85 km², con una población aproximada de 16 410 habitantes. Sus principales barrios son Bruncas, Carmen, Claraval, Cruz, Cuesta Grande, (parte), Estéfana (parte), Hortensias, Jaboncillal, Jardines de la Paz, Lourdes, Praderas, Tepeyac, Térraba, Villalta, Villaverde y Vista del Valle.
- Distrito 5to Ipís: Debido a su alta concentración poblacional se ha convertido en el centro de la actividad urbana del cantón, concentrándose la dotación de servicios

privados y locales comerciales en la vía principal que viene de Guadalupe centro, se observa alguna actividad comercial, artesanal e industrial. Tiene una población de 26 186 habitantes en 2,77 km². Entre sus barrios se encuentran Los Ángeles, El Alto (parte), Floresta, Korobó, La Mora, Morita, Mozotal, Nazareno, Las Orquídeas, Rodrigo Facio, Santa Clara, Zetillal y Vista del Mar.

- Distrito 6to Rancho Redondo: En su mayoría considerado de tipo rural, en este distrito se observa como actividad más frecuente la ganadería de producción de leche; aunque cuenta con servicios públicos básicos. Es el menos poblado del cantón, con una población de 2 723 habitantes en el distrito más grande del cantón con 12,52 km². Posee el barrio conocido como El Mirador y los poblados de Corralillo, Guayabillos, Isla, San Miguel y Vista de Mar.
- Distrito 7mo Purrul: Es el distrito más joven del cantón. La dotación de servicios y comercios básicos se concentra en la vía de acceso principal que viene de Guadalupe, en este distrito hay concentración masiva de asentamientos humanos de tipo espontáneo. Posee una población de 26 859 habitantes en 9,99 km². Entre sus barrios se encuentran Ana Frank, Castores, Cuadros, Don Carlos, El Alto (parte), Flor de Liz, Kurú, Lomas de Tepeyac, Lupita, Montesol, Nogales, Pueblo, Purrul Abajo, Purrul Arriba y Violetas.

Recolección de residuos actuales

La recolección de los residuos ordinarios municipales se lleva a cabo por medio de 24 rutas de recolección las cuales se detallan seguidamente.

La ubicación final de los residuos es el relleno de El Huaso (EBI el Huaso PTA Aserrí) el cual, queda ubicado en Aserrí.

Tabla 11. Rutas de recolección de la Municipalidad de Goicoechea.

Ruta	Días de la semana	Barrios
1.1	Lunes y jueves	Bajo Los Acuñaas, Recta de Moravia hasta el puente, San Gerardo, Santa Cecilia, por El Guadalupano, Barrio Campos.
1.2	Martes y viernes	Barrio Pilar, Bomberos, San Antonio, Gallito, Moreno Cañas, Independencia
1.3	Miércoles y sábado	Monte Lima, resto Pilar Jiménez, Esquivel Bonilla
2.1	Lunes y jueves	Urbanización el Encanto I, II, III y Periferia
2.2	Martes y viernes	Del parque de Guadalupe hasta el puente de San Francisco incluyendo, por Canal 4, Colonia del Río, Barrio la Margarita, Barrio Miraflores, Las Magnolias, recta Cementerio de Guadalupe.
2.3	Miércoles y sábado	Vilas Turnón, ULACIT, Frente a La República, alrededores Centro Comercial El Pueblo, RECOPE, LAICA, alrededores Simón Bolívar hasta el puente de San Francisco, Lotes Volio
3.1	Lunes y jueves	De la entrada de Purral hacia el este hasta el Palí de Ipís, Bajo Moravia, El Roblar, Urb Saint Claire
3.2	Martes y viernes	Las Orquídeas, Fábrica Kobert hasta el depósito Diarmo, Claraval, Bruncas, La Pradera, La Toyota
3.3	Miércoles y sábado	Calle principal Mozotal hasta Monte Sol. Calle Ana Frank hacia Purral, Urbanización Las Lomas, entrada principal a Purral, Plantel de buses de Guadalupe, Calle Morales.
4.1	Lunes y jueves	Bella Vista, La Chanita, entrada Calle Gutiérrez hasta el puente, Urbanización Flor de Luz, El Balbanero, Urbanización Don Carlos, Urbanización Marianas

Tabla 11. (continuación) Rutas de recolección de la Municipalidad de Goicoechea.

Ruta	Días de la semana	Barrios
4.2	Martes y viernes	El Progreso, Urbanización El Pueblo, Caserío las 85, Urbanización Loremar, Urbanización Los Cuadros incluyendo caserío 1, 2, 3, Urbanización El Oasis, Urbanización Lupita
4.3	Miércoles y sábado	Alrededores Colegio Técnico de Calle Blancos, alrededores de la Coca Cola, Calle Blancos por la Plaza, Santo Tomás, La Vuelta del Aguacate, Calle del Guadalupano, Condominios 1, 2 y 3.
5.1	Lunes y jueves	Dos kilómetros hacia el este de Vistas del Valle hasta tanques del AYA en Jaboncillal y de Vistas del Valle hasta El Palí.
5.2	Martes y viernes	De la entrada de Sabanilla hacia el puente de Mata de Plátano incluyendo, Residencial Yaranaba, Azul del Prado, Tejares y Hortensias.
5.3	Miércoles y sábado	Iglesia de Guadalupe hacia el sur, al este hasta la salida con Moravia, Calle Paso Hondo hasta el puente, Barrio Corazón de Jesús, Barrio Cristal.
6.1	Lunes y jueves	Korobó, Urbanización La Lucha, Urbanización La Mora, El Progreso, La Facio.
6.2	Martes y viernes	Urbanización Zetillal, Urbanización Nazareno, Urbanización Morita, La Floresta 1 y 2.
6.3	Miércoles y sábado	Fabricas del Este, Urbanización La Trinidad de Mozotal, Urbanización Carla María, Urbanización Monte Sol, Vista de Mar, El Edén, Urbanización Bruno Martínez, alrededores del Colegio Salvador Umaña, alrededores del Palí Ipís.
7.1	Lunes y jueves	Recta del cruce de Moravia hacia el este, Urbanización La Robert, detrás del Colegio Madre del Divino Pastor, Urbanización Odily, Urbanización Los Rodríguez.

Tabla 11. (continuación) Rutas de recolección de la Municipalidad de Goicoechea.

Ruta	Días de la semana	Barrios
7.2	Martes y viernes	Barrio Minerva, Urbanización Kurú, Urbanización Los Olimpos.
7.3	Miércoles y sábado	Lotes Volio abajo, San Gabriel, Límite con Cinco Esquinas de Tibás, La recta de la Coca Cola hasta el puente de Tibás con sus respectivas entradas, detrás de la Mercedes Benz (La Conejera)
8.1	Lunes	El Rocío, La Lucha, Calle Gutiérrez, Flor de Luz, Balbanero, Marianas, Don Carlos, de la recta de Purrall arriba a Flor de Luz, Los Nogales.
8.2	Martes	Salitrillos, Niza, recta hasta Escuela El Carmen, Tepeyac 1 (calles largas), La Lupita, recta de la Nena, El Pueblo.
8.3	Miércoles	La Coca Cola, Escuela Doc Ferras, Lotes Volio, Bodegas Banco Nacional, Calox.
8.4	Jueves	Rancho Redondo desde entrada a la Socola hasta Vista de Marc (Hospicio de Huérfanos), Isla de Vista de Mar, La Lupita, Don Carlos, recta de Don Carlos hasta Calle Gutiérrez
8.5	Viernes	El Pueblo, El Progreso, vuelta a La Mora, recta de La Mora hasta Iglesia Techo Verde, recta de El Pueblo hasta Funn, Oasis, El Matadero
8.6	Sábado	El Carmen, Salitrillos y Tepeyak

La recolección se realiza con 8 camiones propios de la Municipalidad con una cantidad anual aproximada mayor a las 35 000 toneladas de basura. El costo por tonelada es aproximadamente 11 000 colones. Esto representa un costo aproximado de 396 millones de colones anuales sin tomar en cuenta los costos de mantenimiento o transporte.

La cantidad de recolección diaria de cada una de las rutas se describe a continuación, ese análisis se realiza por medio de un promedio de los últimos tres meses. Las cantidades diarias

por ruta se encuentran muy bien balanceadas por cantidad, el análisis es por ruta y como se explicó anteriormente no es perteneciente a un solo distrito, ya que las rutas cruzan dos o más, sin embargo, se coloca en la tabla el distrito donde se ubican la mayoría de los barrios con el fin de tener una noción específica del camino que recorren.

Tabla 12. Rutas de recolección de la Municipalidad de Goicoechea por camión.

Camión	Rutas	Distrito	Promedio kg por día de recolección
6864	1.1	Guadalupe	13400
	1.2	Guadalupe	13800
	1.3	Guadalupe	10300
6528	2.1	Calle Blancos	13400
	2.2	Guadalupe	10500
	2.3	San Francisco	11300
4635	3.1	Ipís	11100
	3.2	Mata de Plátano	11700
	3.3	Purral	10800
6133	4.1	Purral	13600
	4.2	Purral	14600
	4.3	Calle Blancos	12100
4807	5.1	Rancho Redondo	11500
	5.2	Mata de Plátano	11100
	5.3	Guadalupe	10500
6132	6.1	Ipís	13900
	6.2	Ipís	12600
	6.3	Ipís	10900
4810	7.1	Ipís	9800
	7.2	Purral	11900
	7.3	Calle Blancos	11100
3857	8.1	Purral	11900
	8.2	Mata de Plátano	11700
	8.3	Calle Blancos	9200
	8.4	Rancho Redondo	9200
	8.5	Purral	9000
	8.6	Mata de Plátano	9200

Por otro lado, se realiza el cálculo de la huella de carbono del proceso actual considerando el transporte de los residuos y los desechos en el relleno sanitario.

La Municipalidad de Goicoechea recolecta un aproximado de 35 000 ton de residuos sólidos al año. La huella de carbono la cantidad total de residuos anuales se calcula como sigue:

$$35\,000 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{58,1 \text{ g CH}_4}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 2\,033\,500\,000 \text{ g CH}_4$$

$$2\,033\,500\,000 \text{ g CH}_4 \times \frac{1 \text{ ton CH}_4}{1\,000\,000 \text{ g CH}_4} \times \frac{21 \text{ CO}_2 \text{ ton eq}}{1 \text{ ton CH}_4} = 42\,703,50 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Además, según el IMN el 44% son residuos orgánicos:

$$35\,000 \text{ ton de residuos sólidos} \times \frac{44\% \text{ residuos orgánicos}}{\text{residuos sólidos}}$$

$$= 15400 \text{ ton de residuos orgánicos}$$

Para esta cantidad de residuos se calcula la cantidad de CH₄ producido debido al desecho en el relleno sanitario:

$$15\,400 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{58,1 \text{ g CH}_4}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 894\,790\,000 \text{ g CH}_4$$

Y con el dato anterior se calcula el equivalente a toneladas de dióxido de carbono.

$$894\,790\,000 \text{ g CH}_4 \times \frac{1 \text{ ton CH}_4}{1\,000\,000 \text{ g CH}_4} \times \frac{21 \text{ CO}_2 \text{ ton eq}}{1 \text{ ton CH}_4} = 18\,789,54 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Para el transporte, se utilizan los datos 2019 donde el promedio de consumo de combustible en litros para todas las rutas de recolección:

$$63\,000 \text{ L de combustible diesel} \times \frac{2.613 \text{ kg CO}_2}{\text{L combustible diesel}} = 164\,619 \text{ kg CO}_2$$

$$164\,619\text{ kg } CO_2 \times \frac{1\text{ ton } CO_2}{1000\text{ kg } CO_2} = 164,62\text{ ton } CO_2\text{ eq}$$

Para tener más claro la magnitud de lo que corresponde la huella de carbono, se dice que 1000 km de bosque absorben una tonelada de CO₂ equivalente. En la siguiente tabla se muestra la huella de los residuos orgánicos recolectados actualmente en el cantón.

Tabla 13. Resumen de huella de carbono provocada por los residuos orgánicos y el transporte de las rutas de recolección actual.

Huella de carbono	Toneladas de CO ₂ equivalente (ton CO ₂ eq)
Residuos orgánicos	18 789,54
Rutas de recolección	164,62
<i>Total</i>	<i>18 954,16</i>

La implicación económica anual de estos residuos en el relleno sanitario se calcula a continuación, este valor se debe al costo pagado por disponer cada tonelada de basura en este.

$$15\,400\text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{11\,000\text{ colones}}{\text{ton residuos sólidos orgánicos}} \\ = 169\,000\,000\text{ colones}$$

Es decir, si se valoriza o se recupera el 90-100% de los residuos orgánicos del cantón de Goicoechea se podría ahorrar más de cien millones de colones, lo que comprueba que la promoción de proyectos de reducción, recuperación y valorización son importantes no sólo por el impacto ambiental, sino también por el beneficio económico. Así también, la valorización permite no sólo ahorro de dinero, sino la posibilidad de generar ingresos y empleo.

4.1.3 Ruta actual de residuos en su mayoría orgánicos de la Feria del Agricultor

La ruta actual perteneciente a la recolección de residuos orgánicos de la Feria del Agricultor se realiza todos los sábados en la siguiente ubicación: latitud 9.94782 longitud: -84.05529.

Los desechos se transportan al Plantel Municipal posteriormente, estos se trasladan al relleno sanitario, véase Figura 17. Estos residuos contienen en su mayoría material orgánico. El transporte de estos residuos se realiza el lunes, lo que implica que los desechos quedan almacenados en los camiones 2 días hasta su traslado al relleno sanitario.

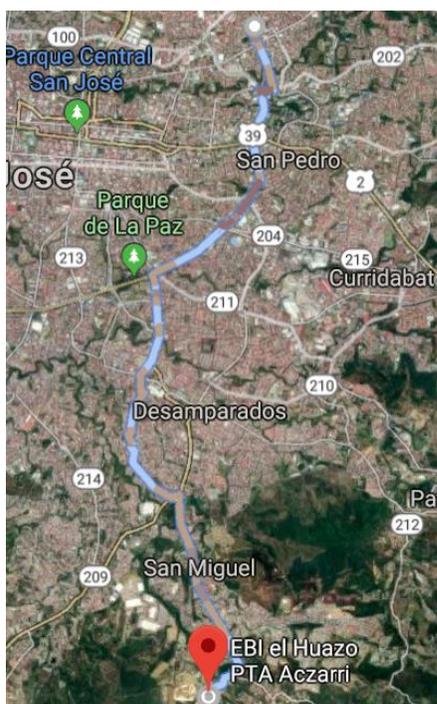


Figura 17. Ruta actual desde el Plantel Municipal al relleno sanitario.

Fuente: Google (2019)

Se compara con la Municipalidad de San José, los cuales, realizan la recolección de material orgánico del mercado y lo llevan a un vivero municipal en el cual, procesan alrededor de dos toneladas por semana para su transformación a abono orgánico. El sistema que utilizan es bastante sencillo, ellos realizaron capacitaciones a los vendedores del mercado para que logren separar en contenedores los residuos orgánicos que son fácilmente procesables.

Lo anterior denota que en la Feria del Agricultor existe un enorme potencial, ya que involucra un punto específico de recolección que puede ser transportado al centro de valorización, así también podría involucrar diferentes sociedades o involucramiento de instituciones que permitan valorizar los residuos previamente seleccionados para tal fin.

4.1.4 Indicadores actuales ambientales

La Municipalidad no tiene indicadores ambientales específicos, ellos conocen que aproximadamente menos de un 1% de los residuos lo recolectan por medio del reciclaje. En este proyecto, se proponen algunos indicadores ambientales útiles para el uso de los gobiernos locales, con el fin de medir la gestión de mejoras en busca de la sostenibilidad.

En la Municipalidad de Goicoechea existe un proyecto para la gestión integral de residuos valorizables que pretende implementar rutas para reciclaje, además, aprovechar espacios verdes para la producción de cultivos y abono orgánico, este proyecto complementa de buena forma los esfuerzos por buscar una forma de gestionar los residuos en el cantón. Además, busca aumentar el porcentaje de material reciclado a un 7%.

4.2 Diseño del proceso

El cantón de Goicoechea es extenso y adicionalmente posee algunos barrios conflictivos. Parte del diseño adecuado del proceso involucra el análisis de la realidad con la que se enfrenta el sector la cual tiene un delimitante importante: la falta de separación de residuos y su control. Si bien es cierto, este proyecto no tiene la intención de cambiar el proceso mediante el cual las personas realizan la separación de los residuos es una premisa que se tomará en cuenta para el análisis de los sectores.

Para llevar a cabo el diseño del proceso, se va a describir este tomando como base, algunos de los pasos del diseño de procesos en ingeniería descrito de forma general en la Figura 18.

Para empezar, se retoma el problema que este proyecto de graduación pretende resolver, la falta de contribución del proceso actual de recolección de residuos urbanos municipales en la posterior valorización de los desechos orgánicos, lo que provoca cargas al medio ambiente y costo elevado. Este problema proviene de la recolección de residuos sólidos ordinarios sin separación, es decir el proceso de recolección no posee rutas propias por residuo.

Dentro de las posibles soluciones está el establecimiento de rutas adicionales para la recolección segregada, para esto se requiere establecer criterios y restricciones. Con la información descrita en el marco teórico referencial y la opinión de expertos en gestión ambiental y acción climática, así como la herramienta de ubicación de planta perteneciente a

Macrologística, se pretende obtener sectores adecuados tanto para la valorización de los residuos como para el lugar apropiado para iniciar con la implementación de un proyecto de separación en la fuente.



Figura 18. Diseño de un proceso en ingeniería.

Fuente: Strimel (2014)

La herramienta de análisis multicriterio de proceso jerárquico (AHP) es utilizada para definir dentro del sector de estudio los distritos o comunidades que pueden priorizarse para el establecimiento de proyectos de gestión ambiental con segregación en la fuente, ya que poseen ciertas características que facilitarían esta implementación. Este análisis, incluye la participación de un juicio de expertos, específicamente gestores ambientales de Municipalidades, expertos en cambio climático, entre otros (véase Anexo I).

Antes de realizar la consulta a los expertos se crea una herramienta que permita evaluar factores entre sí, los mismos fueron determinados por medio de la teoría contextual y referencial descrita en capítulos anteriores. Para llevar a cabo rutas de recolección específicas para residuos valorizables se tomarán en cuenta, no sólo factores socioeconómicos y de control conductual percibido (presencia de programas de reciclaje en el lugar), sino también, el tamaño de población que se relaciona con la cantidad de residuos disponibles para

recolectar y por último, el tamaño de la comunidad que correspondería a la distancia que se debe recorrer dentro del distrito. Para esto se utilizó la literatura descrita en donde varios autores evidencian la existencia de factores o variables que determinan la intención de un individuo de llevar a cabo la separación de los residuos y, adicionalmente, los factores importantes para establecer una ruta de recolección.

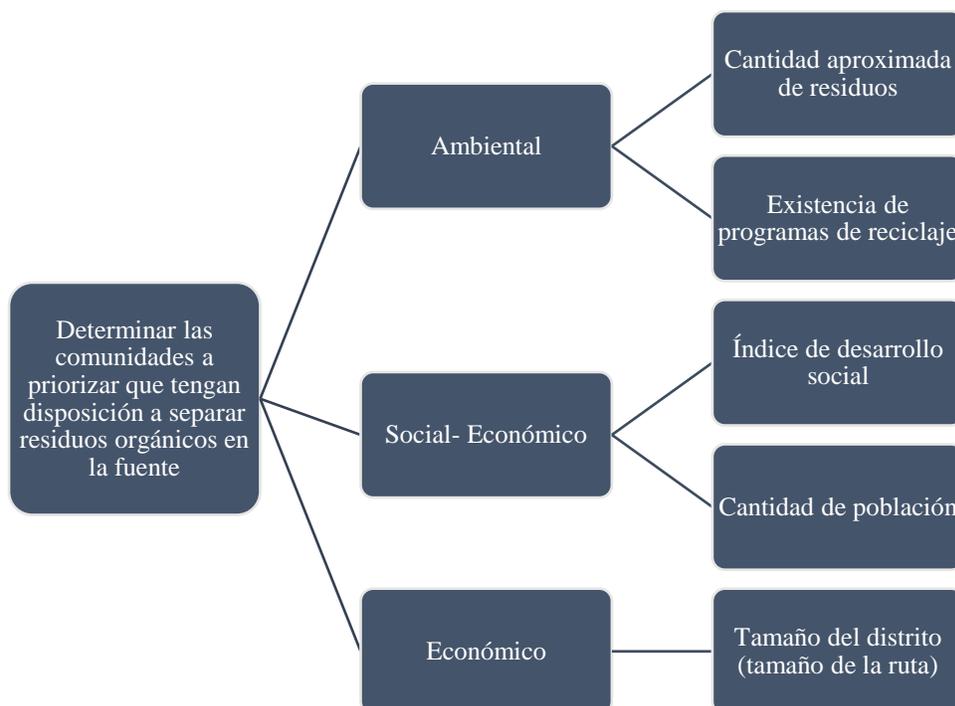


Figura 19. Análisis de los factores mayormente contribuyentes con la disposición de las comunidades a separar los residuos en la fuente.

Fuente: propia (2020).

- Cantidad de rutas de reciclaje o valorización de residuos actuales que se relacionaría con la percepción que tiene la comunidad ante la existencia de los programas lo que implicaría la facilidad para llevar a cabo la separación de residuos sin que implique actividades adicionales.
- Nivel socioeconómico: se medirá con ayuda del análisis de índice de desarrollo social. Esta es la única herramienta que existe a nivel nacional que realiza una medición del desarrollo social desde la dimensión distrital, con el fin de acercarse lo mejor posible a la realidad social que enfrenta el país.

- Cantidad de población: la cantidad de población que se relaciona proporcionalmente a la cantidad de residuos producidos, tomando en cuenta que la caracterización de los residuos depende del área de estudio y no forma parte de este trabajo final de graduación.
- Tamaño del distrito: información recopilada de la Municipalidad de Goicoechea.

La participación del juicio de expertos se dio por medio de una encuesta, estos por medio del AHP determinaron la importancia de cada uno de los factores y adicionalmente mencionaron otros que consideran importantes, lo que permite tener un resultado valioso, los cuales se discutirán en el próximo capítulo.

Se puede comprobar el potencial que tienen las ferias del agricultor dentro de los distrito,s ya que se podría cuantificar con mayor facilidad cada una de las variables anteriores.

Si el país quiere avanzar en el tema de gestión de residuos no basta con hacer uso de los desechos de la Feria del Agricultor, es necesario un paso importante y por ello este trabajo realiza dos propuestas de procesos logísticos. Uno para la Feria del Agricultor y otro para el sector del cantón que presente las mejores características que facilite la recolección de sólo residuos orgánicos; para este último, se realizó un análisis AHP.

Los factores de la Figura 19 fueron cuantificados en la siguiente Tabla para la Municipalidad en cuestión.

Tabla 14. Factores contribuyentes para el desarrollo de una ruta selectiva de residuos orgánicos. (Municipalidad de Goicoechea, 2019)

Distritos	Índice de desarrollo social	Cantidad de población (habitantes)	Cantidad de programas o rutas de reciclaje	Tamaño del distrito (km ²)
Purral	67,51	33186	1	9,99
Racho Redondo	71,10	3008	0	12,52
Guadalupe	79,68	22558	3	2,48
San Francisco	77,54	2324	0	0,5
Calle Blancos	78,35	22293	1	2,39
Mata de Plátano	79,32	20057	5	7,85
Ipis	72,52	30131	2	2,77

En la entrevista se constata que las opiniones son muy diferentes, y por ello fue necesario hacer uso de una media geométrica para obtener un resultado adecuado, la información completa de las matrices del AHP se puede observar en el Anexo 1.

El factor con mayor importancia es la cantidad de población con un 37,6 %, este se relaciona con la cantidad de residuos producidos per cápita, seguidamente la presencia de programas de reciclaje con un 24,2%, criterio muy importante dada la percepción de facilidad de llevar a cabo la tarea de separación en la fuente.

Tabla 15. Resultado de la importancia de cada uno de los factores según el criterio de expertos.

Crterios	Vector propio del criterio
Cantidad de población	37,6%
Índice de desarrollo social	19,8%
Presencia de programas de reciclaje	24,2%
Tamaño del distrito	18,4%

El resultado de combinación de las matrices del AHP se observa en el siguiente gráfico:

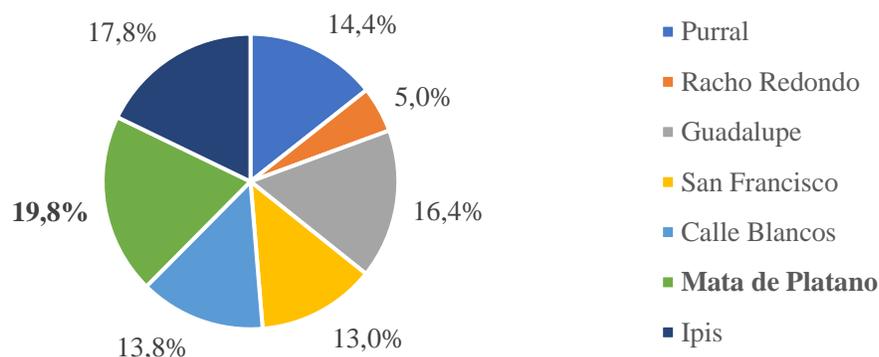


Figura 20. Resultados de la importancia de los distritos.

Fuente: propia (2020).

Basados en las restricciones y definición de criterios del AHP, el lugar propuesto y más adecuado para iniciar con un prototipo de recolección segregada de residuos orgánicos es Mata de Plátano. Lo anterior, se corrobora con la información suministrada por la

municipalidad pues, este distrito mostraba ser un buen sector para comenzar la sensibilización en el tema de la gestión de residuos.

En resumen, hasta el momento se poseen dos ubicaciones en las cuales, se recomienda iniciar con la recolección selectiva de residuos orgánicos:

1. Feria del Agricultor
2. Distrito de Mata de Plátano

Proceso genérico para otras instituciones

Para realizar el mismo proceso anterior y así encontrar el distrito o sector más adecuado para iniciar un proceso de recolección segregado, se pueden utilizar los porcentajes de los resultados del criterio de expertos y calcular el producto matriz utilizando los datos de los sectores.

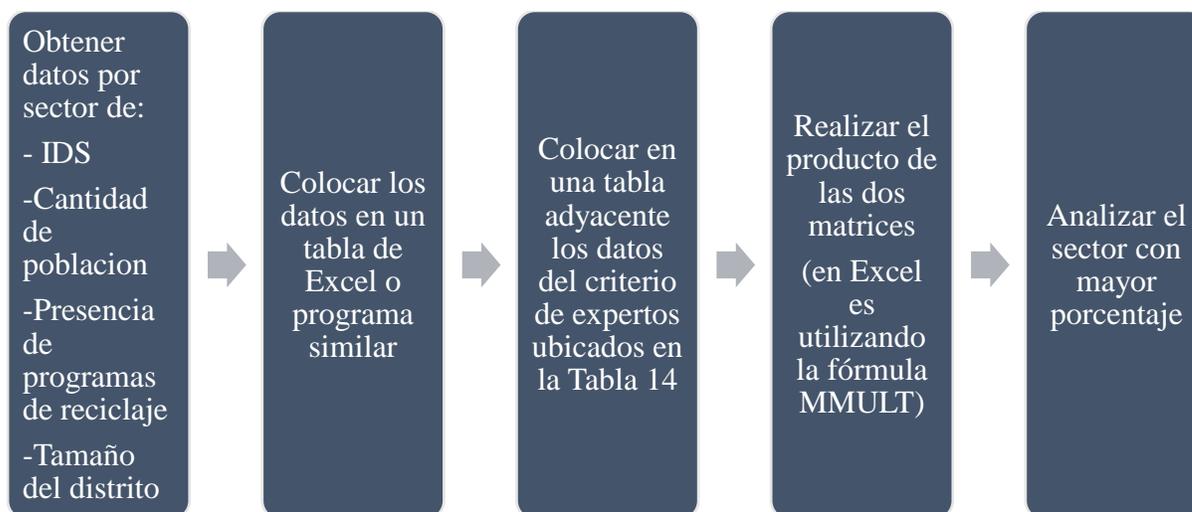


Figura 21. Proceso genérico para otras instituciones

Fuente: propia (2020).

Ahora bien, ¿qué ubicación final se propone para llevar a cabo la valoración de estos residuos?, esta pregunta tiene la respuesta en las siguientes secciones.

4.2.2 Ubicación ideal de valoración para todo el cantón

Usando tanto la cantidad promedio recolectada en los tres meses como el aproximado de la cantidad de residuos producidos por persona por día en Costa Rica y un análisis por distrito con la herramienta de Macrologística, se obtiene el espacio donde podría ser ubicado un centro de valorización, esto si todo el cantón hiciera la segregación de residuos.

Este tipo de análisis puede ser replicado por otras municipales donde, se obtendría la mejor ubicación de una planta de valorización dependiendo de la cantidad a recolectar por distritos o por ruta.



Figura 22. Ubicación ideal del centro de valorización si se recogiera todo el volumen del cantón.

Fuente: Propia (2020).

Luego de encontrar la latitud y longitud del sector, se analiza el área resultante en el distrito de Purral, al ser un área con gran densidad poblacional, no hay disponibles terrenos de gran tamaño (mayores a 500 m²) en la cercanía, pero si existen diferentes terrenos de pequeña escala donde se recomienda evaluar la colocación de pequeños viveros para producción de abono en cantidades pequeñas es decir no mayores a una tonelada semanal.

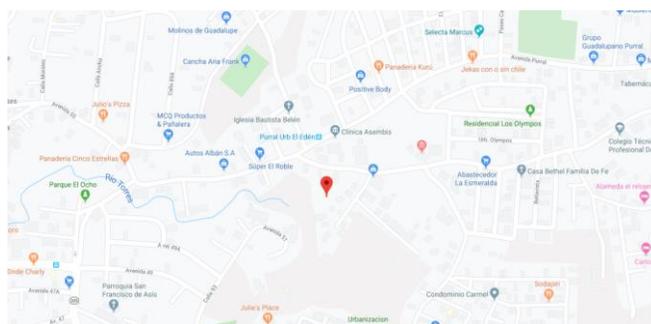


Figura 23. Posible ubicación de un terreno para valorización de los residuos orgánicos de todos los distritos.

Fuente: propia (2020).

4.2.3 Propuesta ubicación final de valoración para el distrito de Mata de Plátano

Utilizando la misma herramienta se encontró la ubicación final de valoración en el distrito de Mata de Plátano. Para este caso se obtuvo un resultado, en una urbanización sector urbano con gran cantidad de casas de habitación, por ello, se recomienda la ubicación cercana a la parte rural de Mata de Plátano, cercana a Rancho Redondo.

Dado el resultado anterior, se propone la búsqueda en un sector rural de este cantón en la cercanía de la siguiente ubicación: -84.016989, 9.955449, esto realizando la búsqueda de terrenos disponibles en el radio de la localización encontrada (Figura 24).

Resultado Final	
Latitud	9.9535091
Longitud	-84.02284

Figura 24. Posible ubicación del centro de valorización si se recogiera sólo el volumen de residuos orgánicos de Mata de Plátano.

Fuente: propia (2020).

4.2.4 Ubicación para la valorización

La ubicación del lugar de valorización no sólo depende de factores logísticos sino también económicos y políticos. La Municipalidad de Goicoechea no posee por el momento ningún terreno para la colocación de una planta de compostaje, sin embargo, consideran que la zona de rural de Rancho Redondo es una opción para el mismo, así también colocamos la ubicación en los alrededores de: -83.95318, 9.962804. Lo anterior, coincide con la recomendación anterior, ya que son distritos aledaños.

Para empezar con un proyecto piloto, se considera la recolección del 50% de los residuos orgánicos del cantón de Mata de Plátano, aproximadamente 750 toneladas al año. En Costa Rica, municipalidades como Jiménez y Alvarado poseen experiencia a nivel nacional de operación de centros de compostaje municipal, ellas utilizan un valor promedio de 13,59 m²/ton-mes dado esto, el terreno debe tener un tamaño aproximado de 800 m² (ver Recomendaciones). (Rudín, Soto, & Linnenberg, 2019)

4.2.4 Rutas propuestas de residuos orgánicos

Uso de la Aplicación: Optimoroute

La ruta de recolección se calculó con el programa en la nube Optimoroute, el mismo utiliza algoritmos matemáticos basados en el problema del agente viajero TSP y VRP, de forma que trata de minimizar la distancia recorrida/tiempo recorrido, visitando todos los nodos de la red una única red, en este caso se utiliza el módulo para la recolección de residuos.

OptimoRoute es un servicio web comercial. Puede resolver el problema con limitaciones adicionales como el tiempo de trabajo del conductor y la capacidad de carga del vehículo. La función objetiva que aborda OptimoRoute implica los siguientes criterios: función objetivo = distancia mínima, capacidad máxima de carga, gestión del tiempo del conductor}, el programa puede resolver el CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem), VRPTW (Vehicle Routing Problem with Time Windows), VRPB (Vehicle Routing Problem with Backhauls) y VRPPD (Vehicle Routing Problem with Pick-up and Delivering) (Bouneffa et al., 2018).

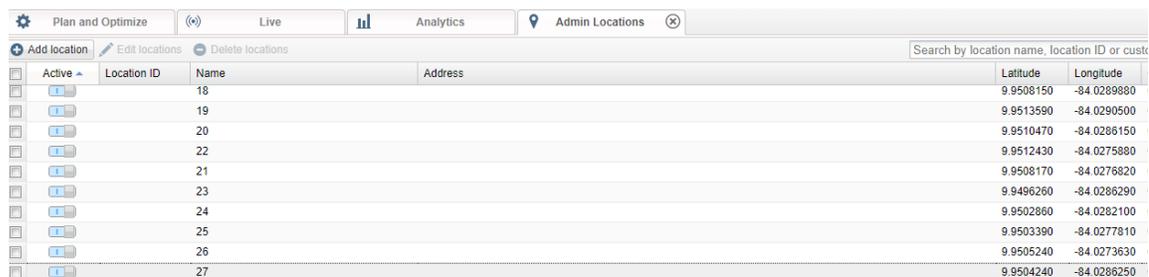


Figura 25. Información de la aplicación Optimoroute

Fuente: Hall y Partzka (2016).

Se crea una cuenta en la aplicación de forma gratuita por 30 días por medio de la cual, se escoge el módulo de recolección de residuos. Posteriormente, se agrega cada una de las ubicaciones del sector de Mata de Plátano, utilizando parte de la Ruta 5.1 y agregando residenciales y otros condominios.

Se coloca la longitud y latitud de los puntos requeridos, agregando un total de 152 puntos.

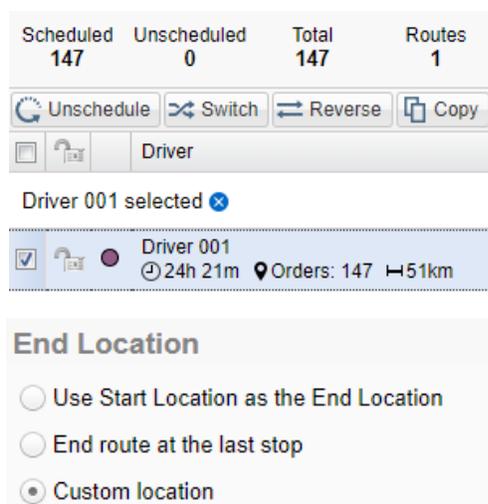


Active	Location ID	Name	Address	Latitude	Longitude
<input type="checkbox"/>	18			9.9508150	-84.0289880
<input type="checkbox"/>	19			9.9513590	-84.0290500
<input type="checkbox"/>	20			9.9510470	-84.0286150
<input type="checkbox"/>	22			9.9512430	-84.0275880
<input type="checkbox"/>	21			9.9508170	-84.0276820
<input type="checkbox"/>	23			9.9496260	-84.0286290
<input type="checkbox"/>	24			9.9502860	-84.0282100
<input type="checkbox"/>	25			9.9503390	-84.0277810
<input type="checkbox"/>	26			9.9505240	-84.0273630
<input type="checkbox"/>	27			9.9504240	-84.0286250

Figura 26. Longitud y latitud en Optimoroute

Fuente: propia (2021).

Seguidamente, se colocaron las características del conductor y se generaron las rutas en la aplicación, seleccionando los puntos y cambiando respectivamente, dependiendo de la ubicación final.



Scheduled 147 Unscheduled 0 Total 147 Routes 1

Unschedule Switch Reverse Copy

Driver

Driver 001 selected

Driver 001
⌚ 24h 21m 📍 Orders: 147 📏 51km

End Location

Use Start Location as the End Location

End route at the last stop

Custom location

Figura 27. Características del conductor en la aplicación Optimoroute

Fuente: propia (2021).

Cabe destacar que la generación de la ruta no se toma en cuenta ventanas de tiempo, volumen ni peso, esto debido a que el camión de recolección tiene un recorrido fijo y no se tiene cuantificada por punto la cantidad de residuos orgánicos desechada.

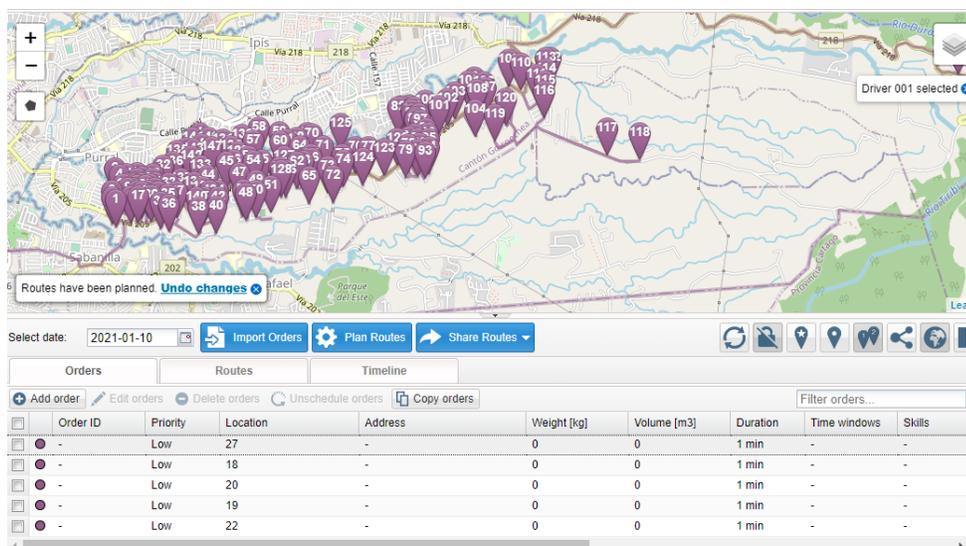


Figura 28. Generación de la ruta en la aplicación Optimoroute

Fuente: propia (2021).

Para las instituciones que no poseen un software adecuado para el cálculo de rutas, es posible utilizar las diferentes ubicaciones inicial y final, y utilizar sistemas gratuitos de GPS o similares también, promover la ayuda de estudiantes universitarios para optimizar los recorridos, de forma que no implique altos costos para los gobiernos locales.

Este proyecto lo que busca es promover la implementación de rutas para residuos previamente segregados, como lo utiliza la Municipalidad de Jiménez, Alvarado o Pérez Zeledón, es decir, que se reemplacen poco a poco las rutas actuales de residuos ordinarios por rutas selectivas.

Rutas

Se propone para la Feria del Agricultor dada la concentración de residuos orgánicos, tres rutas para las posibles ubicaciones anteriormente descritas.

Si sólo se utilizara como método de valorización el compostaje para los residuos orgánicos de la feria del agricultor, la cantidad recolectada aproximada actual es de 8 toneladas por mes dada la aproximación utilizando las municipalidades con experiencia en compostaje centralizado se requeriría un terreno de una dimensión aproximada a 110 m².

La aplicación brinda la ruta optimizada a las ubicaciones correspondientes, a continuación, la ruta correspondiente de la Feria del Agricultor al centro de valoración en Rancho Redondo. Esta ruta propuesta se alinea a la búsqueda de la Municipalidad de un terreno en este sector dada la gran cantidad de área rural.

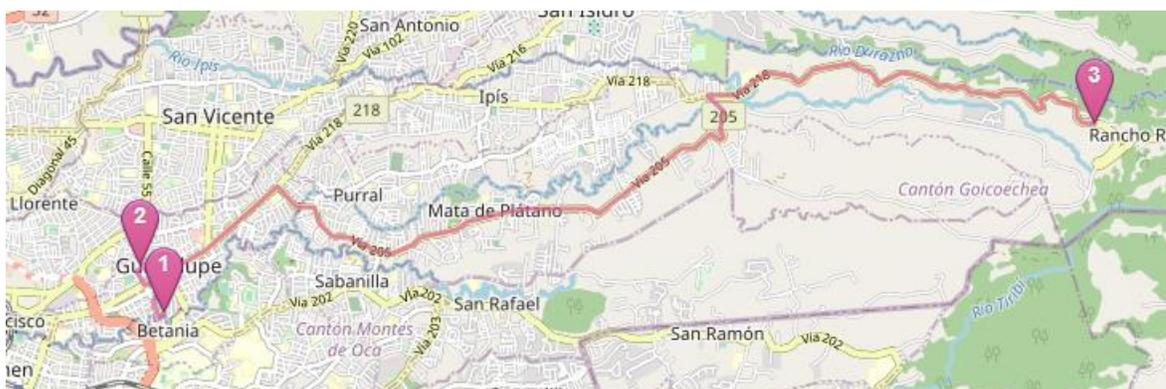


Figura 29. Ruta propuesta de la Feria del Agricultor a una ubicación en el sector de Rancho Redondo.

Fuente: propia (2021).

Siguiendo con las propuestas, si la ruta es en la cercanía rural de Mata de Plátano, se obtiene el recorrido representado en la Figura 26. Esta ubicación se utiliza debido a que este distrito es el recomendado en este proyecto de graduación como adecuado para el comienzo de la capacitación y sensibilización para la recolección segregada, por lo que la escogencia de un terreno en la cercanía de este sector podría utilizarse para los residuos de la Feria del Agricultor como para los desechos orgánicos de este lugar. En este caso, se recomienda un terreno de un tamaño aproximado de 900 m² para procesar una cantidad de residuos no menor a 70 toneladas mensuales.

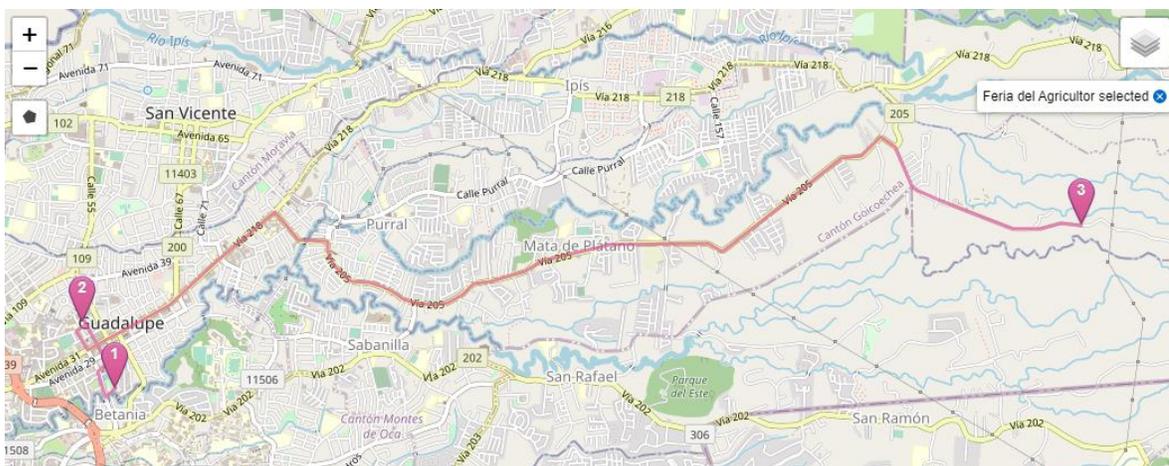


Figura 30. Ruta propuesta de la Feria del Agricultor a una ubicación en el sector de Mata de Plátano.

Fuente: propia (2021).

La tercera ruta propuesta es de la Feria del Agricultor a un terreno en la cercanía de la ubicación ideal si se valorizara todos los residuos del cantón, es decir en el distrito de Purral.

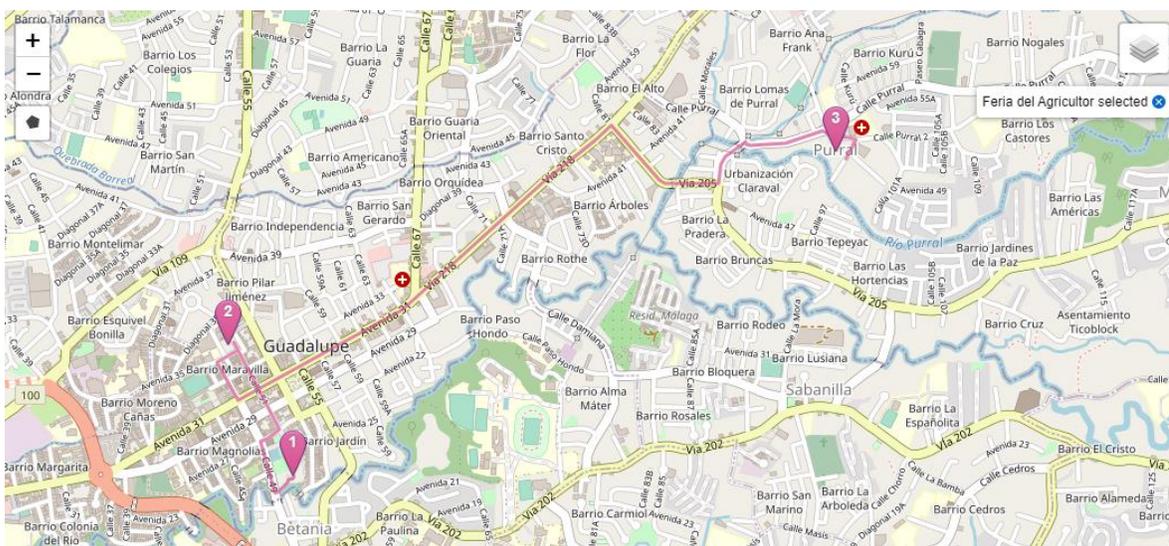


Figura 31. Ruta propuesta de la Feria del Agricultor a una ubicación en el sector de Purral

Fuente: propia (2021).

La distancia recorrida para cada una de las rutas para los residuos de la Feria del Agricultor se detalla en la Tabla 16.

Tabla 16. Distancias recorridas para las rutas a los diferentes posibles centros de valorización para los residuos de la Feria del Agricultor.

Ubicación final	Distancia recorrida al centro de valorización (km)
Cercanía de Purral	4,60
Cercanía rural Mata de Plátano	11,14
Cercanía rural Rancho Redondo	15,28

Seguidamente, para el análisis del sector de Mata de Plátano se proponen tres rutas de recolección de residuos orgánicos. Utilizando el principio de proximidad así también la recomendación de Environment Canada (2013), la ubicación propuesta para centro de valorización en el sector de Mata de Plátano es adecuada dada la densidad poblacional y lo urbano del sector, se recomienda la utilización y búsqueda de un terreno en la zona rural del distrito. Para la optimización de la ruta, es posible observar que los algoritmos del software permite colocar como inicio el Plantel Municipal donde se estacionan los camiones recolectores, y realiza la ruta óptima dentro de todas las alamedas del sector hasta la ubicación en el sector de Mata de Plátano.

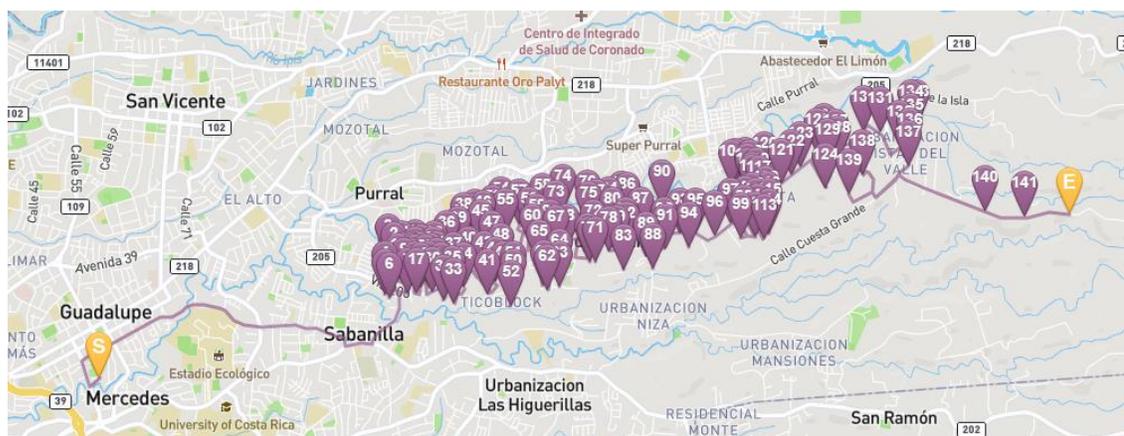


Figura 32. Ruta propuesta de la recolección de Mata de Plátano a una ubicación en el sector rural del distrito

Fuente: propia (2021).

A continuación, se muestra el detalle de la ruta para observar con detalle parte de la optimización que utiliza la aplicación para visitar cada nodo de la red. En los anexos, se puede observar los resultados del archivo de Excel que brinda la aplicación.

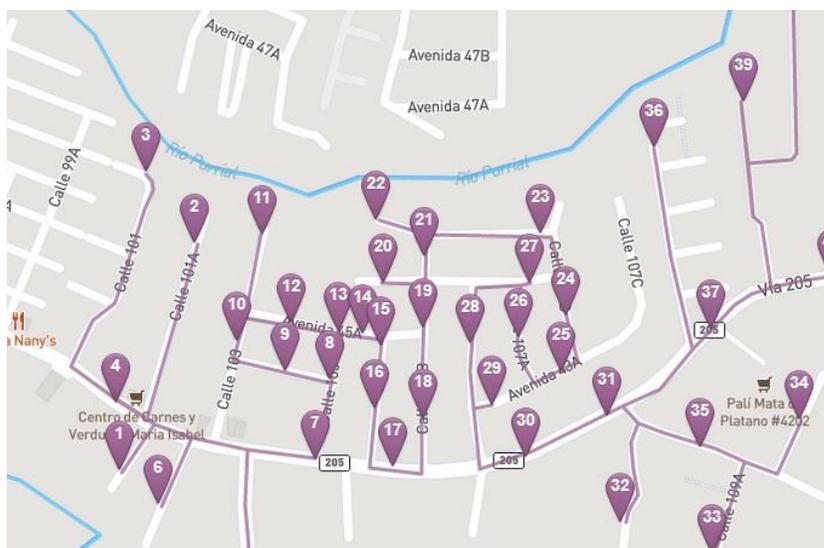


Figura 33. Detalle de la ruta propuesta de la recolección de Mata de Plátano a una ubicación en el sector rural del distrito puntos 1-34

Fuente: propia (2021).

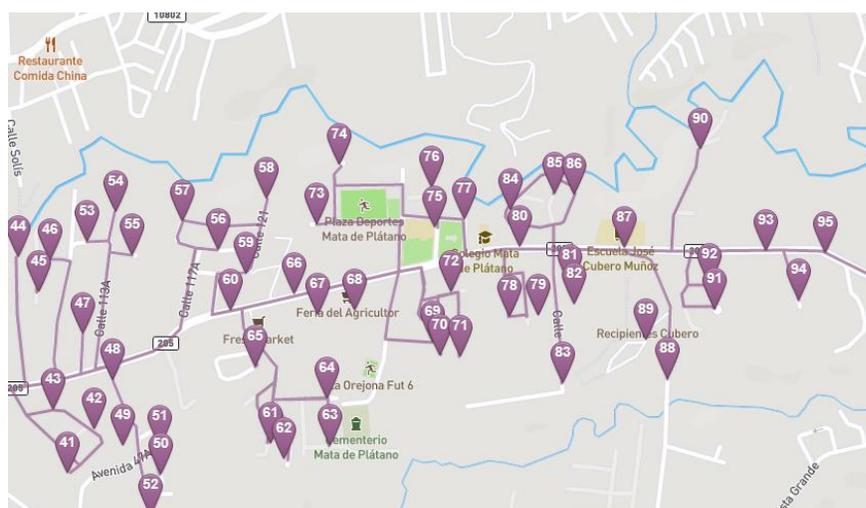


Figura 34. Detalle de la ruta propuesta de la recolección de Mata de Plátano a una ubicación en el sector rural del distrito puntos 54-95

Fuente: propia (2021).

Tabla 17. Distancias recorridas para las rutas a los diferentes posibles centros de valorización para los residuos de Mata de Plátano.

Ubicación final	Distancia recorrida al centro de valorización (km)
Cercanía de Purral	43,95
Cercanía rural Mata de Plátano	35,70
Cercanía rural Rancho Redondo	41,36

4.3 Validación del proceso

El piloto del recorrido de la ruta se realiza en un carro particular, adicionalmente se observa que la ruta es similar a la Ruta número 5.1, corroborando su factibilidad. El recorrido se corrobora siguiendo el camión recolector en el sector como se muestra en la Figura 30.



Figura 37. Seguimiento de una ruta de recolección.

Fuente: propia (2021).

El recorrido de la Ruta 5.1 se observa en la siguiente Figura, el mapa con las rutas de recolección fue proporcionado por el personal de la Municipalidad de Goicoechea. Adicionalmente, es posible verificar que el recorrido contiene 75% de las mismas localizaciones de recolección que la ruta 5.1, el otro 25% se debe a que se adicionan algunos residenciales y alamedas del lugar, tratando de abarcar más lugares, esta información se encuentra en la Tabla en el Anexo A17.

Adicionalmente, la ruta de recolección es corroborada con el personal de la Municipalidad de Goicoechea.

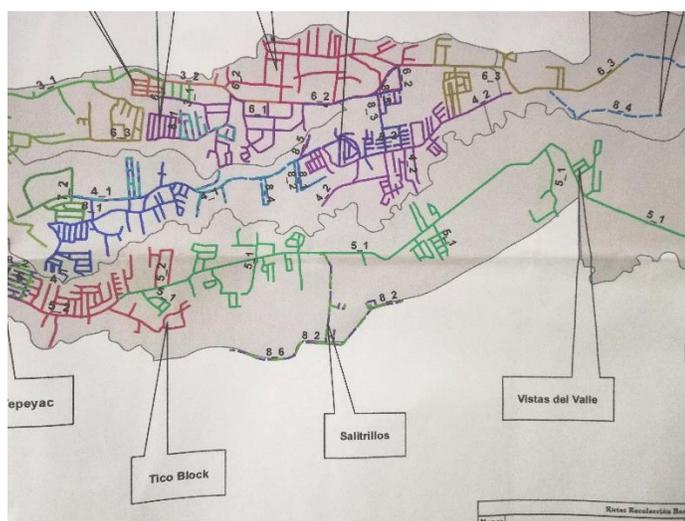


Figura 38. Rutas en los sectores de Mata de Plátano y Rancho Redondo.

Fuente: Municipalidad de Goicoechea (2021).

Es importante aclarar, que también es posible utilizar la ruta actual para los residuos orgánicos, es decir, la propuesta incluye algunas alamedas adicionales y está optimizada por medio del software, sin embargo, lo que pretende este proyecto es establecer que las rutas de residuos segregadas deben implementarse y los proyectos de valorización deben priorizarse por el impacto ambiental y el económico que representan.

Capacidad

Actualmente, se posee la capacidad disponible de los camiones para hacer la recolección selectiva de los residuos orgánicos, adicionalmente, la capacidad de los camiones de reciclaje se va a ampliar.

En la siguiente Tabla, se observa la capacidad actual por ruta y por semana, tomando en cuenta que la capacidad de los camiones de recolección de residuos ordinarios es entre 11 y 14 ton y adicional, algunos camiones realizan dos viajes. Corroborando la posibilidad de implementación de la recolección selectiva.

Tabla 18. Horarios y capacidad de los camiones.

Ruta	Lunes	Martes	Miercoles	Jueves	Viernes	Sábado	Capacidad
1	12940	12550	8955	12940	12550	8955	63%
2	13070	15310	9030	13070	15310	9030	68%
3	12060	13400	11220	12060	13400	11220	67%
4	11450	22550	11075	11450	22550	11075	82%
5	19770	20425	10480	19770	20425	10480	92%
6	15690	21820	14510	21820	21820	14510	99%
7	13600	10800	7500	13600	10800	7500	58%
8	6600	10540	7940	9020	12800	6060	48%
1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	
2	2,1	2,2	2,3	2,1	2,2	2,3	
3	3,1	3,2	3,3	3,1	3,2	3,3	
4	4,1	4,2	4,3	4,1	4,2	4,3	
5	5,1	5,2	5,3	5,1	5,2	5,3	
6	6,1	6,2	6,3	6,1	6,2	6,3	
7	7,1	7,2	7,3	7,1	7,2	7,3	
8	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	

Cálculo mejora a nivel ambiental

Para el cálculo de la cantidad de residuos anuales de Mata de Plátano se utiliza la Tabla 11, si se considera que se puede recuperar el 50% de residuos orgánicos del distrito en cuestión, y que a su vez representa un 10 % de la recolección total de todo el cantón (Goicoechea):

$$\begin{aligned}
 &15\ 400\ \text{ton de residuos sólidos orgánicos} \times 10\% \times 50\% \\
 &= 750\ \text{ton de residuos sólidos orgánicos}
 \end{aligned}$$

En el relleno sanitario:

$$750 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{58,1 \text{ g CH}_4}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 43\,575\,000 \text{ g CH}_4$$

$$43\,575\,000 \text{ g CH}_4 \times \frac{1 \text{ ton CH}_4}{1\,000\,000 \text{ g CH}_4} \times \frac{21 \text{ CO}_2 \text{ ton eq}}{1 \text{ ton CH}_4} = \mathbf{915,08 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}}$$

Si se utiliza compost:

$$750 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{4 \text{ g CH}_4}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 3\,000\,000 \text{ g CH}_4$$

$$750 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{0,3 \text{ g NO}_2}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 225\,000 \text{ g NO}_2$$

$$3\,000\,000 \text{ g CH}_4 \times \frac{1 \text{ ton CH}_4}{1\,000\,000 \text{ g CH}_4} \times \frac{21 \text{ CO}_2 \text{ eq}}{1 \text{ CH}_4} = 63 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

$$225\,000 \text{ g NO}_2 \times \frac{1 \text{ ton NO}_2}{1\,000\,000 \text{ g NO}_2} \times \frac{310 \text{ CO}_2 \text{ eq}}{1 \text{ NO}_2} = 69,75 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

$$69,75 \text{ ton CO}_2 \text{ eq} + 63 \text{ ton CO}_2 \text{ eq} = \mathbf{132,75 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}}$$

Si se utiliza biodigestión:

$$750 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{2 \text{ g CH}_4}{\text{kg residuos sólidos}} = 1\,500\,000 \text{ g CH}_4$$

$$1\,500\,000 \text{ g CH}_4 \times \frac{1 \text{ ton CH}_4}{1\,000\,000 \text{ g CH}_4} \times \frac{21 \text{ CO}_2 \text{ eq}}{1 \text{ CH}_4} = \mathbf{31,5 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}}$$

Tomando en cuenta la huella de carbono únicamente de la descomposición de los residuos, el hecho de recolectar únicamente el 50% de los residuos orgánicos del cantón representa una mejora del 85% (compostaje) y un 96% (biodigestión) en huella de carbono, alineado con la estrategia del país de descarbonización 2021, ENSRVR y Ley GIR.

Tabla 19. Mejora en la huella de carbono con la propuesta de una ruta en el sector de Mata de Plátano.

Huella de carbono	Toneladas de CO ₂ equivalente (ton CO ₂ eq)
Residuos orgánicos del 50% Mata de Plátano compostaje	132,75
Residuos orgánicos del 50% Mata de Plátano biodigestión	31,50
Residuos de Mata de Plátano en el relleno sanitario	915,08

Propuesta Feria del Agricultor

Por mes son aproximadamente 8 toneladas de residuos orgánicos que corresponden a 96 toneladas al año. Actualmente se depositan en el relleno sanitario como se calcula a continuación:

$$96 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{58,1 \text{ g CH}_4}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 5\,577\,600 \text{ g CH}_4$$

$$5\,577\,600 \text{ g CH}_4 \times \frac{1 \text{ ton CH}_4}{1\,000\,000 \text{ g CH}_4} \times \frac{21 \text{ CO}_2}{1 \text{ CH}_4} = 117,13 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Si se realizara compostaje de estos residuos:

$$96 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{4 \text{ g CH}_4}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 384\,000 \text{ g CH}_4$$

$$96 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{0.3 \text{ g NO}_2}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 28\,800 \text{ g NO}_2$$

$$384,000 \text{ g CH}_4 \times \frac{1 \text{ ton CH}_4}{1\,000\,000 \text{ g CH}_4} \times \frac{21 \text{ CO}_2}{1 \text{ CH}_4} = 8.06 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

$$28,800 \text{ g NO}_2 \times \frac{1 \text{ ton NO}_2}{1\,000\,000 \text{ g NO}_2} \times \frac{310 \text{ CO}_2 \text{ eq}}{1 \text{ NO}_2} = 8.93 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

$$8.06 \text{ ton CO}_2 \text{ eq} + 8.93 \text{ ton CO}_2 \text{ eq} = 16.99 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Si se realizara biodigestión de estos residuos:

$$96 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \frac{2 \text{ g CH}_4}{\text{kg residuos sólidos}}$$

$$= 192\,000 \text{ g CH}_4$$

$$192\,000 \text{ g CH}_4 \times \frac{1 \text{ ton CH}_4}{1\,000\,000 \text{ g CH}_4} \times \frac{21 \text{ CO}_2}{1 \text{ CH}_4} = 4.03 \text{ ton CO}_2 \text{ eq}$$

Tabla 20. Mejora en la huella de carbono con la propuesta de una ruta para la recolección de residuos de la Feria del Agricultor.

Huella de carbono	Toneladas de CO ₂ equivalente (ton CO ₂ eq)
Residuos orgánicos la Feria del Agricultor compostaje	16,99
Residuos orgánicos la Feria del Agricultor biodigestión	4,03
Residuos de la Feria del Agricultor en el relleno sanitario	117,13

Tomando en cuenta la huella de carbono únicamente de la descomposición de los residuos, el hecho de recolectar los residuos de la Feria del Agricultor mejora un 85% (compostaje) y 96% (biodigestión) en huella de carbono.

En la siguiente Tabla, se compara la huella de carbono del total de residuos anuales recolectados por la Municipalidad con la producida por los litros de diésel del total de las rutas de recolección. Se nota que los residuos en el vertedero provocan un mayor impacto ambiental negativo medido en toneladas de CO₂ equivalente (más de un 99 %). En otras palabras, a pesar de que se propone una ruta de recolección adicional para los residuos orgánicos, la contribución ambiental de ésta es excelente, debido a la valorización de los residuos.

Tabla 21. Comparación del impacto de la huella de carbono por residuos y por consumo de combustible.

Huella de carbono	Huella de carbono (ton CO ₂ equivalente)
Residuos orgánicos	42 703,5
Rutas de recolección	164,6

Implicación económica

La mejora económica anual debido a la no disposición de los residuos orgánicos en el relleno sanitario se calcula a continuación:

$$96 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{11\,000 \text{ colones}}{\text{ton residuos sólidos}} = 1\,056\,000 \text{ colones}$$

$$750 \text{ ton de residuos sólidos orgánicos} \times \frac{11\,000 \text{ colones}}{\text{ton residuos sólidos}} = 8\,250\,000 \text{ colones}$$

Estos 9,3 millones por año representan únicamente la valorización para un 5,5% de residuos orgánicos del cantón, el potencial de estos residuos es enorme, como ya se indicó se encuentran en su mayoría en los residuos ordinarios, por ello es importante seguir en la línea de los proyectos de gestión de residuos.

Por otro lado, la inversión en el terreno depende de las toneladas a procesar, para ello es requerido un análisis técnico y financiero que permita obtener la opción más rentable.

4.2.3 Proceso de implementación de un proceso de recolección segregado

El proceso de recolección de residuos orgánicos posee diferentes etapas, muchas de ellas requieren análisis técnico propio del tipo de valorización a utilizar, así como capacitación y sensibilización. Tomando en cuenta únicamente el proceso logístico que involucra ubicación ideal y rutas. El proyecto de graduación propone el siguiente proceso.

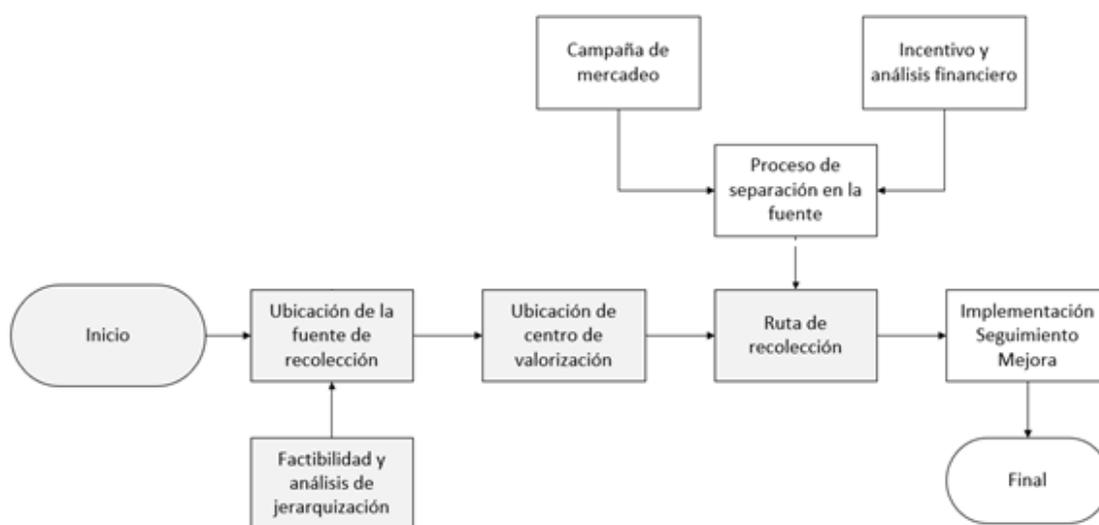


Figura 39. Proceso de recolección de residuos orgánicos propuesto.

Fuente: propia (2020).

Adicionalmente, se proponen algunos ejemplos de indicadores y metas para las etapas de ubicación de la fuente, donde se recolectan los residuos, ubicación del centro de valorización y las rutas, véase Tabla 16.

Los indicadores que pueden utilizar los gobiernos locales relacionados con economía circular y rendimiento propio de la gestión ambiental son variados, en este proyecto se recomienda a la Municipalidad de Goicoechea el uso de indicadores para poder medir de mejor forma el avance en los proyectos, así también para poder demostrar los esfuerzos realizados en esta área.

Tabla 21. Proceso, indicadores y metas

Etapa	Indicadores	Metas
Factibilidad y análisis para ubicar la fuente de recolección	<ul style="list-style-type: none"> - Cantidad de residuos orgánicos recolectados por unidad de tiempo - Indicadores propios de sensibilización y capacitación (talleres-pruebas): - Cantidad de personas que recibieron capacitación/sensibilización por cantidad de personas totales - Huella de carbono de los residuos trasladados al relleno sanitario anual 	<p>Recolectar un mínimo de 50% de los residuos orgánicos producidos por mes del sector</p> <p>Reducción de un % enviado al relleno sanitario</p>
Factibilidad de la ubicación y análisis del centro de valorización	<ul style="list-style-type: none"> - Cantidad de residuos procesados por medio de planta de compostaje u otro método (biodigestión, etc.) - Número de proyectos ambientales ejecutados/en ejecución - Factibilidad financiera de la compra del terreno para la valorización 	<p>Ubicación óptima y factible para llevar a cabo la compra del terreno</p> <p>Eficiencia de procesamiento mayor a un 85%</p>
Rutas de recolección	<ul style="list-style-type: none"> - Medición de la huella de carbono debido al consumo de combustible de la ruta en cuestión 	<p>Cumplimiento de un 100% de los días de recolección</p> <p>Eficiencia de las rutas de recolección</p>

A continuación, se muestra de forma más gráfica del énfasis que debe existir por parte de los gobiernos locales en el área de gestión ambiental, con el objetivo de lograr la sostenibilidad.

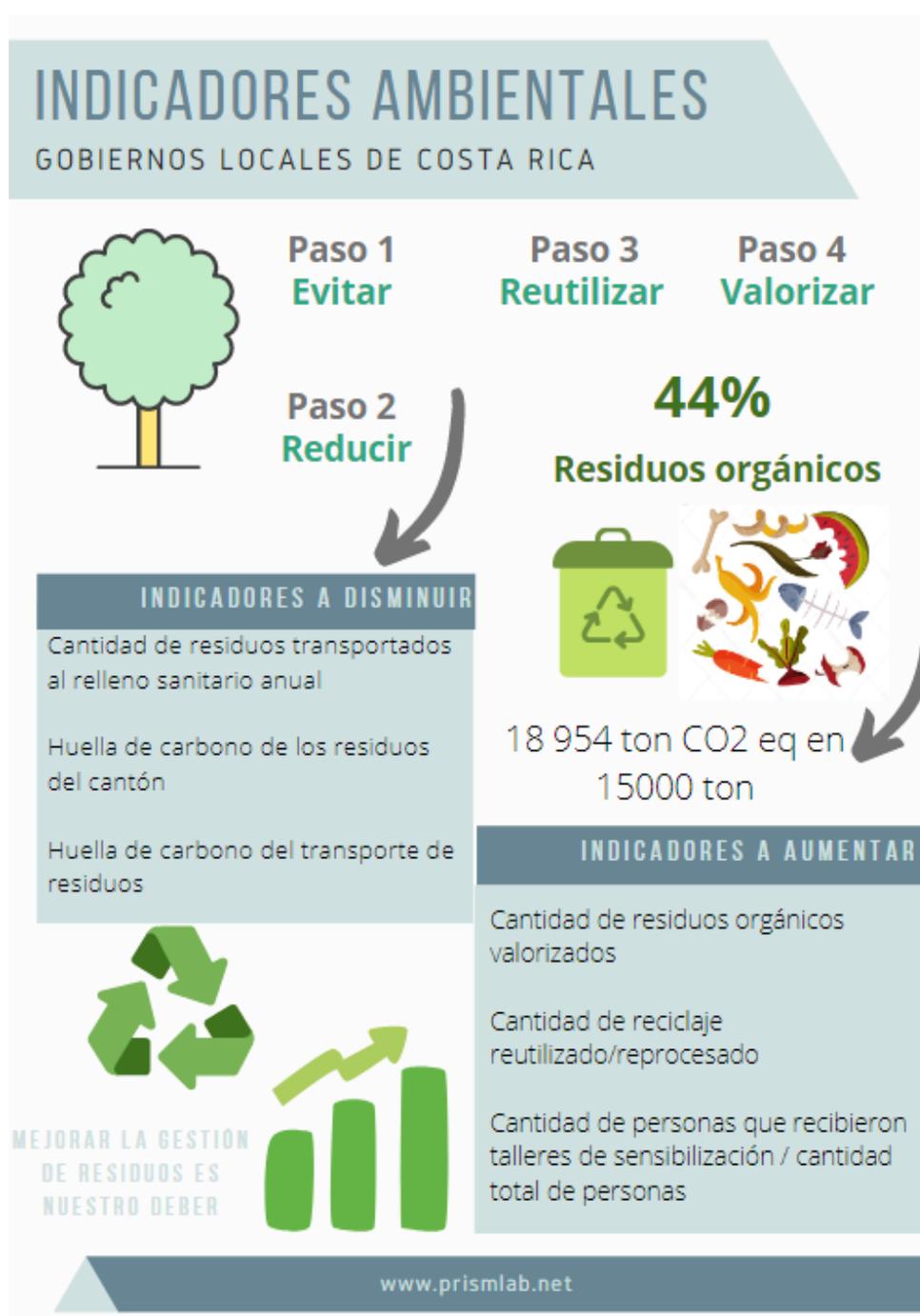


Figura 40. Indicadores ambientales por fomentar en los gobiernos locales.

Fuente: propia (2021).

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

A lo largo de este documento se ha puntualizado lo importante que es este proyecto de graduación como base informativa y analítica de un tópico trascendental de la actualidad dentro de la economía circular; el impacto ambiental de los residuos que producimos, genera repercusiones directas no sólo que contribuyen al cambio climático, sino también económicas y sociales. A continuación, se realiza una revisión general del cumplimiento de los objetivos de este trabajo.

El análisis de la situación actual muestra que a pesar de que el país tiene una estrategia muy clara en torno a la gestión de los residuos, los esfuerzos se quedan cortos, especialmente en gobiernos locales dentro de la Gran Área Metropolitana donde pocas municipalidades han logrado crear la capacitación requerida y la logística adecuada para gestionar los desechos sólidos de una manera valorizable. El Reglamento General a la Ley para la Gestión de Residuos autoriza a las municipalidades para que desarrollen tecnologías alternativas para el tratamiento de residuos, siempre y cuando sean menos contaminantes. Dado que la Municipalidad de Goicoechea recicla aproximadamente un 1% de sus residuos y por el momento no posee una solución a los desechos orgánicos es necesario, como lo indica el reglamento, establecer instrumentos de planificación, gestión, tasas diferenciadas, según el tipo y la cantidad de residuos a aquellos que separen en la fuente, u otra forma de incentivo fiscal para el generador o el gestor, que contribuya en el cantón a la gestión integral de residuos. (Decreto No. 37567-S MINAET-H, 2013). De este modo, este proyecto contribuye a generar conocimiento de la trascendencia que conlleva implementar un proceso de recolección segregada para residuos orgánicos.

En cuanto a la gestión propia de la recolección, las 24 rutas actuales del cantón aseguran que en su mayoría se mantenga el aseo en el cantón, utilizando recorridos balanceados por cantidad de residuos y con frecuencia de dos veces a la semana. Basados en el indicador de economía circular, sobre la cantidad de residuos colocados en el relleno sanitario, la municipalidad posee un 99% contra un porcentaje recomendado de 28%, por lo que se

observa es necesario incrementar en definitiva los proyectos de la separación, recuperación y reducción de desechos. Al mismo tiempo, generar sensibilización e iniciar proyectos educativos para evitar y reducir los desperdicios.

Aunado a lo anterior, existen proyectos dentro de la Municipalidad interesantes para el establecimiento de rutas de reciclaje y producción de abono orgánico por medio de compostaje en las viviendas que promueven la mejora de la gestión de los desechos. Este proyecto de graduación complementa de buena forma estas iniciativas dado que determina el sector que tiene las características adecuadas para iniciar con sensibilización y pruebas piloto de recolección segregada. Para ello, la propuesta del diseño de este proceso de recolección consta de tres etapas: la ubicación del sector donde se recolectan los residuos, la ubicación del posible centro de valorización y la ruta de recolección.

Para la ubicación del sector piloto o el lugar donde la Municipalidad de Goicoechea podría iniciar esfuerzos de sensibilización, incluye el análisis de los factores principales para lograr la separación en la fuente, para esto el análisis jerárquico (AHP) es la herramienta de toma de decisiones multicriterio más acertada basada en la literatura correspondiente. Con el criterio de expertos, que se obtiene por medio de una encuesta, se prioriza los cuatro factores más relevantes para la determinación del sector: cantidad de residuos, tamaño del distrito, presencia de programas de reciclaje y nivel socioeconómico. Además, lograr un compendio de otros factores o variables que los expertos consideran importantes para el establecimiento de una ruta de recolección de residuos orgánicos.

Con la matriz AHP se obtiene en porcentaje los factores que determinan las comunidades a priorizar para una ruta de recolección segregada, con personas con disposición para separar residuos orgánicos en la fuente. Los resultados de los expertos consultados muestran que la cantidad de residuos (34%) y la presencia de programas de reciclaje (26%) afectan en mayor medida. Analizando esto, el factor de la cantidad de residuos a recolectar es fundamental para calcular el tamaño del camión y frecuencia de la recolección, además, se relaciona proporcionalmente a la densidad de población. Por otra parte, el factor que tiene ver con la conducta de la persona en realizar la separación de residuos se ve influenciado con la

facilidad que brinda la comunidad o los alrededores para reciclar o valorizar por ello la presencia de programas de reciclaje es trascendental.

Por otro lado, con estos porcentajes obtenidos con el criterio de expertos se genera un proceso genérico utilizable para otras municipalidades para obtener de forma muy rápida cuál sector a priorizar. Esto es valioso ya que representa uno de los primeros pasos a tomar dentro de los proyectos de mejora en la gestión de residuos, dados los grandes esfuerzos en capacitación y educación que se requiere, datos confirmados por otras municipalidades que han iniciado con recolección segregada; por ello, iniciar de forma escalonada es lo recomendable.

Como se menciona anteriormente, los expertos citan otros aspectos que deben tomarse en cuenta en la elaboración de rutas segregadas:

- Densidad poblacional
- Distancia entre viviendas
- Programas asociados
- Apropiación ambiental de cada comunidad
- Nivel de sensibilización de la comunidad
- Recipiente o material en se debe recolectar los residuos
- Tipo de vehículo para recogerlo
- Horarios más apropiados a la población
- Frecuencia de recolección
- Cobro adicional en el servicio de recolección de residuos
- Tipo de tratamiento o uso que se les va a dar a los residuos
- Estado de las vías, ubicación y acceso
- Distancia del distrito hasta el punto del Centro de Compostaje o de Tratamiento.
- Estudio de composición de residuos
- Porcentaje de cobertura
- Porcentaje de morosidad

Como es posible observar, el proceso tiene muchas variables que no son fácilmente cuantificables y otras, que son propiamente del proceso de valorización (fuera de

alcance). Sin embargo, presenta datos esenciales a tomar en cuenta, por las municipalidades o entidades que quieran gestionar los residuos valorizables de forma diferenciada.

En este caso, la matriz jerárquica concluye que Mata de Plátano es el sector con potencial basados en los cuatro factores antes mencionados, seguidamente de Ipís. En este trabajo, únicamente se toma en cuenta el distrito de Mata de Plátano, ya que la Municipalidad debe focalizarse primeramente en un proyecto piloto y hacerlo crecer de forma paulatina debido a los gastos de inversión en capacitación y cualquier otra herramienta de valorización que se desee implementar.

La ubicación del lugar óptimo para la colocación de un centro de valorización se utilizó la herramienta de Macrologística utilizando modelos de ubicación de planta (modelo rectilíneo y euclideano) y puntos ubicados a lo largo del todo cantón. La primera ubicación se calcula tomando como premisa que todo el cantón realiza separación en la fuente, obteniendo la ubicación en Purral, zona en la cercanía de Asembis. Este distrito posee barrios conflictivos y gran cantidad de viviendas, por lo que no se recomienda un terreno para compostar gran cantidad de desechos, sin embargo, si hay terrenos disponibles para la creación de pequeños viveros municipales para compostar en pequeña escala, lo que complicaría la logística a implementar, pero con barrios organizados puede ser posible.

La segunda ubicación tomando en cuenta sólo los residuos de Mata de Plátano, se ubica en el sector urbano del distrito por lo que en búsqueda de terrenos disponibles se propone la zona rural de Mata de Plátano, además se incluye la propuesta de la Municipalidad en la zona de Rancho Redondo, pues al ser una zona rural se pretende la búsqueda de un terreno en este sector.

Seguidamente, con el programa Optimoroute se obtiene las rutas correspondientes tomando en cuenta dos fuentes de residuos orgánicos, la primera la Feria del Agricultor y la segunda el sector propuesto de Mata de Plátano. Esta herramienta permitió lograr la ruta óptima con modelos de optimización logístico que resuelven el problema de TSP y VRP, además, de ser una herramienta de Ingeniería Industrial que posee diferentes módulos que optimizan diferentes problemas de distribución y logística.

La inversión para llevar a cabo una planta de compostaje u otro método de valorización como la biodigestión, se pueden combinar con el proyecto de centro de acopio para poder lograr un ahorro mucho mayor debido a los desechos no trasladados al relleno sanitario y al costo que esto conlleva, para esto se requiere un estudio detallado de prefactibilidad financiera y técnica.

Especialmente, se recomienda que sean explorados los convenios con otras municipalidades, instituciones públicas o privadas para tener no sólo el compostaje como opción si no también, la biodigestión ya que este método puede traer un posible mayor beneficio económico después de recuperar la inversión inicial.

Para la validación, se corrobora que la ruta es posible y factible, es decir, el camión recolector puede seguir la ruta propuesta. Además, un 75% de los puntos de la ruta propuesta se comparte con la ruta actual del sector, con algunos cambios en las alamedas a recorrer y el orden, sin embargo, el planteamiento de este proyecto es generar una ruta nueva independiente a la actual que sea única para residuos orgánicos. Además, se verifica que hay capacidad actual en los camiones de recolección para llevar a cabo esta, adicionalmente, se está realizando compra de camiones de reciclaje adicionales que podrían en un futuro también servir para este proyecto.

Al respecto, los desechos orgánicos, cuando se envían a vertederos, generan emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a la degradación de la materia orgánica presente en los residuos produce una mezcla de gases compuesta fundamentalmente por metano y dióxido de carbono (CH_4 y CO_2), los cuales son reconocidos gases (GEI) que contribuyen al proceso de cambio climático. Estos pueden crear problemas de salud y molestias; por ello, se comprueba que la mejora en huella de carbono de los residuos no enviados al relleno sanitario es mayor a un 85% dependiendo del método de valorización, así también un ahorro proporcional a lo recuperado y adicional se obtendría lo generado por la valorización/comercialización/reutilización. (Grupo de Investigación de Economía Ecológica, 2016).

La valorización de residuos orgánicos es necesaria, ya que representan un 44% de los residuos sólidos municipales, un terreno en un área rural con dimensiones aproximadas de

900 m² sería adecuada para poder procesar 70 toneladas de residuos orgánicos mensuales aproximadas del sector de Mata de Plátano y la Feria del Agricultor, esto basado en datos de otras municipalidades que actualmente realizan la recolección segregada como lo es la Municipalidad de Alvarado y Jiménez. Sin embargo, dependiendo del tipo de valorización realizada el dimensionamiento debe ser calculado, así como el proceso como tal.

El impacto ambiental y económico que los residuos orgánicos provocan es importante, no sólo porque en nuestro país no se cuentan con sistemas de gestión adecuados para compensar el impacto, sino porque no hay medidas adecuadas de gestión en los hogares para la disminución de estos residuos. Es primordial que se tomen acciones al respecto, los residuos orgánicos deben ser tratados de forma diferenciada y si bien es cierto, las rutas de reciclaje (plástico, vidrio, papel y cartón) han tomado relevancia en los últimos años, no ha sido así con los desechos orgánicos, por los que la Municipalidad paga anualmente un aproximado de 160 millones de colones. El proyecto busca proponer y comprobar que la mejora en los procesos que brinda la ingeniería industrial y el nuevo modelo económico circular son esenciales para poder incrementar eficiencia no sólo financiera, logística y ambiental.

A pesar de que la pandemia de COVID-19, ha cambiado la rutina diaria de la mayoría de las personas, la forma de ver el futuro, las medidas de salud pública, comportamiento del consumidor etc., la importancia de buscar la sostenibilidad de nuestros procesos permanece o se intensifica, el cambio climático, la contaminación de agua, suelo y aire, la pobreza en aumento entre otros problemas sociales, deben ser combatidos con educación, sensibilización y capacitación. El esfuerzo debe ser grande al ser un país en vías de desarrollo, pero es posible, así se observa en gobiernos locales que han dado grandes pasos en la mejora de la gestión ambiental.

El uso de indicadores ambientales en los gobiernos locales para la medición del rendimiento en la gestión debe ser establecido, la Municipalidad de Goicoechea posee una oportunidad de mejora en este ámbito. El proyecto propone algunos ejemplos de indicadores que se requieren para medir los esfuerzos en proyectos de recuperación, reciclaje y valorización.

Por último, es interesante destacar que según información del Gobierno de Costa Rica se indica que La Municipalidad de Turrialba, con MINAE y el Centro y Red de Tecnología del

Clima (CTCN, en inglés) está identificando las barreras que limitan a los gobiernos locales para ir hacia una economía circular, este trabajo establece que a pesar de los esfuerzos en mejorar la gestión de los residuos existen deficiencias claras en cuanto a los indicadores de economía circular y, por ello, diseñar una ruta de recolección selectiva se alinea a este modelo económico y contribuye a la valorización de los residuos orgánicos, pero los gobiernos locales deben priorizar sus objetivos y establecer indicadores que permitan medir las mejoras realizadas.

El proyecto de graduación pretende establecer un criterio claro de que la recolección segregada es necesaria, además, de que se deben establecer soluciones de valorización para los residuos orgánicos, que mejoren la eficiencia y la huella ambiental de estos.

5.1 Lecciones aprendidas

Como parte de la elaboración de este proyecto de graduación se generaron diferentes lecciones aprendidas.

Conforme se dio el desarrollo del proyecto y el estudio del marco teórico, se observa que la implementación de un proceso de recolección segregada implica muchos otros procesos que no estaban contemplados en el alcance del proyecto por lo que, a partir de este trabajo se generan recomendaciones para poder lograr la implementación completa del sistema de recolección segregada de residuos orgánicos.

Debido a esto es importante delimitar el proyecto de buena forma porque en un tema tan importante como lo es este puede resultar complicado la finalización, ya que hay mucho por construir y hacer que no es posible abarcar todas las aristas del problema.

Las actividades en este proyecto que involucraron diferentes expertos en el área son fundamentales, la gestión de los residuos en Costa Rica debe mejorar, pero con esfuerzos aislados en gobiernos locales no es suficiente, para ello es necesario promover la comunicación no solo entre municipalidades sino también el sector privado.

5.2 El gran aporte a la academia

El aporte a la academia resulta primordial, pues la búsqueda de trabajos finales de graduación que involucren logística, ingeniería y economía circular es muy limitada en la Universidad de Costa Rica. Este trabajo brinda información valiosa acerca de la posibilidad de poder realizar un cambio en la sociedad costarricense en el ámbito ambiental y poder fomentar la segregación de los residuos debido al impacto que causan.

Cabe rescatar que se genera múltiples posibilidades para nuevos trabajos de graduación en diferentes facultades de la Universidad, lo que amplía el éxito del proyecto.

A continuación, se enumeran algunos de ellos: prefactibilidad y factibilidad de una planta de compostaje para los residuos orgánicos de la Municipalidad de Goicoechea, estudios para el mejor método de compostaje para los residuos orgánicos urbanos de la Municipalidad de Goicoechea y metodologías de sensibilización para promover la separación de residuos en la fuente de cantones con alta densidad poblacional.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- La gestión actual de la recolección de residuos en la Municipalidad de Goicoechea no es la adecuada, en relación con principios de economía circular. La cantidad de residuos enviados al relleno sanitario es superior al valor recomendado (28%), ya que únicamente se recicla menos de un 1% de los residuos totales y un 99% es trasladado al relleno sanitario El Huaso. Esto genera una huella de carbono de 42703 toneladas de CO₂ equivalente y un gasto mayor a los 300 millones de colones anuales debido a la tarifa del relleno sanitario. Esto concluye que es necesario realizar un cambio en el proceso actual que permita valorizar los residuos orgánicos que son la fracción mayoritaria de los residuos ordinarios municipales.
- En la Municipalidad de Goicoechea no se cuentan con indicadores ambientales que permitan medir los esfuerzos de los proyectos y mejoras en la gestión ambiental, esto no contribuye con la medición del rendimiento de la gestión. Para ello, se propone el uso de indicadores ambientales por etapa del proceso: proyectos ejecutados o en ejecución, huella de carbono, porcentaje de residuos en el relleno sanitario anuales y porcentaje de residuos reciclados o valorizados.
- El proyecto plantea un proceso para la Municipalidad de Goicoechea, que contribuye con la valorización de residuos orgánicos, alineado a las medidas nacionales de descarbonización, estrategias de valorización y gestión de residuos. Propone un proceso genérico que se basa en el análisis del sector donde se recolectan los residuos, análisis del sector donde se valorizan los residuos y la ruta de recolección correspondiente.
- El proceso logístico para la recolección de residuos orgánicos municipales requiere como mínimo la cuantificación de los siguientes factores: tamaño de distrito, cantidad de residuos a recolectar, presencia de proyectos de reciclaje y nivel socioeconómico (IDS), para poder obtener la mejor ubicación en donde sería factible el diseño de un proceso selectivo. Se propone un proceso genérico para que de forma ágil cualquier gobierno local pueda encontrar el sector/distrito a priorizar, esto utilizando dos

matrices, los primeros porcentajes de criterio de experto y la segunda, datos propios de los distritos.

- La utilización de la herramienta logística (Macrologística) basada en modelos de ubicación permite ubicar dos localizaciones adecuadas para la valorización de residuos orgánicos de la Municipalidad de Goicoechea. Esta propuesta pretende facilitar la toma de decisiones en la Municipalidad para la implementación de proyectos de rutas segregadas. La cercanía de Mata de Plátano y Rancho Redondo es ideal para la búsqueda de un terreno para una planta de compostaje o biodigestión, debido a que el sector posee una gran zona rural.
- Las rutas propuestas para el sector de Mata de Plátano y Rancho Redondo no difieren en gran cantidad en distancia recorrida (6 km), por lo que resultan ubicaciones excelentes para el terreno de compostaje centralizado o proceso de biodigestión.
- Si se realizara la separación en la fuente de todo el cantón la ubicación idea sería en la cercanía de Purrál debido a que en el sector no hay terrenos de gran tamaño es un barrio conflictivo no se recomienda utilizar esta ubicación. Sin embargo, se puede promover viveros municipales en pequeña escala en el sector, así como en otros lugares del cantón.
- La recolección de residuos orgánicos con la ruta propuesta es factible, se cuenta con capacidad en los camiones, además, se pretende ampliar la flota de camiones de reciclaje. Es necesario establecer el método de recolección, el camión para dicho fin y llevar a cabo la compra del terreno. Adicionalmente a los programas de capacitación que son fundamentales para que sensibilizar la población de la importancia de la separación de desechos.
- La recolección selectiva de los residuos orgánicos se requiere como parte de las estrategias ambientales del país, el compostaje de los desechos brinda un 85% de mejora en huella de carbono y la biodigestión un 96%, es decir se demuestra que el proceso de recolección selectiva contribuye a la carbono neutralidad.
- Por otro lado, la reducción de costos es directamente proporcional a la cantidad de residuos que evitan el relleno sanitario, por lo que para la Feria del Agricultor

aproximadamente un millón de colones anual y un 50% de los residuos orgánicos de Mata de Plátano representarían aproximadamente 8 millones de colones anuales.

6.2 Recomendaciones

- A partir de este trabajo se generan diferentes proyectos de graduación especialmente en el área de ingeniería industrial, administración de negocios, ingeniería química, por lo que se recomienda el contacto con estudiantes avanzados para el estudio de optimización de las rutas actuales, metodología de capacitación-sensibilización para la separación de residuos, dimensionamiento, prefactibilidad y factibilidad técnica y financiera para la implementación de una planta de compostaje o biodigestión.
- La implementación de un proceso de recolección segregada en la Municipalidad de Goicoechea requiere de antemano el involucramiento de los altos mandos, adicional a la inversión en educación, capacitación y sensibilización de las personas. Por lo que, es recomendable compartir la información de este proyecto.
- Se recomienda también llevar a cabo estudios de mercado o encuestas que permitan recolectar la opinión de los vecinos donde estará ubicado el área de valorización, esto con el fin de determinar obstáculos durante la implementación.
- A pesar de que el plan de descarbonización menciona primordialmente el compostaje como forma de valorización de los residuos orgánicos, se recomienda el estudio de la biodigestión como proceso para la generación de energía y tratamiento de residuos.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, L., Maas, G., y Hogland, W. (2015). *Desafíos en la gestión de residuos sólidos para las ciudades de países en desarrollo*. Elsevier.
- Acosta Chávez, C., y Acosta Chávez, G. (2015). *Propuesta de localización de una planta procesadora de pollo para la empresa Grupo Santiago Express S.A.S*. Santiago de Cali: Universidad ICESI.
- Arneil, R., Sze Ki Lin, C., Ming Chan, K., Him Kwan, T., y Luque, R. (2013). Advances on waste valorization: new horizons for a more sustainable society. *Energy Science and Engineering*, 53-71.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2010). *Ley para la Gestión Integral de Residuos N° 8839*. San José: Ley de Costa Rica.
- Atalia, K., Buha, D., Bhavsar, K., y Shah, N. (2015). *A Review on Composting of Municipal Solid Waste*. India: Journal of Environmental Science.
- Banaitė, D., y Tamošiūnienė, R. (2016). *Sustainable development: The circular economy indicators: selection model*. Lituania: Research Gate.
- Banco Mundial. (2018). *Informe del Banco Mundial*. Obtenido de Banco Mundial: <https://www.bancomundial.org/es/>
- Beancourt, N., & Beancourt, D. (2016). *Propuesta de implementación de la logística inversa para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, caso Plaza de Mercado de la localidad de los mártires de la Ciudad de Bogotá*. Bogotá: Corporación Universitaria Iberoamericana.
- Berumen, S., y Llamazares, F. (2007). *La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente*. Bogotá: Scielo.
- Bouneffa, M., Ahmad, A., Fonlup, C., y Hendi, H. (Enero de 2018). *Ontology-Based Reasoning System for Logistics Applications Deployment*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/325889192_Ontology-Based_Reasoning_System_for_Logistics_Applications_Deployment
- Castillo, L., y Cerquera, N. (2012). *Diseño de sistema logístico de transporte para la recolección de materiales reciclados en la localidad de Engativá con la empresa Compapeles Milenium*. Bogotá: Universidad Libre.

- Chongrak , P., y Thammarat , K. (2017). *Organic Waste Recycling: Technology, Management and Sustainability*. Reino Unido: IWA Publishing.
- Comisión Europea. (2000). *La UE apuesta por la gestión de residuos*. Alemania: Comunidades Europeas.
- Contraloría General de la República. (2016). *Informe de auditoría operativa acerca de la gestión de las municipalidades para garantizar la prestación eficaz y eficiente del servicio de recolección de residuos ordinarios*. San José: División de fiscalización operativa evaluativa.
- Córdoba, J. P. (2014). *Modelo de logística inversa para la recuperación y aprovechamiento de residuos plásticos ABS en Cali*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Decreto No. 37567-S MINAET-H. (2013). *Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de Residuos*. Costa Rica: Procuraduría General de la República.
- Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., y Wassenhove, L. (2004). *Reverse logistics: Quantitative models for closed-loop supply chains*. Springer.
- Directiva de la Unión Europea. (2018). *Directiva 2008/98/CE sobre los residuos*. Unión Europea: Diario Oficial de la Unión Europea.
- División de fiscalización operativa evaluativa . (2016). *Informe de auditoría operativa acerca de la gestión de las municipalidades para garantizar la prestación eficaz y eficiente del servicio de recolección de residuos ordinarios*. San José: Área de fiscalización de servicios para el desarrollo local.
- Drijaca, M. (2015). *The transition from linear to circular economy (concept of efficient waste management)*. Serbia: Quality System Condition for Successful Business and Competitiveness.
- Dueñas, D. E. (2007). *Diseño estratégico del sistema de distribución para el proyecto de empresa Food Service S.A*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Environment Canada. (2013). *Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing*. Canada: Government of Canada.
- Espaliat, M. (2017). *Introducción a los principios de economía circular y de sostenibilidad*. España: Instituto Técnico Español de Limpieza.
- Flores, M., Guardado, A., y Romero, C. (2008). *Diseño de una metodología para la logística de recolección de desechos sólidos en los distritos 4 y 5 del Municipio del San Salvador*. San Salvador: Universidad de El Salvador.

- Gallardo , A., Prades, M., y Colomer, F. (2012). *Separate Collection Systems for Urban Waste (UW)*. Spain: Research Gate.
- Gobierno de Costa Rica. (2019). *Avances Plan de descarbonización 2018-2050*. San José: Gobierno de Costa Rica.
- Golden, B. (2012). *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. USA: Springer Science & Business Media.
- Google. (2019). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps>
- Grupo de Investigación de Economía Ecológica. (2016). *Universidad Nacional del Mar de la Plata*. Obtenido de La basura: consecuencias ambientales y desafíos: <https://eco.mdp.edu.ar/institucional/eco-enlaces/1611-la-basura-consecuencias-ambientales-y-desafios>
- Hall, R., y Partzka, J. (2016). Higher expectations drive transformation. *Vehicle Routing Software Survey*, 40-47.
- Han, H., y Ponce, E. (2015). *Waste collection vehicle routing problem: literature review*. Madrid: Technical University of Madrid.
- Hernández, R., Fernández , C., y Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. México: McGraw Hill.
- Herrera, I., Collagazo, G., Lorente, L., Montero, Y., y Valencia , R. (s.f). *Una revisión del estado del arte de la optimización de rutas de recolección de residuos sólidos municipales en países en vías de desarrollo*. Ecuador: Universidad Técnica del Norte.
- Hettiarachchi, H., Meegoda, J., y Ryu, S. (2018). OrganicWaste Buyback as a Viable Method to Enhance Sustainable Municipal Solid Waste Management in Developing Countries. *International Journal of Environmental Research an Public Health*, 1-15.
- Hodkinson, G. (2018). *Circular Economy in Cities Evolving the model for a sustainable urban future*. Switzerland: World Economic Forum.
- Hurtado, T., y Bruno, G. (2005). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2012). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono*. San José: MINAE.
- Instituto Meteorológico Nacional . (2020). *Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica*. Obtenido

<http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/factoresemision/factoresemision2020/index.html>

- Interreg Europe. (2017). *Sustainable management of bio-waste: Regional cooperation for improved bio-waste management*. UE: Environment and Resource Efficiency Policy Learning Platform.
- Jain, S., Newman, D., Cepeda, R., y Zeller, K. (2018). *Global Food waste management*. Cities Climate Leadership: World Biogas Organization.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., y Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington: World Bank Group.
- Kirakozian, A. (2014). *Selective sorting of waste: a study of individual behaviors*. Gredeg.
- Kumar , P., y Rasquin, C. (08 de abril de 2020). *The Coronavirus Crisis and Waste Management in Germany*. Obtenido de Association of Cities and Regions for sustainable Resource management: <https://www.iass-potsdam.de/en/blog/2020/04/coronavirus-crisis-and-waste-management-germany>
- López, B. S. (junio de 2019). *Problema del agente viajero – TSP*. Obtenido de Investigación de Operaciones: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/problema-del-agente-viajero-tsp/>
- Macrologística. (19 de noviembre de 2019). Modelo de localización. San José.
- Macrologística. (enero de 2021). *Macrologística*. Obtenido de www.macro.cr
- Máñez, C. A. (2018). *Diseño de una planta de valorización de residuos urbanos para el área de gestión A6 de la Comunitat Valenciana*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Martínez, A., y Zuñiga, M. (2012). *Análisis de la estructura jurídica de la gestión integral de residuos sólidos y sus implicaciones sociales*. San Ramón : Universidad de Costa Rica.
- McKinnon, A., Cullinane, S., Browne, M., y Whiteing, A. (2010). *Green Logistics*. London: The Chartered Institute of Logistics and Transport.
- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D., y Garcia, D. (Setiembre de 2019). *Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos*. Obtenido de Revista chilena de ingeniería: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000300348

- MINAE. (2019). *Plan de descarbonización de la economía*. San José: Gobierno de la República.
- Ministerio de Planificación y Política Económica. (2017). *Índice de desarrollo social 2017*. San José: CONICIT.
- Ministerio de Salud. (2016). *Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos (ENSRVR)*. San José: Ministerio de Salud.
- Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador. (2020). *Manual de aprovechamiento de residuos orgánicos municipales*. Ecuador: Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador.
- Ministry of Government and Provincial Councils. (2008). *Solid collection and transport*. Ministry of Government and Provincial Councils.
- Montes de Oca, G., y Arce, E. (2011). *La huella de carbono en la Municipalidad de San Carlos y logro de la carbono neutralidad*. San Carlos: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Moreno, J. M. (28 de enero de 2021). *El proceso analítico jerárquico fundamentos, metodología y aplicaciones*. Obtenido de [https://users.dcc.uchile.cl/~nbaloian/DSS-DCC/ExplicacionMetodoAHP\(ve%20rpaginas11-16\).pdf](https://users.dcc.uchile.cl/~nbaloian/DSS-DCC/ExplicacionMetodoAHP(ve%20rpaginas11-16).pdf)
- Municipalidad de Goicoechea. (julio de 2019). *Municipalidad de Goicoechea*. Obtenido de <https://www.munigoicoechea.com/index.php/pagina-historia>
- Nylund, S. (2012). *Reverse Logistics and Green Logistics*. Wärrsilä: University of Applied Sciences.
- Rezae, J. (2015). A systematic review of multi-criteria decision-making applications in reverse logistics. *Transportation Research*, 766-776.
- Rivera Monsalve , J., y Fredy Rojas , E. (2019). *Las decisiones de localización de instalaciones en una organización. Comparación entre métodos de decisión multicriterio*. Bogotá: Universidad La Salle.
- Rositas, J., y Mendoza, J. (2013). *El proceso analítico jerárquico (AHP) como método innovador en la toma de decisiones grupales*. Mexico: Universidad de Nuevo León.
- Rudín, V., Soto, S., y Linnenberg, C. (2019). *Elaboración de la propuesta de proyecto a financiar para una NAMA de residuos sólidos en Costa Rica*. Costa Rica: GIZ.
- Sandí, A. L. (2018). *Herramientas para la estimación de huella de carbono de proyectos constructivos*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

- Santiago, R. (2017). *Plan estratégico logístico para una PyME*. Buenos Aires: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- Sarache Castro,, W., y Morales, M. (2016). *Localización, transporte e inventarios*. Universidad Nacional de Colombia: Colombia.
- SOeS. (2017). *10 Key Indicators for monitoring the Circular Economy*. France: The Monitoring and Statistics Directorate (SOeS).
- Solís, M. (2010). Conductas ambientales de separación de desechos sólidos y ahorro de agua. *Revista Costarricense de Psicología*, Vol. 29, número 44, 2010, 19-34.
- Soto, S. (2011). *Informe del Estado de la Nación*. San José: Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible.
- Soto, S. (2012). *Situación del manejo de los desechos sólidos de Costa Rica*. San José: Estado de la Nación.
- Strimel, G. (2014). *Engineering design a cognitive process approach*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/317054643_ENGINEERING_DESIGN_A_COGNITIVE_PROCESS_APPROACH
- Tapia, M. M. (diciembre de 2014). *Modelos clásicos de localización óptima*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/marcosmedinatapia/modelos-clasicos-de-localizacin-ptima-archivo>
- Tompkins, T., White, J., Bozer, Y., y Tanchoco, J. (2011). *Planeación de instalaciones*. México: Cengage Learning.
- Varela Menéndez, J. (2018). *La economía circular: una propuesta de futuro para España y Europa*. Coruña: Universidad de Coruña.
- You, S., Sonne, C., y Sik Ok , Y. (26 de junio de 2020). Obtenido de COVID-19's unsustainable waste management: <https://science.sciencemag.org/content/368/6498/1438.1>

ANEXOS

ANEXO 1. ANÁLISIS JERÁRQUICO

Tabla A1. Expertos que contestaron la encuesta para el AHP.

Experto	Información	
Licda. Ingrid Sandoval	Municipalidad de Tibás	Gestora Ambiental
Ing. Ana Lorena Vallejo	Municipalidad de Turrialba	Gestora de Residuos
Ing. Jessie Vega Méndez	Centro Para la Sostenibilidad Urbana	Coordinadora de Acción Climática
Ing. Rosario Chacón	Municipalidad de Alvarado	Gestor Ambiental
Daniel Barquero	Municipalidad de Moravia.	Gestor Ambiental
Ing. Cindy Torres, MSc	Universidad de Costa Rica	Profesora Universidad de Costa Rica
Raquel Artavia Castro	Municipalidad de San José	Gestor Ambiental
Jorge Jiménez Sandi	Municipalidad de Santa Ana	Gestor Ambiental
Jerson Calderón Valverde	Municipalidad de Escazú	Jefatura Gestión Ambiental
G.Benitez	Municipalidad de Coronado	Saneamiento Ambietal

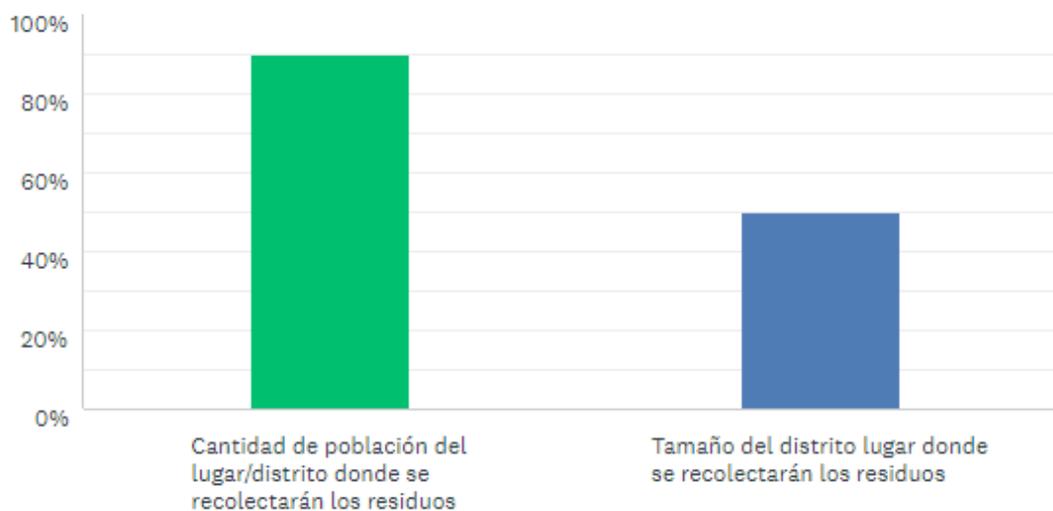


Figura A1. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre la cantidad de población y el tamaño del distrito.

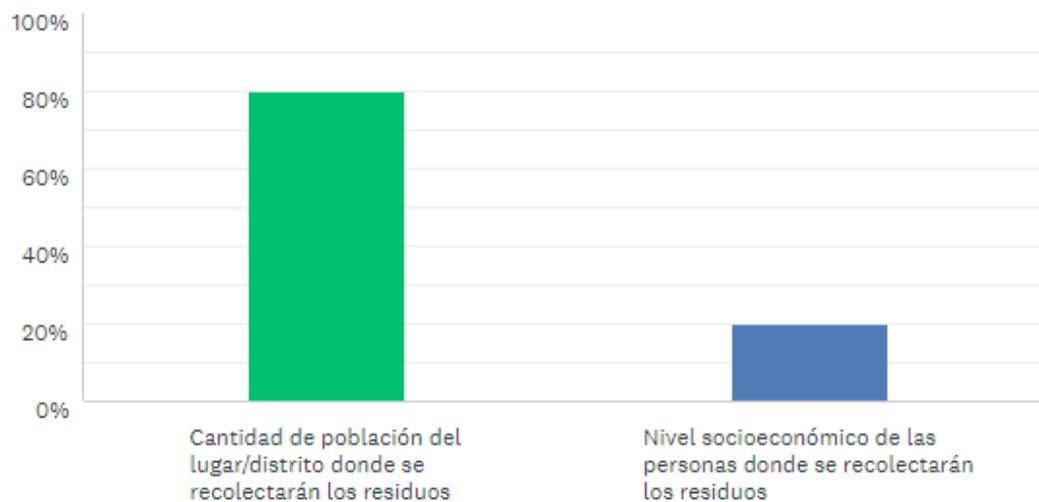


Figura A2. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre la cantidad de población y el nivel socioeconómico de la población.

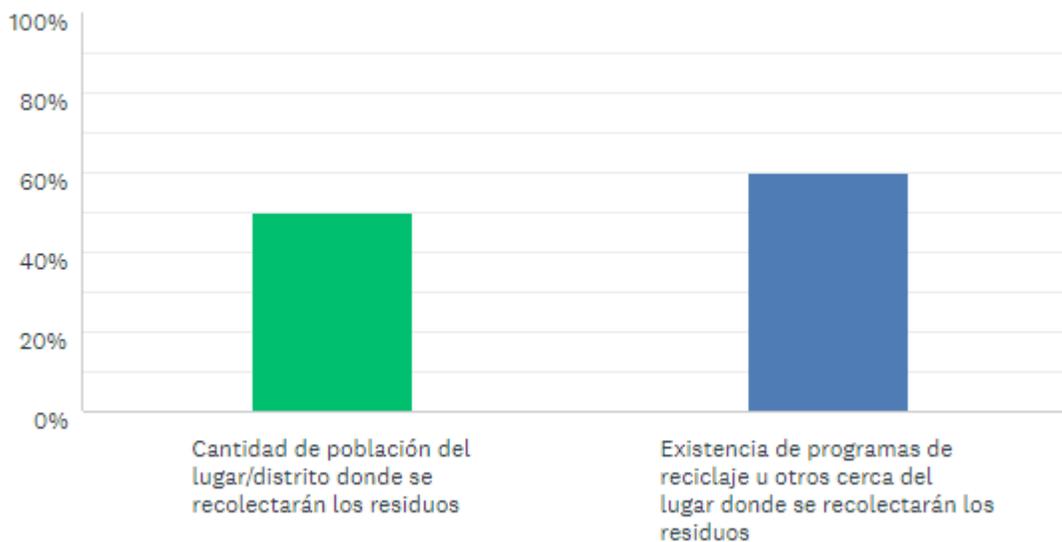


Figura A3. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre la cantidad de población y la existencia de programas similares.

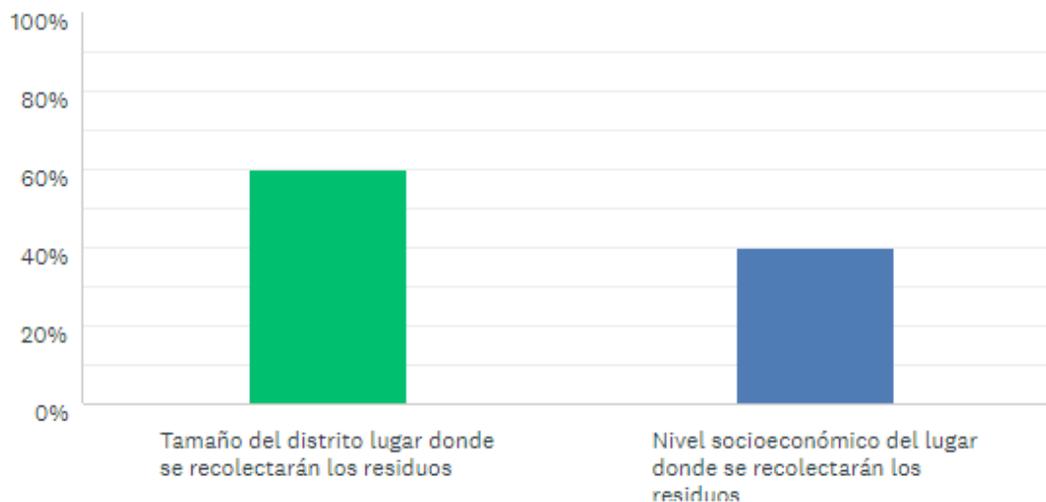


Figura A4. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre el tamaño del lugar y el nivel socioeconómico de la población.

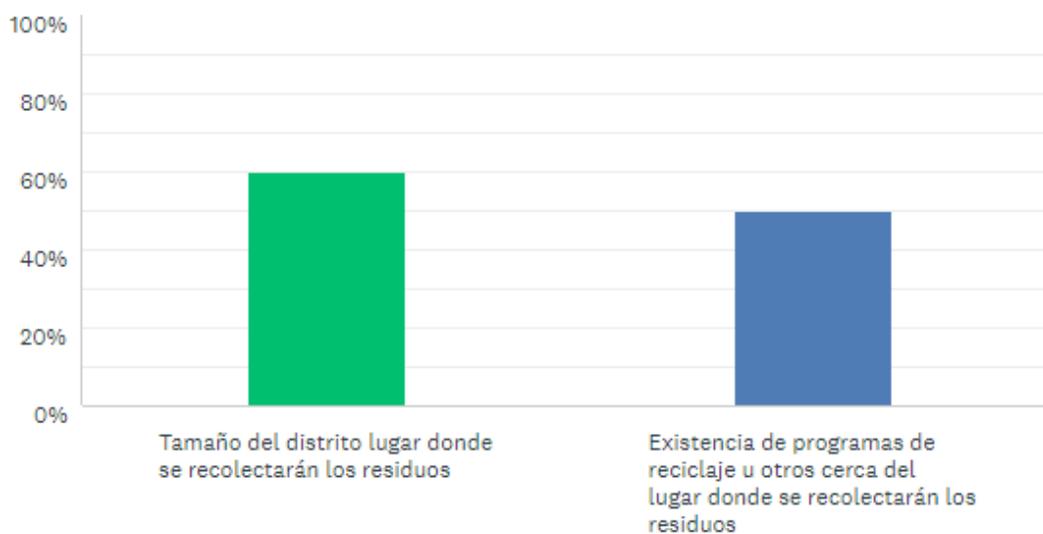


Figura A5. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre el tamaño del lugar y la existencia de programas similares.

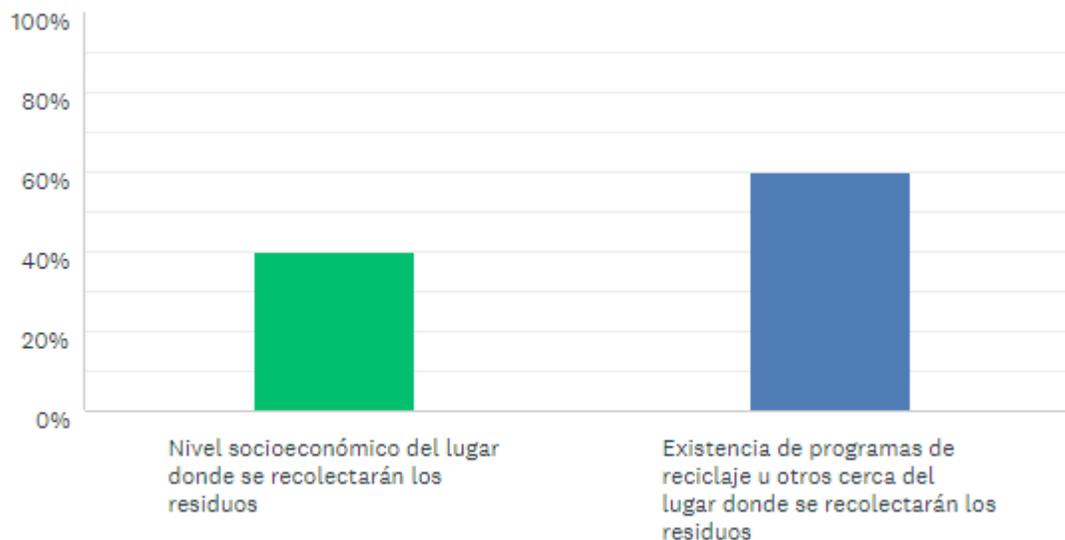


Figura A6. Comparación de la importancia según el juicio de expertos entre el nivel socioeconómico de la población y la existencia de programas similares.

Tabla A2. Matriz principal del AHP.

Distritos	Índice de desarrollo social	Cantidad de población (habitantes)	Cantidad de programas o rutas de reciclaje	Tamaño del distrito (km ²)
Índice de Desarrollo Social	1	1/2	1	1
Cantidad de población	2	1	1	3
Madurez de los programas de reciclajes presentes	1	1	1	1
Tamaño del distrito	1	1/3	1	1

Tabla A3. Matriz de la comparación del índice de desarrollo social.

Distritos	Purrall	Rancho Redondo	Guadalupe	San Francisco	Calle Blancos	Mata de Plátano	Ipís
Purrall	1	1/3	1/7	1/6	1/6	1/7	1/4
Rancho Redondo	3	1	1/6	1/2	1/2	1/2	1
Guadalupe	7	6	1	1	1	1	2
San Francisco	4	4	1/2	1	1	1	2
Calle Blancos	7	6	1	1	1	1	2
Mata de Plátano	7	9	1	1	1	1	2
Ipís	3	2	1/3	1/2	1/2	1/2	1

Tabla A4. Matriz de la comparación de la cantidad de población.

Distritos	Purrall	Rancho Redondo	Guadalupe	San Francisco	Calle Blancos	Mata de Plátano	Ipís
Purrall	1	7	3	7	3	2	1
Racho Redondo	1/7	1	1/5	1	1/5	1/2	1/7
Guadalupe	1/3	5	1	5	1	1/2	1/2
San Francisco	1/7	1	1/5	1	1/5	1/4	1/7
Calle Blancos	1/3	5	1	5	1	1/2	1/2
Mata de Platano	1/2	2	2	4	2	1	1/2
Ipis	1	7	2	7	2	2	1

Tabla A5. Matriz de la comparación de programas de reciclaje.

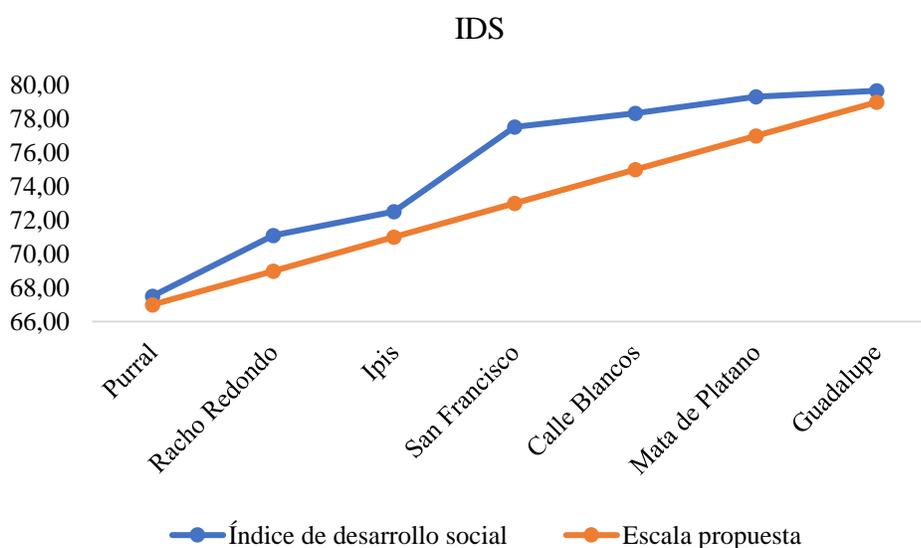
Distritos	Purrall	Rancho Redondo	Guadalupe	San Francisco	Calle Blancos	Mata de Plátano	Ipís
Purrall	1	2	1/2	2	1	1/3	1/2
Racho Redondo	1/2	1	1/4	1	1/2	1/6	1/3
Guadalupe	2	4	1	4	2	1/2	1
San Francisco	1/2	1	1/4	1	1/2	1/6	1/3
Calle Blancos	1	2	1/2	2	1	1/3	1/2
Mata de Platano	3	6	2	6	3	1	2
Ipis	2	3	1	3	2	1/2	1

Tabla A6. Matriz de los tamaños de distrito.

Distritos	Purrall	Rancho Redondo	Guadalupe	San Francisco	Calle Blancos	Mata de Plátano	Ipís
Purrall	1	2	1/4	1/7	1/4	1/2	1/4
Racho Redondo	1/2	1	1/7	1/9	1/7	1/3	1/7
Guadalupe	4	7	1	1/3	1	5	1
San Francisco	7	9	3	1	3	5	3
Calle Blancos	4	7	1	1/3	1	3	1
Mata de Platano	2	3	1/5	1/5	1/3	1	2
Ipis	4	7	1	1/3	1	1/2	1

Tabla A7. Datos de IDS por distrito con la respectiva escala propuesta.

Distrito	Índice de desarrollo social	Escala propuesta
Purrall	67.51	67
Racho Redondo	71.10	69
Ipis	72.52	71
San Francisco	77.54	73
Calle Blancos	78.35	75
Mata de Platano	79.32	77
Guadalupe	79.68	79

**Figura A7.** Comparación de los datos de IDS con una escala propuesta.**Tabla A8.** Datos de cantidad de población por distrito con la respectiva escala propuesta.

Distritos	Cantidad de población (2016)	Escala propuesta
San Francisco	2324	2500
Racho Redondo	3008	7500
Mata de Platano	20057	12500
Calle Blancos	22293	17500
Guadalupe	22558	22500
Ipis	30131	27500
Purrall	33186	32500

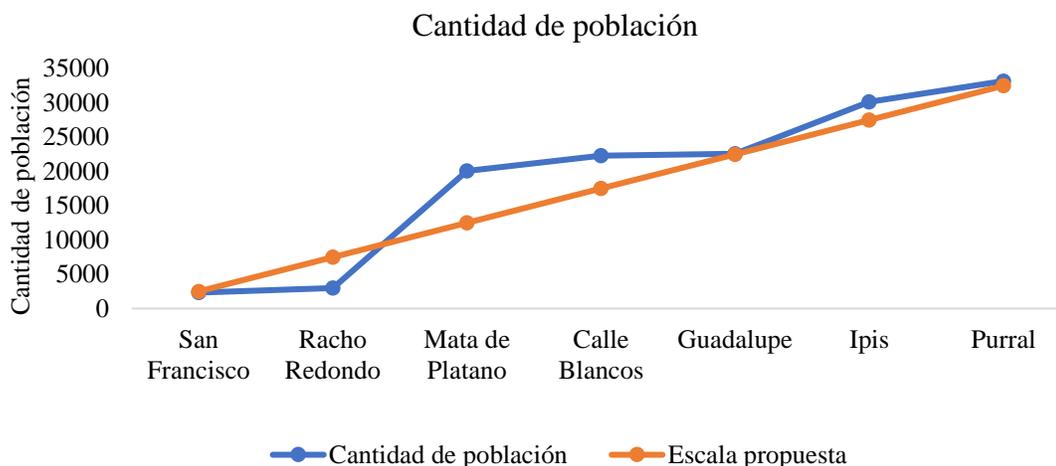


Figura A8. Comparación de los datos de cantidad de población con una escala propuesta.

Tabla A9. Datos de tamaño por distrito con la respectiva escala propuesta.

Districtos	Tamaño del distrito	Escala propuesta
San Francisco	0.5	0.5
Calle Blancos	2.39	2.5
Guadalupe	2.48	4.5
Ipis	2.77	6.5
Mata de Platano	7.85	8.5
Purral	9.99	10.5
Racho Redondo	12.52	12.5

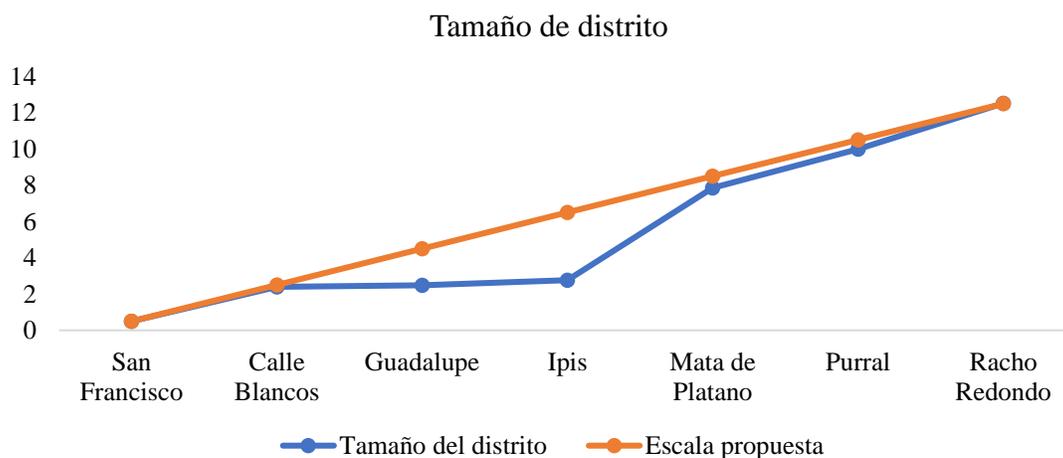
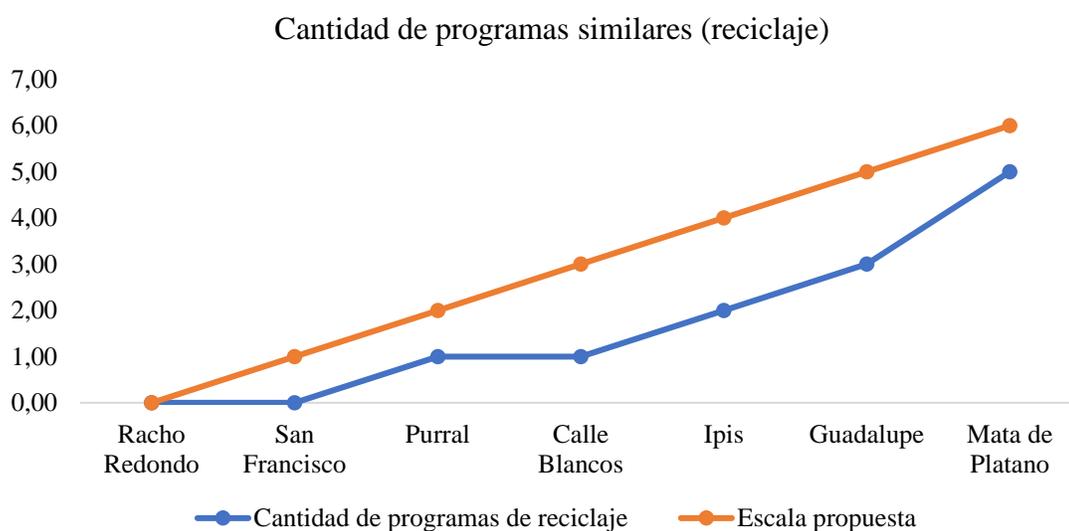


Figura A9. Comparación de los datos de tamaño de distrito con una escala propuesta.

Tabla A10. Datos de cantidad de programas de reciclaje con la respectiva escala propuesta

Distrito	Cantidad de programas de reciclaje	Escala propuesta
Racho Redondo	0.00	0
San Francisco	0.00	1
Purrall	1.00	2
Calle Blancos	1.00	3
Ipís	2.00	4
Guadalupe	3.00	5
Mata de Platano	5.00	6

**Figura A10.** Comparación de la cantidad de programas similares (reciclaje) con una escala propuesta.

ANEXO 2. RUTEO CON EL PROGRAMA OPTIMOROUTE

Tabla A11. Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Purral

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	2	7	9.948875	-84.030983
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	3	2	9.951781	-84.031089
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	4	1	9.949763	-84.031357
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	5	6	9.951157	-84.030657
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	6	3	9.949171	-84.031326
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	7	12	9.949271	-84.02959
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	8	11	9.949968	-84.029456
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	9	10	9.950037	-84.029858
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	10	5	9.950302	-84.030284
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	11	8	9.951236	-84.030062
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	12	16	9.950461	-84.029804
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	13	9	9.950391	-84.029386
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	14	13	9.950368	-84.029165
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	15	144	9.950266	-84.029006
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	16	14	9.949715	-84.029059
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	17	17	9.949203	-84.028894
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	18	23	9.949626	-84.028629
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	19	27	9.950424	-84.028625
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	20	18	9.950815	-84.028988
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	21	20	9.951047	-84.028615
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	22	19	9.951359	-84.02905
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	23	22	9.951243	-84.027588
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	24	26	9.950524	-84.027363
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	25	28	9.950038	-84.027406
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	26	25	9.950339	-84.027781
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	27	21	9.950817	-84.027682
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	28	24	9.950286	-84.02821
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	29	29	9.949748	-84.028017
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	30	30	9.949293	-84.027722
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	31	31	9.949652	-84.027003
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	32	32	9.948722	-84.026885
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	33	37	9.949621	-84.025298
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	34	36	9.948448	-84.02607
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	35	35	9.949372	-84.026172
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	36	44	9.951993	-84.026585
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	37	43	9.950413	-84.026081
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	38	46	9.953367	-84.02534
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	39	45	9.9524	-84.025791
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	40	145	9.95086	-84.025002
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	41	146	9.949172	-84.023488
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	42	148	9.950074	-84.022913

Tabla A11. (cont.) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Purral

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	43	149	9.950485	-84.02379
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	44	47	9.953631	-84.024509
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	45	150	9.952043	-84.023155
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	46	42	9.951105	-84.022529
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	47	39	9.949753	-84.022326
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	48	41	9.949156	-84.021526
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	49	40	9.949732	-84.021542
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	50	38	9.948305	-84.021746
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	51	57	9.953792	-84.020335
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	52	56	9.954379	-84.021081
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	53	55	9.954844	-84.019327
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	54	58	9.953301	-84.01974
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	55	60	9.952535	-84.020078
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	56	66	9.951362	-84.019563
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	57	67	9.949798	-84.01923
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	58	68	9.94947	-84.018951
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	59	69	9.949745	-84.017997
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	60	70	9.950712	-84.01805
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	61	61	9.952873	-84.018731
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	62	63	9.95245	-84.018254
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	63	64	9.952545	-84.017476
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	64	72	9.951879	-84.015845
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	65	152	9.954312	-84.01826
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	66	62	9.955536	-84.017787
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	67	76	9.955071	-84.015856
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	68	78	9.954253	-84.015799
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	69	77	9.95441	-84.015186
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	70	84	9.953837	-84.014014
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	71	82	9.953049	-84.012963
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	72	81	9.951042	-84.013113
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	73	83	9.952669	-84.012883
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	74	86	9.953822	-84.011828
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	75	90	9.95112	-84.010935
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	76	89	9.951921	-84.011388
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	77	91	9.955852	-84.010249
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	78	92	9.953057	-84.010045
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	79	93	9.95255	-84.009951
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	80	94	9.95376	-84.008876
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	81	96	9.953722	-84.007627
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	82	98	9.954486	-84.004984
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	83	102	9.95397	-84.003961
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	84	99	9.953406	-84.004173
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	85	100	9.953482	-84.003090
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	86	103	9.954681	-84.003839

Tabla A11. (cont.) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Purral

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	87	104	9.957383	-84.004895
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	88	110	9.956221	-84.003313
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	89	107	9.957122	-84.003703
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	90	106	9.957483	-84.003865
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	91	105	9.957476	-84.00462
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	92	108	9.956758	-84.003597
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	93	109	9.956415	-84.00339
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	94	118	9.955435	-84.002287
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	95	117	9.95487	-84.00337
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	96	115	9.954479	-84.003135
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	97	101	9.954062	-84.002932
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	98	112	9.953335	-84.002451
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	99	113	9.953721	-84.002102
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	100	114	9.954515	-84.002066
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	101	116	9.95499	-84.00217
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	102	111	9.956177	-84.002841
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	103	119	9.957323	-84.003492
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	104	120	9.956785	-84.002973
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	105	121	9.957954	-84.002368
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	106	122	9.957456	-84.001146
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	107	123	9.958078	-84.000365
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	108	124	9.958665	-83.999621
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	109	125	9.957132	-83.997758
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	110	126	9.959682	-83.998336
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	111	130	9.9596	-83.997028
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	112	131	9.958923	-83.997629
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	113	129	9.959154	-83.996809
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	114	133	9.958144	-83.994902
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	115	132	9.956663	-83.995933
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	116	143	9.954955	-83.982578
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	117	142	9.955388	-83.985611
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	118	140	9.958803	-83.991392
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	119	141	9.959727	-83.991345
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	120	137	9.961876	-83.990825
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	121	138	9.961803	-83.991271
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	122	139	9.960824	-83.991262
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	123	136	9.960286	-83.992116
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	124	135	9.961291	-83.993602
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	125	134	9.961647	-83.994707
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	126	127	9.960078	-83.997835
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	127	97	9.953514	-84.00622
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	128	95	9.952737	-84.008187
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	129	87	9.954597	-84.014213
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	130	85	9.954946	-84.013296
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	131	88	9.95492	-84.012872

Tabla A11. (cont.) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Purral

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	132	79	9.952399	-84.014229
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	133	80	9.952431	-84.013623
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	134	73	9.95161	-84.01569
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	135	74	9.951578	-84.015266
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	136	75	9.952905	-84.015448
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	137	54	9.953681	-84.022122
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	138	53	9.954558	-84.022476
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	139	52	9.953951	-84.023071
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	140	48	9.95291	-84.024074
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	141	50	9.953581	-84.023844

Tabla A12. Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Rancho Redondo

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	2	7	9.948875	-84.030983
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	3	2	9.951781	-84.031089
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	4	1	9.949763	-84.031357
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	5	6	9.951157	-84.030657
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	6	3	9.949171	-84.031326
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	7	12	9.949271	-84.02959
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	8	11	9.949968	-84.029456
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	9	10	9.950037	-84.029858
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	10	5	9.950302	-84.030284
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	11	8	9.951236	-84.030062
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	12	16	9.950461	-84.029804
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	13	9	9.950391	-84.029386
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	14	13	9.950368	-84.029165
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	15	144	9.950266	-84.029006
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	16	14	9.949715	-84.029059
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	17	17	9.949203	-84.028894
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	18	23	9.949626	-84.028629
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	19	27	9.950424	-84.028625
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	20	18	9.950815	-84.028988
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	21	20	9.951047	-84.028615
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	22	19	9.951359	-84.02905
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	23	22	9.951243	-84.027588
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	24	26	9.950524	-84.027363
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	25	28	9.950038	-84.027406
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	26	25	9.950339	-84.027781
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	27	21	9.950817	-84.027682
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	28	24	9.950286	-84.02821
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	29	29	9.949748	-84.028017
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	30	30	9.949293	-84.027722
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	31	31	9.949652	-84.027003

Tabla A12. (cont.) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Rancho Redondo

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	32	32	9.948722	-84.026885
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	33	37	9.949621	-84.025298
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	34	36	9.948448	-84.02607
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	35	35	9.949372	-84.026172
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	36	44	9.951993	-84.026585
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	37	43	9.950413	-84.026081
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	38	46	9.953367	-84.02534
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	39	45	9.9524	-84.025791
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	40	145	9.95086	-84.025002
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	41	146	9.949172	-84.023488
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	42	148	9.950074	-84.022913
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	43	149	9.950485	-84.02379
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	44	47	9.953631	-84.024509
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	45	48	9.95291	-84.024074
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	46	50	9.953581	-84.023844
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	47	150	9.952043	-84.023155
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	48	39	9.949753	-84.022326
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	49	38	9.948305	-84.021746
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	50	41	9.949156	-84.021526
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	51	40	9.949732	-84.021542
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	52	42	9.951105	-84.022529
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	53	52	9.953951	-84.023071
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	54	53	9.954558	-84.022476
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	55	54	9.953681	-84.022122
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	56	57	9.953792	-84.020335
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	57	56	9.954379	-84.021081
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	58	55	9.954844	-84.019327
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	59	58	9.953301	-84.01974
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	60	60	9.952535	-84.020078
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	61	66	9.951362	-84.019563
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	62	67	9.949798	-84.01923
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	63	68	9.94947	-84.018951
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	64	69	9.949745	-84.017997
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	65	70	9.950712	-84.01805
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	66	61	9.952873	-84.018731
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	67	63	9.95245	-84.018254
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	68	64	9.952545	-84.017476
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	69	72	9.951879	-84.015845
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	70	73	9.95161	-84.01569
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	71	74	9.951578	-84.015266
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	72	75	9.952905	-84.015448
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	73	152	9.954312	-84.01826

Tabla A12. (cont.) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Rancho Redondo

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	74	62	9.955536	-84.017787
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	75	78	9.954253	-84.015799
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	76	76	9.955071	-84.015856
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	77	77	9.95441	-84.015186
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	78	79	9.952399	-84.014229
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	79	80	9.952431	-84.013623
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	80	84	9.953837	-84.014014
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	81	81	9.951042	-84.013113
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	82	83	9.952669	-84.012883
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	83	82	9.953049	-84.012963
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	84	87	9.954597	-84.014213
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	85	85	9.954946	-84.013296
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	86	88	9.95492	-84.012872
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	87	86	9.953822	-84.011828
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	88	90	9.95112	-84.010935
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	89	89	9.951921	-84.011388
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	90	91	9.955852	-84.010249
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	91	93	9.95255	-84.009951
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	92	92	9.953057	-84.010045
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	93	94	9.95376	-84.008876
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	94	95	9.952737	-84.008187
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	95	96	9.953722	-84.007627
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	96	97	9.953514	-84.00622
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	97	98	9.954486	-84.004984
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	98	102	9.95397	-84.003961
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	99	99	9.953406	-84.004173
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	100	100	9.953482	-84.00309
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	101	103	9.954681	-84.003839
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	102	104	9.957383	-84.004895
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	103	110	9.956221	-84.003313
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	104	107	9.957122	-84.003703
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	105	105	9.957476	-84.00462
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	106	106	9.957483	-84.003865
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	107	108	9.956758	-84.003597
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	108	109	9.956415	-84.00339
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	109	117	9.95487	-84.00337
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	110	115	9.954479	-84.003135
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	111	101	9.954062	-84.002932
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	112	112	9.953335	-84.002451
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	113	113	9.953721	-84.002102
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	114	114	9.954515	-84.002066
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	115	116	9.95499	-84.00217
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	116	118	9.955435	-84.002287
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	117	111	9.956177	-84.002841

Tabla A12. (cont.) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en Rancho Redondo

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	118	119	9.957323	-84.003492
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	119	120	9.956785	-84.002973
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	120	121	9.957954	-84.002368
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	121	122	9.957456	-84.001146
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	122	123	9.958078	-84.000365
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	123	124	9.958665	-83.999621
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	124	125	9.957132	-83.997758
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	125	126	9.959682	-83.998336
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	126	130	9.9596	-83.997028
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	127	131	9.958923	-83.997629
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	128	129	9.959154	-83.996809
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	129	127	9.960078	-83.997835
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	130	134	9.961647	-83.994707
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	131	135	9.961291	-83.993602
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	132	136	9.960286	-83.992116
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	133	139	9.960824	-83.991262
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	134	138	9.961803	-83.991271
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	135	137	9.961876	-83.990825
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	136	141	9.959727	-83.991345
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	137	140	9.958803	-83.991392
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	138	143	9.954955	-83.982578
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	139	142	9.955388	-83.985611
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	140	132	9.956663	-83.995933
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	141	133	9.958144	-83.994902

Tabla A13. Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en el sector rural de Mata de Plátano

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	1	3	9.949171	-84.031326
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	2	6	9.951157	-84.030657
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	3	2	9.951781	-84.031089
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	4	1	9.949763	-84.031357
Break	Driver 001	Vehicle 001	5	7	9.948875	-84.030983
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	6	7	9.948875	-84.030983
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	7	12	9.949271	-84.02959
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	8	11	9.949968	-84.029456
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	9	10	9.950037	-84.029858
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	10	5	9.950302	-84.030284
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	11	8	9.951236	-84.030062
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	12	16	9.950461	-84.029804
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	13	9	9.950391	-84.029386

Tabla A13. (cont) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en el sector rural de Mata de Plátano

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	14	13	9.950368	-84.029165
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	15	144	9.950266	-84.029006
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	16	14	9.949715	-84.029059
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	17	17	9.949203	-84.028894
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	18	23	9.949626	-84.028629
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	19	27	9.950424	-84.028625
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	20	18	9.950815	-84.028988
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	21	20	9.951047	-84.028615
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	22	19	9.951359	-84.02905
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	23	22	9.951243	-84.027588
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	24	26	9.950524	-84.027363
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	25	28	9.950038	-84.027406
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	26	25	9.950339	-84.027781
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	27	21	9.950817	-84.027682
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	28	24	9.950286	-84.02821
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	29	29	9.949748	-84.028017
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	30	30	9.949293	-84.027722
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	31	31	9.949652	-84.027003
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	32	32	9.948722	-84.026885
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	33	36	9.948448	-84.02607
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	34	37	9.949621	-84.025298
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	35	35	9.949372	-84.026172
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	36	44	9.951993	-84.026585
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	37	43	9.950413	-84.026081
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	38	46	9.953367	-84.02534
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	39	45	9.9524	-84.025791
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	40	145	9.95086	-84.025002
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	41	146	9.949172	-84.023488
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	42	148	9.950074	-84.022913
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	43	149	9.950485	-84.02379
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	44	47	9.953631	-84.024509
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	45	48	9.95291	-84.024074
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	46	50	9.953581	-84.023844
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	47	150	9.952043	-84.023155
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	48	42	9.951105	-84.022529
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	49	39	9.949753	-84.022326
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	50	41	9.949156	-84.021526
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	51	40	9.949732	-84.021542
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	52	38	9.948305	-84.021746
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	53	52	9.953951	-84.023071
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	54	53	9.954558	-84.022476
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	55	54	9.953681	-84.022122
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	56	57	9.953792	-84.020335

Tabla A13. (cont) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en el sector rural de Mata de Plátano

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	57	56	9.954379	-84.021081
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	58	55	9.954844	-84.019327
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	59	58	9.953301	-84.01974
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	60	60	9.952535	-84.020078
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	61	67	9.949798	-84.01923
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	62	68	9.94947	-84.018951
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	63	69	9.949745	-84.017997
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	64	70	9.950712	-84.01805
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	65	66	9.951362	-84.019563
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	66	61	9.952873	-84.018731
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	67	63	9.95245	-84.018254
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	68	64	9.952545	-84.017476
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	69	72	9.951879	-84.015845
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	70	73	9.95161	-84.01569
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	71	74	9.951578	-84.015266
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	72	75	9.952905	-84.015448
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	73	152	9.954312	-84.01826
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	74	62	9.955536	-84.017787
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	75	78	9.954253	-84.015799
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	76	76	9.955071	-84.015856
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	77	77	9.95441	-84.015186
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	78	79	9.952399	-84.014229
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	79	80	9.952431	-84.013623
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	80	84	9.953837	-84.014014
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	81	82	9.953049	-84.012963
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	82	83	9.952669	-84.012883
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	83	81	9.951042	-84.013113
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	84	87	9.954597	-84.014213
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	85	85	9.954946	-84.013296
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	86	88	9.95492	-84.012872
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	87	86	9.953822	-84.011828
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	88	90	9.95112	-84.010935
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	89	89	9.951921	-84.011388
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	90	91	9.955852	-84.010249
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	91	93	9.95255	-84.009951
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	92	92	9.953057	-84.010045
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	93	94	9.95376	-84.008876
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	94	95	9.952737	-84.008187
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	95	96	9.953722	-84.007627
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	96	97	9.953514	-84.00622
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	97	98	9.954486	-84.004984
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	98	102	9.95397	-84.003961
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	99	99	9.953406	-84.004173
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	100	100	9.953482	-84.00309

Tabla A13. (cont) Resultado del ruteo de Mata de Plátano hacia la ubicación en el sector rural de Mata de Plátano

Order Type	Driver	Vehicle	Stop Number	Location	Latitude	Longitude
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	101	103	9.954681	-84.003839
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	102	104	9.957383	-84.004895
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	103	110	9.956221	-84.003313
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	104	109	9.956415	-84.00339
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	105	108	9.956758	-84.003597
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	106	107	9.957122	-84.003703
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	107	105	9.957476	-84.00462
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	108	106	9.957483	-84.003865
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	109	118	9.955435	-84.002287
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	110	117	9.95487	-84.00337
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	111	115	9.954479	-84.003135
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	112	101	9.954062	-84.002932
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	113	112	9.953335	-84.002451
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	114	113	9.953721	-84.002102
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	115	114	9.954515	-84.002066
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	116	116	9.95499	-84.00217
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	117	111	9.956177	-84.002841
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	118	119	9.957323	-84.003492
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	119	120	9.956785	-84.002973
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	120	121	9.957954	-84.002368
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	121	122	9.957456	-84.001146
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	122	123	9.958078	-84.000365
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	123	124	9.958665	-83.999621
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	124	125	9.957132	-83.997758
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	125	126	9.959682	-83.998336
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	126	127	9.960078	-83.997835
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	127	130	9.9596	-83.997028
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	128	129	9.959154	-83.996809
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	129	131	9.958923	-83.997629
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	130	134	9.961398	-83.994889
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	131	135	9.961291	-83.993602
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	132	136	9.960286	-83.992116
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	133	137	9.961876	-83.990825
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	134	138	9.961803	-83.991271
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	135	139	9.960824	-83.991262
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	136	141	9.959727	-83.991345
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	137	140	9.958803	-83.991392
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	138	133	9.958144	-83.994902
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	139	132	9.956663	-83.995933
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	140	142	9.955388	-83.985611
Pickup	Driver 001	Vehicle 001	141	143	9.954955	-83.982578

Tabla A14. Resultado del ruteo de la Feria del Agricultor hacia la ubicación en el sector rural de Mata de Plátano

Order Type	Stop Number	Location	Address	Latitude	Longitude
Pickup	1	Plantel	Union Jardin, San José Province, Guadalupe, Costa Rica	9.942893	-84.053128
Pickup	2	Feria del Agricultor	-	9.947853	-84.055625
Pickup	3	Final Mata de Platano	-	9.955253	-83.979117

Tabla A15. Resultado del ruteo de la Feria del Agricultor hacia la ubicación en Purral

Order Type	Stop Number	Location	Address	Latitude	Longitude
Pickup	1	Plantel	Union Jardin, San José Province, Guadalupe, Costa Rica	9.942893	-84.053128
Pickup	2	Feria del Agricultor	-	9.947853	-84.055625
Pickup	3	Final optimo del canton	-	9.955163	-84.032284

Tabla A16. Resultado del ruteo de la Feria del Agricultor hacia la ubicación en el sector rural de Rancho Redondo

Order Type	Stop Number	Location	Address	Latitude	Longitude
Pickup	1	Plantel	Union Jardin, San José Province, Guadalupe, Costa Rica	9.942893	-84.053128
Pickup	2	Feria del Agricultor	-	9.947853	-84.055625
Pickup	3	Final Rancho Redondo	-	9.962804	-83.95318

Tabla A17. Datos de longitud y latitud de la ruta propuesta, resaltando los puntos que se encuentran en la ruta actual 5.1.

Stop Number	Location	Latitude	Longitude
1	3	9.949171	-84.031326
2	6	9.951157	-84.030657
3	2	9.951781	-84.031089
4	1	9.949763	-84.031357

Tabla A17. (cont) Datos de longitud y latitud de la ruta propuesta, resaltando los puntos que se encuentran en la ruta actual 5.1.

Stop Number	Location	Latitude	Longitude
5	7	9.948875	-84.030983
6	7	9.948875	-84.030983
7	12	9.949271	-84.02959
8	11	9.949968	-84.029456
9	10	9.950037	-84.029858
10	5	9.950302	-84.030284
11	8	9.951236	-84.030062
12	16	9.950461	-84.029804
13	9	9.950391	-84.029386
14	13	9.950368	-84.029165
15	144	9.950266	-84.029006
16	14	9.949715	-84.029059
17	17	9.949203	-84.028894
18	23	9.949626	-84.028629
19	27	9.950424	-84.028625
20	18	9.950815	-84.028988
21	20	9.951047	-84.028615
22	19	9.951359	-84.02905
23	22	9.951243	-84.027588
24	26	9.950524	-84.027363
25	28	9.950038	-84.027406
26	25	9.950339	-84.027781
27	21	9.950817	-84.027682
28	24	9.950286	-84.02821
29	29	9.949748	-84.028017
30	30	9.949293	-84.027722
31	31	9.949652	-84.027003
32	32	9.948722	-84.026885
33	36	9.948448	-84.02607
34	37	9.949621	-84.025298
35	35	9.949372	-84.026172
36	44	9.951993	-84.026585
37	43	9.950413	-84.026081
38	46	9.953367	-84.02534
39	45	9.9524	-84.025791
40	145	9.95086	-84.025002
41	146	9.949172	-84.023488
42	148	9.950074	-84.022913
43	149	9.950485	-84.02379
44	47	9.953631	-84.024509
45	48	9.95291	-84.024074
46	50	9.953581	-84.023844
47	150	9.952043	-84.023155
48	42	9.951105	-84.022529

Tabla A17. (cont) Datos de longitud y latitud de la ruta propuesta, resaltando los puntos que se encuentran en la ruta actual 5.1.

Stop Number	Location	Latitudo	Longitudo
49	39	9.949753	-84.022326
50	41	9.949156	-84.021526
51	40	9.949732	-84.021542
52	38	9.948305	-84.021746
53	52	9.953951	-84.023071
54	53	9.954558	-84.022476
55	54	9.953681	-84.022122
56	57	9.953792	-84.020335
57	56	9.954379	-84.021081
58	55	9.954844	-84.019327
59	58	9.953301	-84.01974
60	60	9.952535	-84.020078
61	67	9.949798	-84.01923
62	68	9.94947	-84.018951
63	69	9.949745	-84.017997
64	70	9.950712	-84.01805
65	66	9.951362	-84.019563
66	61	9.952873	-84.018731
67	63	9.95245	-84.018254
68	64	9.952545	-84.017476
69	72	9.951879	-84.015845
70	73	9.95161	-84.01569
71	74	9.951578	-84.015266
72	75	9.952905	-84.015448
73	152	9.954312	-84.01826
74	62	9.955536	-84.017787
75	78	9.954253	-84.015799
76	76	9.955071	-84.015856
77	77	9.95441	-84.015186
78	79	9.952399	-84.014229
79	80	9.952431	-84.013623
80	84	9.953837	-84.014014
81	82	9.953049	-84.012963
82	83	9.952669	-84.012883
83	81	9.951042	-84.013113
84	87	9.954597	-84.014213
85	85	9.954946	-84.013296
86	88	9.95492	-84.012872
87	86	9.953822	-84.011828
88	90	9.95112	-84.010935
89	89	9.951921	-84.011388
90	91	9.955852	-84.010249
91	93	9.95255	-84.009951
92	92	9.953057	-84.010045

Tabla A17. (cont) Datos de longitud y latitud de la ruta propuesta, resaltando los puntos que se encuentran en la ruta actual 5.1.

Stop Number	Location	Latitudo	Longitudo
93	94	9.95376	-84.008876
94	95	9.952737	-84.008187
95	96	9.953722	-84.007627
96	97	9.953514	-84.00622
97	98	9.954486	-84.004984
98	102	9.95397	-84.003961
99	99	9.953406	-84.004173
100	100	9.953482	-84.00309
101	103	9.954681	-84.003839
102	104	9.957383	-84.004895
103	110	9.956221	-84.003313
104	109	9.956415	-84.00339
105	108	9.956758	-84.003597
106	107	9.957122	-84.003703
107	105	9.957476	-84.00462
108	106	9.957483	-84.003865
109	118	9.955435	-84.002287
110	117	9.95487	-84.00337
111	115	9.954479	-84.003135
112	101	9.954062	-84.002932
113	112	9.953335	-84.002451
114	113	9.953721	-84.002102
115	114	9.954515	-84.002066
116	116	9.95499	-84.00217
117	111	9.956177	-84.002841
118	119	9.957323	-84.003492
119	120	9.956785	-84.002973
120	121	9.957954	-84.002368
121	122	9.957456	-84.001146
122	123	9.958078	-84.000365
123	124	9.958665	-83.999621
124	125	9.957132	-83.997758
125	126	9.959682	-83.998336
126	127	9.960078	-83.997835
127	130	9.9596	-83.997028
128	129	9.959154	-83.996809
129	131	9.958923	-83.997629
130	134	9.961398	-83.994889
131	135	9.961291	-83.993602
132	136	9.960286	-83.992116
133	137	9.961876	-83.990825
134	138	9.961803	-83.991271
135	139	9.960824	-83.991262
136	141	9.959727	-83.991345

Tabla A17. (cont) Datos de longitud y latitud de la ruta propuesta, resaltando los puntos que se encuentran en la ruta actual 5.1.

Stop Number	Location	Latitude	Longitude
137	140	9.958803	-83.991392
138	133	9.958144	-83.994902
139	132	9.956663	-83.995933
140	142	9.955388	-83.985611
141	143	9.954955	-83.982578