



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TESIS DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN DE TÍTULO DE INGENIERO
INDUSTRIAL

TEMA:

“DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD
ÓPTIMA DE CONTENEDORES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD
DE IBARRA”

AUTOR(A): IMBAQUINGO USIÑA WILSON GEOVANNY
DIRECTOR: MSC. ING. ISRAEL DAVID HERRERA GRANDA

IBARRA- ECUADOR

2018



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	040185956-6		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny		
DIRECCIÓN:	Chutan Bajo - San Gabriel – Carchi		
EMAIL:	wgimbaquingo@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2292 – 378	TELÉFONO MÓVIL:	0960266560

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD ÓPTIMA DE CONTENEDORES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE IBARRA
AUTOR (ES):	Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny
FECHA:	15 de junio de 2018
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería Industrial
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Israel David Herrera Granda

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, **Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny**, con cédula de identidad Nro. **040185956-6**, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

3. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 15 días del mes de junio de 2018

EL AUTOR:



.....

Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, **Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny**, con cédula de identidad Nro. 040185956-6, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autora de la obra o trabajo de grado denominado: **“DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD ÓPTIMA DE CONTENEDORES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE IBARRA”**, que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERO INDUSTRIAL** en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 15 días del mes de junio de 2018

Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny

C.C 040185956-6



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

DECLARACIÓN

Yo, **Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny**, con cédula de identidad Nro. **040185956-6**, declaro bajo juramento que el trabajo de grado con el tema “**DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD ÓPTIMA DE CONTENEDORES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE IBARRA**”, corresponde a mi autoría y que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Además, a través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ibarra, 15 de junio del 2018

AUTOR:

.....
Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny
C.C: **040185956-6**



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

MSc. Israel David Herrera Granda, Director del Trabajo de Grado desarrollado por el señor estudiante **IMBAQUINGO USIÑA WILSON GEOVANNY**:

CERTIFICA

Que, el Proyecto de Trabajo de grado titulado “**DISEÑO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD ÓPTIMA DE CONTENEDORES DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE IBARRA**”, ha sido elaborado en su totalidad por el señor estudiante **Imbaquingo Usiña Wilson Geovanny** bajo mi dirección, para la obtención del título de Ingeniero Industrial. Luego de ser revisada, considerando que se encuentra concluido y cumple con las exigencias y requisitos académicos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Industrial, autoriza su presentación y defensa para que pueda ser juzgado por el tribunal correspondiente.

Ibarra, 15 de junio del 2018

MSc. Israel David Herrera Granda
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Marlene

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor y su apoyo constante.

AGRADECIMIENTO

A Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; a cada uno de los que son parte de mi familia a mi madre Marlene, mis abuelitos Hernán y Piedad.

A mis hermanos Robinson y Héctor y a todos mis tíos; por siempre haberme dado su fuerza y apoyo incondicional que me han ayudado y llevado hasta donde estoy ahora.

Por último, a mis compañeros porque en esta armonía grupal lo hemos logrado y a mi director quién me ayudó en todo momento, Msc. Israel Herrera.

ÍNDICE

DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTO.....	VIII
ÍNDICE	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO I. GENERALIDADES	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Alcance.....	4
1.5. Aspectos Generales	5
1.6. Ubicación del Proyecto	5
1.7. Características Físicas	6
1.8. Características del Medio Socio-cultural	7
1.8.1. Población.....	7
1.8.2. Servicio de Salud.....	7
1.8.3. Vialidad	8
1.9. Factores socio económicos del cantón	8
1.9.1. Sector Industrial	8
1.9.2. Sector Agrícola y Ganadero	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	10
2.1. Marco Normativo	10
2.1.1. Marco Normativo Internacional	11
2.1.2. Marco Normativo Nacional.....	12
2.2. Residuos Sólidos Urbanos.....	13
2.2.1. Gestión Integral	13
2.2.1.1. Responsabilidad de los habitantes de la ciudad	14
2.2.1.2. Responsabilidad de los municipios	14
2.2.1.3. Responsabilidad de la empresa	14
2.3. Definiciones Generales de RSU	15
2.3.1. Desechos o Residuos.....	15
2.3.2. Residuos Solidos	15

2.3.3.	Clasificación de los residuos sólidos.....	16
2.3.4.	Tiempo de descomposición.....	17
2.3.5.	Características de los residuos sólidos	18
2.3.5.1.	Humedad	18
2.3.5.2.	Densidad.....	18
2.3.5.3.	Granulometría.....	19
2.4.	Diseño del Modelo Matemático	19
2.4.1.	Recopilación de la información.....	20
2.4.2.	Diseño del sistema y análisis de la información.	21
2.4.3.	Validación de los modelos	22
2.5.	Definiciones Generales Modelación Matemática	24
2.5.1.	Optimización	24
2.5.1.1.	Modelos de Optimización	24
2.5.1.2.	Clasificación de los Modelos	24
2.5.1.3.	El modelo como representación de un sistema	25
2.5.2.	Programación Lineal	28
2.5.2.1.	El modelo lineal multi-variable.....	29
2.5.2.1.1.	Función objetivo.....	29
2.5.2.1.2.	Restricciones.....	30
2.5.3.	Programación Entera Mixta (PEM).....	31
2.5.4.	Programación Multi-objetivo	32
2.6.	Definiciones generales de Software	32
2.6.1.	Sistemas Informáticos Geográficos.....	33
2.6.1.1.	Funciones de los SIG.....	33
2.6.1.2.	Aplicaciones de los SIG	35
2.6.1.3.	Análisis del software gratuito para SIG	38
2.6.1.3.1.	Descripción del software utilizado	39
2.6.2.	Sistema General de Modelaje Algebraico - GAMS	40
2.6.3.	Características Importantes	41
2.6.4.	Tipos de Modelos Básicos.....	41
2.6.5.	GAMS Solvers	41
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA		43
3.1.	Análisis de la situación actual	43

3.2.	Construcción del Modelo Matemático	44
3.2.1.	Función Objetivo	46
3.2.2.	Indicadores de eficiencia del modelo	46
3.2.2.1.	Indicador de minimización	46
3.2.2.2.	Indicador de satisfacción	46
3.2.3.	Restricciones	47
3.3.	Definiciones básicas de GAMS.....	49
CAPÍTULO IV. RESULTADOS		51
4.1.	Cartografía.....	51
4.1.1.	Mapeo en QGIS.....	51
4.1.1.1.	Mapeo de construcciones domiciliarias	51
4.1.1.2.	Mapeo de posibles ubicaciones de los contenedores	53
4.1.2.	Obtención de matrices distancia.....	54
4.2.	Programación del modelo.....	57
4.2.1.	Title	57
4.2.2.	Sets	57
4.2.3.	Parameter.....	57
4.2.4.	Scalar.....	58
4.2.5.	Variables.....	58
4.2.6.	Equations.....	58
4.2.7.	Model	59
4.2.8.	Solve.....	59
4.3.	Validación del modelo	59
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN.....		63
5.1.	El Sagrario.....	64
5.2.	San Francisco	64
5.3.	Caranqui	65
5.4.	Alpachaca	65
5.5.	La Dolorosa de Priorato.	66
CONCLUSIONES		72
RECOMENDACIONES		73
BIBLIOGRAFÍA.....		74
ANEXOS.....		76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los residuos sólidos	16
Figura 2 Tipos de residuos	17
Figura 3 Etapas del diseño del modelo	20
Figura 4 Retroalimentación del diseño del modelo	21
Figura 5 Revisión bibliográfica de diferentes modelos	23
Figura 6 Clasificación de los modelos matemáticos	25
Figura 7 Contenedor de basura rebozando.....	43
Figura 8 Predios Ibarra.....	52
Figura 9 Predios construidos y no construidos	52
Figura 10 Construcciones.....	53
Figura 11 Contenedores	54
Figura 12 Numeración construcciones.....	55
Figura 13 Numeración contenedores	55
Figura 14 Numeración construcciones y contenedores.....	55
Figura 15 Herramienta de análisis - Matriz de distancia	56
Figura 16 Parámetros de matriz de distancia	56
Figura 17 Comparación entre dos computadores del tiempo de resolución del modelo ..	61
Figura 18 Cantidad de generados y posibles ubicaciones de contenedores	62
Figura 19 Contenedores propuestos para la parroquia El Sagrario.....	64
Figura 20 Contenedores propuestos para la parroquia San Francisco	65
Figura 21 Contenedores propuestos para la parroquia Caranqui	65
Figura 22 Contenedores propuestos para la parroquia Alpachaca.....	66
Figura 23 Contenedores propuestos para la parroquia La Dolorosa de Priorato	66
Figura 24 Datos de tasa de generación de residuos dependiendo del nivel de servicio.....	67

Figura 25 Propuesta de ubicaciones de contenedores de residuos, por parroquias.....	68
Figura 26 Propuesta de nuevas ubicaciones de contenedores de residuos.....	69
Figura 27 Ubicación actual de los contenedores.....	70
Figura 28 Propuesta de ubicación de contenedores	71

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Metodología utilizada para la elaboración del presente trabajo	76
Anexo 2 Predios Ibarra	77
Anexo 3 Predios construidos y predios no construidos	77
Anexo 4 Construcciones	78
Anexo 5 Posible ubicación de contenedores	78
Anexo 6 Numeración de casas y contenedores	79
Anexo 7 Programación del modelo matemático	80
Anexo 8 Pruebas	81
Anexo 9 Prueba piloto del modelo.....	81
Anexo 10 Resultados de las pruebas realizadas.....	82
Anexo 11 Casas y contenedores instalados actualmente, por parroquias	83

RESUMEN

En el presente trabajo se aborda la problemática de la optimización en la asignación de contenedores en la ciudad de Ibarra, habitada por aproximadamente 121616 personas, usando un modelo importado desde otro contexto similar, es decir, que esta relacionado con temas de reciclaje, dicho modelo fue propuesto por Rossit et. al. (2015), el cual consiste en una programación entera mixta y a su vez multi-objetivo, se le realizó una serie de modificaciones significativas, entre las cuales se incluye como posibles ubicaciones de los contenedores uno en cada esquina de las cuadras que contienen predios construidos; también se agregó una restricción para el conteo total de los contenedores instalados y se dio un peso en cada una de las funciones objetivo para lograr la optimización multi-objetivo.

Como resultado, se presenta un plano con las asignaciones óptimas de contenedores de residuos sólidos municipales para el cantón Ibarra, listo para su implementación y orientado a elevar el nivel de servicio de recolección y la reducción de costos operativos.

ABSTRACT

In the present work the problematics of the optimization is approached in the assignment of containers in Ibarra's city, inhabited for approximately 121616 persons, using a model imported from another similar context, that is to say, that this related to topics of recycling, the above mentioned model was proposed by Rossit et. al. (2015), which consists of an entire mixed programming and in turn I multi-target, there was realized a series of significant modifications, between which one is included as possible locations of the containers in every corner of the stables that contain constructed lands; also one added a restriction for the total count of the installed containers and one gave a weight in each of the functions I target to achieve the optimization multi-target.

As result, one presents a plane with the ideal assignments of containers of solid municipal residues for Ibarra city, I list for his implementation and orientated to raising the level of service of compilation and the reduction of operative costs.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

A nivel global y en nuestra sociedad, la generación de residuos sólidos urbanos se ha incrementado, lo cual, por sus características se ha convertido en un problema para las localidades poblacionales. Uno de los aspectos principales de la problemática es sin duda el manejo inadecuado, esto debido principalmente a la falta de programas de educación ambiental y conciencia de la ciudadanía con respecto a este tema.

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente, la equívoca ubicación geográfica de los contenedores de basura en la ciudad de Ibarra, generan altas cantidades de residuos dispersos en las calles de la urbe.

La mayor parte de la población urbana tiene, en general, una percepción muy lejana de los problemas reales que implica el tratamiento de los residuos generados, ya que estamos en presencia de una sociedad consumista que desconoce el volumen de sus propios desperdicios y hacia dónde van; por tal motivo, la preocupación de todo individuo es que el municipio realice un servicio de recolección lo más eficaz posible para desentenderse del problema.

Por lo que es muy importante que se reconozca el crecimiento demográfico ascendente que se está produciendo en la ciudad de Ibarra, y con esto la expansión de la zona urbanizada, por tal motivo se debe de tener en mente que no todos los sectores urbanos se benefician del servicio adecuado de recolección de residuos sólidos urbanos (RSU), lo cual conlleva a que la sociedad convierta a aceras y calles en micro basurales¹ que son generados por ellos mismos. (Bonfanti, 2004)

De acuerdo a esto, se puede mencionar que la ciudad de Ibarra se ve afectada por las situaciones mencionadas anteriormente y se ha visto la necesidad de implementar un trabajo investigativo que permita la eficaz eliminación de RSU en las calles de la ciudad, mediante un

¹ Son pequeños basureros improvisados e ilegales en zonas urbanas. Suelen generarse poco a poco en zonas poco controladas o abandonadas.

manejo adecuado de los mismos y una óptima colocación de recipientes en los cuales se pueda almacenarlos.

1.2. Objetivos

Objetivo General

- Diseñar un modelo matemático, que mediante lenguajes de programación y herramientas del Sistema de Información Geográfico-SIG, permita obtener la mejor localización posible de los contenedores de RSU, y determinar la cantidad óptima de contenedores a distribuirse en el sector urbano de la ciudad.

Objetivos Específicos

- Realizar un estudio bibliográfico sobre la ubicación de los contenedores de residuos sólidos urbanos y de la misma manera acerca de la modelación matemática
- Planificar la ubicación de los contenedores, utilizados para recogida de los RSU producidos por las viviendas (uso residencial), además de las zonas comerciales, a partir del desarrollo de un modelo matemático en el cual se involucre datos como la población, tasa de generación de residuos, caracterización de RSU.
- Determinar un coeficiente de asignación de contenedores por estrato social y por habitante mediante la aplicación del modelo matemático.
- Optimizar la recogida de los RSU mediante la reducción del tiempo de recogida para cada contenedor y la cantidad de envíos diarios de residuos desde las macro zonas hasta los vertederos o zonas de transferencia.
- Comparar el modelo matemático, su eficiencia al momento de determinar la localización y la óptima cantidad de contenedores a distribuirse en el sector (macro zona).

1.3. Justificación

El manejo indebido de los residuos sólidos crea un problema ambiental en las primordiales calles de la ciudad de Ibarra que rompe con la estabilidad ecológica y versátil del ambiente; el cual es originado ya que no se tiene ninguna actividad establecida para la clasificación de residuos sólidos en la fuente, la carencia de organización y la de mayor relevancia la falta de una cultura ambiental; entonces, la generación de residuos es una consecuencia directa de alguna clase de actividad construida por el hombre, en los hogares, superficies de trabajo, mercados, industrias, hospitales, etc. se desarrollan residuos que son precisos agarrar, tratar y eliminar como corresponde (Ambientum, 2003)

Exactamente se consideran “residuos urbanos” esos que produzcan o generen los pobladores de una localidad o población, no solo como residuo propio, sino, además, como resultado de las ocupaciones que en las mismas tienen lugar.

Esta circunstancia ambiental se refleja en la calidad del ámbito para vida de las personas; por esa razón es de enorme consideración achicar de alguna forma la contaminación que se crea por la acumulación de residuos rígidos en sitios públicos como aceras, parques, esquinas, calles; donde no hay un programa que controle y maneje integralmente los residuos y que permita realizar acciones que buscan ayudar a la administración ambiental del ayuntamiento.

Por tanto, es significativo emprender acciones al respecto, para atenuar los impactos socio-ambientales; a través de la puesta en marcha de actividades; en las etapas de generación, separación, almacenamiento y disposición; enfocadas en estrategias de reubicación de contenedores de basura. Todo esto con el fin de disminuir el volumen de residuos dispuestos diariamente al centro de acopio y a fin de contribuir con la gestión ambiental del municipio y de mantener la ciudad como un lugar agradable y de encuentro de todos y para todos (Bonfanti, 2004)

Para esto se debe de analizar uno de los aspectos principales que es el tema de los usuarios, ya que existen limitaciones al respecto a la distancia máxima que estarían dispuestos a caminar para depositar los residuos hasta el contenedor, dependiendo del sector, y mediante este indicador queremos conocer cuántos son los contenedores que existen para la recogida de los residuos urbanos, si la cantidad es la necesaria y están ubicados en un lugar estratégico.

El proyecto busca mejorar la calidad de vida de los ciudadanos así como se lo menciona en El Plan Nacional del Buen Vivir a través de su objetivo 7: “Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable” (PNBV, 2017), mediante una propuesta de reubicación de los contenedores de basura; la cual hace parte de la estructura institucional del municipio; en donde la población que conviven cerca con la problemática; son los directamente afectados por los impactos nocivos al ambiente; causados por la mala disposición de los residuos sólidos.

Así como también se lo recalca en el objetivo 2 del Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos: “Diseñar e implementar un Modelo estandarizado de Gestión Integral de Residuos Sólidos en base a parámetros geográficos, poblacionales, generación y caracterización de los residuos sólidos”. (PNGIDS, 2010)

La defensa de este proyecto se verá centrada y apoyada por el anexo 6 del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente: “Esta Norma establece los criterios para el manejo de los desechos sólidos no peligrosos, desde su generación hasta su disposición final. La presente Norma Técnica no regula a los desechos sólidos peligrosos”. (TULSMA, 2003)

1.4. Alcance

Con este modelo matemático se pretende llegar a determinar una cantidad óptima de contenedores, y así evitar demasiados o escasos contenedores en un sector de la ciudad (macro-zona), así como también su correcta ubicación geográfica dentro de la zona, analizando sus

diferentes variables. Además de concienciar sobre la importancia que tiene la recogida y la gestión de los residuos de la ciudad para fomentar de manera indirecta el reciclaje y la disminución de la producción de residuos en general.

1.5. Aspectos Generales

Provincia: Imbabura

Población: 121616 habitantes

Temperatura Promedio: 18°C

Superficie: 1093.3 Km²

Parroquias: Ambuquí, Angochahua, Carolina, Ibarra, La Esperanza, Lita, Salinas, San Antonio.

En una amplia y verde planicie a los pies del Volcán Imbabura, se encuentra Ibarra, ciudad de tradición española que goza de un clima privilegiado, en la que conviven variedad de culturas y etnias que enriquecen y hacen única a la provincia de Imbabura. La riqueza cultural, expresada a través de las diferentes manifestaciones de sus habitantes, la hace inconfundible. Ibarra, expone una ciudad pujante, educadora, progresista. Se han trabajado en proyectos que ayuden a mejorar la calidad de vida de los Ibarreños desarrollando estrategias de recuperación ciudadana en los espacios públicos y la construcción de servicios que han mejorado rotundamente el paisaje urbanístico.

1.6. Ubicación del Proyecto

La Empresa Pública Municipal para el Aprovechamiento e Industrialización de Residuos Sólidos, Materiales Áridos y Pétreos del Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel de Ibarra, VIRSAP – EP, donde se realizará la presente investigación “Diseño de un modelo matemático para determinar la cantidad óptima de contenedores de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Ibarra”, está ubicada en la provincia de Imbabura, ciudad de Ibarra, en la

Parroquia Urbana de El Sagrario, sus oficinas se encuentran en funcionamiento en el edificio Teatro Gran Colombia.

1.7. Características Físicas

Ibarra está ubicada en un valle templado en la zona norte de Ecuador a una altura promedio de 2220 m.s.n.m., sin embargo, la zona más baja de la ciudad (el sur) se halla a 1945 m.s.n.m., mientras que la parte más elevada (el norte) se halla a 2347 m.s.n.m. La villa se encuentra a 115 km al noreste de Quito y 125 km al sur de Tulcán.

Los componentes de relieve que destacan en torno a la ciudad son el Volcán Imbabura, la Laguna de Yahuarcocha, el Macizo Floral, la Campiña Ibarreña y la Llanura de Caranqui. Desde los valles y dehesas soplan los vientos cálidos y secos, mientras desde los andes y las partes altas soplan vientos frescos y fríos, lo que le dan a Ibarra un clima templado y agradable.

1. Altitud: 2.192 metros.
2. Latitud: 00° 21' N
3. Longitud: 078° 07' O

Ibarra, para su manejo más equilibrado se halla dividida en más de 400 barrios que se agrupan en 5 parroquias urbanas (Alpachaca, San Francisco, El Sagrario, La Dolorosa de Priorato, Caranqui). Aproximadamente en Ibarra la conforman 121616 habitantes. (Ibarra, 2014)

El clima se presenta como templado seco-mediterráneo con ciertas influencias del clima subtropical árido de tierras altas, dado que Ibarra se halla en un valle y es modificado tanto por los vientos que llegan desde las llanuras y vientos cálidos y secos, como por los vientos que llegan desde los Andes y las partes altas que son vientos frescos y fríos. Ibarra tiene una temperatura promedio de 18°C, oscilando entre una temperatura media en diciembre de 7°C y de hasta 32°C en agosto.

El clima anual se divide en 3 partes: la etapa seca que va desde junio hasta principios de septiembre, la época estival de principios de septiembre a mediados de febrero y la fría de finales de febrero a finales de mayo. (Díaz, 2016)

1.8. Características del Medio Socio-cultural

1.8.1. Población

Etnografía ibarreña mestizos son el grupo étnico mayoritario que en Ibarra corresponde al 36% de la población, seguido por los blancos con un 30%, los castizos (unión de mestizos con blancos) 30%, los afrodescendientes con un 1%, los asiáticos con un 1%, los árabes con un 1%, y el 1% restante lo constituyen mulatos, indígenas y otros grupos. En Ibarra como sucede en la mayoría de las ciudades imbabureñas, los mestizos son el grupo étnico mayoritario. (Anónimo, 2015)

1.8.2. Servicio de Salud

La salud en Ibarra se halla garantizada por dos hospitales: San Vicente de Paúl (hospital público), Hospital del Seguro (Hospital del IESS), así como de más de 15 clínicas privadas y cerca de 300 consultorios privados, las principales clínicas privadas son: Clínica Ibarra, Clínica Moderna, Hospital Metropolitano, Clínica Mariano Acosta, Clínica del Norte, Clínica Médica Fértil, Dialibarra, etc. La principal causa de muerte en Ibarra son los problemas cardio-cerebrales y los respiratorios, mientras la población goza de una alta calidad de vida y una esperanza de vida que se aproxima a los 79,7 años para los hombres y 83,4 años para las mujeres. Un dato interesante es que Ibarra tiene una población que visita al médico cada 3 meses como prevención, siendo la ciudad con mejor avance de la salud preventiva del país.

La obesidad es un problema que fue algo notorio en Ibarra durante el 2005 pero no trascendió a mayores ya que para 2010 el número de casos bajó y no se ha vuelto a tener pacientes que sufran este mal. El estrés sin embargo ha causado grandes estragos en su población, ya que los problemas nerviosos y psicológicos han sido crecientes desde el 2007.

Aproximadamente un 45% de los ibarreños mayores de 30 años fumaban para 2010, convirtiendo a Ibarra en la segunda ciudad con más población fumadora del Ecuador tras Quito, y le siguen Guaranda, Cuenca, Otavalo y Loja. (EcuRed, 2017)

1.8.3. Vialidad

En Ibarra como en todas las ciudades de la Sierra Ecuatoriana el tráfico y la congestión vehicular es un problema constante para lo cual se ha propuesto un nuevo trazado urbano y vial en la ciudad, la invención del SISMERT, y una serie de proyectos y campañas escolares y profesionales sobre conciencia vial. Ibarra cuenta con calles medianas, grades y angostas, como cualquier ciudad colonial, enmarcada con innumerables intersecciones, monumentos, redondeles, y parques, así Ibarra cuenta con dos Compañías de Autobuses, 28 de septiembre y San Miguel de Ibarra, las cuales prestan servicios a toda la población, y en sus innumerables barrios.

1.9. Factores socio económicos del cantón

1.9.1. Sector Industrial

La industria manufacturera, después del comercio, es el sector que más aporta a la economía del país; su contribución al producto interno bruto nacional es alrededor del 14%. La rama que más aporta a la producción de este sector es la de alimentos y bebidas.

Las importaciones del sector industrial representan alrededor del 43% de las importaciones totales. El sector industrial ha logrado fomentar, constituir, poner en funcionamiento y administrar conglomerados industriales, el mismo que provee de las funciones e instalaciones necesarias, para el establecimiento y desarrollo de empresas industriales, artesanales, micro empresariales y de servicios varios.

1.9.2. Sector Agrícola y Ganadero

Imbabura es una provincia que cuenta con una vasta extensión de suelo que permite diversificar la actividad productiva en lo referente a agricultura.

Los productos son variados, dependiendo del sector geográfico donde se desarrollen. El valle del Chota, por ejemplo, es propicio y único para el cultivo del apetitoso ovo y las zonas de paramos como Zuleta son el escenario ideal para el cultivo de cebada, trigo o papa. Según datos registrados en el documento del Plan de Desarrollo Estratégico del Gobierno Provincial de Imbabura, el 37.4% de la superficie territorial de Imbabura se destina a actividades agropecuarias y el 62.6% se ocupan en bosques, páramos, infraestructura, asentamientos de población, entre otros. De todas las hectáreas registradas en el territorio provincial, el 21.2% está destinado a pastos, pero esta cifra habría mermado en los últimos años por el establecimiento de empresas florícolas que han ocupado parte de estos suelos.

A pesar de ser los páramos un área que posee vital importancia al generar el líquido vital (agua) para el consumo humano, ocupa apenas un área de 24.786 hectáreas de la superficie total del suelo. El mayor porcentaje de hectáreas lo ocupan los montes y bosques, con 96.347 hectáreas; le siguen los pastos cultivados (43.419 has.) y los pastos naturales (2.953 has.). Según datos del III Censo Nacional Agropecuario 2.002, la superficie total del suelo en Imbabura, incluyendo otros tipos de cultivos, es de 283.659 hectáreas. (EcuRed, 2017)

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco Normativo

El tema “Residuos Sólidos”, desde hace mucho tiempo, ha sido un eje central de estudio para organismos de carácter público y privado a nivel mundial. Es por eso que, en este capítulo, se hace hincapié a aspectos importantes acerca de los RSU tanto a nivel mundial, como en América Latina específicamente en la zona de Ibarra. De esta manera, se aborda el marco normativo de los RSU que son aplicables en general al Ecuador y concretamente a la ciudad de Ibarra.

El estudio realizado por Acurio et. al. , (1997) divide la problemática de los RSU en América Latina y el Caribe en seis categorías:

La primera trata lo referente a la debilidad institucional, centralismo y operatividad deficiente, falta de planificación, carencia de sistemas nacionales, legislación inadecuada, incumplimiento de los instrumentos legales, falta de políticas para reducir la generación de residuos, programas a corto, mediano y largo plazo, calificación de los recursos humanos y privatizaciones.

Los aspectos técnicos, son los que se mencionan en la segunda categoría, que se realizan en forma deficientemente, por ejemplo, el manejo de los residuos especiales y peligrosos, almacenamiento temporal de los residuos, recolección con equipos, disposición final y hasta incluso se toma en cuenta los rellenos sanitarios, entre otros, en los cuales se utiliza todo tipo de tecnología antigua y moderna, se resalta el hecho de la gran cantidad de segregadores² y la mezcla de residuos.

Los aspectos económicos – financieros se abordan en esta tercera categoría, en la que se establece la falta de esquemas para la recuperación de inversión, la problemática con las tarifas

² Hace referencia a apartar, separar a alguien de algo o una cosa de otra

por el servicio de aseo urbano, cobranzas de los servicios y en la mayoría de los casos la falta de financiamiento al sector

Y para culminar con las problemáticas más relevantes dentro del ámbito internacional, tenemos en el ámbito de la salud a personas expuestas a agentes físicos, químicos y biológicos a los que se está arriesgado una persona al estar en contacto con las RSU.

Mientras que en el ámbito del ambiente hace un fuerte ahínco, puesto que representa un aspecto negativo por falta de estaciones de transferencia, rellenos sanitarios temporales y lo más importante acerca de la contaminación de recursos hídricos, aire, suelo y paisajes.

El área social-comunitaria es una problemática amplia, puesto que, se piensa que todo el tratamiento de los RSU solo les compete a las municipalidades.

2.1.1. Marco Normativo Internacional

a. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

En el conjunto de naciones americanas, Estados Unidos es el primer país con una Agencia de Custodia Ambiental conocida por sus iniciales en el idioma anglosajón EPA, y el primer país en anunciar en 1965 una ley federal relativa a la administración de Residuos Rígidos llamada “Acta de Retirada de Residuos”.

En 1971 el estado de Oregón emitió una ley sobre reciclaje de botellas (plásticas y vidrio), y desde 1979 el Gobierno subvenciona, impulsa y ordena al reciclaje de los Residuos.

b. Agenda 21

En el capítulo 21: “Manejo Ecológicamente Racional de los Desechos Sólidos y Cuestiones Similares con las Aguas Servidas” relata 4 criterios a tener en cuenta en la Administración Integral de Residuos Sólidos:

- a) Reducir al mínimo los Desechos
- b) Aumentar el reciclado ecológico de los Residuos

- c) Promocionar los tratamientos ecológicos de los Residuos y Desechos remanentes de la ordenación.
- d) Ampliar la llegada de los servicios relacionados con la Basura.

2.1.2. Marco Normativo Nacional

La Ley Ecuatoriana tiene relación y legisla a los residuos y lo relacionado con estos, en las siguientes normas:

- 1) Constitución Política de la República del Ecuador, Capítulo V, parte Segunda del Medio Ambiente, 11 de agosto de 1998.
- 2) Código de la Salud
- 3) Texto Unificado de Legislación Ambiental, Libro VI, Encabezado II
- 4) Ley Orgánica de régimen municipal
- 5) Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental
- 6) Reglamento de Seguridad e Higiene del Trabajo. Normas emitidas por el Consejo Superior del IESS. Resolución No 172.

“El Estado va a proteger el derecho de la gente a vivir en un ámbito sano y ecológicamente equilibrado, además tipificara las infracciones a la gente naturales o jurídicas por las acciones u omisiones en oposición a las normas de custodia al medio ambiente”. (“Constitución Política de la República del Ecuador," 2008)

La Ley Orgánica de Salud, (2006) hace referencia a la obligación de cada individuo a sostener el aseo de las localidades en donde habitan, a no arrojar basura en sitios no autorizados y establece que son los municipios las entidades encargadas a hacer el manejo de los RSU.

En el TULSMA, (2003) el Estado Ecuatoriano afirma como prioridad nacional la administración integral de los residuos, un compromiso que debe ser compartido por medio de un grupo de reglas que abarcan el tema de salud y ambiente, el tema popular, financiero,

institucional, técnico y legal, los mismos que se expresan por medio del Anexo 6 Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de Desechos No Peligrosos.

La Ley Orgánica de Régimen Municipal, (1989) establece que servicios debe prestar la municipalidad al aseo público, recolección, régimen de basuras, residuos y desechos, para proteger la higiene y salubridad del cantón.

La Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, (2004) considera los probables procedimientos de disposición final que tienen la posibilidad de perjudicar al aire, agua y suelo, como es la situación de la incineración o quema a cielo abierto de desechos.

Además, el Ministerio de Salud, en sincronización con las municipalidades, planificará, regulará, normará, limitará y supervisará los sistemas de recolección, transporte y disposición final de basuras en el medio urbano y rural.

2.2. Residuos Sólidos Urbanos

2.2.1. Gestión Integral

Toda aglomeración de seres humanos, ya sea un pueblito, ciudad o metrópolis, genera basura, mucha basura. La mayoría de estos residuos terminan en vertederos, pero un buen manejo de la basura que se genera puede hacer que lo que llega a los sumideros sea la menor cantidad posible. Se trata de un sistema de manejo sostenible de la basura cuyo objetivo principal es la reducción de los residuos que llegan al depósito final, o sea los rellenos sanitarios o cloacas.

Este sistema se impuso en gran parte del mundo luego de años de estudios para poder reducir el impacto ambiental de la actividad humana, que cómo decíamos, siempre genera basura. Esto se refiere tanto al nivel residencial, comercial e industrial.

La gestión integral de residuos domiciliarios está reglamentada por la Ley 25916, que establece las siguientes etapas: generación, disposición inicial, recolección, transferencia, transporte, tratamiento y disposición final.

2.2.1.1. Responsabilidad de los habitantes de la ciudad

a) **Generación:** es la actividad que comprende la producción de residuos domiciliarios.

b) **Disposición inicial:** es la acción por la cual se depositan o abandonan los residuos.

La disposición inicial puede ser general (sin clasificación y separación de residuos) o selectiva (con clasificación y separación de residuos a cargo del generador).

2.2.1.2. Responsabilidad de los municipios

c) **Recolección:** es el conjunto de acciones que comprende el acopio y carga de los residuos en los vehículos recolectores. La recolección puede ser general (sin discriminar los distintos tipos de residuo) o diferenciada (discriminando por tipo de residuo en función de su tratamiento y valoración posterior)

Los municipios están a cargo del mantenimiento de la higiene urbana, lo que incluye el barrido de la vía pública y la recolección de los residuos domiciliarios

2.2.1.3. Responsabilidad de la empresa

d) **Transferencia:** comprende las actividades de almacenamiento transitorio y/o acondicionamiento de residuos para su transporte.

e) **Transporte:** comprende los viajes de traslado de los residuos entre los diferentes sitios comprendidos en la gestión integral.

f) **Tratamiento:** comprende el conjunto de operaciones tendientes al acondicionamiento y valorización de los residuos. Se entiende por acondicionamiento a las operaciones realizadas a fin de adecuar los residuos para su valorización o disposición final. Se entiende por valorización a todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, mediante el reciclaje en sus formas físicos, químicos, mecánicos o biológicos, y la reutilización.

g) Disposición final: comprende al conjunto de operaciones destinadas a lograr el depósito permanente de los residuos domiciliarios, así como de las fracciones de rechazo inevitables resultantes de los métodos de tratamiento adoptados. Asimismo, quedan comprendidas en esta etapa las actividades propias de la clausura y post-clausura de los centros de disposición final.

2.3. Definiciones Generales de RSU

2.3.1. Desechos o Residuos

El concepto de residuo provenía de un tipo de sociedad denominada por hábitos de “usar y tirar”, donde se producían gran cantidad de materias que se desechaban ya que su valor era mínimo, provocando importantes impactos ambientales.

A continuación, se considera las definiciones de residuo recogidas en diferentes fuentes:

Alguna sustancia u objeto correspondiente a alguna de las categorías que figura en el anexo de esta ley, del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse. En todo caso, va a tener esta consideración los que figuren en el Muestreo Europeo de Residuos (CER), aprobado por las Instituciones Comunitarias. (Estado, 2009)

“Los desechos o residuos son esos desperdicios que no son transportados por agua y que se han rechazado porque por el momento no se van a usar”. (Henry et. al., 1999)

2.3.2. Residuos Solidos

Es el material, producto o subproducto que, sin considerarlo peligroso, se desecha y el cual puede reaprovecharse o requiere sujetarse a métodos de tratamiento o disposición final. Pueden ser residuos inorgánicos como vidrio, metales u orgánicos biodegradables como frutas, verduras, restos de poda, entre otros. (Sbarato, 2009)

Los residuos son originados por los organismos vivos como desechos de las funciones que estos realizan, por lo fenómenos naturales derivados de los ciclos y por la acción directa al hombre, donde se encuentra los residuos más peligrosos para el medio ambiente pues muchos

de ellos tienen un efecto negativo y prolongado en el entorno, lo cual viene dado en muchos casos por la propia naturaleza físico-química de los desechos. (Fernández & Sánchez, 2007)

2.3.3. Clasificación de los residuos sólidos

El Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) en su anexo 6 apunta la siguiente ordenación para los desechos sólidos según su origen:

<p>Desecho domiciliario</p> <ul style="list-style-type: none"> • El que por su naturaleza, estructura, cantidad y volumen es generado en ocupaciones llevadas a cabo en casas o en algún establecimiento asimilable a éstas.
<p>Desecho comercial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aquel que es generado en establecimientos comerciales y mercantiles, así como almacenes, bodegas, hoteles, sitios de comidas, cafeterías, plazas de mercado y otros.
<p>Desecho de demolición</p> <ul style="list-style-type: none"> • Son desechos sólidos producidos por la creación de inmuebles, pavimentos, maravillas artísticas de la creación, brozas, cascote. Etc., que quedan de la construcción o derrumbe de una obra de ingeniería. Están constituidas por tierra, ladrillos, material pétreo, hormigón fácil y armado, metales ferrosos y no ferrosos, maderas, vidrios, arena, etc.
<p>Desecho de barrido de calles</p> <ul style="list-style-type: none"> • Son los originados por el barrido y limpieza de las calles y comprende entre otras: basuras domiciliarias, institucional, industrial y comercial arrojadas clandestinamente a la vía pública.
<p>Desecho de limpieza de parques y jardines</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es aquel originado por la limpieza y arreglo de jardines y parques públicos, corte de césped y poda de árboles o arbustos localizados en zonas públicas o privadas.
<p>Desecho de hospitales, sanitarios y de laboratorios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Son generados por las ocupaciones de curaciones, intervenciones quirúrgicas laboratorios de examen e exploración y desechos asimilables a los domésticos que no tienen la posibilidad de dividir de lo previo
<p>Desecho institucional</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aquel que es generado en establecimientos académicos, gubernamentales, militares, carcelarios, religiosos, plataformas aéreas, terrestres fluviales o marítimos y edificaciones destinadas a áreas de trabajo
<p>Desecho industrial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aquel que es generado en ocupaciones propias de esta área, como producto de los procesos de producción.
<p>Desechos Municipales</p> <ul style="list-style-type: none"> • Por lo general tienen dentro a los desechos producidos en los hogares y algunos desechos blancos generados en tiendas pequeñas e industrias, de esta forma como los residuos de mercado y jardines.

Figura 1 Clasificación de los residuos sólidos
Fuente: Elaboración propia en base a (Zúñiga, 1999)

De los 27 tipos de residuos frecuentes, 15 corresponden a residuos de origen orgánico que tienen la posibilidad de ser biodegradados, algunos ejemplos son: residuos alimenticios, de jardinería, algodón, cartón, papel, hueso, fibra vegetal y otros.

Para el propósito investigativo y para una eficaz respuesta se distribuye en 4 grupos o tipos, como se lo apunta en (Tobar, 2008) en el proyecto de grado previo a la obtención del título de Ingeniería, según su estructura y estos residuos urbanos son:

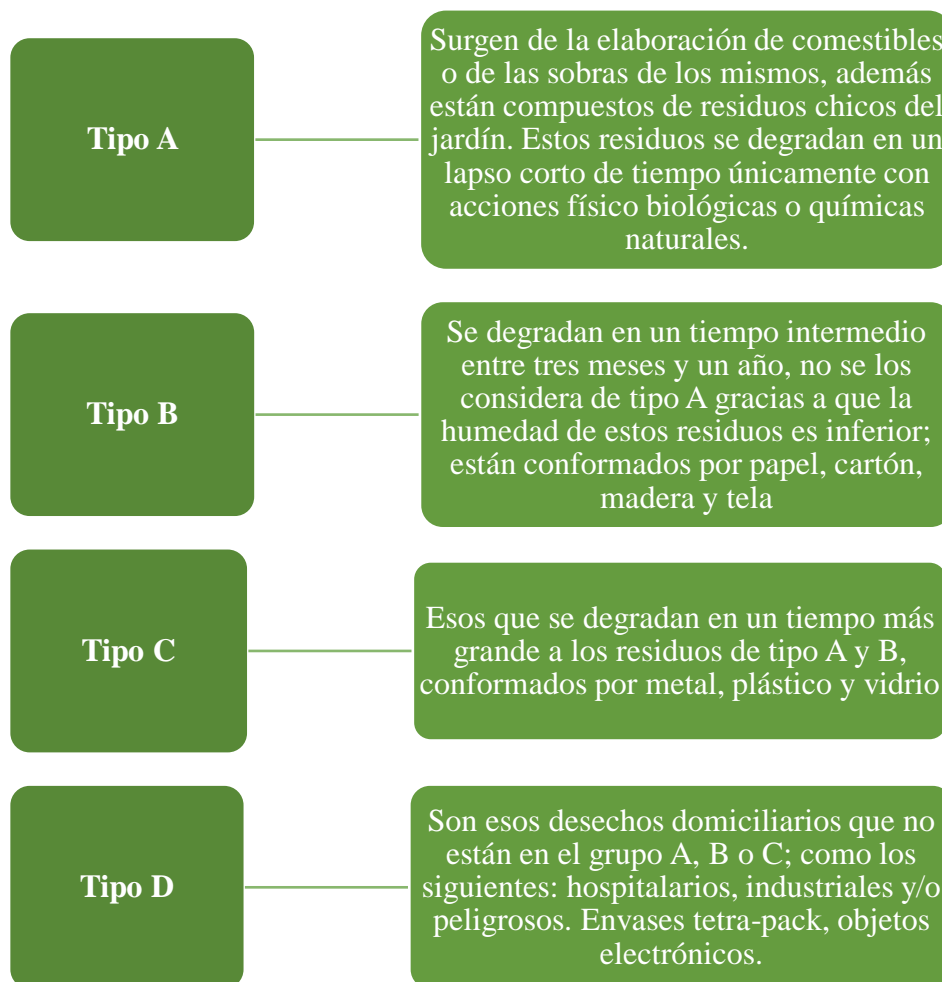


Figura 2 Tipos de residuos

Fuente: Elaboración propia en base a (Tobar, 2008)

2.3.4. Tiempo de descomposición

Los principales componentes de los residuos sólidos son: material orgánico, vidrio, papel/cartón, plástico, metales, madera, textiles y pilas.

El tiempo de degradación de los principales componentes de los residuos sólidos son: para los materiales orgánicos máximo medio año, papel y cartón en 1 año, madera en 5 años, latas entre 10-30 años, textiles en 40 años máximo, plástico en 1000 años, vidrio en 4000 años, metales pesados en un millón de años y las pilas no tienen un tiempo definido por ser muy extenso.

Por tanto, los residuos con mayor y menor tiempo de degradabilidad son las pilas y el material orgánico respectivamente. La producción per cápita de residuos sólidos en la ciudad de Ibarra tiene un promedio de 0,685 kg/día y existe una tendencia de crecimiento por períodos de 3 años.

2.3.5. Características de los residuos sólidos

Bonilla & Núñez, (2012) en su trabajo “Plan de manejo ambiental de los residuos de la región de Logroño” apunta que, dentro de las características físicas y químicas de la mayor parte de desechos rígidos urbanos, tenemos la posibilidad de resaltar las siguientes, como las más importantes:

2.3.5.1. Humedad

La humedad de los residuos, es la proporción de agua contenida en el residuo, se obtiene desde una exhibe de 1 a 2 kg., del residuo calentado a 80°C a lo largo de 24 horas. En los residuos urbanos se posiciona en un rango de 30 a 60% en peso, en estos residuos la humedad se transmite de un residuo a otro. El porcentaje de humedad es sustancial en el instante del transporte y la transformación.

2.3.5.2. Densidad

La consistencia de los residuos urbanos está en funcionalidad de la estructura y de la compactación de los mismos, es un valor primordial para saber las dimensiones de los tachos domiciliarios y de los camiones encargados de la recolección. Se mide en entidades de masa sobre volumen. Se clasifica en dos tipos: densidad suelta que viene siendo el valor de

consistencia del residuo en el origen sin ejercer presión alguna y la densidad compactada o de transporte es el valor de la consistencia en el auto compactador, luego de que han ejercido presión sobre ella.

2.3.5.3. Granulometría

Es la determinación del tamaño de las partículas que se lo puede hacer por medio del conteo o por medio del tamiz.

2.4. Diseño del Modelo Matemático

La investigación de operaciones (IO) reúne un conjunto de técnicas cuantitativas, entre las cuales se encuentra la programación lineal, entendida como la técnica de la IO empleada para optimizar sistemas modelados linealmente en términos de maximización y minimización de objetivo, cumpliendo con las limitaciones asociadas.

Esta técnica, en cuanto a su tratamiento, pertenece a una de las ramas de la programación matemática, enfocándose en la construcción de modelos matemáticos de tipo lineal, en los que mientras se cumple con una serie de limitaciones, se maximiza o se minimiza desde el punto de vista matemático el objetivo de un sistema.

A través de la programación lineal se genera una representación abstracta de la realidad, la cual se expresa como función lineal de una o más variables de decisión y de parámetros y de una o más restricciones lineales consideradas como limitaciones del sistema, a fin de que al resolver el modelo se obtenga alternativas que mayor beneficio matemático genera al objetivo de interés que se presenta en términos de minimización o maximización.

Con lo mencionado anteriormente, es fundamental que al diseño de un modelo se lo puede ver como un sistema identificado por un conjunto de subsistemas o módulos en donde la información es procesada con objeto de transformarla, de un conjunto de datos aislados a una ecuación matemática que representa una realidad concreta. Las etapas del diseño de modelos se encuentran plasmados en la figura 3, en donde cada uno de los rectángulos representa un

módulo, las flechas están identificadas con el flujo de la información entre cada una de las etapas después de un proceso. (Rodríguez, 2004)

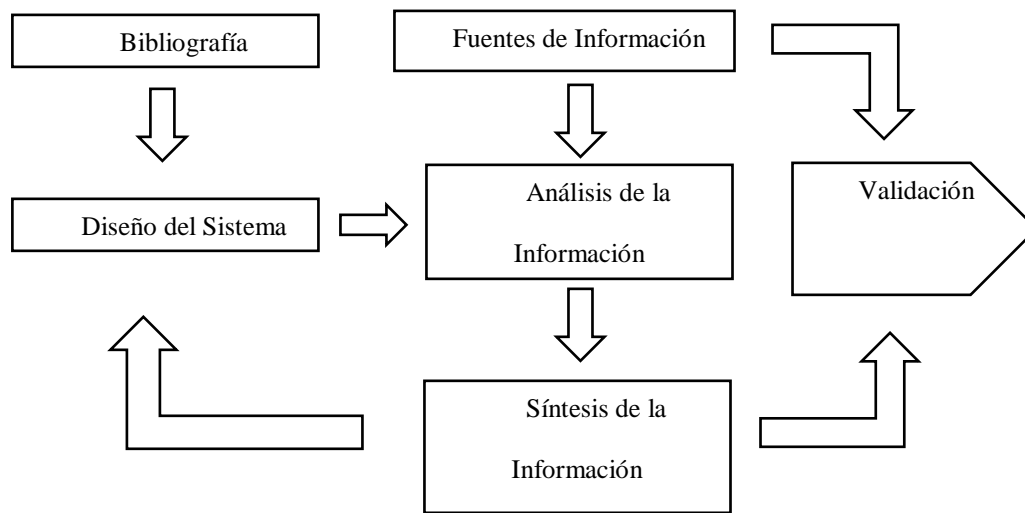


Figura 3 Etapas del diseño del modelo
Fuente: (Rodríguez Salinas, 2004)

Este proceso de información es retroalimentado, está identificado con la flecha que une la síntesis de información y el diseño del sistema. Las entradas son dos, identificadas por la bibliografía y las fuentes de información. El centro del proceso está en el análisis de la información, finalmente, la validación genera el modelo matemático.

2.4.1. Recopilación de la información

Las características generales de la región de estudio, así como las diferentes teorías y modelos que describen el fenómeno, forman parte de un conjunto de información que sirve como base para el proceso de diseño del modelo. Adicionalmente se requiere del conjunto de información que se va a procesar y que va a formar parte integral del modelo matemático. Esta información se recopila siguiendo tres etapas:

1. La recopilación de información procedente de fuentes oficiales que caracterizan al municipio y la región. Esta información incluye una breve descripción de los elementos naturales y sociales. Está enfocada a las variables que se utilizan en la esfera gubernamental para medir las propiedades previamente definidas.

2. Para recopilar la información que no se encuentra contenida en fuentes oficiales se utiliza el instrumento de medición empleado por la subdirección de ecología municipal y la información generada. Este instrumento se aplicó en el año de 1998.
3. La Información generada dentro del análisis es retroalimentada y conforma un nuevo conjunto de información para el diseño del sistema.

2.4.2. Diseño del sistema y análisis de la información.

Se emplea principalmente la regresión lineal como técnica de análisis numérico. Esta técnica se aplica utilizando modelos matemáticos previamente desarrollados para sistemas sociales.

El diseño del sistema consiste en la selección de las variables socioeconómicas disponibles para aplicarlas a los modelos desarrollados. Este diseño está siempre en función de los resultados del análisis previo. La conformación de un nuevo modelo se logra gracias a los estadísticos producidos por la regresión lineal. Un esquema de esta etapa se muestra en la figura siguiente:

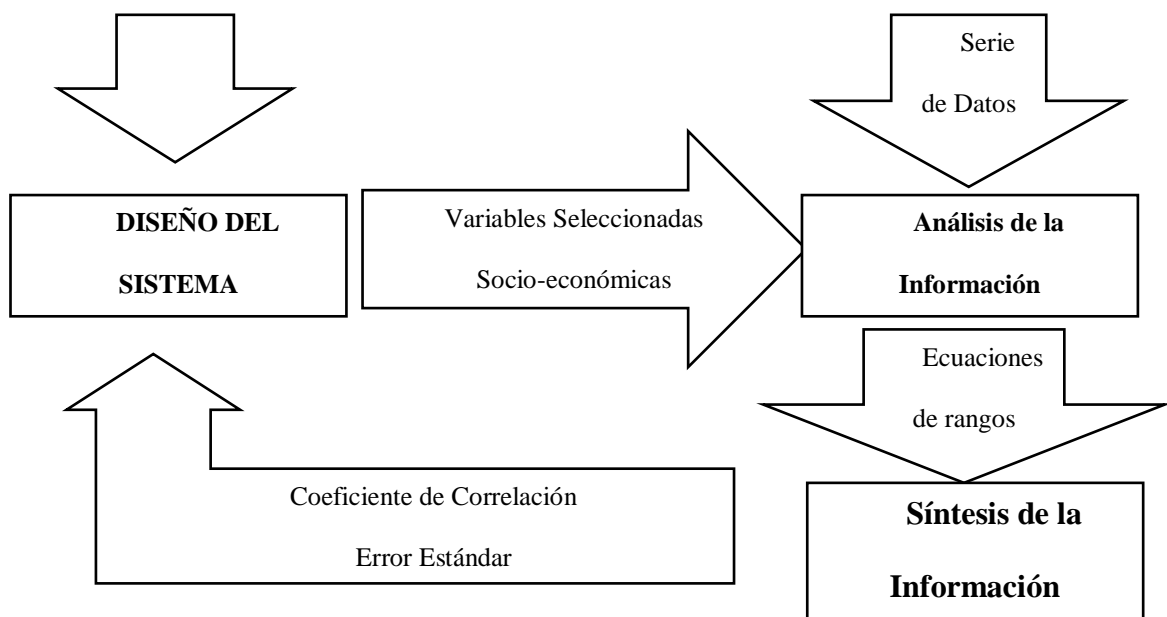


Figura 4 Retroalimentación del diseño del modelo
Fuente: (Rodríguez, 2004)

Los estadísticos deben de poseer valores en los rangos adecuados y establecidos teóricamente en la estadística para que el modelo pueda ser considerado susceptible de validación.

2.4.3. Validación de los modelos

Los modelos obtenidos contienen una síntesis de la información recopilada tanto en la etapa de la bibliografía como de los datos fuente. Con el objeto de obtener un instrumento confiable para la determinación de las variables dependientes se debe de contrastar los resultados del modelo contra valores reales medidos.

Para la selección del mejor modelo, se realizó una revisión bibliográfica de distintos casos de similitud aplicación entre los más importantes, se puede mencionar a los siguientes:

Asignación de los contenedores de recogida de residuos sólidos y optimización de rutas que se utiliza el el sistema de información geográfica: Un estudio de caso de la ciudad de Dhanbad, India

D Khan y SR Samander

• **Características**

• Presenta método de asignación de bandeja de recogida de residuos sólidos en lugares adecuados, con una distancia uniforme y un lugar de fácil acceso para los vehículos.

• **Ventajas**

• Toma en cuenta densidad poblacional, localización de contenedores

• **Desventajas**

• Primer lugar genera la ruta que debe de seguir el camión recolector y a continuación la localización de contenedores en base a la ruta creada con anterioridad.

Análisis distritación subregión para municipal privatización recogida de residuos sólidos

Hung Lin-Yueh, Jehng Jung-Kao

• **Características**

• Se centra en las rutas de recolección por subregiones, es decir, dependiendo de la demanda, cantidad de residuos.

• **Ventajas**

• Reduce los costos de recogida, pues reducen el riesgo de inversión.

• **Desventajas**

• Creación de distritos genera inconvenientes para determinar una ruta de recolección eficiente.

Un nuevo modelo para el diseño de arco territorio: La promoción distritos de Euler

Gabriela García, Luis González, Elena Fernández

• **Características**

• Se aborda el problema de distrito para la ejecución de las actividades de enrutamiento de arco.

• **Ventajas**

• Ninguna

• **Desventajas**

• Dividir una red de carreteras en un número determinado de sectores que facilita la organización. aborda temas de entregas de postal, lecturas de medidores, mantenimiento de carreteras y recolección de residuos

Figura 5 Revisión bibliográfica de diferentes modelos

Fuente: Elaboración propia

2.5. Definiciones Generales Modelación Matemática

El desarrollo de este contenido, hace una breve referencia teórica en lo que concierne al diseño de los modelos, en nuestro caso muy en particular el diseño de un modelo matemático lineal multi-variable, en un marco conceptual en el que se definen temas relacionados con el sistema y sus elementos, de la misma manera las etapas del proceso del diseño del modelo como una representación del sistema, técnicas relacionadas con el modelo, entre las que podemos mencionar: Sistemas Informáticos Geográficos, algoritmos, agrupamiento geográfico mediante la herramienta QGIS.

2.5.1. Optimización

Es el proceso de optimar una función objetivo con respecto a algunas variables con restricciones en las mismas, es la selección del mejor elemento (con respecto a algún criterio) de un conjunto de elementos disponibles. Es empleada para modelizar la asignación de recursos escasos entre fines alternativos, y resolver problemas de distribución desarrollados en la teoría del consumidor, teoría de la producción, economía del bienestar, equilibrio general, etc.

2.5.1.1. Modelos de Optimización

Se distinguen diferentes modelos de optimización. La característica es la existencia de un único decisor. Si existe más de un decisor se tiene la optimización multi-criterio y la teoría de juegos. (Fernandez, 1999)

2.5.1.2. Clasificación de los Modelos

Para determinar el punto exacto para resolver alguna problemática administrativa, de producción, o cualquier otra situación. Cuando la optimización es entera o no lineal, combinada, se refiere a modelos matemáticos poco predecibles, pero que pueden acoplarse a alguna alternativa existente y aproximada en su cuantificación. Este tipo de modelos requiere comparar diversas condiciones, casos o posibles valores de un parámetro y ver cual de ellos

resulta óptimo según el criterio elegido, para esto, es importante realizar una rápida clasificación de los modelos, de la siguiente manera:

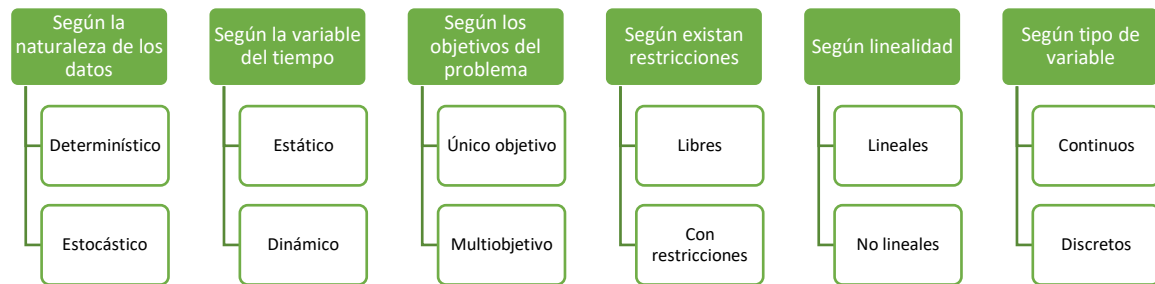


Figura 6 Clasificación de los modelos matemáticos
Fuente: Elaboración propia en base a (Fernandez, 1999)

2.5.1.3. El modelo como representación de un sistema

En el contexto de Pérez, (2011), la modelación es el proceso de construir y utilizar modelos matemáticos, es decir, representar en forma aproximada, la realidad de un sistema, a través de elementos matemáticos, con el fin de estudiarlo, entenderlo, analizarlo, probar alternativas de decisión y llevar a la práctica aquella más satisfactoria.

En el entorno de un sistema se utiliza con el propósito de obtener la realidad para realizar un estudio eficiente. Este sistema se basa en tres conceptos fundamentales, que son inseparables, es decir, si uno de esta falta, los otros simplemente no tendrían valor.

De acuerdo a Rodríguez, (2004), estos tres conceptos son:

- a) **Sistema:** lugar en el espacio con materia y energía seleccionado para su estudio
- b) **Límite:** cubierta que envuelve al sistema y lo separa de su alrededor
- c) **Alrededor:** todo aquello que no pertenece al sistema y lo separa de su alrededor.

Adicionalmente se presenta el concepto Universo, que representa todo aquello que existe, incluido el sistema. El universo en sí no se puede ver como un sistema puesto que no existe un límite para el universo ni un alrededor; esto es, el universo es infinito.

El sistema, el límite y el alrededor están definidos en torno a las propiedades (elementos componentes, o variables). Una propiedad es un elemento del sistema, tiene un nombre y un

valor al menos. Las propiedades tienen valores que puedan variar de acuerdo a funciones definidas, también poseen relaciones con las demás propiedades. El sistema sólo existe con base en las propiedades que lo conforman, a su vez, las propiedades establecen el límite y las interacciones con el alrededor. El límite puede definirse por la ausencia de las propiedades o por los rangos aceptados para identificar cada una de las propiedades. El alrededor, al ser una interacción con el sistema, debe estar identificado por, al menos, una propiedad del sistema que de alguna forma “abandona” el sistema o “ingresa” al sistema.

Al conjunto de los valores de las propiedades se le denomina estado. El valor de las propiedades puede ser un rango diferente al límite. El estado, al estar basado en valores susceptibles de cambio, puede modificarse con el simple hecho de que varié uno de estos valores. Un mismo sistema, identificado por sus propiedades y los límites que estas fijen, puede tener varios estados.

Para la definición del equilibrio y proceso se toma como base los dos siguientes principios:

- Entre dos equilibrios siempre hay un proceso y entre dos procesos siempre hay un equilibrio.
- El cambio del valor de una propiedad ocasiona el cambio en el valor de al menos una propiedad diferente.

Equilibrio: Ocurre cuando el estado no cambia en el tiempo.

Proceso: Ocurre cuando el estado cambia.

La característica de equilibrio o proceso debe de ser definida previamente. Dentro de cada equilibrio pueden existir procesos y dentro de los procesos pueden existir equilibrios, de tal suerte que los principios enunciados sean un instrumento para definir equilibrios y procesos. Existen equilibrios denominados dinámicos en los cuales algunas de las propiedades no mantienen su valor, sin embargo, otras si lo hacen; un caso particular son los equilibrios cíclicos en donde las propiedades que no mantienen su valor constante siempre recorren el mismo

“camino” hasta llegar al “punto de partida”. También se presentan los procesos estables donde ocurre lo mismo que en el equilibrio dinámico, de tal suerte que el denominar a un fenómeno como proceso o equilibrio requiere de ciertas consideraciones ordinariamente del tipo prácticas.

El equilibrio está ligado con las relaciones entre las propiedades. El proceso está relacionado con las funciones de las propiedades. El cambio de una propiedad no puede hacerse sino de acuerdo a las funciones de un elemento, variable o componente que altera el estado y las relaciones entre las mismas. Por definición, si el cambio de valor de una propiedad no altera a ninguna otra propiedad el equilibrio no se altera; de esta forma el valor de la propiedad no es “puntual” sino más bien se trata de un rango.

El subsistema es una agrupación de propiedades del sistema para identificar claramente los equilibrios y los procesos. En fenómenos de equilibrios dinámicos o procesos estables donde algunas de las propiedades se mantienen y otras no, es conveniente agruparlas. De esta forma, aquellas que se mantienen constantes pueden formar un subsistema y estar en equilibrio, mientras que las que no se mantienen constantes son un proceso. El subsistema también se le conoce como elemento y está identificado por sus propiedades. Todas las propiedades del subsistema pertenecen al sistema, pero no todas las del sistema al subsistema. Los subsistemas se pueden considerar sistemas con propiedades, límite y alrededor, que está identificado con el sistema.

El modelo es una forma de representar al sistema. En éste se muestran los subsistemas y sus límites, se señalan las relaciones y las variables que se consideran para el estudio; también se le llama esquema. El modelo es un sistema en donde sólo hay flujo de información que representa a una realidad concreta. Los modelos pueden ser tan complicados como las maquetas de los ferrocarriles o tan simples como un carácter y de entre estos modelos sobresale el modelo matemático.

El modelo matemático es una relación entre varios componentes del sistema desde un punto de vista positivista. La percepción de la realidad está en función de magnitudes mesurables y la estructura en las relaciones puede expresarse mediante el lenguaje matemático. El modelo matemático representa al sistema, sus límites y alrededores y las propiedades seleccionadas, sin embargo, no representa todos los aspectos de la realidad concreta y, por tanto, es una versión simplificada. La complejidad del modelo matemático debe de ser mínima de tal forma que no se requiera de una gran cantidad de información y, a la vez, debe de proporcionar una confiabilidad aceptable.

Los modelos matemáticos suelen clasificarse en función de la incertidumbre, en deterministas y probabilísticos. Los modelos deterministas son más comúnmente aplicados ya que generan magnitudes de variables mesurables a partir de la información suministrada. Los modelos probabilísticos generan distribuciones de probabilidad, esto es, “nubes” de valores en los que una medición se puede encontrar. Los modelos deterministas tratan de “determinar” la relación entre las diferentes propiedades del sistema y los probabilísticos tratan de calcular la “probabilidad” de una propiedad. (Rodríguez, 2004)

2.5.2. Programación Lineal

“En algunas situaciones que pueden representarse con modelos lineales, nos encontramos con que solo tiene sentido aquellas soluciones de la región factible en las que toda o algunas de las variables de decisión sean números enteros. Estas situaciones pueden representarse mediante modelos matemáticos ligeramente diferentes de la programación lineal. Si todas las variables de decisión deben ser enteras, tenemos un problema de *programación lineal entera*. Si solo algunas variables de decisión deben ser enteras, pudiendo ser reales las demás, se trata de un problema de *programación lineal entera mixta*. (Dantzig & Cottle, 2003)

En algunos casos, todas o algunas de las variables enteras solo pueden tomar valores de 0 o 1. A estas variables se les llama variables binarias. De este modo tenemos tres tipos de variables:

- a) Variables no enteras o reales
- b) Variables enteras
- c) Variables binarias o de decisión

2.5.2.1. El modelo lineal multi-variable

Un Modelo de Programación Lineal matemática (MPL) donde todos sus componentes son de tipo lineal y poseen “ n ” variables de decisión, “ m ” restricciones del problema conocidas como restricciones tecnológicas, una sola función objetivo y “ n ” restricciones de no negatividad. Tanto la función objetivo como las restricciones del problema se relacionan con las variables de decisión a través de parámetros.

La investigación científica se puede agrupar en tres categorías: exploratoria, descriptiva y predictiva (Jimenez, 2012). Los modelos matemáticos se aplican de forma amplia en las últimas dos dando lugar a dos categorías de modelos matemáticos principales:

Descriptivos: Permiten relacionar un conjunto de propiedades del sistema con otro conjunto. Estos modelos se emplean como las relaciones entre las propiedades del sistema que representa la realidad concreta.

Predictivos: Permiten establecer un comportamiento entre dos estados del sistema. Estos modelos son los aplicados durante los procesos de tal forma que relacionan dos equilibrios contiguos.

2.5.2.1.1. Función objetivo

La función objetivo es la ecuación que será optimizada dadas las limitaciones o restricciones determinadas y con variables que necesitan ser minimizadas o maximizadas usando técnicas de programación lineal o no lineal. Una función objetivo puede ser el resultado de un intento

de expresar un objetivo de negocio en términos matemáticos para su uso en el análisis de toma de decisiones, operaciones, estudios de investigación o de optimización.

2.5.2.1.2. Restricciones

Cuando se habla de las restricciones en un problema de programación lineal, se refiere a todo aquello que limita la libertad de los valores que pueden tomar las variables de decisión.

Duran, (2006) menciona que el modelo matemático simple más utilizado que relaciona dos variables es el modelo lineal, este modelo mostrado en la ecuación 1 incorpora dos conceptos: la dependencia proporcional, también llamada tasa de cambio, pendiente o derivada, representada por b_1 y el coeficiente independiente, también llamado ordenada al origen representado por b_0

$$Y = b_0 + b_1X + U \quad (1)$$

La X es conocida como la variable independiente y Y como la variable dependiente, ambas son propiedades del sistema. Este modelo puede usarse considerando $b_0 = 0$ y se obtiene un modelo más sencillo, en donde b_1 se le conoce como constante de proporcionalidad.

El modelo lineal simple se puede generalizar para un conjunto de m variables explicativas en la forma que se muestra en la ecuación 2. Se muestra el conjunto de ecuaciones básicas utilizadas para el manejo de la información utilizando la ecuación. El modelo de una sola variable en muchas ocasiones no resulta totalmente capaz de explicar de forma precisa la realidad debido a que utiliza sólo una propiedad causal. Al incluir un mayor número de propiedades para determinar el efecto se puede disminuir el sesgo de estimación. El modelo multi-lineal establece una relación entre una propiedad del sistema llamada variable independiente y un conjunto de propiedades agrupadas en la variable independiente concebida como un vector. La ecuación 2 muestra este modelo en su forma escalar que puede escribirse en su forma vectorial.

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_mX_m + U \quad (2)$$

Para el empleo de este modelo es necesario considerar los siguientes supuestos:

- a) La variable de perturbación (U) está distribuida normalmente, poseen una media cero y una variancia constante.
- b) Las perturbaciones aleatorias (U) son independientes entre sí y poseen una variancia constante.
- c) La matriz de las observaciones X es un conjunto de números fijos, esto es, que la variación de Y depende solo de la variación de U . Los parámetros calculados y las pruebas de hipótesis están condicionadas a la matriz X .
- d) La matriz X posee rango $n > m + 1$; implica la necesidad de que sea mayor el número de puntos (n) que de los coeficientes por calcular ($m + 1$).
- e) No existe correlación lineal exacta entre las variables explicativas.

Se calcula la probabilidad de que la perturbación tenga distribución normal con media cero (Rodríguez, 2004).

El problema de la multicolinealidad, se presenta comúnmente en las ciencias sociales y una de sus causas es la imposibilidad de efectuar experimentos factoriales en los que las variables independientes sean a su vez independientes unas de otras (Rodríguez, 2004). En muchas ocasiones las variables independientes están relacionadas de forma que los coeficientes b calculados son inestables, esto es, que una pequeña variación en los datos muestrales ocasiona una gran variación en sobre dichos coeficientes. Una técnica empleada para resolver este problema es la regresión de cordillera. (Hoerl, 2016)

2.5.3. Programación Entera Mixta (PEM)

A esta categoría pertenecen aquellos problemas de optimización que consideran variables de decisión enteras o binarias, pero no de forma exclusiva. De esta forma un problema de PEM puede considerarse como un híbrido entre distintas categorías de modelamiento, siendo un caso

típico aquel que considera la mezcla de variables enteras y variables continuas (estas últimas características de los modelos de Programación Lineal).

Existen tres tipos de modelos por programación entera

- a) **Pura:** Son modelos similares a los de programación entera
- b) **Binaria:** Estos modelos lineales, las variables sólo toman valores 0 y 1, son usadas para uso probabilístico Donde 0 se rechaza la opción y 1 se acepta la opción.
- c) **Mixta:** Este tipo de modelos integra las variables puras y las mixtas

2.5.4. Programación Multi-objetivo

Los modelos de programación lineal se basan en la optimización de una sola función objetivo. Existen casos en donde lo más adecuado es tener varios objetivos (posiblemente opuestos), es decir varias funciones objetivo. En tales casos será imposible encontrar una solución única que optimice las funciones objetivas. En lugar de ellos se podrá buscar una solución intermedia, o de compromiso basada en la importancia relativa de cada objetivo. La programación lineal multi-objetivo es usada para resolver modelos con varias funciones objetivo.

2.6. Definiciones generales de Software

Los objetivos planteados persiguen la verificación, de tal forma que los métodos y técnicas presentados conlleven a este fin. La búsqueda de información referente a los residuos sólidos, a continuación de esta se desarrollaron temas relacionados con modelación matemática. La etapa final se describe a continuación con mayor detalle acerca de los softwares utilizados para el desarrollo del trabajo final, como por ejemplo para la elaboración de las cartografías claramente diseñadas y de la misma manera para la programación del modelo matemático.

2.6.1. Sistemas Informáticos Geográficos

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se pueden definir como una tecnología informática para gestionar y analizar información espacial. Más comúnmente se los puede denominar como una base de datos de tipo espacial.

Junto a estas definiciones, se encuentra una gran variedad de ellas, enfatizando a veces en el aspecto informático o en el geográfico. Como ejemplo, se citan a continuación algunas de estas definiciones:

“Un Sistema de Información Geográfica es un tipo especializado de base de datos, que se caracteriza por su capacidad de manejar datos geográficos, es decir, espacialmente referenciados, los cuales se pueden representar gráficamente como imágenes” (Olaya, 2012)

“Un Sistema de Información Geográfico (SIG) permite relacionar cualquier tipo de dato con una localización geográfica. Esto quiere decir que en un solo mapa el sistema muestra la distribución de recursos, edificios, poblaciones, entre otros datos de los municipios, departamentos, regiones o todo un país. Este es un conjunto que mezcla hardware, software y datos geográficos, y los muestra en una representación gráfica. Los SIG están diseñados para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar la información de todas las formas posibles de manera lógica y coordinada.” (Puebla & Gould, 1994)

“Un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión” (Palomar, 1990)

A parte de la denominación tradicional de los SIG, en algunos campos también se les denomina Sistemas de Información Georreferenciada.

2.6.1.1. Funciones de los SIG

Los SIG tienen básicamente las siguientes cuatro funciones:

a) Funciones para la entrada de la información

Una vez se ha obtenido la información, que ya de por sí es un proceso largo y complejo, hay que preparar esa información para que sea entendida por el SIG. Habitualmente, este proceso consiste en convertir la cartografía analógica a formato digital mediante la digitalización o similares.

Posteriormente, existe un proceso de corrección de errores de la etapa anterior. Hoy en día, la obtención de cartografía digitalizada se realiza de un modo más sencillo al existir mayor oferta en el mercado.

Del mismo modo será necesario obtener la información temática que acompaña al SIG. Aunque muchos SIG poseen su propio sistema de edición y gestión de bases de datos, la mayoría se basan en bases de datos relacionales exteriores.

Los propios SIG pueden adaptar estas bases de datos o bien conectarse a ellas con una relación cliente/servidor (SQL Server).

b) Funciones para la salida/representación gráfica y cartográfica de la información

Se refiere a las actividades que sirven para mostrar al usuario, datos incorporados en la base relacional del SIG, y los resultados de las operaciones analíticas realizados sobre ellos. Esto genera como resultado distintos mapas, gráficos, tablas que serán utilizados para las presentaciones bien en formato informático o sobre papel.

c) Funciones de gestión de la información espacial

De esta forma se aprovecha las bases de datos, la que tiene información espacial y la temática, para realizar consultas y obtener lo que se desea de la cartografía.

d) Funciones analíticas

Facilitan el procesamiento de los datos integrados en el SIG de modo que sea posible obtener mayor información, y con ella mayor conocimiento del que inicialmente se disponía. Esta es una de las características más utilizadas en un SIG, ya que, gracias a ella, se pueden estudiar simulaciones sobre un mismo caso para, de esta manera, obtener un mejor análisis. De todas las funciones analíticas, una de las utilizadas es, por ejemplo, el análisis de redes.

2.6.1.2. Aplicaciones de los SIG

Para poder comprender de un modo más completo toda la tecnología de los SIG, a continuación, se van a detallar varias de sus aplicaciones actualmente desarrolladas. Cada aplicación es fundamentalmente un desarrollo particular del software de SIG utilizado.

Estos avances se pueden dar en diferentes campos de la tecnología: mejorando la representación digital de la cartografía, avanzando en los procedimientos internos de los SIG, el topográfico y geodésico disminuyendo la cantidad y envergadura de los errores en la cartografía, etc. Todas estas aplicaciones se desarrollan a partir del SIG comercial. La mayoría de los SIG tienen una posibilidad de avance, gracias a los lenguajes de programación paralelos. Algunos paquetes comerciales tienen su propio lenguaje de programación (QGIS). Sin embargo, es más clarificador presentar una clasificación de las aplicaciones en función de donde se apliquen:

a) Inventario y gestión de los recursos naturales

Se ha dado a la tarea de que se requieren con urgencia los inventarios de suelo, agua, vegetación, etc., así como el inventario de riesgos a los que nuestras faltas de planeación nos han enfrentado, inventarios plasmados en mapas a un nivel de detalle suficiente, y con un lenguaje gráfico accesible para que el contenido de información pueda transformarse en conocimiento compartido por nuestra sociedad.

b) Los SIG como archivos espaciales

Consiste en convertir la abundante información de la cartografía sobre papel en digital. Se enfatiza en la conversión y no en un análisis posterior de la misma.

c) Planificación y gestión urbana.

Las dos bases de datos que se necesitarán son aquella que tiene elementos espaciales (calles, edificios, equipos municipales, etc.) y la base de datos temática (datos del padrón de población, económicos).

d) Catastros y Sistema de Información Catastral (SIC/LIS).

La información catastral consiste en el registro oficial de propiedades y de valores del suelo para así, establecer los impuestos correspondientes. Con los SIG lo que se consigue es la automatización de la tarea, obteniéndose también una inmejorable salida gráfica.

e) Gestión de Instalaciones (AM/FM).

Estas iniciales vienen del inglés Automatic Mapping/Facilities Management. Este tipo de aplicaciones son las más ampliamente desarrolladas en la actualidad. Su desarrollo viene condicionado, fundamentalmente, por la llamada tecnología de componentes (aunque otras aplicaciones también se desarrollen por esta tecnología, su verdadero desarrollo se presenta aquí), es decir, a partir de un SIG comercial se programan unas nuevas aplicaciones en forma de componentes independientes del SIG, pero que funcionan dentro de él.

f) La utilidad del SIG en estos casos es la de gestionar correctamente cualquier tipo de infraestructura

Redes de abastecimiento, tendidos eléctricos, instalaciones de gas, de telefonía, etc. El SIG interviene desde la fase misma del diseño de las redes hasta en las fases de mantenimiento y reparación de las redes.

g) Geo demografía y marketing

La finalidad de esta aplicación es estudiar las características demográficas, sociales, económicas que existen en un área determinada (barrio, ciudad, distrito, etc.) para alcanzar alguno de los siguientes objetivos:

- 1) Localizar comercios.
- 2) Determinar las zonas más propicias para lanzar campañas publicitarias
- 3) Creación de distritos geográficos homogéneos en cuanto a alguna característica predeterminada (cercanía a un centro comercial, ...)
- 4) Análisis de la penetración en el mercado de productos comerciales

h) Transporte.

La utilidad del SIG es fundamentalmente la elaboración de rutas para vehículos. Teniendo la cartografía digital de, por ejemplo, una ciudad, al detallar los puntos concretos por los que el SIG tendría que pasar, él mismo que brindará la ruta óptima. Esta aplicación unida a la tecnología del GPS (Global Position System) facilita las coordenadas en la que está situado el camión, podrá en un futuro indicar la ruta que deberá tomar para llegar al destino teniendo en cuenta al tráfico a esa hora, los posibles accidentes, etc.

Junto a estas aplicaciones básicas, se están abriendo unas nuevas que tendrán los SIG como una herramienta más de trabajo. Entre ellas cabe destacar todo tipo de aplicaciones medioambientales, que abarcan desde la gestión de residuos hasta el análisis de los acuíferos para ver la contaminación producida por un vertido incontrolado. Los estudios de Impacto Ambiental se pueden realizar también de una manera más fácil y cómoda en el caso, por ejemplo, del trazado de carreteras, de construcciones de presas, etc.

En definitiva, los SIG tienen su utilización en aquellas empresas que en su trabajo normal utilicen mapas y basen muchas de sus decisiones en criterios geográficos. Es en este caso

cuando todas las herramientas gráficas de análisis adquieren todo su potencial, ya que sin el concurso de la informática la toma de decisiones para una gestión correcta es más compleja.

2.6.1.3. Análisis del software gratuito para SIG

En la actualidad se encuentran en el mercado una gran cantidad de software informáticos en el entorno SIG. Este software de sistemas de información geográfica se puede clasificar en las siguientes categorías: comerciales, de dominio público y de enseñanza.

Los SIG se están desarrollando de modo que el personal requiera la menor formación posible y que, además, posea una alta flexibilidad frente a las modificaciones y las tendencias futuras (desarrollo de la tecnología de componentes, flexibilidad gracias a las relaciones cliente/servidor). Por último, dentro del software comercial, cabe realizar otra clasificación: entre los modelos vectoriales y los “ráster”.

Luego está el software de dominio público, que son elaborados por instituciones estatales u otras entidades públicas. La distribución suele ser gratuita o a un precio bajo a disposición de cualquier usuario. Como ejemplos de este software se encuentran:

GRASS del cuerpo de Ingenieros del Ejército Americano, ODYSEY del Laboratorio de Análisis Espacial de la Universidad de Harvard, etc.

El software SIG cuyo fin sea la enseñanza quiere posicionarse en un lugar intermedio entre los comerciales y los públicos. Su coste es bajo, y su representante más importante es el IDRISI de la Universidad de Clark. Una de las funciones más importantes de este tipo de software es la de iniciar al usuario en el mundo de los SIG, familiarizándose con los diferentes conceptos.

El IDRISI es uno de los ejemplos más clásicos de los SIG con modelo “raster”, que como se han detallado antes tienen un costo inferior, así como también Quantum GIS.

2.6.1.3.1. Descripción del software utilizado

Para el desarrollo del presente trabajo, se optó por tomar dos tipos de software; el primero un software del Sistema de Información Geográfica denominado QGIS (Quantum GIS), para la representación geográfica de elementos que utilizamos.

- **QuantumGIS**

Quantum Gis (QGis). Es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto, multiplataforma, desarrollado en QT Toolkit. Se publica bajo Licencia Pública General (GNU General Public License). Posee muchas características SIG comunes, proporcionadas por las funciones del núcleo y los complementos. Es un proyecto oficial de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

Características

- QGis puede ver y superponer datos vectoriales y ráster en diferentes formatos y proyecciones sin conversión a un formato interno o común.
- Los formatos admitidos incluyen Tablas de PostgreSQL con capacidad espacial, archivos en formatos ráster e imágenes admitidas por la biblioteca GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), datos ráster y vectoriales, de GRASS, de bases de datos, entre otros.
- Es capaz de diseñar mapas y explorar datos espaciales de forma interactiva con una interfaz amigable.
- Permite además crear, editar, administrar y exportar mapas vectoriales en varios formatos.
- Ofrece herramientas de digitalización para formatos admitidos por OGR y capas vectoriales de GRASS.
- Permite crear y editar archivos shape y capas vectoriales de GRASS.
- Geocodificar imágenes con el complemento Georreferenciador.

- Dispone de herramientas GPS para importar y exportar formato GPX y convertir otros formatos GPS a GPX.
- Crear capas PostGIS a partir de archivos shape con el complemento SPIT.
- Es capaz de guardar capturas de pantalla como imágenes georreferenciadas.
- Permite realizar análisis de datos espaciales de PostgreSQL/PostGIS y de otros formatos admitidos por OGR usando el complemento de Python fTools.
- QGIS actualmente ofrece herramientas de análisis vectorial, muestreo y geo procesamiento, geometría y administración de bases de datos. *Puede usar las herramientas de GRASS integradas, que incluyen la funcionalidad completa de GRASS de más de 350 módulos.
- QGIS también se puede usar como cliente WMS o WFS y como servidor WMS además de permitir exportar datos a un archivo Mapfile y publicarlos en Internet usando un servidor web con UMN MapServer instalado.

Recalcando que se procedió a la utilización de las versiones 2.18.14 y así mismo la versión 1.7.4. La primera de estas, por ser más actualizada y una interfaz mucho más manejable, se la utilizo para la representación geográfica de dichos elementos (edificaciones y contenedores). En el caso de la segunda, por un complemento denominado “Herramientas de Análisis”, se la utilizo para el cálculo de una matriz de distancias entre estos dos elementos ya mencionados.

2.6.2. Sistema General de Modelaje Algebraico - GAMS

En este apartado se habla específicamente de la estructura del lenguaje GAMS y sus componentes. Se debe enfatizar nuevamente que GAMS es un lenguaje de programación, y que los programas deben escribirse en el lenguaje para usarlo. Un software GAMS está contenido en un archivo de disco, que generalmente se construye con un editor de texto de elección (por ejemplo, el IDE de GAMS). Cuando GAMS se ejecuta, el archivo de entrada se envía para su procesamiento. Después de que este proceso haya finalizado, los resultados, que

se encuentran en los archivos de salida, se pueden inspeccionar. Por defecto, el registro de GAMS aparece en la pantalla mientras GAMS se ejecuta, manteniendo al usuario informado sobre el progreso y la detección de errores. Es responsabilidad del usuario inspeccionar los archivos de salida con cuidado para ver los resultados y diagnosticar cualquier error.

2.6.3. Características Importantes

- a) Tecnología de modelaje robusta y dimensional
- b) Hecho a la medida para aplicaciones complejas, de modelaje a gran escala
- c) Aumento de productividad a través de un ambiente de desarrollo eficiente
- d) Una ancha red académica y comercial
- e) Más de 30 años de experiencia en la industria y academia

2.6.4. Tipos de Modelos Básicos

- a) Programas de Enteros Lineales/Cuadráticos Mezclados (MIP/MIQCP)
- b) Programa de Enteros No Lineales Mezclados (MINLP)
- c) Problemas Complementarios Mezclados (MCP)
- d) Programas Matemáticos con Equilibrio de Constantes (MPEC)
- e) Sistemas No Lineales constreñidos (CNS)
- f) La arquitectura abierta de GAMS asegura una integración fácil de los modelos de optimización en toda clase de ambientes aplicación.
- g) Interfaces y herramientas de Conectividad
- h) Ejecución de modelos interactiva y orientada
- i) Ejecución distribuida (computación de gradillas)
- j) Intercambio de datos con DBMS, MS-Office, Matlab, etc.
- k) Componentes de librería con interfaces para C++, Java, .NET, etc.

2.6.5. GAMS Solvers

Información general para utilizar GAMS solvers:

- a) Uso básico
- b) Uso avanzado
- c) Opción de Solver

Un gran número de solvers para modelos de programación matemática han sido creados en GAMS.

GAMS es especialmente útil para problemas únicos que sean grandes y complejos que puedan necesitar muchas revisiones antes de establecer el modelo final. El sistema modela problemas en una manera compacta y natural a través de lenguaje de programación. El usuario puede cambiar la formulación del problema con facilidad, cambiar de un tipo de solucionador a otro y hasta convertir el problema de lineal a no lineal sin ningún tipo de problema.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En el apartado siguiente, se presenta el análisis de la situación actual el desarrollo y construcción del modelo matemático que se va a utilizar para el cumplimiento del objetivo planteado.

En el anexo 1 se recalca la metodología a implementarse durante el desarrollo de este trabajo, teniendo en cuenta desde un análisis de estudios similares realizados y hasta la culminación y cumplimiento de los objetivos planteados en este.

Para esto es necesario acentuar conceptos fundamentales, que nos servirán mucho y facilitará tanto en la construcción del modelo como en su programación.

3.1. Análisis de la situación actual

Los contenedores de basura que se colocaron en la ciudad de Ibarra, tienen gran demanda, muchas veces estos recipientes rebosan de basura, se llenan totalmente e incluso resultan insuficientes frente a la demanda, mostrado de tal manera en la figura 7:



Figura 7 Contenedor de basura rebozando
Fuente: (Expectativa, 2017)

La basura que se genera en la ciudad de Ibarra, es uno de los problemas fundamentales que tiene la urbe, antes la basura esta botada en las calles, porque los perros callejeros rompían las fundas de plástico, hoy la situación es diferente, existe la presencia de contenedores, pero distribuidos de manera incorrecta.

3.2. Construcción del Modelo Matemático

El cual se realizó un rediseño para adaptarlo a la problemática estudiada en varias bases de datos se determinó que el modelo propuesto por (Rossit, Broz, Rossit, Frutos, & Tohme, 2015) cumple con la mayoría de requerimientos para solucionar la problemática para el cantón Ibarra y tomando como eje principal la programación lineal entera mixta, se plantea el modelo multi-objetivo para así poder determinar la ubicación optima de los contenedores de basura dentro de toda la ciudad de Ibarra, centrándose esencialmente en la minimización de dos ejes principales tales como el costo de inversión de dichos contenedores y la distancia promedio que deben recorrer los usuarios para utilizar dicho contenedor. La utilización de dos funciones al final nos facilitara la comparación mediante gráficos estadísticos de las soluciones que este genere.

El desarrollo de este modelo está orientado a la correcta ubicación de los contenedores de residuos sólidos urbanos centrándose en una optimización multi-objetivo.

Para trabajar en el desarrollo de este modelo, se ha tomado como una base primordial el modelo propuesto por Rossit et. al, (2015) en el desarrollo del tema “Modelado de una red urbana de recolección de residuos plásticos en base a optimización multi-objetivo”.

Como ya lo mencionamos con anterioridad, este modelo matemático persigue dos diferentes objetivos:

- a) Minimizar el costo de inversión en la instalación de un nuevo contenedor de residuos.

- b) Minimizar la distancia promedio a recorrer por parte del generador hasta el contenedor asignado.

Antes de diseñar el modelo es muy importante tener en cuenta una serie de parámetros, índices e incluso algunas variables que facilitará entender y a construir el modelo de una mejor manera, como, por ejemplo, dentro de:

- a) Las variables binarias, K_{ij} que toma valores de 1 si el generador i deposita su residuo en el contenedor j , así como también, L_j que toma valor de 1 en el caso de que se instale un contenedor en la ubicación j ; y tomara un valor de 0 en caso de ser contrario.

Y una variable externa N que al final, nos ayudara a contabilizar el número de contenedores a instalarse.

- b) Los índices se van a encontrar I que es la cantidad potencial de generadores de RSU dentro del área urbana de la ciudad de Ibarra, mientras que, J es la cantidad potencial de posibles ubicaciones de contenedores de residuos sólidos urbanos.

- c) Los parámetros se utiliza **distancia** i_j que sería la distancia entre el generador i y la ubicación j ; **costo_instalacion** proporciona el costo de obtener e instalar un contenedor de RSU; **tasa** es la cantidad de residuos producidos en la diariamente por un generador i ; **capacidad_contenedor** es la capacidad máxima que soporta un contenedor de residuos sólidos urbanos; **distancia_max1** es la distancia máxima que está dispuesto a recorrer el generador hasta depositar el residuo en un contenedor; **coef_llenado** es la relación entre la densidad de los RSU y la carga nominal de un contendor.

Con lo anteriormente mencionado se va a construir en modelo matemático, para esto es primordial construir la función objetivo y sus restricciones respectivas:

3.2.1. Función Objetivo

De esta manera se puede declarar a la función como:

$$F = F(f_c ; f_d)$$

Dentro de la cual f_c representa la función objetivo para minimizar el costo de instalación de un contenedor de residuos, mientras que, f_d es la función objetivo que nos ayudara a minimizar la distancia promedio a recorrer por parte del generador hasta el contenedor asignado.

Para esto se plantea cada función como:

$$f_c = \sum_j^J (L_j * costo_instalacion)$$

$$f_d = \sum_{i,j}^{I,J} (distancia_{i,j} * K_{i,j})$$

La función $F = F(f_c ; f_d)$ minimiza de manera conjunta las dos funciones objetivas, es por esto que, la convierte en una función multi-objetivo.

3.2.2. Indicadores de eficiencia del modelo

3.2.2.1. Indicador de minimización

Con este indicador, se optimiza de manera eficiente y de manera conjunta el costo de adquirir un contenedor e instalarlo, y a su vez, reduce la distancia entre un generador y un contenedor, es decir, esta debe ser la mínima que está dispuesto a caminar una persona hasta colocar su residuo en un contenedor.

3.2.2.2. Indicador de satisfacción

Es la máxima satisfacción que tiene el cliente, en este caso, VIRSAP-EP, al momento de manejar el modelo y ajustarlo a las necesidades propias de la empresa, es decir, el modelo está en una versión libre para la modificación de variables que son alterables con el paso del tiempo o de acuerdo a la necesidad económica.

3.2.3. Restricciones

En el momento de trabajar en la localización óptima de los contenedores de residuos sólidos urbanos, se debe restringir el modelo, es decir, ponerle limitaciones y que trabaje sobre estas, de esta manera se enumera las más esenciales, pero a su vez las que justifiquen el desarrollo del trabajo, entre estas se tiene:

a) Restricción de distancia del generador al contenedor

Con esta restricción se está limitando la distancia entre el generador y el contenedor en el cual se debería de depositar los residuos, es decir, no permite que sobrepase la distancia máxima tolerable a la cual las personas están dispuestas a desplazarse desde su hogar hasta la ubicación del contenedor.

$$K_{ij} * distancia_{ij} \leq distancia_max1$$

b) Restricción de capacidad máxima del contenedor

Esta restricción limita la capacidad del contenedor, es decir, limita la cantidad de generadores que pueden utilizar dicho contenedor.

$$\left(\sum_I tasa * K_{ij} \right) * coef_llenado \leq capacidad_contenedor * L_j$$

c) Restricción de un generador para un único contenedor

Esta restricción establece un contenedor para un generador, es decir, un generador puede depositar su residuo en un único contenedor.

$$\sum_i^I K_{ij} = 1$$

d) Restricción para sumar contenedores a instalarse

Con esta, se tiene de una manera más fácil y sencilla la cantidad de contenedores de residuos que necesitaremos para instalar.

$$\sum_{j=1}^N L_j = N$$

Naturalmente, existe un claro conflicto entre los objetivos considerados. La instalación de una mayor cantidad de contenedores, lo que ocasiona un alza indeseada del costo de inversión de los mismos, permitirá que la distancia promedio que deben recorrer los usuarios del sistema se reduzca. Consecuentemente, si se reduce la cantidad de contenedores disponibles, lo cual implica un abaratamiento de los costos de inversión, aumentará la distancia promedio que separa a los usuarios de los respectivos contenedores asignados.

En un problema multi-objetivo cuando la alternativa ideal es inalcanzable, la elección óptima o mejor solución de compromiso es aquella solución más próxima al punto ideal. Esta regla de comportamiento suele denominarse axioma de Zeleny. De acuerdo con este postulado, dado un conjunto de soluciones, la solución preferida será aquella que se encuentre a la distancia más próxima del punto ideal. De esta forma, puede definirse el grado de proximidad existente entre un objetivo k-ésimo (f_k) y su valor ideal o el mejor valor posible para el objetivo k-ésimo en la región factible (f_k^*), de la siguiente manera: $f_k^* - f_k$

Una vez definido el grado de proximidad el paso siguiente consiste en agregar los grados de proximidad para los distintos objetivos del problema multi-objetivo. Debido a que, en general, los objetivos están medidos en unidades dimensionales diferentes, la suma simple de los grados de proximidad no tiene valor real. Por lo tanto, se procede a su normalización. Una manera de normalizar los objetivos, es la siguiente: $h_k = \frac{(f_k^* - f_k)}{(f_k^* - f_{k^*})}$

Donde h_k representa el grado de proximidad del objetivo k-ésimo normalizado y f_k^* representa el valor anti-ideal de dicho objetivo (el peor valor posible para el objetivo k-ésimo sobre la región factible). h_k , está acotado entre 0, cuando alcanza su mejor valor posible o ideal, y 1, cuando alcanza su peor valor posible o anti-ideal.

Finalmente, este enfoque permite incluir las ponderaciones w_k que representan las preferencias que tiene el agente decisor para cada objetivo. Resolviendo el modelo para distintas ponderaciones posibles podrán encontrarse distintas soluciones no dominadas que permitirán explorar la frontera de Pareto del problema. De esta forma, se plantea la siguiente función objetivo con la agregación de los grados de proximidad normalizados ponderados: $F = \sum_k^K w_k * h_k$

En términos del problema bajo análisis en este trabajo la función objetivo general puede definirse de la siguiente manera:

$$\text{Min } F = w_c * \frac{f_c^* - f_c}{f_c^* - f_{c^*}} + w_d * \frac{f_d^* - f_d}{f_d^* - f_d}, \text{ donde } \begin{cases} f_c = \sum_j^J (L_j * \text{capacidad_contenedor}) \\ f_d = \sum_{ij}^{IJ} (\text{distancia}_{ij} * K_{ij}) \end{cases}$$

Donde w_c y w_d son los pesos relativos asociados a os distintos objetivos y estableciéndose que $w_c + w_d = 1$

3.3. Definiciones básicas de GAMS

a) Title

Esencial para nombrar o ponerle un título a programación que se desarrolla.

b) Sets

Aquí se define todos los conjuntos de inputs o datos de entrada del problema en forma de vectores de fila o columna.

c) Parameter

En este punto, se indica los valores de un parámetro relacionado con las variables de decisión de un modelo de optimización

d) Scalar

Se define aquí todos los conjuntos de datos escalares (vectores sin dirección del problema)

e) Variables

Aquí, se define las variables del modelo, es decir, todos los datos que pueden cambiar de acuerdo al modelo matemático de optimización.

Dentro de estas podemos identificar, como las más importantes, las siguientes:

- a. **Positive variable.**- son aquellas variables cuyos valores deben ser estrictamente positivos.
- b. **Binary variable.**- son aquellas variables de valor “1” o “0”, “si” o “no”, que permiten decidir si un recurso se utiliza “1”, o no se utiliza “0”, dependiendo de si se cumple con las restricciones y de si se cumple con la/s funciones objetivo/s.

f) Equations

En primer lugar, se define el alias de cada ecuación, es decir, una frase que indique que representa cada ecuación.

Luego se define matemáticamente las ecuaciones e inecuaciones de su modelo, poner “;” al finalizar cada ecuación.

g) Model

Sirve para indicar el nombre del modelo a resolver, el nombre del modelo se lo puede encontrar en TITLE.

h) Solve

Se indica aquí como resolver el problema en Max/Min, según sea el caso, y el tipo de programación a usar.

Aquí se indica cuales son las variables de decisión que usted desea visualizar en la pantalla de resultados. (.1 significa “valor óptimo”)

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

Para alcanzar el objetivo es necesario la combinación de dos elementos, uno de estos la cartografía que es el campo que involucra la representación gráfica de elementos espaciales, entrada manipulación y salida de datos geográficos con ayuda del computador; así como también de la programación matemática que es una potente técnica de optimización utilizada en el proceso de toma de decisiones.

4.1.Cartografía

La representación cartográfica del área urbana de la ciudad de Ibarra, permitirá identificar los predios construidos y predios no construidos, es decir, el lugar en donde en donde existe una construcción de manera muy en particular una construcción domiciliaria sin tomar en cuenta construcciones comerciales, educativas, bancarias y más construcciones relacionadas a este tipo.

4.1.1. Mapeo en QGIS

Como parte esencial del trabajo es importante tener claro los dos tipos de elementos, por un lado, determinar todas las construcciones domiciliarias dentro del sector urbano de la ciudad, así como también, las posibles ubicaciones de los contenedores, es decir, la ubicación de estos de una manera aleatoria sin tener en cuenta ninguna especificación.

4.1.1.1.Mapeo de construcciones domiciliarias

El mapa facilitado por el Departamento de Avalúos y Catastros del Gobierno Autónomo Descentralizado San Miguel de Ibarra, en el cual consta el sector urbano mapeado por predios o propiedades. En el anexo 2, se pudo identificar el plano en versión completa de los predios de la ciudad de Ibarra. Una figura aumentada de lo dicho se presenta a continuación:



Figura 8 Predios Ibarra
Fuente: Elaboración propia –QGIS

En el anexo 3 se muestra, partiendo de esta información anterior, la localización de los predios tanto construidos como los predios no construidos, para expresar gráficamente lo mencionado, se muestra a continuación en una figura aumentada.

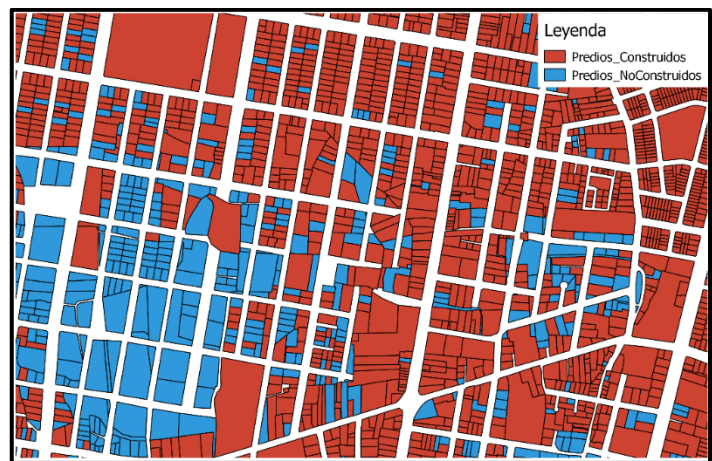


Figura 9 Predios construidos y no construidos
Fuente: Elaboración propia –QGIS

Con la ayuda de las herramientas de geometría de QGIS 1.7.4 se pudo identificar las construcciones, es decir, se representó con un punto cada una de estas, como se lo evidencia en el anexo 4 y una muestra en particular en la figura siguiente.

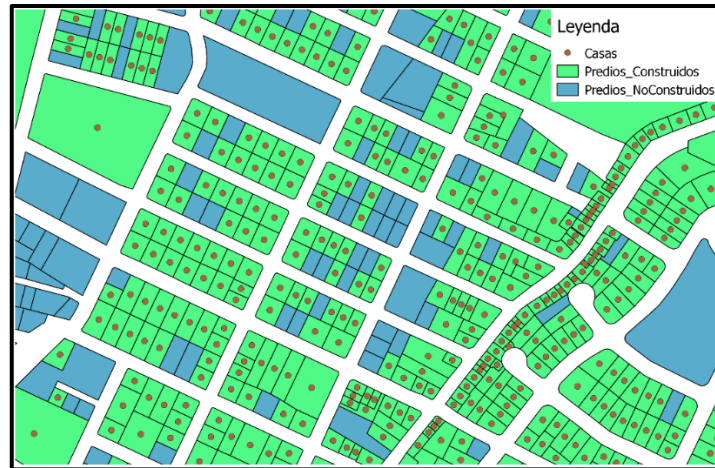


Figura 10 Construcciones
Fuente: Elaboración propia –QGIS

Una vez obtenido todas las construcciones, los puntos que representan una casa o construcción dentro del área urbana de la ciudad de Ibarra, se culmina el trabajo denominado mapeo de construcciones.

4.1.1.2. Mapeo de posibles ubicaciones de los contenedores

Para la implementación del modelo propuesto por Rossit et. al., (2015) en el presente trabajo luego de la revisión bibliográfica de la problemática se determinó que se podría colocar como posibles ubicaciones de los contenedores a cada una de las cuadradas del cantón Ibarra, inspirados sobre todo en el modelo de Khan & Samadder, (2016).

En este apartado, como en el caso anterior, se va a tomar como base el mapa de Ibarra proporcionado por el GAD-San Miguel de Ibarra.

Para este caso, se trabajó directamente con el plano mostrado en el anexo 1 y situando de manera aleatoria una posible ubicación de los contenedores dentro de la ciudad, este asentamiento de contenedores se lo realizó en cada una de las esquinas de cada cuadra, en relación a como se lo ha venido realizando hasta la actualidad.

Una vez terminado este trabajo se obtuvo el plano de los contenedores y sus posibles ubicaciones, como se lo muestra en el anexo 5 y aquí una breve muestra aumentada.



Figura 11 Contenedores
Fuente: Elaboración propia –QGIS

4.1.2. Obtención de matrices distancia

La obtención de estas dos capas o consideradas como un mapa digital, la primera denominada “casas” y la segunda “contenedores” nos permitirá elaboración de una matriz a través del software QGIS 1.7.4 mediante su herramienta de análisis; este software nos permite obtener distancias entre dos puntos en la capa o un conjunto de capas, y el resultado de salida se lo puede expresar como:

- a) Matriz de distancia cuadrada
- b) Matriz de distancia lineal
- c) Matriz de distancia resumen. - puede limitar las distancias de las entidades k más cercanas

Para nuestro caso se va a hacer uso de la matriz de distancias cuadrada, es decir, se consigue un matriz $N \times T$.

Esta matriz será utilizada a continuación para el desarrollo del modelo.

El proceso realizado en el apartado 4.1.1 facilitará este trabajo, para esto, se procede a utilizar las dos capas, la primera denominada “casas” y la segunda “contenedores”, para la obtención de la matriz, en primer lugar, se realiza una numeración des 1 hasta n , tanto en la primera capa como en la segunda, dando como resultado:

Para las casas:

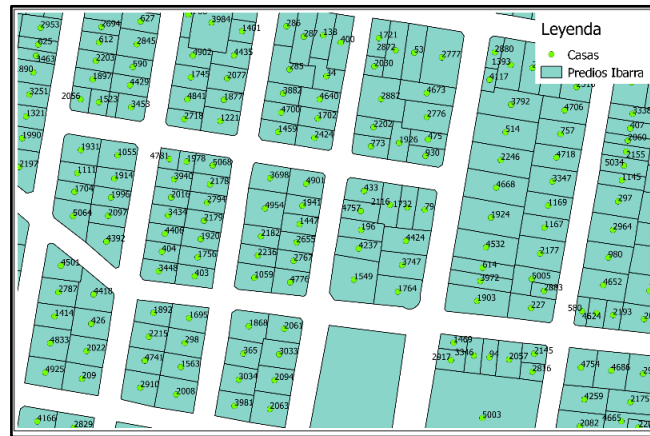


Figura 12 Numeración construcciones
Fuente: Elaboración propia –QGIS

Para los contenedores:

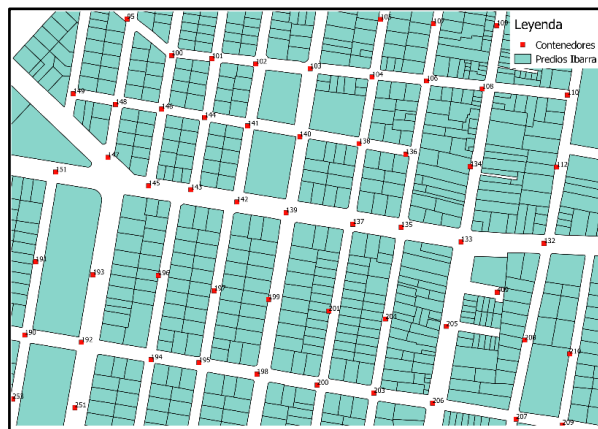


Figura 13 Numeración contenedores
Fuente: Elaboración propia –QGIS

Y para los dos, en conjunto:



Figura 14 Numeración construcciones y contenedores
Fuente: Elaboración propia –QGIS

La numeración, tanto de casas como de contenedores, se lo puede observar de manera global en el anexo 6.

Una vez terminado en procesos se procede a la obtención de la matriz NxT, para esto vas a hacer la utilización del software QGIS versión 1.7.4 y de su herramienta de análisis para la obtención de esta.

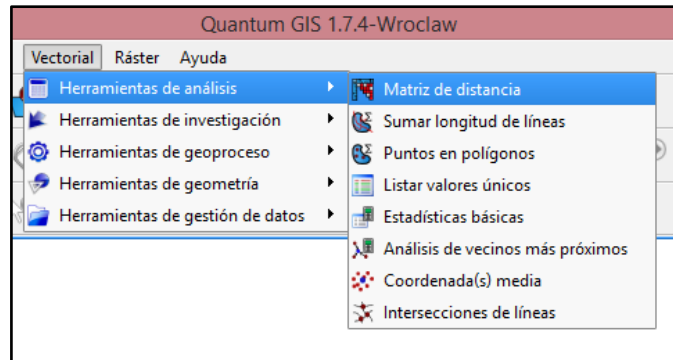


Figura 15 Herramienta de análisis - Matriz de distancia
Fuente: QGIS

Con esta herramienta se procede al cálculo de la matriz, en la siguiente ventana emergente que se abre, se toma a la capa “casas” como la capa de puntos de entrada, mientras que, la de “contenedores” como la capa de puntos objetivo. Seleccionar el tipo de matriz a obtener, para este caso un tipo de matriz NxT; seleccionar el destino para el documento a generarse mediante la opción “explorar” y por último “ok” para comenzar con el proceso de obtención

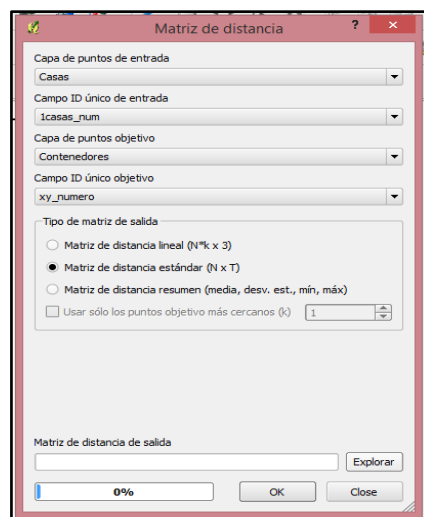


Figura 16 Parámetros de matriz de distancia
Fuente: QGIS

4.2. Programación del modelo

Partiendo de las definiciones mencionadas en el apartado 3.3, se procede a la programación del modelo matemático definido en el punto 3.2; para este proceso con la ayuda del software de programación GAMS versión 23.9.4 y tomando lo más esencial y primordial para dicha programación:

4.2.1. Title

Para el modelo, se lo ha denominado a la programación como “Contenedores”

4.2.2. Sets

Como conjuntos de entrada se tiene, al primero con el nombre de “generadores” y representado por i , y al segundo “contenedores” representado con j .

4.2.3. Parameter

Dentro de este elemento, se tiene valores que se relacionan directamente con las variables de decisión y datos externos que necesariamente deben ser ingresados, para este caso, por la magnitud de datos de distancia que se maneja, se procede a incorporar una matriz detallada en Excel, de la siguiente manera:

Si se quiere importar esta tabla a GAMS, el archivo .xlsx debe guardarse en la carpeta "projdir" localizada en la carpeta documentos y una sub-carpeta denominada gamsdir (como caso de ejemplo, se nombra a dicho archivo como, results.xlsx). Entonces se puede usar la herramienta GDXXRW. Esta herramienta convierte .xlsx en archivos .gdx que GAMS puede leer. Escribiendo el código, como un ejemplo:

```
$CALL GDXXRW.EXE results.xlsx par=data rng=sheet1!A1:D3
Parameter data (i,j);
$gdxin results.gdx
$load data
Display data
```

La primera línea permite leer results.xlsx y genera un archivo .gdx. par = data define que la tabla es un parámetro llamado "datos". Finalmente se especifica el rango y la hoja que se desea leer.

La segunda línea define el conjunto de los datos del parámetro.

La tercera línea carga el archivo .gdx.

La última línea carga el parámetro.

4.2.4. Scalar

Se toma en cuenta valores como: “*costo_instalacion*” que vendría siendo el costo de instalar un contenedor, “*capacidad_contenedor*” que es la capacidad máxima de un contenedor, “*tasa*” que es la denominada tasa de generación de residuos en cada generador, “*distancia_max1*” que es la distancia que está dispuesto a recorrer un generador hasta la ubicación de un contenedor y “*coef_llenado*” que es la relación entre la densidad de los RSU y la carga nominal de un contenedor.

Valores que va a ser utilizados para que funcione el modelo y obtener la mejor solución, estos fueron validados con la empresa pública VIRSAP.

4.2.5. Variables

Aquí se menciona todas las variables, ya sean positivas o de decisión, para este caso de estudios se señala a las siguientes: como variables positivas tenemos z "función multi-objetivo", z_1 "función objetivo1", z_2 "función objetivo2", N suma de contenedores a instalar; mientras que como binarias tenemos K si "generador deposita en ubicación" y L si "instala un contenedor en la ubicación"

4.2.6. Equations

Es importante, tener en cuenta, tanto la función multi-objetivo, las funciones objetivas y las restricciones a las que va a estar sujeto el modelo, nombrándolas de la siguiente manera

- a) **obj_general.** - función multi-objetivo
- b) **obj1.**- función objetivo1
- c) **obj2.**- función objetivo2
- d) **GenerConten.**- restricción de distancia del generador al contenedor

- e) **Capacidad.**- restricción de capacidad máxima del contenedor
- f) **Deposito.**- restricción de un generador para un único contenedor
- g) **SumaInstCont.**- restricción para sumar contenedores instalados

4.2.7. Model

Aquí se menciona que es lo que queremos resolver, por ejemplo, *Contenedores /ALL/*

4.2.8. Solve

Para este modelo, y para este trabajo se necesita que se haga una minimización, es aquí donde se especifica, de la siguiente manera:

CONTENEDORES USING MIP MINIMIZING z1

Tomando en cuenta la función multi-objetivo (z) así como también funciones objetivas (z1 y z2).

Para confirmar lo mencionado con anterioridad, se presenta en el anexo 7 la programación realizada en el software GAMS.

4.3. Validación del modelo

Una vez obtenidos los datos necesarios, tanto en lo que concierne a matriz de distancias y la programación del modelo, se procede a la ejecución del mismo, para validar si funcionamiento y si es necesario realizar las correcciones respectivas, ya sea, en la matriz de distancias o directamente en la misma programación, de la misma manera, verificar que los datos de solución obtenidos sean los correctos.

Para esto, se procedió a realizar pruebas piloto para determinar su correcto funcionamiento del modelo en el software GAMS.

Antes de realizar la prueba piloto, se optó por tomar una matriz de distancias que en comparación con las demás, esta era sumamente pequeña, con valores no reales; durante las pruebas realizadas con esta pequeña matriz, surgieron errores que fueron solucionados durante su proceso como se lo evidencia en el anexo 8.

Mientras que en anexo 9 se puede evidenciar los errores surgidos durante el funcionamiento de la prueba, estos errores pueden surgir por diferentes motivos entre los más importantes se puede destacar la capacidad del computador con el que se está trabajando, las limitaciones del software, ya sea en temas de licencia o en el manejo de datos que este soporta, la cantidad de datos con los que se está trabajando es sumamente grande, que vendría a ser otro de los principales causantes del error.

Para la prueba piloto, cabe recalcar que se está trabajando con la matriz general de 30404 por 3023, es decir que, contamos con 30404 casas generadoras de residuos y 3023 posibles ubicaciones de los contenedores de residuos sólidos urbanos; por tal motivo, el análisis total tendría una duración, en horas, extremadamente grande, en este caso surge un error a partir de la hora 33 y con 34 minutos, evidenciado en el mismo anexo 10.

En relación con el software, se trabajó con un software que no está totalmente licenciado, es decir, solo se cuenta con algunos solucionadores de optimización que limitan la utilización del software.

De la misma manera, el computador con el que se trabaje tiene una limitación para el análisis de los datos, las diferentes pruebas se las realizo en dos diferentes tipos de computador, y obteniendo resultados muy diferentes, no en la solución más bien el tiempo que dura en realizar el análisis, como primera máquina se utilizó un computador con procesador Intel® Core™ i3-2350M CPU @ 2.30GHz con un sistema operativo de 64bits y una memoria instalada de 4,00GB, y como segunda opción un computador con procesador Intel® Core™ i7-4790M CPU @ 3.60GHz con un sistema operativo de 64bits y una memoria instalada de 6,00GB, los resultados en estas dos ejemplares, son muy distintos, en tema de tiempo, el primer caso tiene una duración del doble de lo que se demora el segundo, es decir, si en el primer caso se tiene una duración de 1 hora, en el segundo caso, la duración sería de 30 minutos; esto se debe a la capacidad que tienen cada una, ya sea en los procesadores que son más rápidos para sentenciar

la información y analizarla, para expresar gráficamente esto, se plasma los resultados en la figura siguiente:

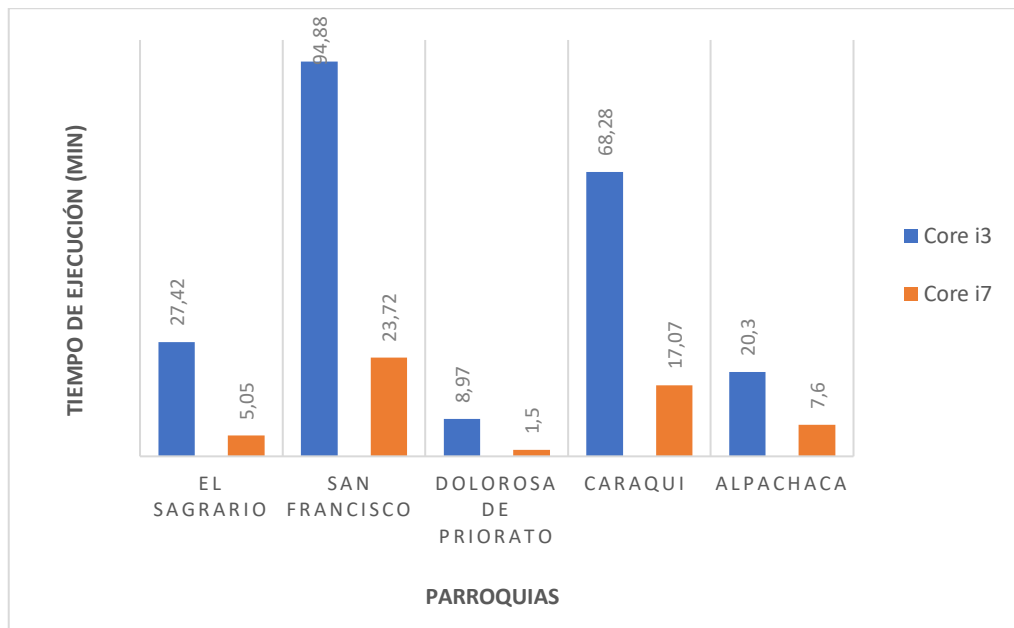


Figura 17 Comparación entre dos computadores del tiempo de resolución del modelo
Fuente: Elaboración propia

En la figura siguiente, se muestra la cantidad de generadores, es decir. Las construcciones por cada una de las parroquias existentes en cada parroquia, de la misma manera las posibles ubicaciones de los contenedores de basura; una matriz generador-contenedor hace entender el desarrollo de la figura 15 que expresa los tiempos de duración, dichos tiempos están expresados por la magnitud de datos con las se está trabajando en las matrices mencionadas con anterioridad.

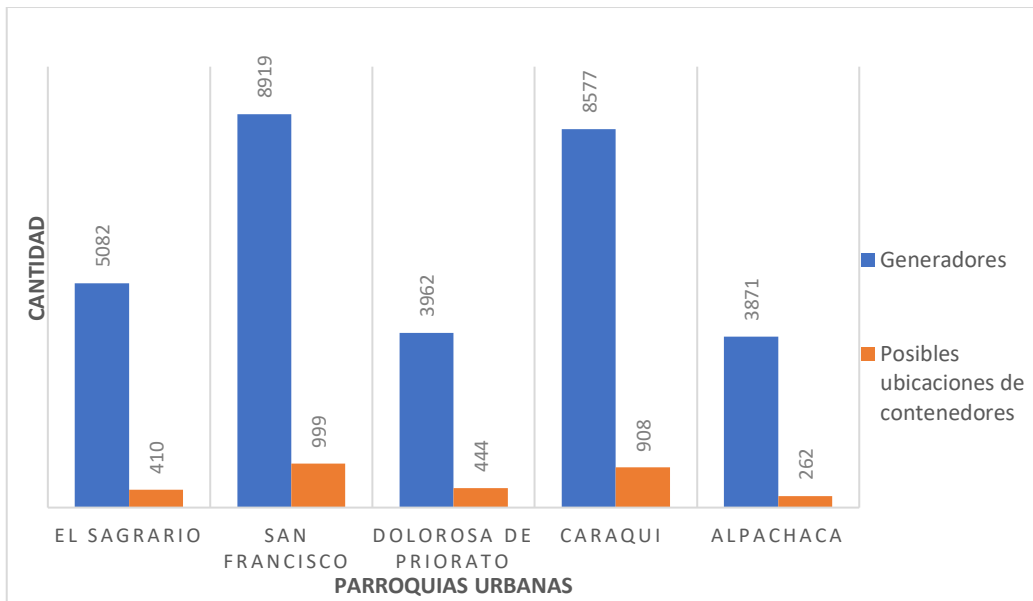


Figura 18 Cantidad de generados y posibles ubicaciones de contenedores.

Fuente: Elaboración propia

Los errores generados, se dieron solución y se tomó la mejor medida para realizar las pruebas respectivas y comprobar que el modelo está en su correcto funcionamiento y los resultados son los que esperamos, lo evidenciamos en el anexo 10, que especifica que al final de las pruebas, el tiempo de duración fue de 10 horas y 36 minutos y con una solución óptima de contenedores a instalarse de 234, recalando que estos valores son obtenidos de pruebas circunstanciales realizadas, con datos no reales.

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN

Con la validación de modelo en el punto 4.3, en este apartado se procede al planteamiento de los resultados obtenidos, mencionado que, para evitar los posible causantes de errores ya se por la capacidad del computador, limitaciones del software y la cantidad de datos que contiene la matriz, se procedió al realizar la división del área urbana de la ciudad de Ibarra, en este caso se lo realizo tomando en cuenta las parroquias en las que esta se divide: El Sagrario, San Francisco, Caranqui, Alpachaca y la Dolorosa de Priorato.

Así como también, la utilización del computador Intel® Core™ i7-4790M CPU @ 3.60GHz con un sistema operativo de 64bits y una memoria instalada de 6,00GB, para reducir la cantidad de tiempo de solución.

Para determinar la solución por parroquias, se debe volver a realizar el punto 4.1 y 4.2 para cada una de las parroquias.

El anexo 11 nos facilita la vista del mapeo de “casas” y “contenedores” para cada una de las parroquias existentes en la ciudad de Ibarra.

Mientras que el único proceso para la programación seria exportar el archivo en Excel de cada una de las parroquias correspondientes.

El modelo fue aplicado en las diferentes parroquias urbanas de la ciudad, cada una de estas densamente pobladas y se supone una recolección de tipo diaria de residuos y, por lo tanto, se utilizó la tasa de generación diaria.

En relación a los generadores, se tomó en cuenta un promedio de 4 habitantes por casa.

Se consideró una capacidad del contenedor de 510 *kg* (Ambiental, 2017). El costo de compra e instalación de un contenedor se estimó en \$ 570. La distancia de tolerancia máxima que está dispuestos a recorrer las personas para depositar su residuo se consideró en 100 m., la tasa de generación en $2,74 \frac{kg}{generador}$ y como coeficiente de llenado 0,55.

Los modelos fueron resueltos utilizando el software de resolución IBM ILOG CPLEX en un entorno de GAMS® (versión 24.9.4). Se utilizó un computador con un procesador Intel® Core™ i7-4790M CPU @ 3.60GHz con un sistema operativo de 64bits y una memoria instalada de 6,00GB.

Los resultados para para cada una de las parroquias lo tenemos a continuación:

5.1.El Sagrario

Se consideraron 5082 generadores de residuos sólidos urbanos, es decir, un aproximado de 20328 personas, así como también, se consideraron 410 posibles ubicaciones de los contenedores de residuos sólidos, distribuidas en esta parroquia.

Como mejor solución, la más óptima para este caso se lo evidencia en la figura siguiente, donde se tiene que se va a instalar un total de 192 contenedores de residuos:

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--- VAR z	-INF	0.582	+INF	.
--- VAR z1	-INF	1.0944E+5	+INF	.
--- VAR z2	-INF	2.0636E+5	+INF	.
--- VAR N	-INF	192.000	+INF	.
z función multiobjetivo				
z1 función objetivo1				
z2 función objetivo2				
N suma de contenedores a instalar				

Figura 19 Contenedores propuestos para la parroquia El Sagrario
Fuente: GAMS

El tiempo de resolución para este caso fue de 5 minutos y 3 segundos.

5.2.San Francisco

Se consideraron 8919 generadores de residuos sólidos urbanos, es decir, un aproximado de 35676 personas, así como también, se consideraron 999 posibles ubicaciones de los contenedores de residuos sólidos, distribuidas en esta parroquia.

Como mejor solución, la más óptima para este caso se lo evidencia en la figura siguiente, donde se tiene que se va a instalar un total de 454 contenedores de residuos:

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
VAR z	-INF	0.589	+INF	.
VAR z1	-INF	2.5878E+5	+INF	.
VAR z2	-INF	3.8425E+5	+INF	.
VAR N	-INF	454.000	+INF	.

z	función multiobjetivo
z1	función objetivo1
z2	función objetivo2
N	suma de contenedores a instalar

Figura 20 Contenedores propuestos para la parroquia San Francisco
Fuente: GAMS

El tiempo de resolución para este caso fue de 23 minutos y 44 segundos.

5.3. Caranqui

Se consideraron 8577 generadores de residuos sólidos urbanos, es decir, un aproximado de 34308 personas, así como también, se consideraron 908 posibles ubicaciones de los contenedores de residuos sólidos, distribuidas en esta parroquia.

Como mejor solución, la más óptima para este caso se lo evidencia en la figura siguiente, donde se tiene que se va a instalar un total de 532 contenedores de residuos:

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
VAR z	-INF	0.668	+INF	.
VAR z1	-INF	3.0324E+5	+INF	.
VAR z2	-INF	3.8140E+5	+INF	.
VAR N	-INF	532.000	+INF	.

z	función multiobjetivo
z1	función objetivo1
z2	función objetivo2
N	suma de contenedores a instalar

Figura 21 Contenedores propuestos para la parroquia Caranqui
Fuente: GAMS

El tiempo de resolución para este caso fue de 17 minutos y 4 segundos.

5.4. Alpachaca

Se consideraron 3871 generadores de residuos sólidos urbanos, es decir, un aproximado de 15484 personas, así como también, se consideraron 262 posibles ubicaciones de los contenedores de residuos sólidos, distribuidas en esta parroquia.

Como mejor solución, la más óptima para este caso se lo evidencia en la figura siguiente, donde se tiene que se va a instalar un total de 133 contenedores de residuos:

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--- VAR z	-INF	0.614	+INF	.
--- VAR z1	-INF	75810.000	+INF	.
--- VAR z2	-INF	1.6026E+5	+INF	.
--- VAR N	-INF	133.000	+INF	.
z función multiobjetivo				
z1 función objetivo1				
z2 función objetivo2				
N suma de contenedores a instalar				

Figura 22 Contenedores propuestos para la parroquia Alpachaca
Fuente: GAMS

El tiempo de resolución para este caso fue de 7 minutos y 36 segundos.

5.5. La Dolorosa de Priorato.

Se consideraron 3962 generadores de residuos sólidos urbanos, es decir, un aproximado de 15848 personas, así como también, se consideraron 444 posibles ubicaciones de los contenedores de residuos sólidos, distribuidas en esta parroquia.

Como mejor solución, la más óptima para este caso se lo evidencia en la figura siguiente, donde se tiene que se va a instalar un total de 230 contenedores de residuos:

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
--- VAR z	-INF	0.660	+INF	.
--- VAR z1	-INF	1.3110E+5	+INF	.
--- VAR z2	-INF	1.7989E+5	+INF	.
--- VAR N	-INF	230.000	+INF	.
z función multiobjetivo				
z1 función objetivo1				
z2 función objetivo2				
N suma de contenedores a instalar				

Figura 23 Contenedores propuestos para la parroquia La Dolorosa de Priorato
Fuente: GAMS

El tiempo de resolución para este caso fue de 1 minutos y 30 segundos.

Una vez analizado los resultados para cada una de las parroquias se procede a determinar el número total de contenedores a instalarse en la ciudad de Ibarra, para un aproximado de 121616 habitantes en el área urbana de la ciudad, se necesita tener instalados como mínimo 1541 contenedores de residuos sólidos urbanos, tomando en cuenta que el análisis se realizó en el caso de que la recolección sea diariamente, es decir, se brinda un nivel de servicio al 100% ;

mientras que, al variar la frecuencia de recolección ya sea a dos y tres veces por semana, el nivel de servicio baja a un 42,85% y 28,57% respectivamente.

El modelo SEDESOL, especifica que, en el peor de los casos, se debe realizar una recolección de residuos dos veces por semana.

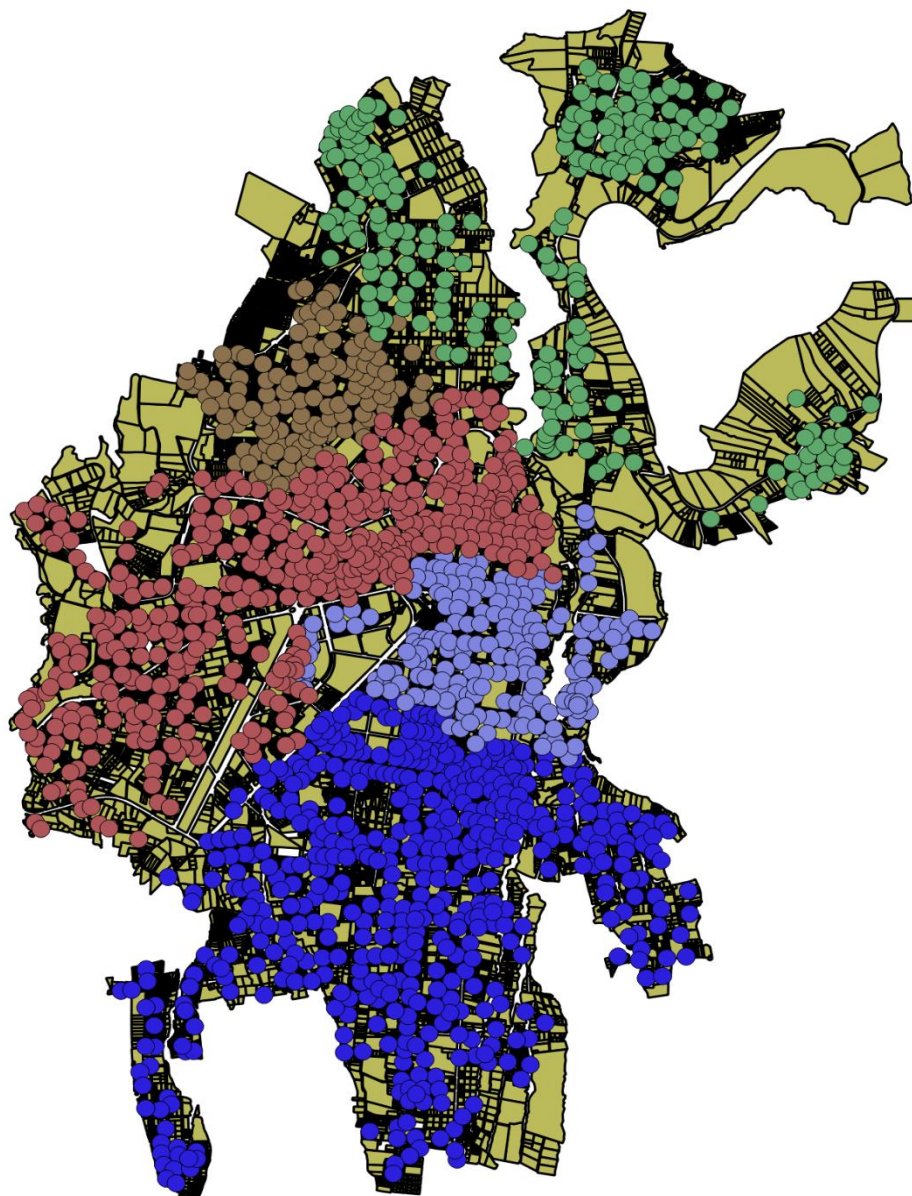
Se expresa a continuación, un resumen de lo anterior mencionado:

Frecuencia de recolección	Tasa ($\frac{kg}{hab+dia}$)	Promedio de habitantes por generador	Tasa ($\frac{kg}{generador+recoleccion}$)	Nivel de servicio (%)
7/7	0,685	4	2,74	100
7/3			6,39	42,85
7/2			9,59	28,57

Figura 24 Datos de tasa de generación de residuos dependiendo del nivel de servicio.

Fuente: (SEDESOL, 2008)

Teniendo en cuenta esto y brindando un servicio 100%, se puede plasmar los resultados obtenidos con anterioridad, para cada parroquia, en las siguientes gráficas, que muestran el mapeo de los contenedores de residuos a instalarse, es decir, la propuesta:



Leyenda

- Contenedores_ San Francisco
- Contenedores_ La Dolorosa de Priorato
- Contenedores_ El Sagrario
- Contenedores_ Caranqui
- Contenedores_ Alpachaca
- Predios Ibarra

Figura 25 Propuesta de ubicaciones de contenedores de residuos, por parroquias
Fuente: Elaboración propia-QGIS

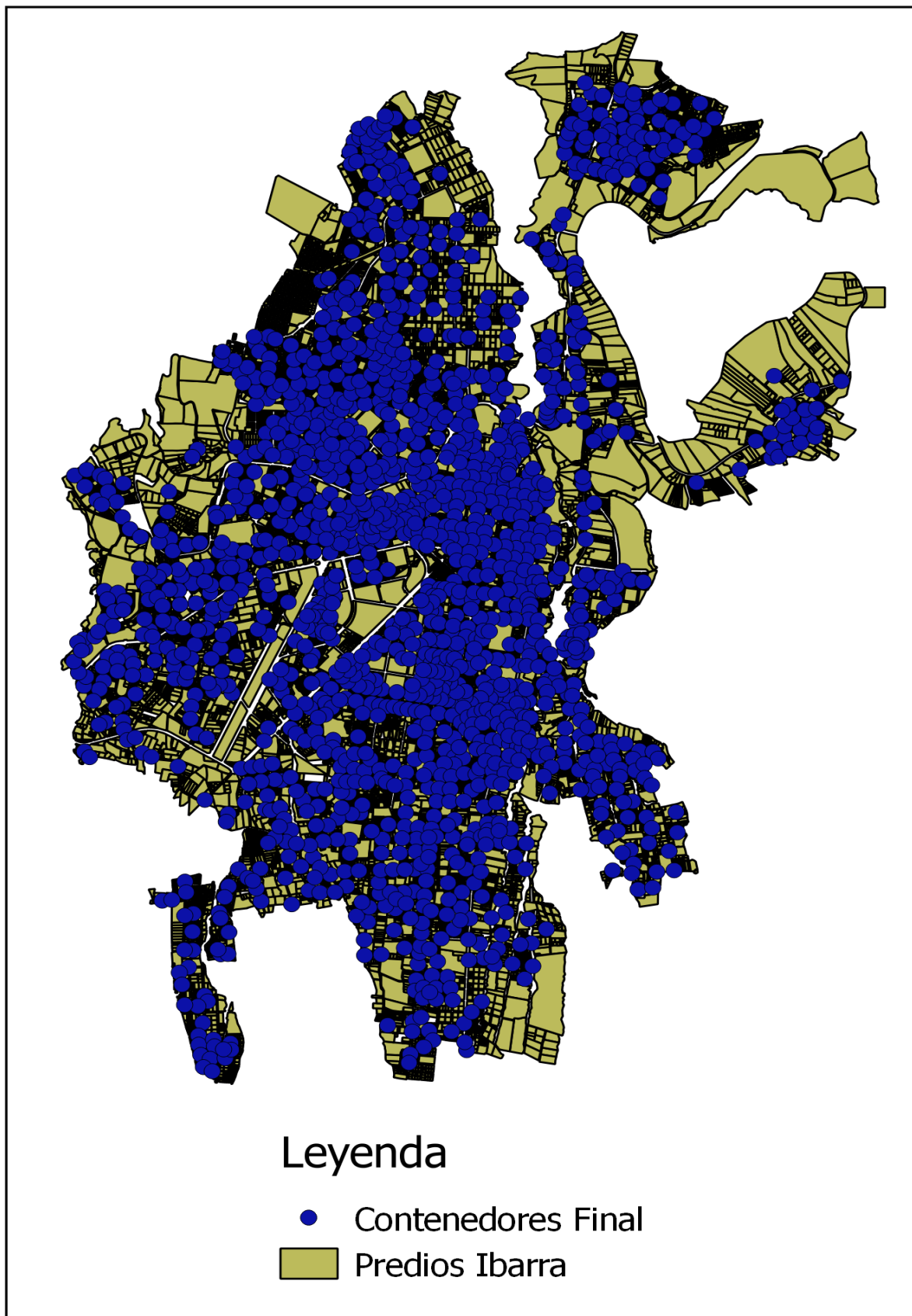


Figura 26 Propuesta de nuevas ubicaciones de contenedores de residuos
Fuente: Elaboración propia-QGIS

La figura 27 muestra los contenedores de residuos sólidos actualmente ubicados dentro del área urbana de la ciudad de Ibarra. Se observa como los contenedores están ubicados de acuerdo a una identificación de necesidad de recolección empírica, sin tomar en cuenta variable como la tasa de generación, la densidad poblacional e incluso sin identificar la zona en la que se está tratando el problema.

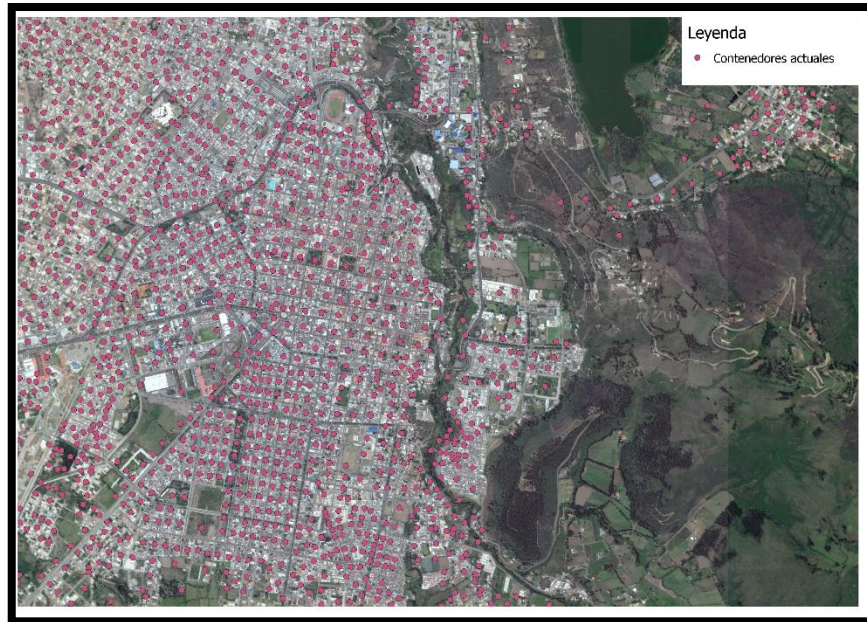


Figura 27 Ubicación actual de los contenedores
Fuente: QGis – Elaboración propia

Posterior a la aplicación del modelo matemático para encontrar la solución óptima de la ubicación de los contenedores dependiendo del comportamiento de la densidad poblacional, tasas de generación, zonas comerciales o residenciales, y en vista de establecer un criterio de comparación entre simulaciones, que permitiera escoger aquella que aproximándose significativamente a la solución esperada requiera menor tiempo de simulación y capacidad computacional. La figura 28 muestra la solución óptima obtenida bajo la combinación de las diferentes variables.



Figura 28 Propuesta de ubicación de contenedores
Fuente: QGis – Elaboración propia

El modelo matemático planteado y sujeto a variables que son analizadas y modificables con el tiempo, genera los resultados esperados, optimizando la cantidad de los contenedores a instalarse con su respectiva ubicación geográfica, brindando un nivel de servicio más eficiente al momento de almacenar los residuos hasta el momento de su recolección.

CONCLUSIONES

- La revisión entorno a modelación matemática y la generación, recolección, tratamiento y disposición de residuos sólidos urbanos, ha aportado de manera significativa en el desarrollo de este trabajo; estudios realizados anteriormente han plasmado la importancia de la elaboración e investigación para llevar a fin termino y entender que los residuos son un punto fundamental para futuros estudios.
- La localización óptima de contenedores de residuos sólidos urbanos, dentro de la ciudad de Ibarra, ayudó de una manera significativa en los temas de recolección de estos, pues basándose en parámetros estrictos como es la tasa de generación de residuos, la población y las zonas en las que se encuentra, ya sean zonas residenciales, comerciales, educativas, entre otras; permitieron tener un mejor manejo de los residuos y evitar la mala disposición de estos residuos.
- La modelación matemática permitió una distribución de un porcentaje de cada contenedor para cada generador de residuos, es decir, que esto permitió que cada persona que genere residuos desde su hogar, tengo un espacio en el contenedor asignado, de manera que este usuario se beneficie y tenga asegurado un espacio para sus residuos y de la misma manera la distancia entre su hogar y el contenedor sea la mínima.
- Con esta propuesta, se mejoró la calidad de recolección de los residuos, puesto que, ya existe un control de la cantidad de residuos que se está generando en cada zona, por lo que, solo se dispone de los recolectores necesarios y mantener una estadística de la cantidad de residuos que pueden llegar hasta un vertedero.
- Al ser una función multi-objetivo, este nos permitió darle la importancia necesaria centrándose en la empresa o en el cliente, de acuerdo a estas, se procederá a la mejor localización de los contenedores, siendo de mayor beneficio para uno de estos.

RECOMENDACIONES

- Mantener una revisión continua y familiarizarse con los temas relacionados con residuos, puesto que, con el avance del tiempo, el avance de la tecnología hará que en tiempos futuros la composición de los residuos y el tratamiento de estos, sea muy diferente.
- El extremado crecimiento poblacional en corto tiempo, así como también la creación de más zonas comerciales, residenciales y domiciliarias, obligan actualizar cada cierto periodo las posibles ubicaciones de los contenedores de residuos sólidos urbanos.
- Mantener en constante revisión la utilización de los contenedores de residuos, su utilización, mantenimiento, y estado en el que se encuentran, y así, evitar posibles problemas de asignación de contenedores a cada hogar.
- Los crecimientos poblacionales será el principal causante del aumento de residuos sólidos, por lo que, se recomienda llevar una estadística de estos aumentos, para mantener en funcionamiento y disponer de recolectores de acuerdo al crecimiento poblacional y de los residuos, de la misma manera estimar la optimización de las rutas de recogida para la reducción del tiempo de recolección mediante la utilización del software ArcGIS Network Analyst, en su versión completa.
- Equilibrar el costo-beneficio tanto para la empresa como para los clientes, es decir, asumir la responsabilidad de identificar el crecimiento poblacional, y a más personas más contenedores de residuos y más dinero que invertir, se recomienda trabajar bajo estos criterios para mantener un equilibrio entre la empresa y los clientes.

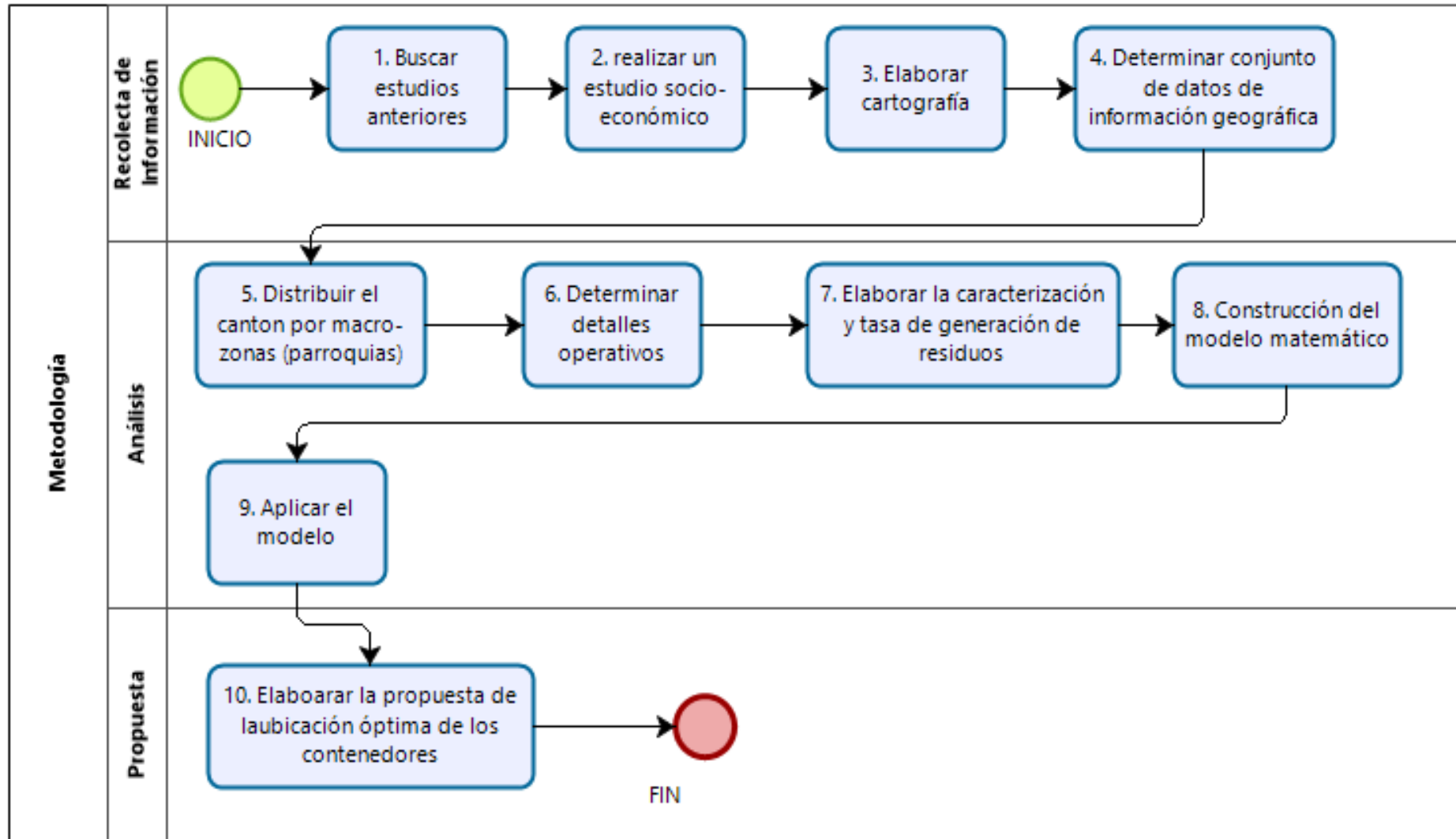
BIBLIOGRAFÍA

- Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, F., & Zepeda, F. (1997). Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y El Caribe. In. Washington D.C.
- Ambiental, D. d. G. (2017). *Especificaciones Técnicas de la "Adquisición de contenedores para la tercera fase de contenerización para la ciudad de Ibarra*. Ibarra
- Ambientum, R. (2003). Medio Ambiente - Revista Ambientum - Generación de Residuos Sólidos Urbanos. Retrieved from https://www.ambientum.com/revista/2003_05/RESIDUOS.htm
- Anónimo. (2015). Demografía-Ibarra Ciudad Blanca. Retrieved from <https://sites.google.com/site/miciudadblanca/home/demografia>
- Bonfanti, F. A. (2004). *La incorrecta gestión de los residuos sólidos urbanos y su incidencia en la calidad de vida de la población de Resistencia*. Instituto de Geografía. Facultad de Humanidades. Argentina.
- Bonilla, M., & Núñez, D. (2012). *Plan de manejo ambiental de los residuos sólidos de la ciudad de Logroño*. Escuela Politécnica del Ejercito, Sangolqui.
- Constitución Política de la República del Ecuador, § Segunda-Medio Ambiente Capitulo 5 (2008).
- Dantzig, G. B., & Cottle, R. (2003). *The Basic George B. Dantzig*: Stanford Business Books.
- Duran, G. (2006). Investigación de Operaciones, Modelos Matemáticos y Optimización. In.
- Díaz, M. (2016). Computación P.U. Retrieved from <http://mylez2804.blogspot.com/>
- EcuRed. (2017). Ibarra (Ecuador) - EcuRed. Retrieved from [https://www.ecured.cu/Ibarra_\(Ecuador\)](https://www.ecured.cu/Ibarra_(Ecuador))
- Ley de Residuos, 10/1998 C.F.R. (2009).
- Expectativa, P. (2017). Contenedores tienen gran demanda. In. Ibarra.
- Fernandez, L. (1999). *Teoría Básica de Optimización* Retrieved from
- Fernández, A., & Sánchez, M. (2007). Guía Para La Gestión Integral De Los Residuos Sólidos Urbanos. 138.
- Henry, J. G., Heinke, G. W., & García, H. J. E. (1999). *Ingeniería ambiental*: Pearson Educación.
- Hoerl, A. e. (2016). Ridge Regression: Applications to Nonorthogonal Problems. *Technometrics*(1), 69. doi:10.1080/00401706.1970.10488635
- Ibarra, G. S. M. d. (2014). El Cantón. Retrieved from <https://www.ibarra.gob.ec/web/index.php/ibarra1234/informacion-general>
- Jimenez, M. (2012). Metodología de Investigaciones de Alto Impacto en las Ciencias Sociales. Retrieved from http://eprints.uanl.mx/8565/1/r11_3.pdf
- Khan, D., & Samadder, S. (2016). *Allocation of solid waste collection bins and route optimisation using geographical information system: A case study of Dhanbad City, India* (Vol. 34).
- Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, (2004).

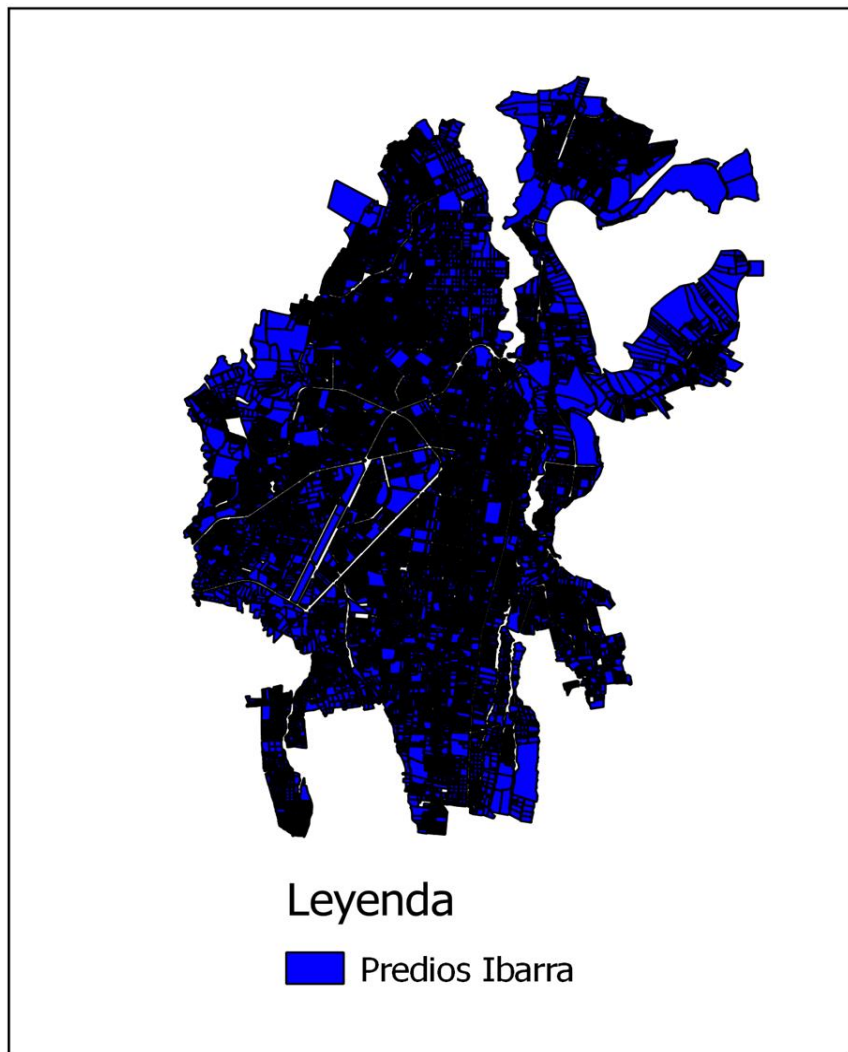
- Ley Orgánica de Régimen Municipal, (1989).
- Ley Orgánica de Salud, (2006).
- Olaya, V. (2012). Sistemas de Información Geográfica.
- Palomar Vazquez, J. s. (1990). Introducción a gvSIG. Retrieved from http://personales.upv.es/jpalomav/cursos/gvsig/gvsig_19.html?t32.html
- Plan Nacional del Buen Vivir - PNBV, (2017).
- Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos - PNGIDS, (2010).
- Puebla, J. G., & Gould, M. (1994). *SIG: Sistemas de información geográfica: Síntesis*.
- Pérez, J. (2011). Modelación lineal en ingeniería industrial. Una mirada sistemática. In (pp. 130). Medellín.
- Rodriguez, A. (2004). *Diseño de un Modelo Matemático de la Generación de Residuos Sólidos Municipales en Nicolas Romero (México)*. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- Rossit, D., Broz, D., Rossit, D., Frutos, M., & Tohme, F. (2015). Modelado de una red urbana de recolección de residuos plásticos en base a optimización multi objetivo.
- Sbarato, R. D. (2009). *Aspectos generales de la problemática de los residuos sólidos urbanos*: Ediciones Encuentro.
- SEDESOL. (2008). Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales In.
- Tobar, V. (2008). “*Propuesta del Programa de manejo de los residuos sólidos urbanos del cantón Rumiñahui*”. Escuela Politécnica del Ejército, Sangolqui.
- TULSMA, Texto Unificado Legislación Secundaria Medio Ambiente, (2003).
- Zúñiga, F. B. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.

ANEXOS

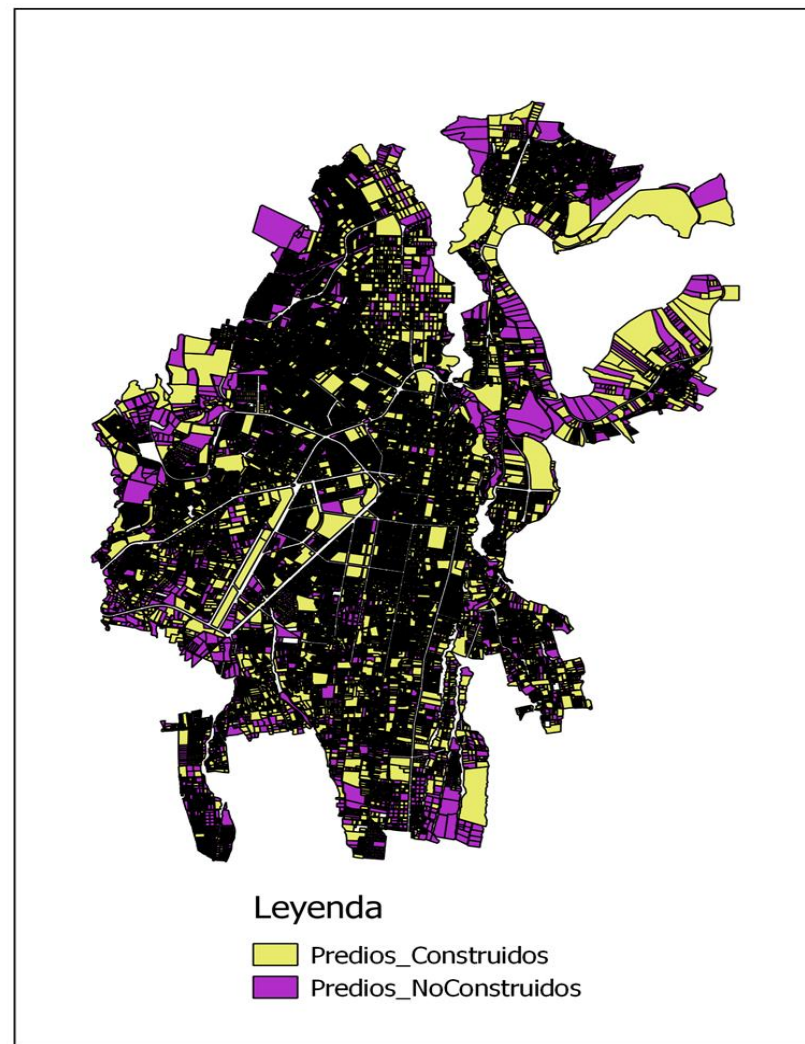
Anexo 1 Metodología utilizada para la elaboración del presente trabajo



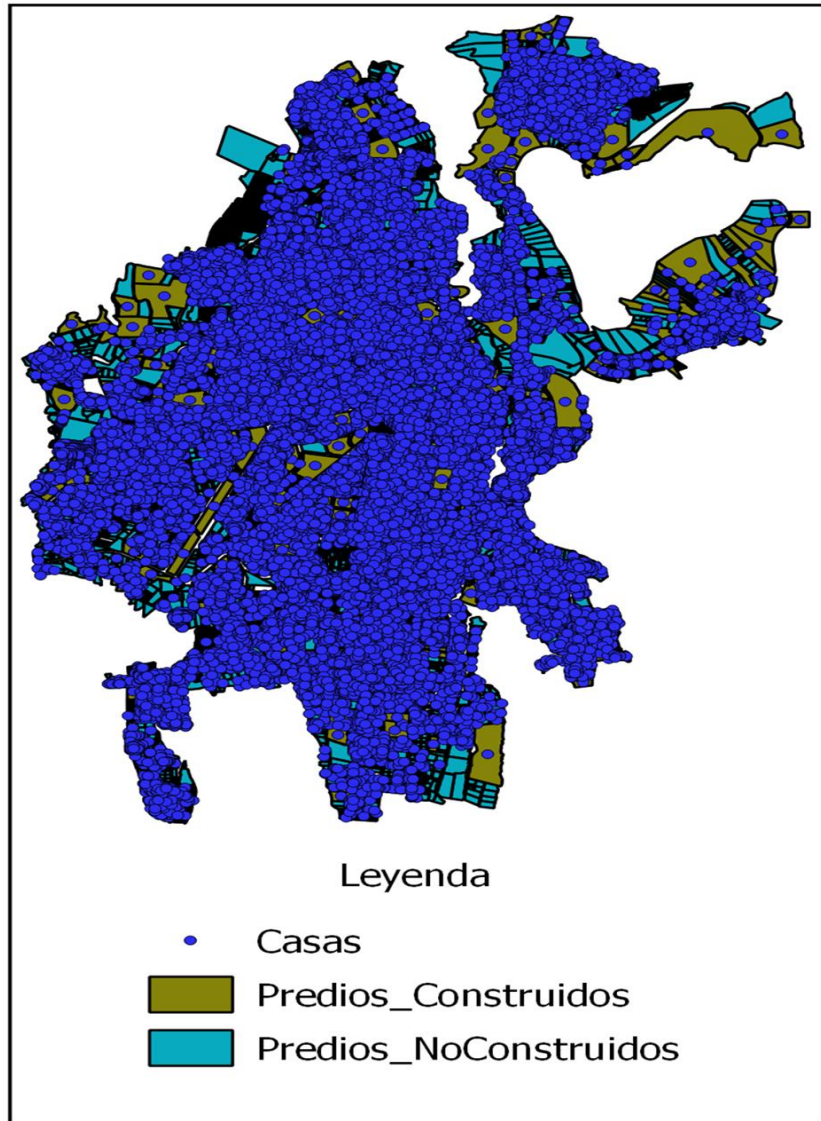
Anexo 2 Predios Ibarra



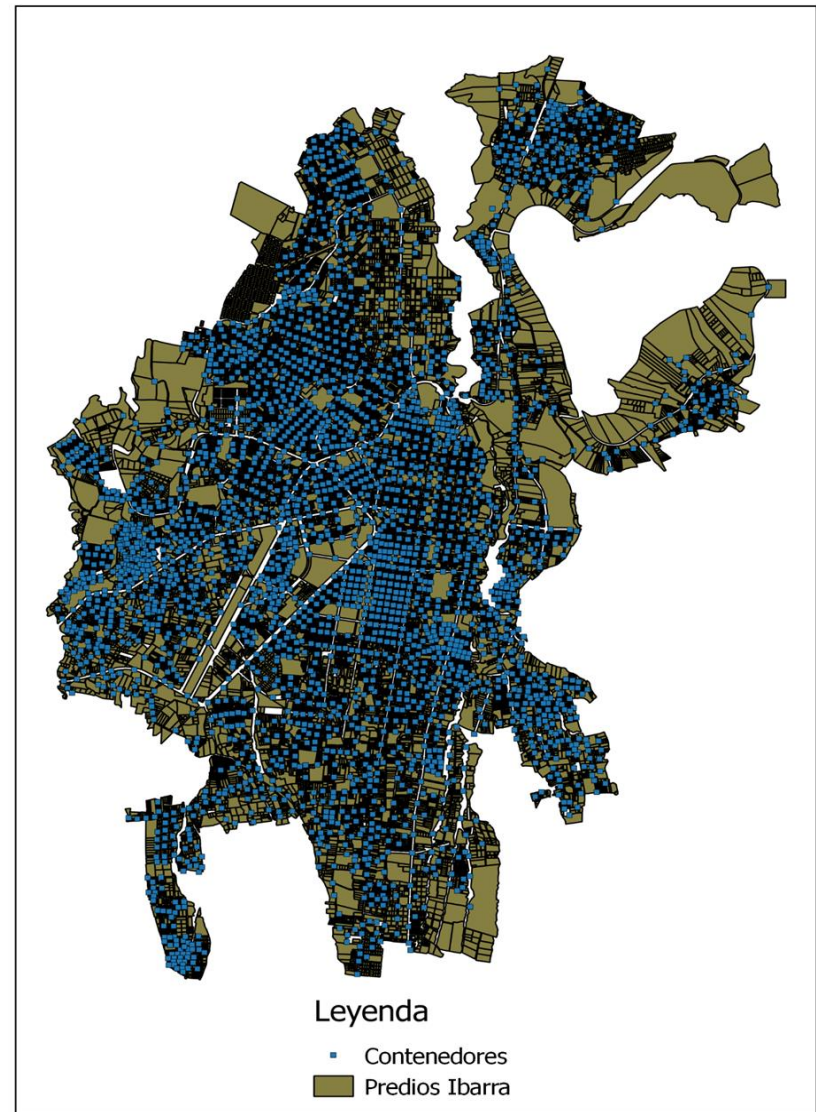
Anexo 3 Predios construidos y predios no construidos



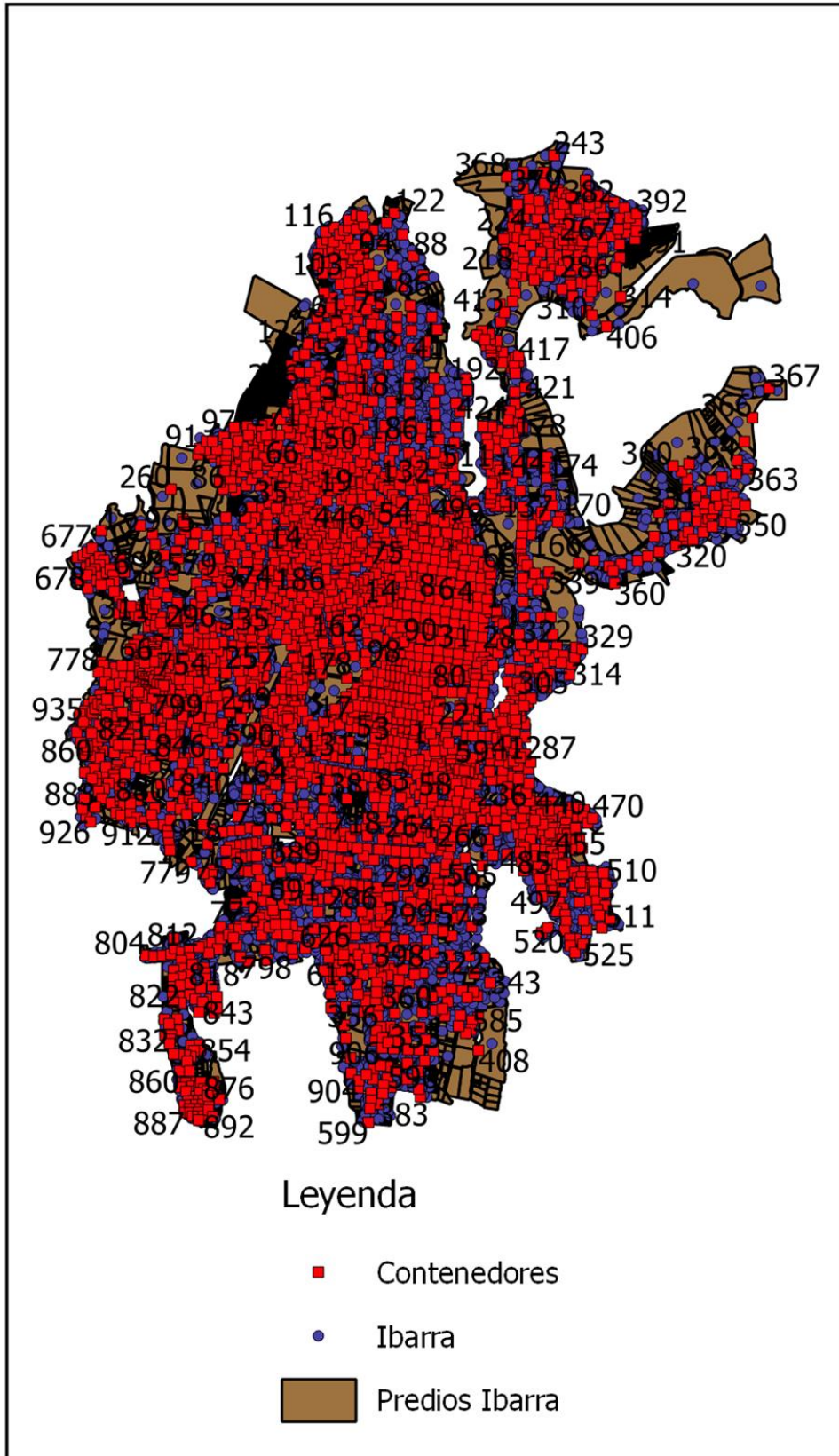
Anexo 4 Construcciones



Anexo 5 Posible ubicación de contenedores



Anexo 6 Numeración de casas y contenedores



Anexo 7 Programación del modelo matemático

<pre> \$TITLE CONTENEDORES SETS i generadores j ubicaciones; * i=usuarios=3962 * j=contenedores=444 (QC) Parameter distancia(i,j) distancia en m; \$onecho > tasks.txt dset=i rng=A1 rdim=1 dset=j rng=A1:QC1 cdim=1 par=distancia rng=olivo!A1 rdim=1 cdim=1 \$offecho \$CALL GDXXRW olivo.xlsx trace=3 @tasks.txt \$GDXIN olivo.gdx \$LOAD i j \$LOADDC distancia \$GDXIN Display i, j, distancia; Scalar costo_instalacion costo de instalar un contenedor j (\$) /570/ capacidad_contenedor capacidad maxima de un contenedor j (kg) /510/ tasa tasa de generacion de residuos en cada generador i /2.74/ </pre>	
<pre> distancia_max1 distancia maxima a recorrer desde i hasta j unifamiliar (m) /100/ coef_llenado coeficiente de llenado del contenedor j /0.55/ Parameters z1_antideal este valor se reemplaza por el valor de z1 cuando se resuelve el problema minimizando z2 /5000000/ z1_ideal este valor se reemplaza por el valor de z1 cuando se resuelve el problema minimizando z1 /0/ z2_antideal este valor se reemplaza por el valor de z2 cuando se resuelve el problema minimizando z1 /5000000/ z2_ideal este valor se reemplaza por el valor de z2 cuando se resuelve el problema minimizando z2 /0/ w1 importancia relativa (entre 0 y 1) que quieras darle al objetivo z1 cuando resuelves multiobjetivo /0.5/ w2 importancia relativa que adopta el objetivo z2 por la diferencia 1 - w1 ; w2 = 1 - w1; VARIABLES z "función multiobjetivo" z1 "función objetivo1" z2 "función objetivo2" N suma de contenedores a instalar; BINARY VARIABLES K(i,j) "generador i deposita en ubicacion j" L(j) "instala un contenedor en la ubicacion j"; equations obj_general "función multiobjetivo" obj1 "función objetivo1" obj2 "función objetivo2" GenerConten "restriccion de distancia del generador al contenedor" Capacidad "restriccion de capacidad maxima del contenedor" Deposito "restriccion de un generador para un unico contenedor" SumaInstCont "restriccion para sumar contenedores instalados"; </pre>	
<pre> obj_general.. z =e= (w1 * (0 - z1)/(0 - z1_antideal)) + (w2 * (0 - z2)/(0 - z2_antideal)); obj1.. z1 =e= sum[j, costo_instalacion*L(j)]; obj2.. z2 =E= [sum((i,j),distancia(i,j)*K(i,j))]; GenerConten(i,j) .. distancia(i,j) * K(i,j) =L= distancia_max1; Capacidad(j) .. (sum(i, (tasa * K(i,j)))) * coef_llenado =L= capacidad_contenedor * L(j); Deposito(i) .. sum(j, K(i,j)) =E= 1; SumaInstCont .. sum[j,L(j)] =E= N; MODEL CONTENEDORES /ALL/; *Primer sentencia solve SOLVE CONTENEDORES USING MIP MINIMIZING z1; z1_ideal = z1.1; z2_antideal = z2.1; *Segunda sentencia solve SOLVE CONTENEDORES USING MIP MINIMIZING z2; z1_antideal = z1.1; z2_ideal = z2.1; *Tercera sentencia solve SOLVE CONTENEDORES USING MIP MINIMIZING z; </pre>	

Anexo 8 Pruebas

--- Executing CPLEX: elapsed 0:00:39.729

```

IBM ILOG CPLEX Jul 4, 2012 23.9.4 WEX 35892.35906 WEI x86_64/MS Windows
--- GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.
Cplex 12.4.0.1

Reading data...
Starting Cplex...
Row 'Capacidad(ID)' infeasible, all entries at implied bounds.
Presolve time = 3.39 sec.
MIP status(119): integer infeasible or unbounded
CPLEX Error 1217: No solution exists.
Problem is integer infeasible.
--- Restarting execution
--- priorato.gms (76) 51 Mb
--- Reading solution for model CONTENEDORES
--- Executing after solve: elapsed 0:01:02.797
--- priorato.gms (78) 52 Mb
--- Generating MIP model CONTENEDORES
--- priorato.gms (65) 52 Mb
*** Error at line 65: division by zero (0)
--- priorato.gms (80) 208 Mb 1 Error
*** SOLVE aborted
--- Executing CPLEX: elapsed 0:01:40.242
--- priorato.gms (80) 208 Mb 1 Error
*** Status: Execution error(s)
--- Job priorato.gms Stop 03/06/18 14:11:08 elapsed 0:01:40.301
Exit code = 3
  
```

Anexo 9 Prueba piloto del modelo

```

j ubicaciones;

Parameter distancia(i,j) distancia en m;

$onecho > tasks.txt
dset=i      rng=A1      rdim=1
dset=j      rng=A1:DAF1  cdim=1
par=distancia rng=Hojal!A1 rdim=1 cdim=1
$offecho

$CALL GDXRW casa.xlsx trace=3 @tasks.txt
$GDXIN casa.gdx
$LOAD i j
$LOADDC distancia
$GDXIN
Display i,j,distancia;

Scalar
costo_instalacion costo de instalar un contenedor j ($)
/570/

capacidad_contenedor capacidad maxima de un contenedor j (kg)
/1000/

tasa tasa de generacion de residuos en cada generador i ((kg*dias) (2d)
/21.4284/

distancia_max1 distancia maxima a recorrer desde i hasta j unifamilia
/100/
  
```

DSet i 1 Hojal B1:B9613 A1:A9613 --:--
DSet j 1 Hojal --:-- A1:DAF1
Par distancia 2 Hojal B2:DAF9613 A2:A9613 B1:DAF1
Total time = 502453 Ms
--- wilson tesis.gms (15) 2 Mb
--- GDXin=d:\Documentos\gamsdir\projdir\casa.gdx
--- wilson tesis.gms (85) 845 Mb
--- Starting execution: elapsed 0:08:35.266
--- wilson tesis.gms (41) 846 Mb
--- Generating MIP model CONTENEDORES
--- wilson tesis.gms (73) 9681 Mb
--- 26,301,171 rows 26,291,559 columns 105,163,491 non-zeroes
--- 26,291,555 discrete-columns
--- Executing CPLEX: elapsed 24:08:42.312

IBM ILOG CPLEX Jul 4, 2012 23.9.4 WEX 35892.35906 WEI x86_64/MS Windows
--- GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems.
Cplex 12.4.0.1

*** Out of memory.
--- Restarting execution
--- wilson tesis.gms (73) 2317 Mb
--- Reading solution for model CONTENEDORES
--- Executing after solve: elapsed 33:34:46.784
--- wilson tesis.gms (75) 2318 Mb
--- Generating MIP model CONTENEDORES
--- wilson tesis.gms (61) 2318 Mb
*** Error at line 61: division by zero (0)

Anexo 10 Resultados de las pruebas realizadas

- Compilation
- Include File Summary
- Execution
- Display
- Equation Listing SOL
- Equation
- Column Listing SOL
- Column
- Model Statistics SOL
- Solution Report SOL
- SolEQU
- SolVAR
- Equation Listing SOL
- Equation
- Column Listing SOL
- Column
- Model Statistics SOL
- Solution Report SOL
- SolEQU
- SolVAR
- Equation Listing SOL
- Equation
- Column Listing SOL
- Column
- Model Statistics SOL
- Solution Report SOL
- SolEQU
- SolVAR
- z
- z1
- z2
- N
- K
- L

```

SumaInstCont  restriccion para sumar contenedore
          LOWER    LEVEL    UPPER
---- VAR z          -INF      0.208    +INF
---- VAR z1         -INF  1.3338E+5  +INF
---- VAR z2         -INF  73478.414  +INF
---- VAR N          -INF    234.000  +INF

z función multiobjetivo
z1 función objetivo1
z2 función objetivo2
N suma de contenedores a instalar

---- VAR K  generador i deposita en ubicacion j
          LOWER    LEVEL    UPPER    MARGINA
ID  .ID      .      .      1.000    EPS
ID  .j92    .      .      1.000    EPS
ID  .j77    .      .      1.000    EPS
ID  .j90    .      .      1.000    EPS
ID  .j91    .      .      1.000    EPS
ID  .j94    .      .      1.000    EPS
ID  .j74    .      .      1.000    EPS
ID  .j76    .      .      1.000    EPS
ID  .j93    .      .      1.000    EPS
ID  .j75    .      .      1.000    EPS

```

```

Real time           =    3.45
Sequential b&c:
Real time           =    0.00
-----
Total (root+branch&cut) =    3.45 sec.
MIP status(102): integer optimal, tolerance
Fixing integer variables, and solving final LP...
Tried aggregator 1 time.
Presolve has eliminated 557633 rows and 558004 columns...
LP Presolve eliminated 557633 rows and 558004 columns.
All rows and columns eliminated.
Presolve time =    5.42 sec.
Fixed MIP status(1): optimal

Solution satisfies tolerances.

MIP Solution:           0.208266    (678 iterations, 0 nodes)
Final Solve:           0.208266    (0 iterations)

Best possible:         0.203747
Absolute gap:          0.004519
Relative gap:          0.021698

--- Restarting execution
--- priorato.gms(84) 123 Mb
--- Reading solution for model CONTENEDORES
*** Status: Normal completion
--- Job priorato.gms Stop 03/06/18 13:57:45 elapsed 0:10:36.081

```

Close Open Log Summary only Update

Anexo 11 Casas y contenedores instalados actualmente, por parroquias

