

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE UN MODELO DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL MUNICIPIO DE LA CONCEPCIÓN DE LA VEGA (REPÚBLICA DOMINICANA).

Intensificación:

Hidráulica Urbana

Autor:

WILKIN ORLANDO TAPIA ACOSTA

Tutor:

DR. JAVIER RODRIGO ILARRI

SEPTIEMBRE, 2019



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



DATOS DEL PROYECTO

Título del TFM en español: Diseño de un modelo de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el municipio de La Concepción de La Vega (República Dominicana).

Título del TFM en inglés: Design of the Solid Waste Management System on the municipality of La Concepción La Vega (Dominican Republic).

Título del TFM en Valenciano: Disseny d'un model de gestió integral de residus sòlids urbans en el municipi de La Concepción La Vega (República Dominicana)

Alumno: Wilkin Orlando Tapia Acosta

Tutor: DR. Javier Rodrigo Ilarri

Fecha de Lectura: Septiembre, 2019

RESUMEN

Durante los últimos tiempos la República Dominicana ha experimentado un aumento sustancial en adquisición y consumo descontrolado de bienes, esto ha generado como consecuencia una mayor producción y modificación en la naturaleza de los residuos. La producción de desechos sólidos es inherente al desarrollo industrial, económico y poblacional que se refleja en cada ciudad del país. Esto se ha convertido en una problemática social, económica y ambiental en toda la región de la República Dominicana. Aquí la gestión no considera todos los procesos de forma integral, como lo son la recogida, el transporte, la valorización ni la eliminación de los residuos. Los vertederos son instalados sin especificaciones o parámetros técnicos de diseño, operando de manera incontrolada a cielo abierto, emitiendo gases de efecto invernadero a la atmósfera por la descomposición anaeróbica de los componentes orgánicos de los residuos.

El municipio escogido para el caso de estudio es La Concepción de La Vega. La gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es atribuible a los ayuntamientos y es orientada exclusivamente a la recolección y transporte hasta su disposición final, donde se depositan sin ningún tratamiento previo. El vertedero del municipio de La Concepción de La Vega actúa como una fuente puntual de contaminación sobre las aguas subterráneas y superficiales, producto del lixiviado que se genera en el mismo, además de una gran proliferación de roedores e insectos que transmiten numerosas enfermedades. Es por esto que se plantea diseñar un modelo de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el municipio de La Concepción de La Vega que sea técnicamente viable, ambientalmente factible y económicamente sostenible y que se adecúe a las particularidades del municipio.

Para el desarrollo de este objetivo, se plantearon tres escenarios que permitieron evaluar la gestión de los RSU mediante una planta de tratamiento que engloba las áreas de pretratamiento y compostaje que, previo a la eliminación de los residuos, permiten valorizar la fracción inorgánica, así como la producción de compost con la fracción orgánica. La mejor alternativa plantea una disminución de los volúmenes a depositar a vertedero en un 73%, garantizando una reducción en la



producción de biogás de un 91% y de lixiviados en un 71%. Sin embargo, esta alternativa debe ir acompañada de un análisis económico que abarque todas las partidas a financiar, el cual está fuera del alcance de este estudio.

Palabras clave: Residuos sólidos urbanos, lixiviado, biogás, planta de tratamiento.

RESUME

Durant els últims temps la República Dominicana ha experimentat un augment substancial en adquisició i consum descontrolat de béns, això ha generat com a conseqüència una major producció i modificació en la naturalesa dels residus. La producció de deixalles sòlides és inherent al desenvolupament industrial, econòmic i poblacional que es reflexa en cada ciutat del país. Això s'ha convertit en una problemàtica social, econòmica i ambiental en tota la regió de la República Dominicana. Aquí la gestió no considera tots els processos de forma integral, com el són la recollida, el transport, la valorització ni l'eliminació dels residus. Els abocadors són instal·lats sense especificacions o paràmetres tècnics de disseny, operant de manera incontrolada a cel obert, emetent gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera per la descomposició anaeròbica dels components orgànics dels residus.

El municipi escollit per al cas d'estudi és la Concepció de la Vega. La gestió dels Residus Sòlids Urbans (RSU) és atribuïble als ajuntaments i és orientada exclusivament a la recollida i transport fins a la seva disposició final, on es dipositen sense cap tractament previ. L'abocador del municipi de la Concepció de la Vega actua com una font puntual de contaminació sobre les aigües subterrànies i superficials, producte del lixiviat que es genera en el mateix, a més d'una gran proliferació de rosegadors i insectes que transmeten nombroses malalties. És per això que es planteja dissenyar un model de gestió integral de residus sòlids urbans en el municipi de la Concepció de la Vega que sigui tècnicament viable, ambientalment factible i econòmicament sostenible i que s'adeqüi a les particularitats del municipi.

Per al desenvolupament d'aquest objectiu, es van plantejar tres escenaris que van permetre avaluar la gestió dels RSU mitjançant una planta de tractament que engloba les àrees de pretractament i compostatge que, previ a l'eliminació dels residus, permeten valoritzar la fracció inorgànica, així com la producció de compost amb la fracció orgànica. La millor alternativa planteja una disminució dels volums a dipositar a abocador en un 73%, garantint una reducció en la producció de biogàs d'un 91% i de lixiviats en un 71%. No obstant això, aquesta alternativa ha d'anar acompanyada d'una anàlisi econòmica que abasti totes les partides a finançar, el qual està fora de l'abast d'aquest estudi.

Paraules clau: Residus sòlids urbans, lixiviat, biogàs, planta de tractament.

SUMMARY

During recent times the Dominican Republic has experienced a substantial increase in uncontrolled acquisition and consumption of goods, this has resulted in a greater production and modification in the nature of the waste. The production of solid waste is inherent to the industrial, economic and population development that is reflected in each city of the country. This has become a social, economic and environmental problem throughout the region of the Dominican Republic. Here the management does not consider all the processes in an integral manner, such as collection, transportation, gathering or disposal of waste. Landfills are installed without specifications or technical parameters, operating uncontrollably in the open, emitting greenhouse gases into the atmosphere by anaerobic decomposition of the organic components of the waste.

The municipality chosen for the case study is La Concepción de La Vega. The management of the Urban Solid Waste (USW) is attributable to the municipalities and is exclusively oriented to the collection and transport until its final disposal, where they are deposited without any previous treatment. The landfill of the municipality of La Concepción de La Vega acts as a point source of pollution on groundwater and surface water, product of the leachate that is generated in it, as well as a large proliferation of rodents and insects that transmit numerous diseases. That is why it is proposed to design a model of integral management of urban solid waste in the municipality of La Concepción de La Vega that is technically viable, environmentally feasible and economically sustainable and that adapts to the particularities of the municipality.

For the development of this objective, three scenarios were proposed that allowed to evaluate the management of USW through a treatment plant that includes the areas of pretreatment and composting that, prior to the elimination of waste, allows the inorganic fraction to be recovered, as well as Compost production with the organic fraction. The best alternative proposes a decrease of the volumes to be deposited to landfill by 73%, guaranteeing a reduction in the production of biogas by 91% and leachate by 71%. However, this alternative must be accompanied by an economic analysis that covers all the items to be financed, which is beyond the scope of this study.

Key words: Urban solid waste, leachate, biogas, treatment plant.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1.- Introducción	1
1.2.- Objetivos	2
1.2.1- Objetivo general	2
1.2.2- Objetivos específicos	2
2. LEGISLACIÓN APLICABLE.....	3
2.1.- Legislación española.....	3
2.1.1- Real Decreto 1481/2001.....	4
2.2.- Legislación dominicana	5
2.2.1- La Constitución de la República Dominicana	5
2.2.2- La Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales 64-00	6
2.2.3- La Ley General de Salud Pública y Asistencia Social 42-01.....	6
2.2.4- La Ley 120-99.....	6
2.2.5- La Ley 83-89.....	7
2.2.6- La Norma para la Gestión Ambiental de los Residuos Sólidos No Peligrosos	7
2.2.7- Ley General de Educación, Ley 66-97.....	7
2.3.- Semejanzas y diferencias entre la legislación española y dominicana	7
2.3.1- Diferencias entre las legislaciones.....	8
2.4.- Conclusiones legales.....	12
3. ANTECEDENTES	13
3.1.- Descripción geográfica de la República Dominicana.....	13
3.2.- Gestión de los residuos sólidos municipales	14
3.2.1- Financiamiento de la gestión de residuos sólidos urbanos municipales	14
3.2.2- Producción de residuos	16
3.2.3- Gestión de barrido, recogida y transporte	19
3.2.4- Reciclaje en República Dominicana.....	21
3.2.5- Proyecto de compost.....	23
3.2.6- Disposición final en vertedero.....	24
4. GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS	26
4.1.- Residuos sólidos urbanos	26
4.1.1- Clasificación de residuos	26
4.1.2- Composición de los RSU	27
4.1.3- Propiedades físicas de los RSU	27
4.1.4- Propiedades químicas	29
4.1.5- Propiedades biológicas.....	31



4.1.6-	Transformación de los residuos	32
4.2.-	Jerarquía en la gestión de los RSU.....	33
4.3.-	Producción de los RSU.....	34
4.3.1-	Generación y composición	35
4.3.2-	Proyección de la generación y composición	36
4.4.-	Recogida y transporte de los RSU	37
4.5.-	Estaciones de transferencia	38
4.6.-	Planta de Tratamiento de RSU	38
4.6.1-	Instalación de pretratamiento.....	38
4.6.2-	El Compostaje.....	43
4.7.-	Eliminación de residuos sólidos mediante depósito en vertedero	46
4.7.1-	Vertedero o depósito controlado.....	46
4.7.2-	Gestión de lixiviados.....	47
5.	APLICACIÓN PRÁCTICA. DESCRIPCIÓN ACTUAL DEL CASO EN ESTUDIO	48
5.1.-	Descripción del Municipio La Concepción La Vega	48
5.1.1-	Demografía.....	48
5.1.2-	Precipitación.....	49
5.2.-	Metodología actual de la gestión de los residuos sólidos en el municipio	50
5.2.1-	Vertedero municipal de La Vega	51
5.2.2-	Reciclaje en el vertedero	53
5.3.-	Diseño del modelo de gestión integral.....	54
5.3.1-	Datos de partida	54
5.3.2-	Caracterización de Residuos Sólidos	55
5.3.3-	Ubicación de Sitio	56
5.3.4-	Sistema de Valorización, Compost.	56
5.3.5-	Diseño de la planta de tratamiento RSU.	57
5.3.6-	Diseño de Relleno Sanitario	72
6.	RESULTADOS Y COMPARACIONES.....	87
6.1.-	Resultados y comparaciones del sistema de tratamiento en los distintos escenarios	87
6.2.-	Resultados y comparaciones de la vida útil de la nueva celda del vertedero de Soto.	92
6.3.-	Resultados y comparaciones de la producción de biogás en la nueva celda.....	93
6.4.-	Resultados y comparaciones de la producción de lixiviados en la nueva celda.	95
6.5.-	Evaluación económica de los ingresos generados con un sistema de tratamiento.....	96
6.5.1-	Evaluación económica de los contenedores requeridos para el sistema selectivo.	99
7.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	101
7.1.-	Futuras líneas de investigaciones.....	102
8.	BIBLIOGRAFÍA	103



ANEXOS.....	105
ANEXO 1	105
ANEXO 2	111
ANEXO 3	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU).....	2
Figura 2: Perfil de impermeabilización del suelo.....	11
Figura 3: Ubicación geográfica de la República Dominicana.....	13
Figura 4: Esquema de gestión de residuos sólidos municipales.....	14
Figura 5: Producción de RSU en la Rep. Dom. (Toneladas al día), por región, al año 2015.....	17
Figura 6: Composición de residuos sólidos municipales en Latinoamérica y el Caribe.....	17
Figura 7: Principales residuos producidos en República Dominicana (toneladas al día), año 2015.....	19
Figura 8: Residuos sólidos depositados en espacios públicos.....	19
Figura 9: Proceso de recogida y transporte.....	20
Figura 10: "Buzos" en plena recuperación de materiales en el vertedero de Duquesa.....	21
Figura 11: Evolución de las exportaciones de los materiales reciclados en los periodos señalados....	22
Figura 12: Rango y valores del tamaño de partícula.....	29
Figura 13: Jerarquía de los residuos.....	34
Figura 14: Segregación de residuos para conocer su composición.....	35
Figura 15: Envases de residuos para recogida selectiva.....	37
Figura 16: Criba trómel.....	39
Figura 17: Esquema de tamizado con trómel.....	39
Figura 18: Esquema de criba vibratoria.....	40
Figura 19: Esquema de criba discos.....	40
Figura 20: Esquema molino de martillos.....	41
Figura 21: Esquema de trituradoras cortantes.....	41
Figura 22: Proceso de compostaje.....	43
Figura 23: Variación del nivel de oxígeno con el tiempo.....	45
Figura 24: Esquema de funcionamiento de pila estática aireada.....	45
Figura 25: Fases de operación del vertedero.....	47
Figura 26: Ubicación del municipio La Concepción de La Vega.....	48
Figura 27: Precipitación media anual en (mm).....	49
Figura 28: Ubicación geográfica del vertedero de Soto, La Vega.....	51
Figura 29: Colocación de residuos sólidos urbanos en el vertedero de La Vega.....	52
Figura 30: Tratamiento de residuos peligrosos en celda separada en el vertedero de La Vega.....	52
Figura 31: Reciclaje por Buzos en el vertedero municipal de La Vega.....	53
Figura 32: Generación de residuos por zona (ton/día) en el municipio La Concepción La Vega.....	54
Figura 33: Composición que caracteriza los RSU del municipio.....	55
Figura 34: Ubicación del vertedero municipal y la propuesta de la nueva celda.....	56
Figura 35: Esquema del área de pretratamiento.....	59
Figura 36: Porcentajes obtenidos en el escenario 1.....	64
Figura 37: Distribución por cada 100 kg RSU que entra a la planta.....	65
Figura 38: Dimensiones de hileras de compost.....	69
Figura 39: Hileras de compost.....	69
Figura 40: Esquema de un bloque de compost.....	70
Figura 41: Esquema del sistema de tratamiento de RSU.....	71
Figura 42: Esquema de impermeabilización en el fondo del vaso para residuos no peligrosos.....	74
Figura 43: Esquema de la capa de sellado superior para residuos no peligrosos.....	75
Figura 44: Diseño de la nueva celda del vertedero de Soto.....	86
Figura 45: Comparación de resultados obtenidos en cada escenario.....	89
Figura 46: Evolución del volumen disponible en el vertedero de Soto.....	90



Figura 47: Flujo de los RSU del Municipio La Concepción de La Vega. Escenario 1.	90
Figura 48: Flujo de los RSU del Municipio La Concepción de La Vega. Escenario 2.	91
Figura 49: Flujo de los RSU del Municipio La Concepción de La Vega. Escenario 3.	91
Figura 50: Volumen a depositar según su densidad en la nueva celda del vertedero de Soto.	92
Figura 51: Vida útil según el tipo de densidad de los RSU en la nueva celda del vertedero de Soto. ..	93
Figura 52: Producción anual de biogás en la nueva celda del vertedero de Soto.	94
Figura 53: Producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto.	95
Figura 54: Beneficios Obtenidos por las Ventas de los Subproductos Recuperados	97
Figura 55: Ingresos generados por la venta del compost.	98
Figura 56: Ingreso total con la Instalación de un Sistema de Tratamiento.	99
Figura 58: Grupos de contenedores por zona.	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Legislaciones que regulan la gestión de los RSU en Rep. Dom.....	5
Tabla 2: Principales semejanzas entre la legislación española y dominicana.....	8
Tabla 3: Frecuencia de monitoreo en vertedero de residuos no peligrosos.....	12
Tabla 4: Principales fuentes de Financiamiento de la gestión de los RSM en la Rep. Dom.....	15
Tabla 5: Rango de costos en la gestión de residuos sólidos en Rep.Dom. al 2016.....	15
Tabla 6: Ingresos municipales correspondientes a la Ley 166-03.....	16
Tabla 7: Generación y PIB por provincia.	18
Tabla 8: Porcentajes de cobertura de barrido en municipios grandes, medianos y pequeños.....	20
Tabla 9: Costo de materiales reciclables en la MGSD.	22
Tabla 10: Empresas dedicadas a actividades de reciclaje o relacionadas, marzo 2017.....	23
Tabla 11: Concentraciones máximas de contaminantes para el procedimiento de lixiviación.	24
Tabla 12: Composición de residuos municipales en función del nivel de desarrollo (%).	27
Tabla 13: Pesos específicos y humedad de los residuos sólidos domésticos.....	28
Tabla 14: Datos típicos del análisis elemental en RSU.	30
Tabla 15: Valores típicos de rechazos inertes y contenido energético de los RSU domésticos.....	31
Tabla 16: Proceso de transformación de los RSU.....	32
Tabla 17: Registros mensuales de precipitación (mm) - La Vega.....	49
Tabla 18: Principales inconvenientes del sistema de gestión del municipio.....	50
Tabla 19: Composición de los RSU del municipio La Concepción La Vega.....	55
Tabla 20: Escenarios alternativos para el diseño de la planta de compostaje en el municipio.....	57
Tabla 21: Equipos útiles para la operación manual de una instalación de pretratamiento.	60
Tabla 22: Características de los RSU de entrada a la planta.	61
Tabla 23: Porcentaje de residuos por cada línea de tratamiento.	62
Tabla 24: Línea de materia orgánica (compost verde).....	62
Tabla 25: Línea de rechazo.....	63
Tabla 26: Elementos recuperados.....	64
Tabla 27: Resumen escenario 1.....	64
Tabla 28: Relación C/N del compost verde a procesar.....	65
Tabla 29: Fracción Orgánica Biodegradable de los RSU.....	66
Tabla 30: Fracción Orgánica No Biodegradable de los RSU.....	67
Tabla 31: Características del compost verde.....	67
Tabla 32: Pérdida del compost fermentado.....	67
Tabla 33: Característica final del compost fermentado.....	68
Tabla 34: Datos del municipio La Concepción La Vega.....	68
Tabla 35: Producción mensual de compost.....	68
Tabla 36: Dimensiones del área de compostaje.....	70
Tabla 37: Cálculo del compost maduro y afino.....	71
Tabla 38: Coeficiente de permeabilidad K.....	72
Tabla 39: Características del suelo donde se emplazará la nueva celda del vertedero de Soto.....	72
Tabla 40: Producción de RSU a gestionar en el municipio.....	73
Tabla 41: Porcentaje de material de recubrimiento en función del tipo de residuo.....	73
Tabla 42: Volumen de residuos según su tipo.....	73
Tabla 43: Características de las celdas y sus espesores por capas.....	74
Tabla 44: Volumen total de capas.....	75
Tabla 45: Volumen requerido según el tipo de residuo.....	75
Tabla 46: Resultados de los residuos a eliminar en el Esc. 1.....	76



Tabla 47: Volumen de la producción anual a vertedero, según la densidad de los residuos	76
Tabla 48: Volumen útil de la nueva celda	76
Tabla 49: Vida útil de la nueva celda en el vertedero de Soto, para residuos no peligrosos según su densidad.	77
Tabla 50: Humedad con la cual llegan los residuos a vertedero en el Esc.1	77
Tabla 51: Análisis químico de los RSU a gestionar en la nueva celda del vertedero de Soto.	78
Tabla 52: Número de mol contenido en cada elemento.....	79
Tabla 53: Valores de CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ O.....	79
Tabla 54: Peso molecular de los componentes de la materia orgánica biodegradable.....	79
Tabla 55: Kg presentes en la materia orgánica.	80
Tabla 56: Volumen producido por cada 100 kg de RSU.	80
Tabla 57: Coeficiente de compactación.	81
Tabla 58: Producción de lixiviados por tipo de relleno.	82
Tabla 59: Coeficiente de escorrentía.....	84
Tabla 60: Resumen de los resultados obtenidos en cada escenario.....	87
Tabla 61: Comparación de los resultados entre los distintos escenarios, según el tipo de instalaciones donde son procesados los RSU.	88
Tabla 62: Volumen disponible en el vertedero de Soto.....	89
Tabla 63: Resultados de la vida útil de la nueva celda del vertedero de Soto.....	92
Tabla 64: Resultados de la producción anual de biogás en la nueva celda del vertedero de Soto.	94
Tabla 65: Producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto.	95
Tabla 66: Análisis Económico de los Subproductos Recuperados en el Esc. 1.....	96
Tabla 67: Análisis Económico de los Subproductos Recuperados en el Esc. 2.....	96
Tabla 68: Análisis Económico de los Subproductos Recuperados en el Esc. 3.....	97
Tabla 69: Análisis económico del compost generado	98
Tabla 70: Referencia y capacidad del tipo de contenedor de RSU.....	99
Tabla 71: Análisis económico de los contenedores de RSU requeridos en el municipio.....	100

Glosario de Abreviaturas

Acáp.	Acápite
ADN	Ayuntamiento del Distrito Nacional
Art.	Artículo
CIE-RD	Centro de Exportación e Inversión de la República Dominicana
CO₂	Dióxido de carbono
FEDOMU	Federación Dominicana de Municipios
FOB	Fracción Orgánica Biodegradable
FOCIMIRS	Proyecto de Fortalecimiento de la Capacidad Institucional en el Manejo de Residuos Sólidos a Nivel Nacional en la República Dominicana
FONB	Fracción Orgánica No Biodegradable
GIRSU	Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos
Gpa	Generación per cápita actual
Gpf	Generación de residuos futuro
JICA	Agencia de Cooperación Internacional de Japón
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetro
M.O.	Materia Orgánica
m³	Metros cúbicos
MGSD	Plan Maestro para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos en la Mancomunidad del Gran Santo Domingo
Min	Minutos
ONE	Oficina Nacional de Estadísticas
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PAS	Programa de Agricultura Sostenible
PCI	Poder Calorífico Inferior
PGIRS	Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos
PIB	Producto Interno Bruto
R.D.	Real Decreto
RD\$	Pesos dominicanos
Relación C/N	Relación carbono partido nitrógeno
Rep. Dom.	República Dominicana
RSM	Residuos Sólidos Municipales
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEA	Ministerio de Agricultura
SEMARENA	Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales
ST	Sólidos Totales
t	Tonelada
TFM	Trabajo Fin de Máster
US\$	Dólares estadounidenses

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción

Dado el problema que ha representado el aumento desenfrenado de los residuos urbanos en República Dominicana frente a una débil e insostenible gestión, tanto en recolección, selectividad, reciclaje, transporte, infraestructura de transferencia y de tratamiento, como en su disposición final; que en la mayoría de los casos estos finalizan en un vertedero a cielo abierto, haciendo uso inclusive de prácticas que son penalizadas por la legislación, como lo es la quema de residuos.

En la actualidad el manejo de los RSU es un tema de gran preocupación en todo el país, debido a que los ayuntamientos no cuentan con una GIRSU (gestión integral de residuos sólidos urbanos) que les permita reducir o mitigar la generación de residuos. “El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales” les asignó un plazo de 6 meses a algunos municipios del país donde deberán presentar un “plan de adecuación de los sitios de disposición final de residuos sólidos y generar un sistema tarifario que permita la sostenibilidad económica, transparentando todos los costos asociados a las distintas etapas de la gestión”.

La Concepción de La Vega es el municipio escogido para el caso de estudio, al igual que en los demás municipios, el ayuntamiento muestra una frágil administración y no cuentan con un GIRSU que incluya todos los procesos (recolección, clasificación, reciclaje, reutilización, transporte, tratamiento y disposición final), únicamente se ha centrado en recolectar y transportar los RSU con fines de disposición final.

Para la disposición final, el vertedero municipal se encuentra aproximadamente a unos 6 Km. del casco urbano, específicamente en la comunidad de Soto, a menos de 1200mts. de una población, infringiendo la “Ley 64-00 sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales” y la “Norma de Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos” que señala que los vertederos deben ser instalados a una distancia de al menos 1500mts de un asentamiento poblacional y a 1000mts de un recurso hídrico.

En dicho vertedero se construyen fosas donde luego son depositados los residuos sólidos, los cuales son colocados por capas de 50 cm de espesor, sin ningún tipo de recubrimiento en el fondo (polímero u otro material impermeable), estos residuos se suelen ir tapando con un relleno de mina una vez colocados, sin estimar la producción de lixiviados ni los gases que se generan en este, siendo estos últimos, los 2 problemas fundamentales para el medio ambiente.

1.2.- Objetivos

1.2.1- Objetivo general

Diseñar un modelo de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el municipio de La Concepción de La Vega que sea técnicamente viable, ambientalmente factible y económicamente sostenible y que se adecúe a las particularidades del municipio.

1.2.2- Objetivos específicos

- Crear un sistema recogida selectiva de residuos sólidos municipales, implementando contenedores separativos de fácil identificación a la ciudadanía.
- Elaborar un Diseño de las infraestructuras o instalaciones necesarias, que permitan la reutilización, reciclaje y recuperación energética, de aquellos residuos que se puedan valorizar.
- Elaborar un diseño de vertedero que garantice la sostenibilidad ambiental, mediante la recolección de lixiviados y reduciendo las emisiones de biogás a la atmósfera.

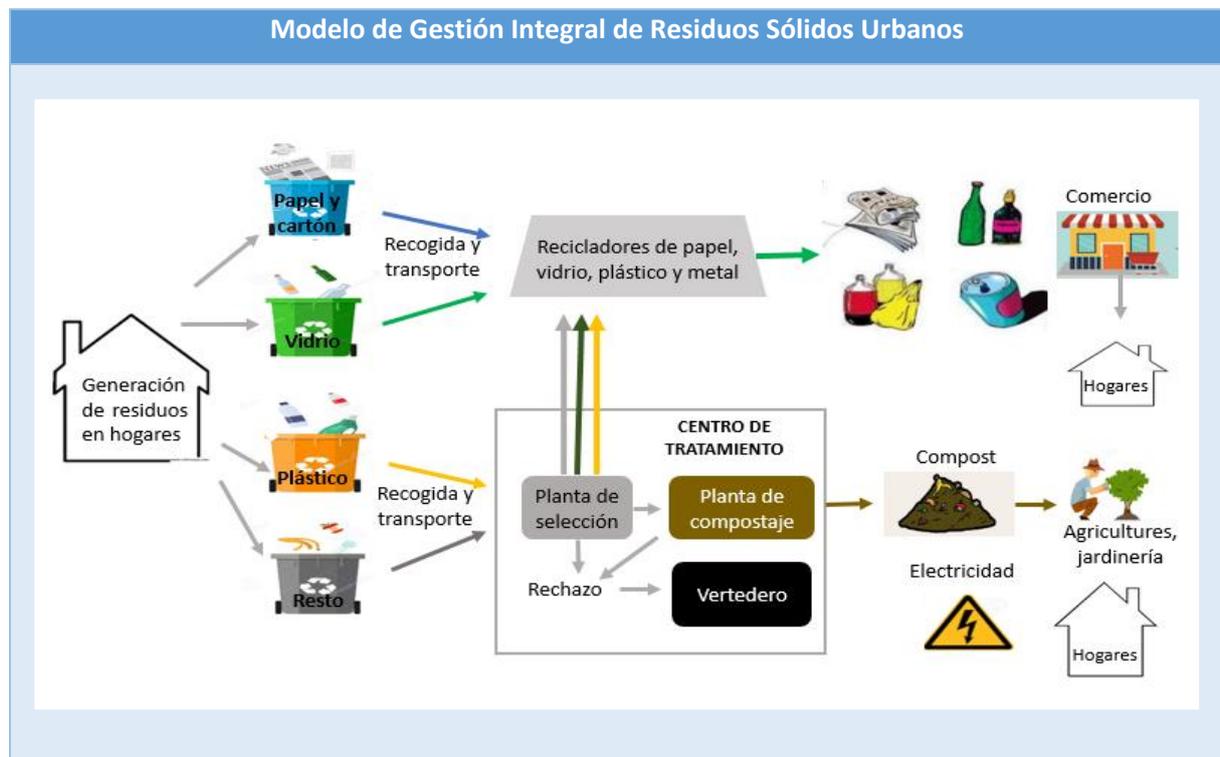


Figura 1: Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU).

2. LEGISLACIÓN APLICABLE

Para diseñar el modelo de GIRSU se hará necesario incluir la legislación española como marco de referencia legal en gestión de residuos, con el propósito de establecer una comparación con la legislación dominicana y tener un criterio o un estándar internacional, que permita confrontar las limitaciones que pueda presentar la misma, tanto en aspectos técnicos como legales. Comparar la legislación dominicana frente a la legislación extranjera, puede aportar una mayor perspectiva de criterios técnicos de diseño y funcionamiento de un vertedero que garantice la sostenibilidad ambiental.

Además, se hace necesario tener una referencia o modelo funcional que sirva de guía para un diseño de un sistema de gestión integral que constituya un punto de arranque, donde se pueda tener la viabilidad de verificar los parámetros necesarios, a partir de rangos y valores ya determinados.

2.1.- Legislación española

La “Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados” es la legislación estatal en vigor, la cual tiene como función regular la gestión de RSU mediante el monitoreo de su producción y jerarquización, así como también, plantear medidas que permitan reducir su generación y la jurisdicción de los suelos contaminados.

“Los principios básicos de la política de residuos es la protección de la salud humana y del medio ambiente. En la nueva Directiva se formula una nueva jerarquía de residuos que explica el orden de prioridad en las actuaciones en la política de residuos: prevención (en la generación de residuos), preparación para la reutilización, reciclado, otros tipos de valorización (incluida la energética) y, por último, la eliminación de los residuos”.

Dentro del marco de utilidad de la legislación se encuentran los residuos domésticos y similares de origen urbano, de construcción, agrarios e industriales no peligrosos.

De la presente ley se enfatizan los siguientes artículos:

“Artículo 8. Jerarquía de residuos.

En este artículo se establece la jerarquía de residuos por el siguiente orden de prioridad:

- a) Prevención;
- b) Preparación para la reutilización;
- c) Reciclado;
- d) Otro tipo de valorización, incluida la valorización energética; y

e) Eliminación.

Si es necesario apartarse de dicha jerarquía, se podrá adoptar un orden distinto de prioridades previa justificación por un enfoque de ciclo de vida sobre los impactos de la generación y gestión de esos residuos”.

“Artículo 11. Costes de la gestión de los residuos.

Según el principio de quien contamina paga, los costes concernientes a la gestión de los residuos tendrán que correr a cargo del productor inicial de residuos, del poseedor actual o del anterior poseedor de residuos de acuerdo con lo establecido en los artículos 42 y 45.2.”

“Artículo 15. Programas de Gestión y Prevención:

Los programas de gestión y prevención de la presente ley deberán contener:

- Objetivos mínimos de prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización y eliminación.
- Tipo, cantidad y fuente de los residuos sólidos producidos.
- Sistemas existentes de recogida e instalaciones de eliminación y valorización.
- Evaluación de la necesidad de nuevos modelos de gestión de residuos”.

[2.1.1- Real Decreto 1481/2001](#)

El enfoque del “*Real Decreto 1481/2001*” es el de establecer los criterios técnicos de diseño para la eliminación de los residuos en vertederos, también regula sus particularidades, gestión y aprovechamiento, apoyándose del principio de jerarquización de los residuos con el propósito de preservar la salud humana y el medio ambiente.

Dentro del “*Real Decreto 1481/2001*”, existe una clasificación de residuos admisibles y no admisibles para ser depositados en el vertedero, entre los siguientes:

Residuos No Admisibles:

- Líquidos
- Explosivos
- Corrosivos
- Oxidantes
- Inflamables
- Infecciosos
- Neumáticos (excepto con fines constructivos)

Residuos Admisibles:

- Inertes
- No peligrosos, incluye a urbanos, industriales y peligrosos no reactivos.

Los “**critérios para el diseño y operación de vertederos** se encuentran en los anexos I (requisitos generales para toda clase de vertederos), II (criterios y procedimientos para la admisión de residuos) y III (procedimientos de control y vigilancia) del Real decreto 1481/2011”, por lo cual se registró el desarrollo técnico para la elaboración del presente trabajo.

2.2.- Legislación dominicana

El marco legal que regula la gestión de RSU en la Rep. Dom. está encerrado en numerosas legislaciones, las cuales constituyen en sus artículos los mecanismos técnicos y jurídicos de los procesos que involucran una gestión integral. En la Tabla 1 se muestran las legislaciones que rigen la gestión de los RSU en República Dominicana.

Tabla 1: Legislaciones que regulan la gestión de los RSU en Rep. Dom.

Legislaciones que regulan la gestión de RSU en República Dominicana
• La Constitución de la República Dominicana
• La Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales 64-00
• La Ley General de Salud Pública y Asistencia Social 42-01
• La Ley sobre el Distrito Municipal y los Municipios 176-07
• La Ley 120-99
• La Ley 83-89
• La Estrategia Nacional de Desarrollo –END, Ley 1-12
• La Norma para la Gestión Ambiental de los Residuos Sólidos No Peligrosos (a ser revisada en función de la presente política) y Resolución No. 15/2009 del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
• Ley General de Educación Ley 66-97
• Ley 163-03 sobre Régimen de Cooperación y Asistencia Financiera del Poder Ejecutivo a los ayuntamientos

2.2.1- La Constitución de la República Dominicana

La “*Carta Magna de la Rep. Dom.*” encierra todos los deberes que el estado tiene asignado para garantizar la protección ambiental y la sostenibilidad de los recursos naturales; así como, el derecho que tiene cada ciudadano de interrelacionar con el entorno sin exponer su salud a la contaminación que se pueda generar por intervención humana.

En el **Art. 67**, “*Protección del medio ambiente*” dispone que es un deber de la nación salvaguardar el medio ambiente, evitar la contaminación de los cuerpos de aguas (superficiales y subterráneas), mantener el equilibrio ecológico y conservar el paisaje para las venideras generaciones.

2.2.2- La Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales 64-00

La actual legislación tiene por objetivo disponer de cánones para la permanencia, protección y restitución del medio ambiente, afianzado al uso sostenible. De esta ley se tomarán algunos artículos y acápite que correspondan con la sostenibilidad ambiental para el presente trabajo.

Art. 106.- “*Los ayuntamientos municipales operarán sistemas de recolección, tratamiento, transporte y disposición final de desechos sólidos no peligrosos dentro del municipio, observando las normas oficiales emitidas por la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, conjuntamente con la Secretaría de Estado de Salud Pública y Asistencia Social, para la protección del medio ambiente y la salud*”.

De acuerdo al Párrafo I, del **Art. 107**, establece: “*Bajo ninguna circunstancia se permitirá la operatividad de vertederos municipales en cercanía de lechos, fuentes, cuerpos de aguas, ni en aquellos lugares donde la escorrentía y la infiltración pueda contaminarla*”.

2.2.3- La Ley General de Salud Pública y Asistencia Social 42-01

En la presente legislación quedan establecidas las políticas y normativas de ejecución de los residuos hospitalarios.

Art. 46.- “*La Secretaría de Estado de Salud Pública y Asistencia Social en coordinación con la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales y demás instituciones competentes, elaborarán las normas oficiales que regulen la disposición y manejo de desechos sólidos cuyo uso, recolección, tratamiento, depósito, reconversión, industrialización, transporte, almacenamiento, eliminación o disposición final resulten peligrosos para la salud de la población*”.

Los almacenamientos de los residuos hospitalarios serán aislados en depósitos con etiquetas rojas, bajo inspección técnica y luego entregados a los gestores municipales para su adecuada disposición final. La “*Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales*” establecerá los lugares donde se dispondrán los residuos que constituyan un peligro para la salud humana.

2.2.4- La Ley 120-99

La “*Ley 120-99*” regula todos los desechos sólidos que son arrojados por personas físicas en lugares públicos, fuentes naturales y establecimientos de recreación temporal.

Art. 4.- *“Las personas que sean sorprendidas tirando basura, desechos o desperdicios de cualquier tipo, del tamaño que fuese, en los lugares públicos, serán condenados a las penas de dos (2) hasta diez (10) días de prisión o multas de quinientos (RD\$500.00) a mil (RD\$ 1,000.00) pesos, o ambas penas a la vez”.*

2.2.5- La Ley 83-89

La “Ley No. 83-89” regula todos los escombros generados en la construcción, demolición o residuos de gran tamaño que sean colocados en las vías públicas, en las aceras, en áreas verdes o solares improductivos.

2.2.6- La Norma para la Gestión Ambiental de los Residuos Sólidos No Peligrosos

En la presente Norma se establecen las definiciones de los diferentes tipos de residuos, su clasificación, los principios y requisitos generales; así como, las especificaciones generales de almacenamiento y eliminación de residuos no peligrosos en vertederos. Además, la normativa encierra todos los detalles de la recolección, transporte y disposición final (prohibición, manejo, monitoreo y clausura). Cabe destacar que el **Acáp. 5.7**, fomenta la reutilización, reciclaje y valorización de todos aquellos residuos que tengan aprovechamiento económico.

2.2.7- Ley General de Educación, Ley 66-97

Esta ley establece el derecho a la educación de todos los ciudadanos, así como a la educación ambiental, donde los estudiantes desarrollen inquietudes y capacidades, que les permitan reducir los impactos generados al medio que les rodea por sus actuaciones. Una correcta gestión de los residuos pasa por un cambio en las actitudes de los ciudadanos, ese cambio en las actitudes y comportamientos de los ciudadanos debe surgir desde la propia escuela.

2.3.- Semejanzas y diferencias entre la legislación española y dominicana

La legislación dominicana tiene mucha similitud con la española en todo lo concerniente a la protección del medio ambiente y la salud humana, en términos específicos persiguen optimizar la gestión de los RSU manteniendo la sostenibilidad ambiental mediante estrategias y acciones que comprometan a un plan integral de los residuos.

En la República Dominicana se establece en la “Ley 176-07” dentro de sus atribuciones, la responsabilidad de los municipios en el manejo y gestión de los residuos sólidos urbanos. Concretamente en el Capítulo 1, Art. 19, se indica: *“normar y gestionar la protección de la higiene y salubridad públicas para garantizar el saneamiento ambiental, además de ofrecer los servicios de limpieza y ornato público, recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos”.*

En la legislación estatal de España se establece en el Capítulo 2, Art. 14, que: “*Las Entidades Locales en el marco de sus competencias, podrán elaborar programas de prevención y gestión de residuos de conformidad y en coordinación con el Plan Nacional marco, y con los planes autonómicos de gestión de residuos*”.

Tabla 2: Principales semejanzas entre la legislación española y dominicana.

Principales Semejanzas entre la Legislación Española y Dominicana		
Descripción	Legislación Española	Legislación Dominicana
Objetivo	Art. 1 Ley 22/2011	Acáp. 1.1 (La Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos, 2003)
Definiciones	Art. 3 Ley 22/2011	Acáp. 2 (La Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos, 2003)
Protección de la salud humana	Art. 7 Ley 22/2011	Art. 61 - Constitución y Art. 46, 47, 48, 49 Ley No. 42-01
Protección del medio ambiente	Art. 7 Ley 22/2011	Art. 67 - Constitución y Ley No. 64-00
Instrumentos de la política de residuos	Art. 14, 15 y 16 Ley 22/2011	Política para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (RSM)
Disposiciones generales para la reutilización, el reciclaje y valorización	Art. 21, 22 Ley 22/2011	Acáp. 5.7 (La Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos, 2003)
Clasificación, características, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final para los residuos sólidos peligrosos	Art. 17, 18, 19, 20, Anexo III Ley 22/2011 Real Decreto 1481/2001	Reglamento Para La Gestión De Sustancia y Desechos Peligrosos En La República Dominicana.
Aspectos de control, manejo y monitoreo ambiental en la operación de instalaciones de disposición final	Art. 12 y 13 - Real Decreto 1481/2001	Acáp. 6 (La Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos, 2003)

2.3.1- Diferencias entre las legislaciones

Dentro de las diferencias a nivel legislativo que existen en materia de RSU entre República Dominicana y España, se destacan las numerosas leyes y normativas dominicanas promulgadas al respecto, mientras la *Ley Estatal 22/2011* y el *Real Decreto 1481/2001* en España este tema lo abarcan íntegramente.

La legislación española se centra en políticas de prevención y reducción de los volúmenes de residuos generados por la población, además de fomentar el reciclaje y la reutilización de los subproductos que se pueden insertar en su ciclo de utilidad. Además, buscan minimizar la eliminación de los residuos mediante la deposición de estos en vertederos. Las legislaciones dominicanas no cuentan con un plan de prevención y reducción que involucre a la ciudadanía a la disminución del consumo insostenible de

bienes, no existe una estrategia nacional que promueva en los centros educativos la educación ambiental, que concientice a la población al reciclaje y reutilización, en un país que los últimos años el 35% de sus residuos son inorgánicos.

- **De la producción y posesión inicial de los residuos**

España en su legislación estatal 22/2011, específicamente en el Art. 17, establece las obligaciones que debe cumplir el productor o poseedor inicial para gestionar sus residuos. Para garantizar el adecuado tratamiento de sus residuos, “*estará obligado a:*

- a) Realizar el tratamiento de los residuos por sí mismo.*
- b) Encargar el tratamiento de sus residuos a un negociante, o a una entidad pública o privada, todos ellos registrados conforme a lo establecido en la Ley.*
- c) Suministrar a las empresas autorizadas para llevar acabo la gestión de los residuos las informaciones y características especiales necesarias para su adecuado tratamiento o eliminación.*
- d) Informar inmediatamente a la administración ambiental competente en caso de pérdida o escape de residuos peligrosos o de aquellos que por su naturaleza o cantidad puedan dañar el medio ambiente”.*

Los productores o importadores en la República Dominicana, según “ (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014)” tienen el compromiso durante el periodo de existencia del producto, incluyendo todas las fases de su elaboración. En este principio, “*La política para la gestión de residuos sólidos municipales*” no contempla las responsabilidades u obligaciones, ni existen leyes que las estipulen como parámetros a cumplir por los productores.

- **Objetivos y medidas en la gestión de los residuos**

En materia de generación y valorización de los residuos, las autoridades competentes en la Rep. Dom. no tienen establecido los “*Objetivos mínimos de reducción en la generación de residuos*”, así como la elaboración de un programa que incentive a la reutilización, reciclado y valorización obligatorias de residuos aprovechables en términos económicos. En España dentro de las competencias administrativas que el *Ministerio de Medio Ambiente* debe establecer se encuentran los objetivos mínimos de reducción general de residuos.

Las autoridades competentes adoptaran las asignaciones necesarias para el cumplimiento de los objetivos, donde certificaran el desempeño de los objetivos específicos, a través de las medidas que se establecieron, como son:

- a) *“Antes de 2020, la cantidad de residuos domésticos y comerciales destinados a la preparación para la reutilización y el reciclado para las fracciones de papel, metales, vidrio, plástico, biorresiduos u otras fracciones reciclables deberá alcanzar, en conjunto, como mínimo el 50% en peso.*
- b) *Antes de 2020, la cantidad de residuos no peligroso de construcción y demolición destinados a la preparación para la reutilización, el reciclado y otra valorización de materiales, deberá alcanzar como mínimo el 70% en peso de los producidos”.*

- **Disposición final**

Según “ (La Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos, 2003)” los dos mecanismos posibles de eliminación de residuos en Rep. Dom., son:

- 1) Relleno Sanitario
- 2) Incineración (la práctica de este último no es común)

Acáp. 6.3.5.- *“Todo vertedero controlado o relleno sanitario deberá estar situado y diseñado de forma que cumpla las condiciones necesarias para impedir la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales y garantizar la recogida eficaz de los lixiviados. La protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas de la superficie se realizará mediante la combinación de una barrera geológica y un revestimiento inferior durante la fase activa o de explotación, y mediante la combinación de una barrera geológica y un revestimiento superior durante la fase pasiva o posterior a la clausura.”*

En el *“Real Decreto 1481/2001, del 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero”*, en España, establece en su Art. 4, La clasificación de los vertederos según los tipos de residuos que se someterán a eliminación, se dispondrán de celdas independientes que cumplan con los requerimientos establecidos en el mismo, en el cual los vertederos se clasificarán:

- a) *“Vertedero para residuos peligrosos*
- b) *Vertedero para residuos no peligrosos*
- c) *Vertedero para residuos inertes”*

El Anexo I del *“Real Decreto 1481/2001”* encierra todos los requerimientos necesarios para las clases de vertederos, del cual haremos énfasis en el Apartado 3 *“Protección del suelo y de las aguas”*, donde se establecen los parámetros técnicos de diseño necesarios para impedir la contaminación de las aguas subterráneas y los suelos, además de garantizar una recogida eficaz de los lixiviados.

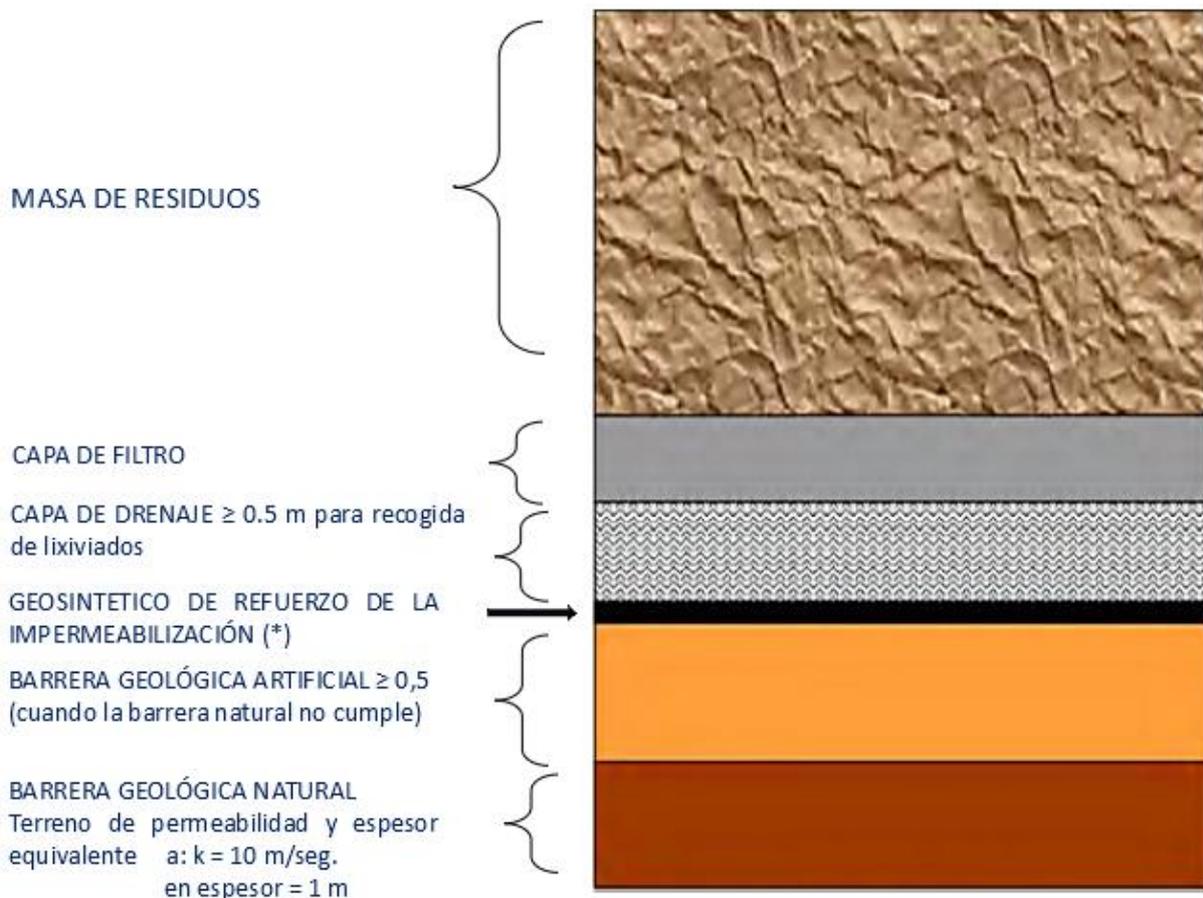
Para garantizar la protección tanto del suelo como de las aguas subterráneas durante la vida de explotación del vertedero, se debe conseguir que en todo el perímetro del vertedero exista una capa

mineral que le permita tener unas condiciones de porosidad y espesor cuya combinación sea al menos semejante a los requisitos siguientes:

- a) "Vertederos para residuos peligrosos: $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s; espesor ≥ 5 m.
- b) Vertederos para residuos no peligrosos: $k \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s; espesor ≥ 1 m.
- c) Vertederos para residuos inertes: $k \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s; espesor ≥ 1 m.

(k = coeficiente de permeabilidad; m/s = metro/segundo.)"

Cuando las condiciones geológicas e hidrogeológicas en los contornos de un vertedero no tengan la capacidad suficiente de impedir la contaminación del suelo y las aguas subterráneas, se deberá de utilizar un revestimiento artificial de al menos 50 centímetros, descrita en el "Real Decreto 1481/2001", en la Figura 2 se muestra un perfil de las diferentes capas y barreras que garantizan la impermeabilización del suelo.



(*) Se dispondrá un geotextil protector encima del geosintético de refuerzo.

Figura 2: Perfil de impermeabilización del suelo.

Fuente: (Real Decreto 1481/2001).

2.4.- Conclusiones legales

A pesar de que existen muchas similitudes entre ambas legislaciones en aspectos conceptuales y de gestión, la legislación dominicana presenta muchas debilidades en materia de prevención y protección del suelo y las aguas subterráneas. Además, la necesidad de promulgar nueva legislación que regule los procedimientos de eliminación de los RSU en la República Dominicana, que contemple y establezca mediante una normativa los valores de los parámetros, criterios técnicos y límites permisibles para la instalación de un relleno sanitario, que garanticen la reducción o mitigación de la contaminación ambiental.

El “*Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales*”, debe garantizar la incorporación de políticas de control y monitoreo ambiental con la frecuencia adecuada, que comprometan a las autoridades ambientales a la supervisión del cumplimiento jurídico, ya que en República Dominicana en la práctica existe una débil gestión en el control y seguimiento de las normativas ambientales por parte de los organismos reguladores.

Tabla 3: Frecuencia de monitoreo en vertedero de residuos no peligrosos.

Factor	Acción	Frecuencia
		Fase Postclausura
Datos Meteorológicos	Medida del Volumen de precipitación	Valor diario y estadísticos mensuales
	Temperatura	Medias mensuales
	Evaporación	Valor diario y estadísticos mensuales
	Humedad atmosférica	Medias mensuales
Control de aguas superficiales y subterráneas	Medida del caudal de aguas superficiales	Semestral
	Cuantificación del volumen de lixiviado	Semestral
	Nivel de aguas subterráneas o niveles freáticos	Semestral
	Composición de aguas subterráneas, superficiales y	Semestral
Emisión de Gases	Determinación de la composición para residuos no peligrosos	Semestral

Fuente: (Real Decreto 1481/2001).

3. ANTECEDENTES

3.1.- Descripción geográfica de la República Dominicana



Figura 3: Ubicación geográfica de la República Dominicana.

La República Dominicana está situada en el centro de las Antillas Mayores, ocupando el 74% del terreno de la Isla La Española. Está limitada por el océano Atlántico (norte), por el canal de la Mona (este), por el Mar Caribe (sur) y con la República de Haití (oeste). Su superficie es de 48.730 km², con una demografía de 10.766.998 habitantes al cierre del año 2017. Después de Cuba es la segunda isla más grande del Caribe.

El 65% del territorio dominicano está conformado por montañas, un 8% de lomas y un 27% de planicies, hidrográficamente cuenta con 108 ríos, los de mayores extensiones son: “*el río Yaque del Norte, Yaque del Sur, el Yuna y la cuenca Ozama-Isabel*”. Exhibe un clima muy variado, en las llanuras se observan temperaturas por encima de los 22°C y estas varían entre 25 y 33°C en verano. En las montañas se registran temperaturas entre 9 a 15 °C.

República Dominicana está constituida por 31 provincias y un Distrito Nacional; 158 municipios, los cuales están conformados por 231 distritos municipales. El 70% de la población vive en zona urbana, Santo Domingo es la provincia de mayor población en todo el país (2,402 millones de habitantes para el 2017).

3.2.- Gestión de los residuos sólidos municipales

En la República Dominicana la gestión de los RSM es responsabilidad de los Ayuntamientos, ya que son las instituciones encargadas de realizar estos servicios, los cuales se enfocan tradicionalmente en recolectar y transportar los desechos sólidos de las diferentes residencias y comercios del municipio, luego son llevados y depositados en un vertedero municipal, gran parte de ellos están sin ningún tipo de clasificación. Los vertederos en su mayoría operan a cielo abierto, emitiendo gases y contaminando las aguas subterráneas.



Figura 4: Esquema de gestión de residuos sólidos municipales.

El soporte técnico y financiero de los ayuntamientos es brindado por la “*Liga Municipal Dominicana*”, que es la institución del gobierno central encargada del financiamiento de todas las planificaciones de mejoras administrativas y tecnológicas de los mismos, aunque la mayoría de veces son limitados. El financiamiento de cada municipio es directamente proporcional a la cantidad de habitantes de la zona. Los ayuntamientos asignan un porcentaje de su presupuesto mensual al servicio de la gestión de los RSM, ya que estos implican unos altos costos asociados a recolectar, transportar y disponer en un vertedero, como también los efectos generados por un mal manejo de los mismos.

3.2.1- Financiamiento de la gestión de residuos sólidos urbanos municipales

De acuerdo a la “*Ley de Transferencias de Municipios y Distritos Municipales (Ley 166-03)*, las fuentes de ingresos de los ayuntamientos provienen de las transferencias que realiza el gobierno central, el cual les asigna el 10% de los ingresos nacionales”. Otras fuentes de financiamientos son los pagos que realizan los ciudadanos por recibir los servicios municipales (incluyendo el servicio de gestión de residuos) y las donaciones realizadas por organismos internacionales, así como el sector privado (Castillo Tió R. , 2016). En Tabla 4 se muestran las diferentes fuentes de financiamiento que reciben los ayuntamientos para la gestión RSM en la Rep. Dom., de las cuales existen organismos que contribuyen a políticas de reducción de residuos y otras donaciones internacionales que no son puntuales en todos los municipios.

Tabla 4: Principales fuentes de financiamiento de la gestión de los RSM en la Rep. Dom.

Principales fuentes de financiamiento
Ley 163-03
Pago por servicio
Donaciones Nacionales
Donaciones de Organismos Cooperantes
Donaciones del Gobierno
Otros ingresos propios

Fuente: (Castillo Tió R. , 2016).

Según (Castillo Tió R. , 2016) *“la transferencia estimada a favor de los ayuntamientos se estima en RD\$ 18.333 Millones de pesos (equivalente a 305,55 Millones de euros), de este monto se destina cerca de 5% a la Liga Municipal Dominicana (LMD), es decir unos 900 millones de pesos (equivalente a 15 millones de euros), de los cuales se destina entre el 10 y 15% a FEDOMU”.*

Tabla 5: Rango de costos en la gestión de residuos sólidos en Rep. Dom. al 2016

Rango de costos					
RD\$/ton		US\$/ton		€/ton	
Recolección	1081 - 1739	Recolección	23 - 37	Recolección	18,64 – 29,98
Transporte	940	Transporte	20	Transporte	16,21
Disposición final	94	Disposición final	2	Disposición final	1,63

Fuente: *Elaboración propia a partir del informe cuantitativo sobre la Situación de los Residuos Sólidos en Rep. Dom. al 2016.*

En la Tabla 6 se muestran desglosados los ingresos municipales proporcionados según la *“Ley 166-03”*, de la cual se hace una estimación del gasto que genera la gestión de los RSM, el cual se calcula considerando un 30% de total de los ingresos que deben destinarse a los servicios, y de esto el 90% a la gestión de residuos. Los gastos en limpieza y de todos los servicios que involucran la gestión de los RSM son del orden 4.600 Millones de RD\$/año, equivalente a 76,66 Millones de €/años (Castillo Tió R. , 2016).

Cabe destacar, que los ayuntamientos en su mayoría no cuentan con los recursos suficientes para dar un manejo adecuado a todos los servicios que implica la gestión de los RSM, además no existen políticas que involucren a la ciudadanía al pago de los servicios ofrecidos por los organismos gestores de los residuos sólidos urbanos, considerando erróneamente que, es un deber del Estado hacerse

responsables de los desechos generados en los municipios. Muchas administraciones privatizan el servicio de los RSM, con el objetivo de garantizar una mejor gestión y descargar la responsabilidad a la empresa contratada.

Tabla 6: Ingresos municipales correspondientes a la Ley 166-03

Fuentes de Financiamiento			
Ingresos municipales		Presente	Proyectado
Ley 166-03		2016	2017
	%	RD\$ $\times 10^6$	RD\$ $\times 10^6$
Ingresos Corrientes del País	100.00	486.985	512.297
Ingresos de Ley	10%	48.699	51.230
Valor Asignado Real Municipalidad	3,46	16.845	18.333
Liga Municipal Dominicana	0,045	758	825
FEDOMU	0,005	84	92
Ingresos Ayuntamientos	0,95	16.003	17.416,35
PIB País en US\$		68.843	72.392,50
Presupuesto País en RD\$		675.829	711.399,00
Tasa		47	47,84
Municipalidad/Presupuesto en %		2,49	2,58
Municipalidad/PIB en %		0,52	0,53
		Año 2016	Año 2017
INGRESOS AYUNTAMIENTOS		RD\$ Millones	RD\$ Millones
Ingresos Neto Ley 166-03	0,98	16.845,00	18.333,00
Ingresos Propios (supuesto*)	0,02	336,9	366,7
Ingresos totales Ayuntamientos	1,00	17.181,90	18.699,70
Excepto ADN.			

Fuente: (Castillo Tió R. , 2016).

3.2.2- Producción de residuos

Al igual que en otros países, la producción de residuos sólidos en República Dominicana es conforme al crecimiento de su población. En las últimas décadas la población prácticamente se ha duplicado y según él (Observatorio de Políticas Sociales y Desarrollo, 2017), se está produciendo más de 4 millones de toneladas de RSU al año, unas 11.000 toneladas diarias, lo que a su vez equivale a 1,11 kilogramos de residuos por persona al día. Estos volúmenes están siendo almacenados en depósitos incontrolados, lo cual implica un riesgo a la salud humana y al medio ambiente.

En la Figura 5, se puede observar que en la región Ozama se genera más de la tercera parte de los residuos totales del país, en dicha región se ubica el Gran Santo Domingo (capital de la Rep. Dom.), posterior a esta se sitúan como grandes generadores al Cibao Norte y Valdesia, dos regiones turísticas, de gran importancia industrial y tamaño poblacional muy significativo.

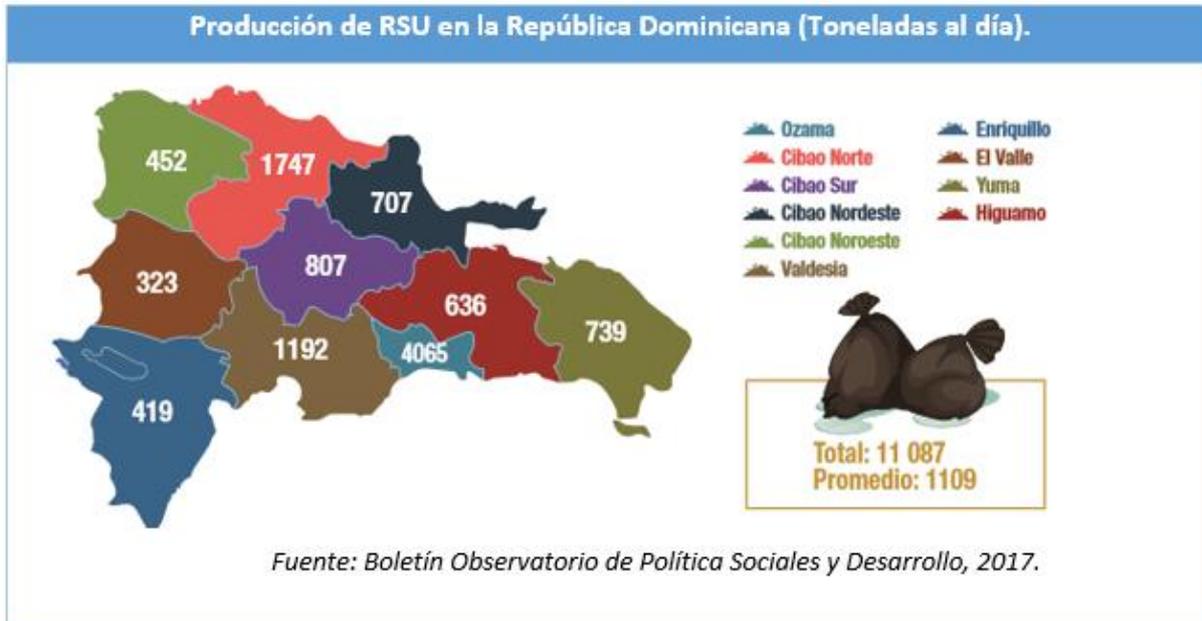


Figura 5: Producción de RSU en la Rep. Dom. (Toneladas al día), por región, al año 2015.

Según el informe realizado por el Banco Mundial “What a Waste, 2012” reveló que las islas del Caribe en las últimas décadas ocupan el más alto índice de generación de residuos per cápita de Latinoamérica, con gran semejanza a las islas en la Región de África. En el informe también se refirió a la gran proporción de residuos plásticos que se generan en República Dominicana por encima de muchos países en América Latina.

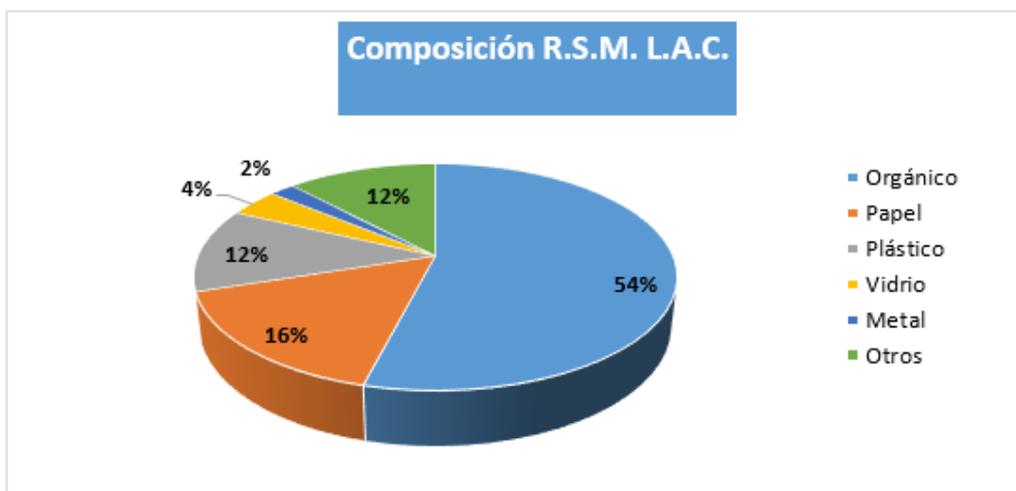


Figura 6: Composición de residuos sólidos municipales en Latinoamérica y el Caribe.

Fuente: Banco Mundial, 2012.

Cabe destacar que la producción de residuos se expresa en Kg/Hab/día, esta depende del tamaño poblacional, del nivel cultural y económico, del clima y el desarrollo industrial que experimenta cada ciudad del país. Los valores de producción en Rep. Dom. están comprendidos entre 0,6 – 1,5Kg/Hab/día.

Tabla 7: Generación y PIB por provincia.

Provincia	PIB (1997)	PIB (2008)	Región Este	(Kg/Hab/Día)
Distrito Nacional	54,48	57,743		0,78
Santiago	13,19	13,980		0,68
Puerto Plata	4,09	4,335		0,66
La Romana	3,67	3,890	3,89	0,66
San Pedro de Macorís	3,44	3,646	3,64	0,66
La Vega	2,74	2,904		0,66
Duarte	2,73	2,894		0,66
San Cristóbal	2,66	2,819		0,66
Españolat	1,50	1,590		0,65
Peravia	1,32	1,399		0,65
Barahona	1,17	1,240		0,65
Monseñor Nouel	1,06	1,123		0,65
La Altagracia	1,01	1,070	1,07	0,65
Azua	0,96	1,018		0,65
Valverde	0,96	1,018		0,65
San Juan de la Maguana	0,74	0,784		0,65
Salcedo	0,62	0,657		0,65
Monte Cristi	0,58	0,615		0,65
Sánchez Ramírez	0,48	0,509		0,65
María Trinidad Sánchez	0,46	0,488		0,65
Hato Mayor	0,42	0,448	0,45	0,65
Santiago Rodríguez	0,42	0,445		0,65
Samaná	0,29	0,307		0,65
Dajabón	0,29	0,307		0,65
El Seibo	0,20	0,212	0,21	0,65
Pedernales	0,19	0,201		0,65
Bahoruco	0,16	0,170		0,65
Independencia	0,12	0,127		0,65
Monte Plata	0,05	0,053	0,05	0,65
Elías Piña	0,000	0,000		0,65
Total	100,00	105,99	9,31	0,89

Fuente: (Castillo Tió R. , 2016).

Para el año 2015, la República Dominicana generaba per cápita 1,20 (kg/hab/día), y su composición era un 60% de materiales orgánicos y un 40% de vidrio, papel, cartón, plástico y metales. En la Figura 7 se presentan los principales residuos producidos en la República Dominicana.



Figura 7: Principales residuos producidos en República Dominicana (toneladas al día), año 2015.

3.2.3- Gestión de barrido, recogida y transporte

Los ayuntamientos municipales en su accionar básico desarrollan las actividades de barrido, recogida y transporte de residuos sólidos, este servicio es realizado sin ninguna sistematización técnica eficaz, debido a la falta de mecanismos adecuados, así como estrategias e instrucciones técnicas que establezcan rutas, zonificación y horarios.

La República Dominicana no cuenta con suficientes contenedores de almacenamiento temporal que permita captar la producción diaria de residuos que generan los municipios, tanto en zonas urbanas como rurales, esto ha conllevado a que personas de toda clase social y sin concientización ambiental depositen sus residuos en las aceras sin ningún control que mitigue los malos olores en calles y avenidas, enfermedades e impactos negativos en el medio ambiente.



Figura 8: Residuos sólidos depositados en espacios públicos.

Fuente: (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014).

La frecuencia de barrido y recogida en los municipios, es un factor determinante para la propagación de nauseabundos olores, lixiviación y proliferación de insectos y roedores. El porcentaje de cobertura de barrido y recogida está en función de la frecuencia con que se realizan dichas actividades, la cual

depende del tamaño del municipio, ya que este servicio es intermitente y varía entre 1 a 4 veces por semana.

Tabla 8: Porcentajes de cobertura de barrido en municipios grandes, medianos y pequeños

Municipios	Barrido	Recolección
Grandes	46-100	60-100
Medianos	30-100	80-100
Pequeños	30-100	42-100

Fuente: Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos Municipales, 2003.

Debido a la poca disponibilidad de contenedores el almacenamiento temporal de los residuos (domiciliarios, comerciales e industriales) se realizan en envases de hierro o plásticos, en fundas “bolsas” u otro material que son colocados en espacios públicos (aceras) frente a sus hogares o comercios sin ningún tipo de clasificación para su posterior recogida. El personal responsable del servicio de recogida está expuesto a enfermedades por el manejo inadecuado de los residuos sólidos municipales debido, a que no se cumplen las mínimas leyes de seguridad y sanidad.



Figura 9: Proceso de recogida y transporte.

Fuente: (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014).

Los camiones recolectores operan en muy mal estado, emitiendo malos olores cuando transportan los residuos a su disposición final. Además, es la etapa más costosa, ya que por las malas condiciones de los equipos de recolección, se gasta mucho en reparación (OPS, 2003). Gran parte de los usuarios se niegan a pagar las tarifas de recolección de residuos por malos hábitos culturales, falta de educación ambiental, apopleo e interés que arrastra la población dominicana.

En las grandes ciudades de la República Dominicana quienes gestionan los residuos sólidos municipales son empresas privadas asignadas por los ayuntamientos. El pago del servicio en la mayoría de los municipios se lleva a cabo por tarifa fija mensual.

3.2.4- Reciclaje en República Dominicana

La actividad de reciclaje en República Dominicana inicia con la fundación de la Fábrica Nacional del Vidrio en San Cristóbal, la cual adquiría objetos de este material con la finalidad de incorporarlos al proceso de producción. Al igual que en otros países este trabajo comienza de manera informal, ya que quienes realizan la segregación y recuperación de materiales son los llamados recicladores de base o segregadores informales "Buzos" (FOCIMIRS, 2017).



Figura 10: "Buzos" en plena recuperación de materiales en el vertedero de Duquesa.

Fuente: (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014).

Según (SEMARENA, 2003), el 25% de los residuos sólidos generados son reciclables, sin embargo, se estima que solo se aprovecha comercialmente el 2%. En la actualidad el 40% de los residuos sólidos son reciclables, aprovechándose comercialmente del 10 a 15%.

En la Figura 11, se observa que durante el período comprendido entre los años 2013 – 2015, según el Centro de Exportaciones e Inversiones de República Dominicana (CEI-RD), el país exportó un total de 1.149.925 toneladas de materiales de diversos tipos, con un costo de US\$408.724.328,00. Los materiales exportados fueron: hierro, cobre, aluminio, acero, zinc, estaño, platino, plomo, plásticos, telas, vidrio, estaño y láminas acrílicas, entre otros.

Los principales mercados internacionales de estos materiales son China, Estados Unidos, Corea del Sur, Singapur, Puerto Rico, Tailandia, España, Brasil, Taiwán, Corea del Norte, Italia, Japón y Alemania.

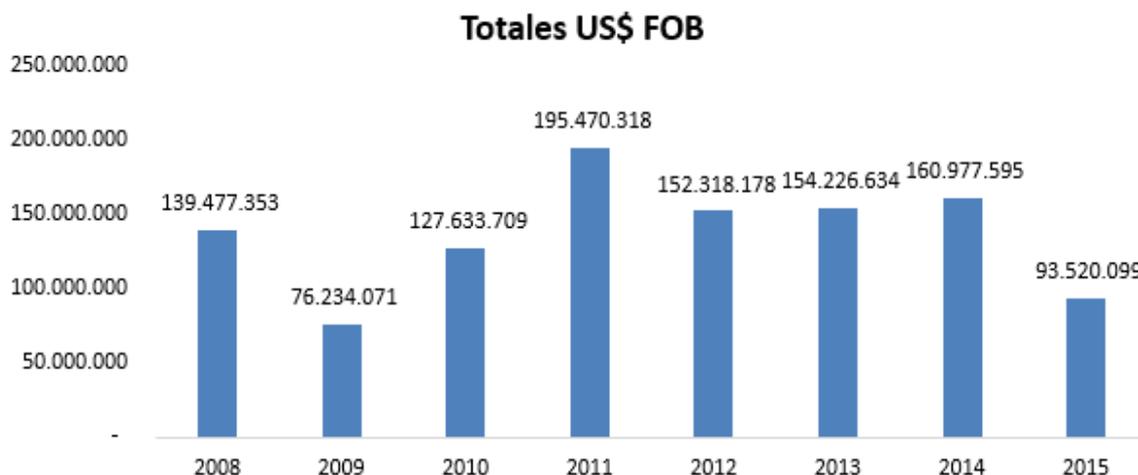


Figura 11: Evolución de las exportaciones de los materiales reciclados en los periodos señalados.

Fuente: Centro de Exportaciones e Inversiones de República Dominicana (CIE-RD).

En el 2011 se realizó un estudio denominado **“Plan Maestro para el Manejo Integral de los Residuos Sólidos en la Mancomunidad del Gran Santo Domingo (MGSD)”**, el cual consistió en establecer los precios de los materiales reciclables para sus posteriores exportaciones a países con mercado receptores de esos materiales (FOCIMIRS, 2017). Los precios que se muestran en la Tabla 9, varían en función del tiempo, tanto en el mercado nacional como internacional.

Tabla 9: Costo de materiales reciclables en la MGSD.

MATERIAL	UNIDAD	COSTO - RD\$	COSTO - US\$	COSTO - €\$
Plástico	libra	3	0,08	0,06
Cartón cajas	Unidad	10 - 70	0,26 – 1,80	0,20 – 1,40
Hierro	kilogramo	12	0,31	0,24
Aluminio	libra	24	0,62	0,48
Bronce	kilogramo	75	1,92	1,50
Calamina	kilogramo	13	0,33	0,26
Cobre	kilogramo	110	2,82	2,20
Vidrio	Unidad	1	0,026	0,02
RESIDUOS VOLUMINOSOS				
Abanico	Unidad	30 - 50	1,28 – 7,69	0,60 – 1,00
Aire Acondicionado	Unidad	500 a 600	12,82 – 15,39	10,00 – 12
Nevera	Unidad	200	5,12	4,00
Lavadora	Unidad	50 a 200	5,12 – 1,28	1,00 – 4,00
Vehículo y Planta	Unidad	410	10,51	8,20

Fuente: (FOCIMIRS, 2017)

En la actualidad existen numerosas empresas recicladoras, las cuales están destinadas a la reutilización o fabricación de otros productos que se insertan al mercado, también existen empresas intermediarias que son exclusivas en empanaciones con fines de exportación.

En la Tabla 10 se presenta un grupo de empresas dedicadas a las actividades del reciclaje, las cuales se mantienen vigente en el país.

Tabla 10: Empresas dedicadas a actividades de reciclaje o relacionadas, marzo 2017.

Empresa	Ubicación	Material recibido	Productos
Moldeados Dominicanos S.A. (MOLDOSA)	Santo Domingo	Periódico, papel no satinado, cartón	Envases para huevos, portavasos y bandejas desechables.
Recicladora del Cibao	Santiago de los Caballeros	Botellas plásticas, galones, huacales, cartón	Pacas de plástico compactado para exportación
RIERBA	Santo Domingo	Papel y cartón	Pacas de papel y cartón compactado para exportación
PLASTIFAR	Santo Domingo	Foam (residuos limpios)	Vasos, platos, sorbetes, envases
CAPOBIANCO Soluciones Ecológicas	Santo Domingo	Envases plásticos de aceite para vehículos, tubería de riego, fundas plásticas	Mobiliario urbano de interior y exterior (contenedores) y recipientes varios.
Metales Antillanos	Santiago de los Caballeros	Chatarra de hierro	Hierro para exportación
ECOSERVICIOS	Higüey	Plásticos, cartón, vidrio, metales, aceite usado de cocina y aceite usado de motor (mineral), baterías usadas	Pacas de plástico, cartón y metales compactados y baterías ecológicas
Green Love	Santo Domingo	Papel, plásticos, Tetrapak, vidrio, cartón foam limpio.	Pacas de materiales compactados

Fuente: (FOCIMIRS, 2017)

3.2.5- Proyecto de compost

En el 2003, la "Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA)" en coordinación con el Ministerio de Agricultura (SEA) instalaron una planta de compostaje en el municipio de La Vega, la cual utiliza como materia prima los desechos vegetales que produce la agricultura de la zona y estiércol de ganado vacuno, la planta produce en la actualidad un promedio mensual de 80 toneladas de abono orgánico. El Programa de Agricultura Sostenible (PAS) durante los últimos años ha implementado nuevas técnicas donde los productores agrícolas han logrado obtener mayores beneficios en sus producciones. El precio del abono orgánico oscila entre 300 a 450 pesos el metro cúbico, teniendo mucha rentabilidad tanto por los productores, como los agricultores que son los principales beneficiados.

3.2.6- Disposición final en vertedero

De acuerdo a un análisis realizado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el 2010, en la República Dominicana existían para la fecha más de 350 vertederos a cielo abierto, de los cuales 325 fueron georreferenciados, con un total 145Km², una cantidad muy elevada para una isla muy pequeña, siendo el vertedero de Duquesa el más grande en la eliminación de residuos sólidos del país, con 127,8 hectáreas (12,78 Km²) en superficie, ubicado en el gran Santo Domingo.

La ubicación de la mayoría de estos vertederos no responde a las exigencias planteadas en la normativa en aspectos hidrogeológicos, a las distancias a guardar respecto a los cursos de agua superficiales o a los asentamientos humanos. Por otro lado, los lixiviados generados indican valores fuera de los límites para ciertos parámetros, de acuerdo a los requisitos de la Norma Ambiental sobre Calidad de Agua, en cuanto a los vertidos al subsuelo, indicando riesgos de contaminación de las aguas subterráneas (Chalas, 2002).

En la Tabla 11 se muestran las concentraciones máximas permitidas de lixiviación en una prueba de caracterización de toxicidad.

Tabla 11: Concentraciones máximas de contaminantes para el procedimiento de lixiviación.

Contaminantes	Nivel Reglamentario (mg/L)
Arsénico (AS)	5.0
Bario (Ba)	100.0
Benceno	0.5
Cadmio	1.0
Tetracloruro de carbono	0.5
Clordano	0.03
Clorobenceno	100.0
Cloroformo	6.0
Cromo	5.0
Cresol (o-, m-, p- o cresol total)	200.0
2, 4-D	10.0
1.4-Diclorobenceno	7.5
1.5-Dicloroetano	0.5
2,4-Dinitrotolueno	0.13
(Límite de cuantificación)	
Endrin	0.02

Heptaclor (y su epóxido)	0.008
Hexaclorobenceno	0.13
Hexaclorobutadieno	0.05
Hexacloroetano	3.0
Plomo	5.0
Lindano	0.4
Mercurio	0.2
Metoxiclor	10.0
Metil etil cetona	200.0
Nitrobenceno	2.0
Pentaclorofenol	100.0
Piridina (límite de cuantificación)	5.0
Selenio	1.0
Plata	5.0
Tetracloroetileno	0.7
Toxafeno	0.5
Tricloroetileno	0.5
2, 4, 5-Triclorofenol	400.0
2, 5, 6-Triclorofenol	2.0
2, 4, 5-TP ((Silvex)	1.0

Fuente: (Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2006).

Según el “*Diagnóstico Preliminar del Sector Residuos Sólidos en la República Dominicana*”, la mayoría de los vertederos municipales establecidos en todo el país presentan un manejo incontrolado, donde el 90% de los ayuntamientos no han establecidos instalaciones adecuadas para disponer sus residuos sólidos municipales.

4. GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS

4.1.- Residuos sólidos urbanos

Los RSU son aquellos residuos que proceden del consumo o producción de bienes, del cual se genera un desecho de origen residencial, comercial e industrial en zonas urbanas, los cuales son gestionados por los ayuntamientos municipales u otras autoridades del gobierno.

4.1.1- Clasificación de residuos

De las diferentes clasificaciones de residuos en “*La Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos*”, cabe destacar las siguientes:

1) Residuo Sólido Domiciliario

Residuo que, por sus características y composición, son generados en actividades realizadas en residencias domiciliarias o cualquier establecimiento similar.

2) Residuo Sólido Comercial

Son todos aquellos RSU generados en espacios comerciales, tales como: hoteles, restaurantes, cafeterías y plazas de mercados, etc.

3) Residuo Industrial

Son aquellos residuos generados en actividades industriales, como consecuencia de los procesos de producción, reparaciones de equipos e instalaciones y tratamiento de la contaminación.

4) Residuos Peligrosos

Son todos aquellos residuos sólidos o semisólidos que, por su naturaleza tóxica, reactiva, corrosiva, radioactiva, inflamable, explosiva o patógena, implica un riesgo fundamental, real o potencial, a la salud humana o al ambiente.

5) Residuos no peligrosos

No presentan en su composición ningún tipo de peligrosidad y por tanto no se encuentran catalogados como residuos peligrosos.

6) Residuos inertes

Son todos aquellos residuos no peligrosos que no experimentan transformaciones físico-químicas o biológicas significativas, como los plásticos, vidrios, latas y otros metales.

4.1.2- Composición de los RSU

La composición que integra la distribución del porcentaje por peso del flujo de Residuos Sólidos Urbanos, específica los componentes que los constituyen en su totalidad. Conocer dicha composición de los residuos, permite instalar o diseñar una adecuada planta de tratamiento, ya que el empleo de una maquinaria u otra, depende de los porcentajes.

En función del nivel de desarrollo de los países, se puede observar en la Tabla 12 la distribución de los residuos municipales generados en porcentajes. La composición de residuos de la República Dominicana se muestra en la (figura 7) para el año 2015.

Tabla 12: Composición de residuos municipales en función del nivel de desarrollo (%).

Fracción	Países desarrollados	Países en vía de desarrollo
Materia orgánica	40-55	58-80
Papel – cartón	19-45	4-10
Vidrio	6-17	1-4
Plásticos	10-16	4-7
Textiles	3-7	2-4
Metales	4-8	1-2
Otros productos	1-8	6-18

Fuente: (Esteve Garcia, 2018)

4.1.3- Propiedades físicas de los RSU

- **Peso específico**

El peso específico de los RSU se define como el peso por unidad de volumen y se expresa en (kg/m³). Este peso específico hace referencia a residuos sueltos o compactados, es por eso que un valor medio de referencia de RSU dentro de un camión compactador sería 300 kg/m³ y cuando se dispone en vertedero el rango de valor estaría entre 400 a 600 kg/m³, con estas condiciones la humedad sería entre un 15-40%, todo dependerá de las características de los residuos y compactación del camión.

- **Contenido de Humedad**

El contenido de humedad de los residuos sólidos se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo, también puede expresarse como un porcentaje del peso seco del material. La humedad está definida como:

$$W = \frac{P(\text{húmedo}) - P(\text{seco})}{P(\text{húmedo})} \times 100$$

En la Tabla 13 se presenta para los diferentes tipos de residuos domésticos, el peso específico y su contenido de humedad.

Tabla 13: Pesos específicos y humedad de los residuos sólidos domésticos

Tipo de residuos	Peso específico (kg/m ³)		Contenido en humedad (%)	
	Rango	Tipo	Rango	Tipo
Residuos de comida	131-481	291	50-80	70
Papel	42-131	89	4-10	6
Cartón	42-80	50	4-8	5
Vidrio	160-481	196	1-4	2
Plástico	42-131	65	1-4	2
Textiles	42-101	65	6-15	10
Latas de hojalata	50-160	89	2-4	3
Aluminios	65-240	160	2-4	2
Otros metales	131-1151	320	2-4	3
Goma	101-202	131	1-4	2
Cuero	101-261	160	8-12	10
Residuos de jardín	59-225	101	30-80	60
Madera	131-320	237	15-40	20
Ceniza	650-831	745	6-12	6

- **Capacidad de campo.**

Se define como capacidad de campo a la proporción de humedad que pueden retener los residuos por acción de la gravedad, varía con la presión y la descomposición de los desechos sólidos. Cuando el umbral de la capacidad de campo de los residuos se he superado por exceso de agua, entonces ese excedente se transformará en lixiviados.

- **Permeabilidad de los residuos compactados**

La conductividad de los residuos compactados es una propiedad física que rige el movimiento de fluidos y gases dentro de un vertedero. Se expresa:

$$K = k \frac{P(\text{específico})}{\mu}$$

Siendo:

k: (Permeabilidad intrínseca) y μ : (Viscosidad dinámica del agua)

▪ **Tamaño de partícula**

Conocer el tamaño de las partículas de los residuos es un dato muy relevante para la selección de los equipos que se instalan dentro de una planta de tratamiento, tales como los separadores magnéticos, el trómel y las cribas. En la Figura 12 se presentan algunos rangos y valores característicos.

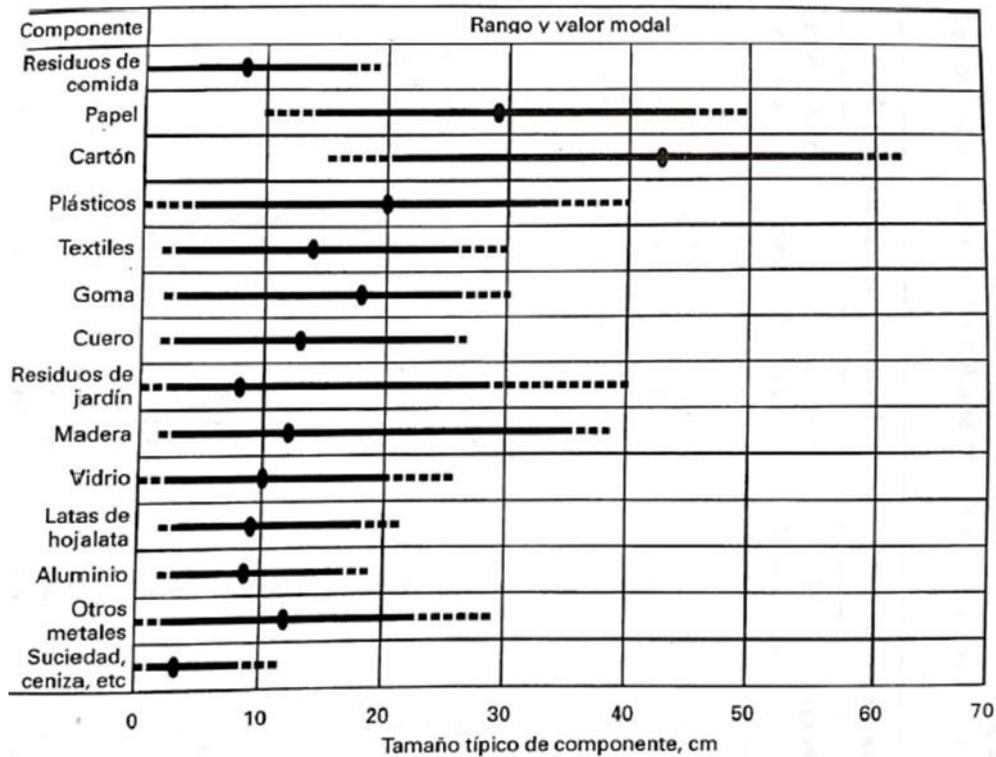


Figura 12: Rango y valores del tamaño de partícula.

Fuente: (Esteve Garcia, 2018).

4.1.4- Propiedades químicas

Si se desea evaluar las opciones de procesamiento y recuperación, resulta muy importante saber la composición química de los componentes que integran los residuos sólidos urbanos. Por ejemplo, considerar la opción de utilizar los residuos sólidos como combustible, sería preciso conocer las cuatro propiedades más importantes, como lo son:

- Análisis físico
- Punto de fusión de la ceniza
- Análisis elemental de las componentes de los residuos
- Contenido energético

1. Análisis físico

En el análisis físico se determina mediante ensayos las siguientes propiedades:

- Humedad: Medir la pérdida de humedad de una muestra que se calienta a 105 °C durante una hora.
- Materia volátil combustible
- Carbón fijo
- Ceniza.

2. Análisis elemental de los componentes

Consiste en determinar el porcentaje de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y ceniza. Con los valores obtenidos se caracteriza la M.O, además de definir la relación C/N, con la cual se define la mezcla adecuada de otras sustancias residuales, y así lograr relaciones de C/N óptimas, para que la transformación biológica se produzca a una velocidad más elevada.

Tabla 14: Datos típicos del análisis elemental en RSU.

<i>Datos típicos del análisis elemental en RSU</i>						
Componentes	C	H	O	N	S	CENIZAS
ORGÁNICOS						
Residuos comida	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Cartón	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Textiles	55,0	6,6	31,2	4,6	0,2	2,5
Goma	78,0	10,0	-	2,0	-	10,0
Cuero	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Residuos jardín	47,8	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Madera	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
INORGÁNICOS						
Vidrio	0,5	0,1	0,4	0,1	-	98,9
Metales	4,5	0,6	4,3	0,1	-	90,5

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1996).

3. Punto de fusión de la ceniza:

Temperatura a la cual la ceniza resultante de la incineración de residuos se transforma en sólido por la fusión y la aglomeración. Las temperaturas de fusión para la formación de escorias de residuos oscilan entre 1100 °C y 1200 °C (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1996).

4. Contenido energético

Hace referencia al poder calorífico de un combustible. Se expresa en kcal/kg. Este valor se puede determinar por medio de una bomba calorimétrica de laboratorio o haciendo el cálculo si se conoce la composición de los elementos.

El poder calorífico inferior (PCI) es aquel para el cual se supone que toda el agua viene del combustible o se ha formado durante la combustión. En la Tabla 15 se muestran los rangos de valores del PCI para los diferentes componentes de los RSU. Un valor inferior 1000 kcal/kg hace inviable la incineración como método de tratamiento para estos residuos (Esteve Garcia, 2018).

Tabla 15: Valores típicos de rechazos inertes y contenido energético de los RSU domésticos.

Componentes	Rechazos inertes, porcentajes		Energía, Kcal/kg	
	Rango	Típico	Rango	Típico
ORGÁNICOS				
Residuos de comida	2-8	5,0	833-1667	1111
Papel	4-8	6,0	2778-4444	4000
Cartón	3-6	5,0	3333-4167	3889
Plásticos	6-20	10,0	6667-8889	7778
Textiles	2-4	2,5	3611-4722	4167
Goma	8-20	10,0	5000-6667	5556
Cuero	8-20	10,0	3611-4722	4167
Residuos de jardín	2-6	4,5	556-4444	1556
Madera	0,6-2,0	1,5	4167-4722	4444
Orgánicos Misceláneos	-	-	-	-
INORGÁNICOS				
Vidrio	99+99	98,0	28-56	33
Latas de hojalata	96+99	98,0	56-278	167
Aluminio	90-99	96,0	-	-
Otros metales	94-99	98,0	56-278	167
Suciedad, ceniza, etc.	60-80	70,0	556-2778	1667
RESIDUOS URBANOS			2222-3333	2778

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1996).

4.1.5- Propiedades biológicas

Gran parte de la fracción orgánicos de los residuos sólidos urbanos pueden transformarse o modificarse mediante un proceso biológico, este proceso genera gases o sólidos (orgánicos e inorgánicos). Dentro de las cualidades biológicas de los componentes de los RSU, se pueden destacar las siguientes:

- **Biodegradabilidad**

La biodegradabilidad se define en función del contenido de lignina en los sólidos volátiles. Mientras mayor sea el contenido de lignina, menor será la biodegradabilidad de la mezcla. Puede inducir errores al medir la biodegradabilidad en función de los sólidos volátiles, ya que algunos componentes de los

residuos sólidos volátiles son altamente volátiles, pero poco biodegradables (ejemplo: el papel de periódico). Usando el contenido de lignina de los residuos se puede estimar la fracción biodegradable, mediante la siguiente expresión:

$$FB=0,83-0,028 C.L.$$

Donde:

FB: Fracción biodegradable expresada en función de los sólidos volátiles (SV)

0,83 y 0,028: constantes empíricas

C.L: Contenido de lignina de los SV expresado como un porcentaje en peso seco

- **Producción de olores**

Los olores se producen por la descomposición anaerobia. Los residuos adoptan un color oscuro, producto de la descomposición que genera sulfuros metálicos (los cuales emiten malos olores).

- **Reproducción de mosca**

La reproducción de moscas es un factor importante, en todas las estaciones del año para los climas cálidos, esto se debe, a que las moscas desde la puesta de huevos, hasta convertirse en adultas, solo necesitan dos semanas.

4.1.6- Transformación de los residuos

Los procesos de transformación a los cuales se ven sometidos los RSU se pueden determinar teniendo en cuenta las propiedades físicas, químicas y biológicas de estos. En la Tabla 16 se observan los diferentes procesos de transformación y los componentes resultantes.

Tabla 16: Proceso de transformación de los RSU.

Proceso de transformación	Medio o método de transformación	Componentes resultantes
Físico:		
Separación de componente	Separación manual y mecánica	Componentes individuales encontrados en los residuos domésticos no seleccionados
Reducción en volumen	Aplicación de energía en forma de fuerza o presión	Reducción del volumen de los residuos originales
Reducción en tamaño	Aplicación de energía en forma de trituración	Alteración de forma y reducción de tamaño de los componentes residuales originales

Químico:		
Combustión	Oxidación térmica	Dióxido de carbono (CO ₂), dióxido de azufre (SO ₂) y otros productos de oxidación
Ceniza:		
Pirólisis	Destilación destructiva	Una corriente de gas que contiene una variedad de gases, alquitrán y aceite y un combustible carbonoso
Gasificación	Combustión con defecto de aire	Un gas de bajo poder calorífico, un combustible que contiene carbono e inertes originalmente en el combustible, y aceite pirolítico
Biológico:		
Aerobio	Conversión biológica aerobia	Compost (material húmedo utilizado como acondicionador de suelo)
Digestión anaerobia	Conversión biológica anaerobia	Metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂), trazas de otros gases, humus o fangos digeridos

Fuente: (Esteve Garcia, 2018)

Para fines de este trabajo los procesos biológicos entre los citados, ofrecen el mayor rendimiento de transformación de los residuos. Mediante los procesos de transformación biológica se obtiene una disminución del volumen de los residuos, así como una valorización de un producto resultante de oxidación controlada denominada compostaje.

4.2.- Jerarquía en la gestión de los RSU

La jerarquía es un orden de prioridad en el manejo integral que deben recibir los residuos. Este orden prioritario de tratamiento se fundamenta en reducir los impactos ambientales y en el aprovechamiento de valiosos recursos contenidos en los materiales residuales.

En este orden de importancia, las prioridades son:

1. Prevención/Reducción
2. Reutilización
3. Reciclaje
4. Valorización de la materia orgánica (compostaje y biodigestión)
5. Valorización energética (conversión de residuos a energía)
6. Eliminación (previo tratamiento si es requerido)

El objetivo principal de la jerarquía es contribuir al uso racional y conservación de los recursos naturales, limitando su explotación. En la Figura 13 se presenta la jerarquía de los residuos, evitando a la medida de lo posible la disposición a vertedero.

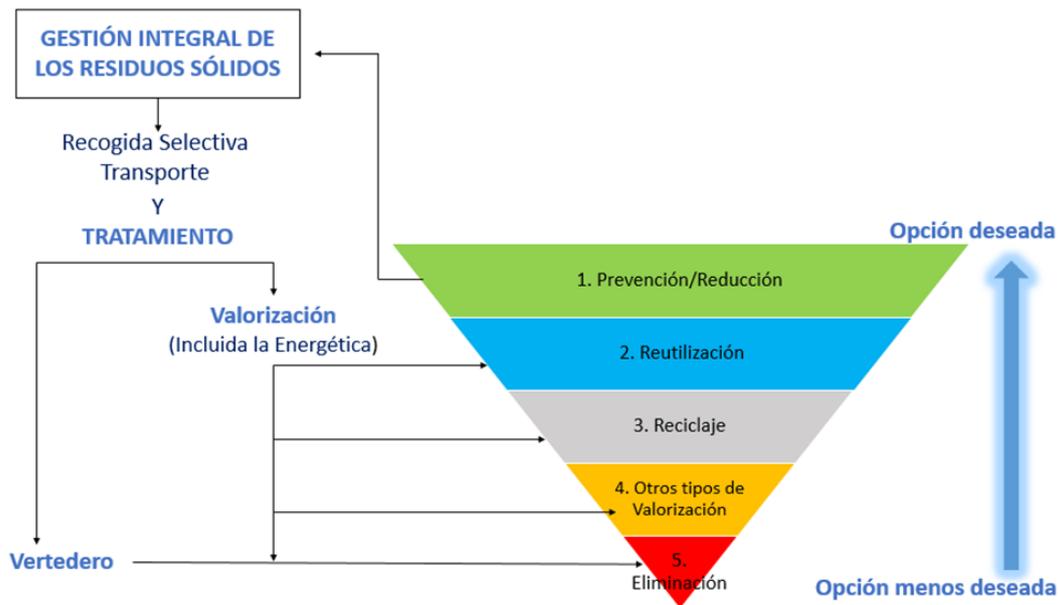


Figura 13: Jerarquía de los residuos.

Con todas estas consideraciones, la GIRS (gestión integral de los residuos sólidos) se enfoca en minimizar la generación y maximizar la valorización de los residuos sólidos, teniendo en cuenta su producción y caracterización, la cual no se puede plantear de forma genérica a cada municipio, región o país. Se debe discernir cuál es el modelo de gestión más adecuado para cada situación particular.

4.3.- Producción de los RSU

La producción de los residuos sólidos urbanos se puede medir por volumen o peso. La medida por volumen es necesaria para la planificación del sistema de recogida y el diseño de las instalaciones (planta de transferencia y tratamiento), mientras que la medida por peso se puede confrontar con valores de diferentes fuentes. La producción de RSU, se calcula en base a los residuos generados tanto en el núcleo poblacional, como en las actividades industriales y agrícolas.

El modo o nivel de vida de cada región o país, es el factor más representativo de la producción de RSU. En la (tabla 12) se visualizó que los países desarrollados generan en proporción, más plásticos y menos materia orgánica que los países en vías de desarrollo. En las áreas urbanas de grandes ciudades de un país se puede notar que la producción de RSU es el doble con relación a la zona rural, una estimación del valor de producción para zonas urbanas es alrededor 1,2kg residuos/hab/día.

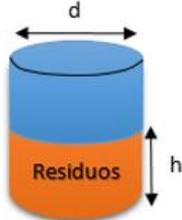
Existen otros factores en consideración como son la estacionalidad y climatología, estos dos últimos varían el consumo de bienes y por tanto las características de los residuos. Todos estos factores son indispensables en un estudio de campo para poder tener una aproximación de la producción de los RSU.

4.3.1- Generación y composición

La generación de los residuos de una determinada población puede ser cuantificada en base a sus habitantes y a su caracterización. De no ser posible la realización de un estudio de caracterización, se puede emplear una estimación en función del número de camiones y viaje que realiza cada uno, posteriormente se verifica la densidad suelta de los residuos o se toma valores de referencia de la literatura existente (FOCIMIRS, 2017).

La composición física de los residuos se puede determinar utilizando el método del recipiente cilíndrico, se recomienda que el recipiente sea de 55 galones, el cual consiste en:

Vaciar el contenido del recipiente utilizado para determinar la densidad, luego separar los componentes dependiendo el tipo de residuos.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Peso (w)}}{\text{volumen (v)}} = \frac{\text{peso (w)}}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 * h}$$


Luego se vierten los residuos con la finalidad de homogenizar la muestra, los residuos voluminosos se trozan hasta que sean manipulables. Se utiliza la muestra de un día para realizar este trabajo, colocada encima de un plástico grande para no combinar los residuos con tierra. En la Figura 14 se muestra el procedimiento de clasificación de los residuos.



Figura 14: Segregación de residuos para conocer su composición

Fuente: (FOCIMIRS, 2017).

Una vez concluida la clasificación de los componentes, se hace un registro de los datos en un formulario de composición de residuos sólidos, en el cual se incluye: el pesaje y el modelo de composición en el que se realizan estos ensayos.

El porcentaje de cada componente se calcula considerando el peso total de la muestra de residuos recolectada en un día (Wt) y el peso de cada componente (Pi):

$$\text{Porcentaje (\%)} = \left(\frac{Wt}{Pi} \right) * 100$$

Durante los siete días que dura el muestreo se debe repetir el procedimiento con los residuos. Cabe mencionar que, este ensayo se realiza durante ocho días y se elimina el primer día por no considerarse útil.

4.3.2- Proyección de la generación y composición

Con el crecimiento socio-económico y poblacional que van experimentando las ciudades en el tiempo, es proporcional al consumo de bienes y, por tanto, a la generación y composición de los residuos. En un PGIRS (plan de gestión integral de residuos sólidos) se contemplan las proyecciones o estimaciones futuras que garanticen la capacidad de las instalaciones (Planta de tratamiento, compostaje y vertedero) para un horizonte de diseño establecido.

Para la proyección deben estimarse los siguientes parámetros:

1. Proyección poblacional
2. Condiciones socio-económicas
3. Tendencia de la tasa de generación de residuos

Se aplica la siguiente fórmula:

$$G_{pf} = G_{pa} + (1+r)^n$$

Donde:

G_{pf} = Generación per cápita futura (Kg/hab/día)

G_{pa} = Generación per cápita actual (Kg/hab/día)

r = Tasa de incremento de generación en %

n = Número de años

Para calcular la cantidad de residuos, considerando que la generación permanece constante. Se aplica la siguiente fórmula:

$$Gpf \text{ (t/años)} = P \text{ anual} \times Gpa \times 365 \div 10^3$$

Donde:

Grf = Cantidad de residuos en el futuro (ton/años)

P anual = Población de cada año (persona)

Gpa = Per cápita (Kg/persona/día)

Factor de conversión kg a ton = 10^3

365 = días del año.

4.4.- Recogida y transporte de los RSU

El sistema de recogida consiste en recolectar los RSU que se generan en un municipio y que luego son transportados en camiones recolectores a una planta clasificadora para su posterior valorización o eliminación cuando no sean económicamente viables. Existen diferentes métodos, pero el más común es la instalación de recipientes en las vías públicas. Estos pueden ser: bolsas, cubos de basura o contenedores para recogida selectiva. Posteriormente, un camión, con sistema de elevar contenedores, transportará los residuos hasta las plantas de tratamiento o las estaciones de transferencias.

La selectividad en el origen, consiste en depositar los diferentes componentes de residuos en contenedores exclusivos para estos, según el tipo de residuos se le asignará un contenedor característico, el cual estará representado por un color y una simbología que permita su fácil identificación, los organismos gestores van a requerir la colaboración y concienciación ciudadana, para que la población deposite en cada contenedor los residuos que les correspondan. En la Figura 15 se presentan los recipientes de recogida selectiva con los colores característicos para cada residuo.



Figura 15: Envases de residuos para recogida selectiva.

4.5.- Estaciones de transferencia

Las estaciones de transferencia funcionan como instalaciones intermedias, cuando la distancia entre las residencias domiciliarias y el vertedero son considerables para los camiones que transportan los residuos sólidos urbanos, por esta razón se hace imprescindible disponer de estas estaciones.

Se puede diferenciar entre dos tipos de estaciones de transferencias:

- **Estaciones de transferencia de carga directa**

Hay diferentes clasificaciones de este tipo, con mayor o menor capacidad, las hay que disponen de fosas de almacenamiento y otras que son utilizadas para descargas directas en los camiones transportadores, estas estaciones por lo regular son dotadas de un espacio para la recuperación de materiales reciclables.

- **Estaciones de transferencia de carga y almacenamiento**

Son estaciones de almacenamiento de gran capacidad, su principal diferencia con relación a las estaciones de transferencias de carga directa es que, la capacidad de almacenamiento de residuos de éstas oscila entre 1 y 3 días de producción.

4.6.- Planta de Tratamiento de RSU

Las plantas de tratamiento de RSU son instalaciones que realizan un conjunto de operaciones para modificar las características físicas, químicas o biológicas de los desechos, su principal objetivo es disminuir los volúmenes que serán puesto en eliminación, mediante la recuperación de materiales o sustancias que puedan ser valorizadas, además de reducir o neutralizar su peligrosidad.

El sistema de tratamiento cuenta con dos importantes instalaciones, como son:

- Instalación de pretratamiento.
- Instalación de compostaje.

4.6.1- Instalación de pretratamiento

La instalación de pretratamiento es donde se modifican las propiedades de los RSU, son también llamadas instalaciones de recuperación de materiales, con los cuales permiten la valorización de los residuos.

Las operaciones se pueden resumir en:

1. Separación por tamaño
2. Reducción de tamaño

3. Separación por densidad
4. Separación magnética y por campo eléctrico
5. Separadores ópticos
6. Manipulación, transporte y almacenamiento

4.6.1.1- Separación por tamaño

Se realiza en seco o húmedo, siendo más habitual la vía seca. Se emplea antes y después de la trituración con el objetivo de separar la mezcla de RSU o varias porciones. Las cribas más empleadas son:

- **Criba trómel**

Su objetivo principal es proteger las trituradoras, así como la separación del papel y cartón para su recuperación. En la figura 16 se observa un esquema de la criba trómel.

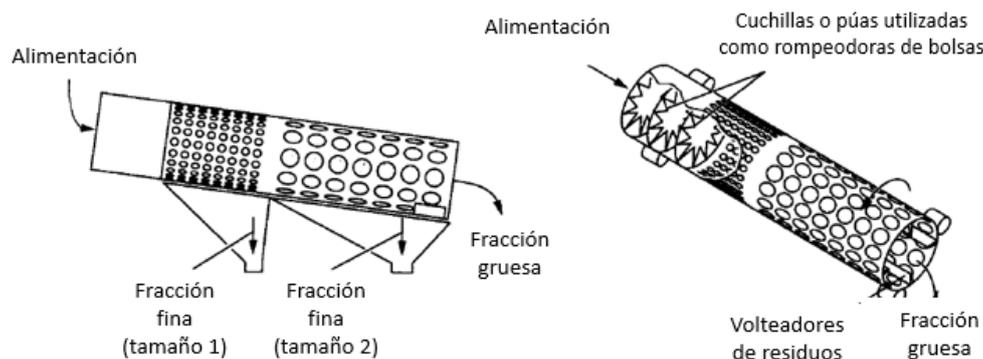


Figura 16: Criba trómel

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1996)



Figura 17: Esquema de tamizado con trómel.

- **Criba vibratoria**

Su objetivo es la de separar materiales secos como metales o vidrios. Además, se emplea para retirar restos de hormigón que procedan de residuos de la construcción.

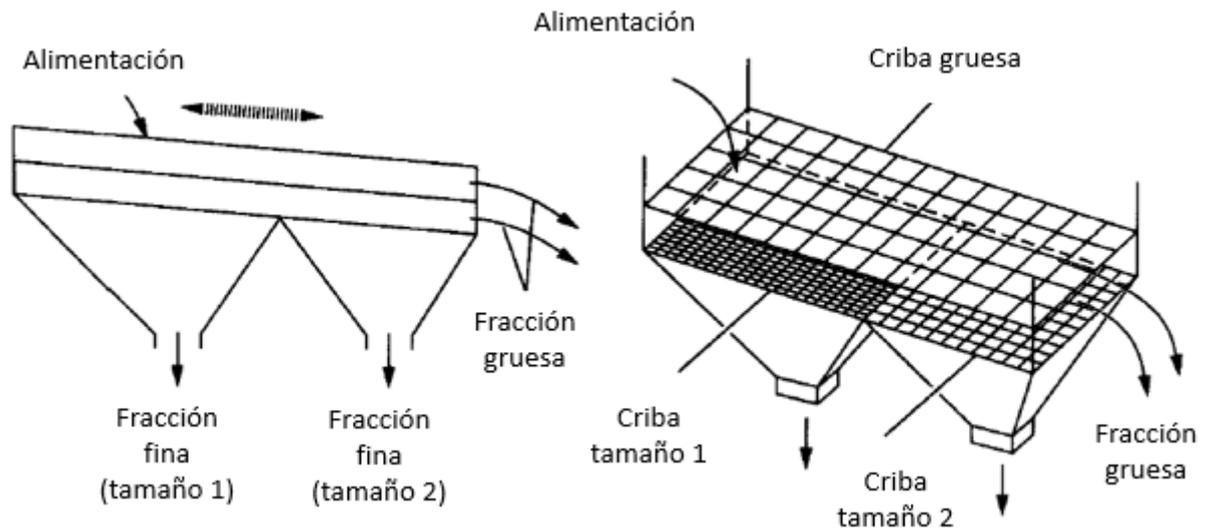


Figura 18: Esquema de criba vibratoria.

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vlgil, 1996).

- **Criba de disco**

Se utiliza como alternativa a la criba vibratoria.

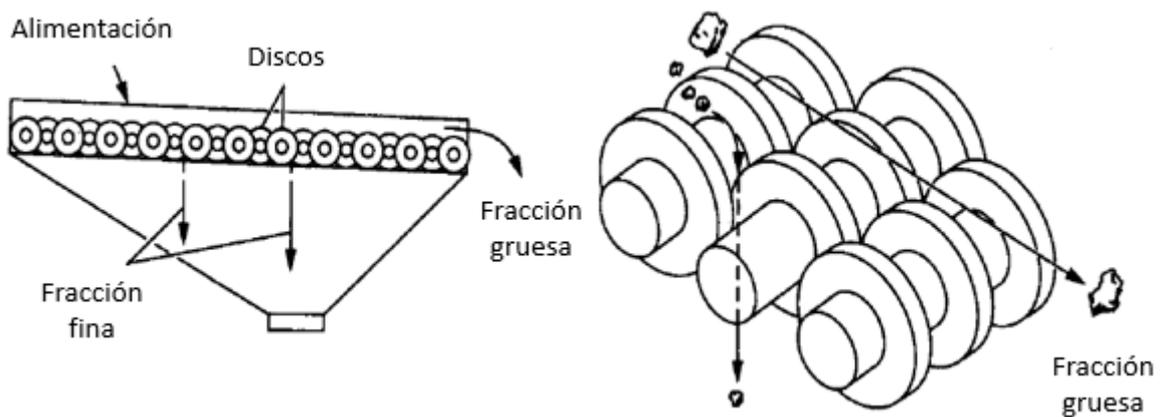


Figura 19: Esquema de criba discos.

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vlgil, 1996).

4.6.1.2- Reducción de tamaño

Tiene por objetivo procesar los materiales para la recuperación de materiales y utilización directa en la elaboración de compost. Los equipos que se utilizan para la reducción son:

- **Molino de martillos**

Su función es generar un impacto entre los martillos junto a la barra rompedora, la cual es ajustable. Según la acción del martillo, el residuo que queda en el tambor es sometido a los golpes de este, con una velocidad de rotación que oscila entre 700-1200 rpm, hasta que pasa por la parrilla del tamiz seleccionado.

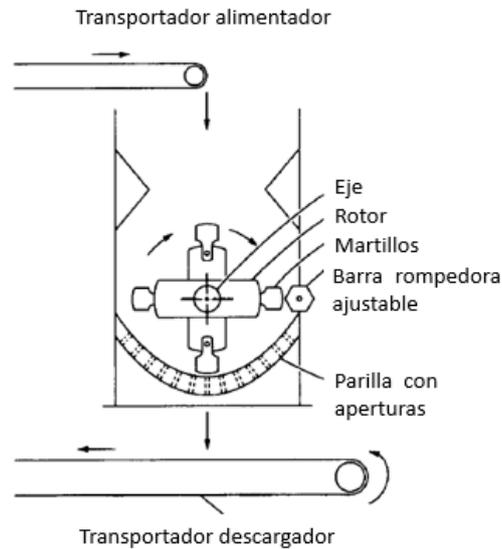


Figura 20: Esquema molino de martillos.

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vlgil, 1996).

- **Trituradoras cortantes**

En este los residuos pasan por los cortadores (velocidad de 60-120 rpm) y caen sobre el transportador.

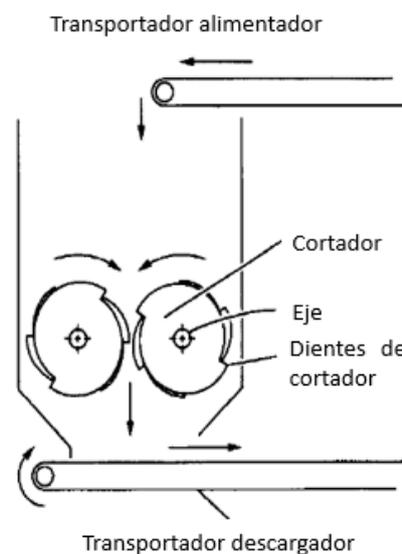


Figura 21: Esquema de trituradoras cortantes.

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vlgil, 1996)

4.6.1.3- Separación por densidad

En este la separación RSU se realiza según la densidad de sus componentes, como pueden ser:

- **Fracción ligera:** plástico, papel y orgánicos.
- **Fracción pesada:** materiales inorgánicos y metales.

Los equipos empleados son:

1. Clasificadores neumáticos
2. Stoner
3. Flotación

4.6.1.4- Separación magnética y por campo eléctrico

Se utiliza para separar los residuos que poseen propiedades férricas, como los metales féreos y no féreos, además de separar por electrostática los plásticos de los papeles por diferencia de carga superficial. Entre los equipos que se emplean están:

- Separación magnética
- Separación electrostática
- Separación por corriente de Foucault

4.6.1.5- Separadores ópticos

Esta separación se realiza clasificando visualmente los residuos, haciendo una selección a bolsa abierta donde se separa el papel, cartón y vidrio.

4.6.1.6- Manipulación, transporte y almacenamiento

El triaje manual representa la manipulación de los RSU, el transporte es realizado por las cintas transportadoras y, el almacenamiento se realiza en áreas cerradas o abiertas. Existen diferentes tipos de almacenamientos para los subproductos recuperados, la línea de rechazos y el producto generado por el compostaje. Entre los cuales se emplean:

- Almacén completamente cerrado.
- Estructuras sin paredes, pero cubiertas de aluzinc para proteger de las lluvias.
- Contenedores de transporte.
- Contenedores especiales para almacenar el combustible derivado de los residuos.

El almacenamiento temporal del compost debe poseer ciertas condiciones que permita disminuir los olores producidos por el mismo, ya que en este proceso se libera CO_2 y H_2O .

4.6.2- El Compostaje

El compostaje es un proceso que se basa en la oxidación aerobia de la materia orgánica. Este proceso transforma la materia orgánica en abono para los cultivos y ha sido utilizada tradicionalmente por los agricultores. La técnica de compostaje se clasifica como biológica y oxidativa, ya que está basada en la oxidación de la materia orgánica debido a la acción de microorganismos aerobios. Para que este proceso se produzca, deben de existir una serie de condiciones óptimas durante el mismo.

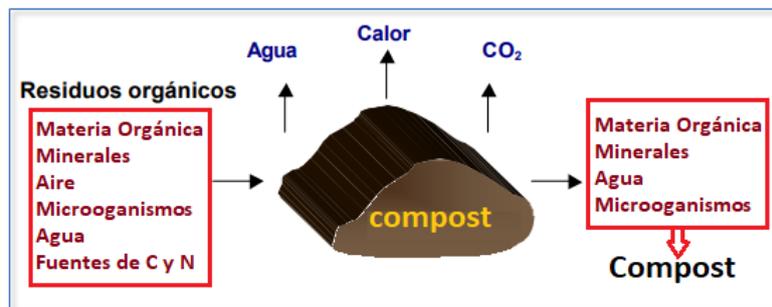
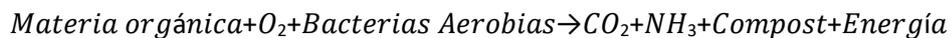


Figura 22: Proceso de compostaje.

Las ecuaciones bioquímicas correspondientes al proceso de compostaje son:



El proceso de compostaje consigue higienizar los residuos, mediante la destrucción de los microorganismos patógenos de la fracción biodegradable. También se consigue reducir los olores de los residuos, así como reducir el volumen de los mismos y obtener un producto estabilizado listo para su uso agrícola.

4.6.2.1- Factores que afectan al proceso de compostaje

El proceso de compostaje requiere de unas condiciones óptimas para que se realice de manera adecuada. Entre los factores que actúan se encuentran:

- **Temperatura**

Con la temperatura se mide la actividad de los microorganismos e indica el proceso de desarrollo del compostaje. Según va variando la temperatura se observan diferentes fases del proceso de compostaje.

- **Relación C/N**

Constituye la relación carbono partido nitrógeno existente en la mezcla de compost verde. Una buena proporción de ambos favorecen el crecimiento y reproducción de los microorganismos. Se considera que una buena relación de la mezcla tendrá una relación C/N aproximada de 20 - 25.

Marca en cierta medida la velocidad del proceso. Para relaciones superiores a 35 la actividad biológica desciende y el proceso se alarga. Para relaciones muy bajas se perderá en exceso nitrógeno en forma de amoníaco (Esteve Garcia, 2018).

- **Humedad**

La presencia de agua es necesaria para la actividad biológica de los microorganismos. Una humedad óptima de la mezcla se sitúa, según diferentes autores, entre 40-60% o entre el 50-70%, según otros. En cualquier caso, cantidades inferiores al 40% o superiores al 70% reducen considerablemente la velocidad del proceso (Esteve Garcia, 2018).

- **Aireación**

Se necesitan unos niveles de oxígeno entre el 5-15%, ya que niveles por debajo generarían condiciones anaerobias, que no permitirían el desarrollo de los microorganismos aerobios. Un exceso de aireación producirá una bajada de la temperatura de la mezcla, una desecación de la misma y pérdidas de calor que ralentizarán el proceso.

- **pH**

El pH varía según diferentes fases del proceso de compostaje. Los valores que presenta en cada una de ellas son:

1. Fase mesofílica inicial, valores entre 5 y 8.
2. Alcalinización del medio, con valores entre 6 y 7,5.
3. Neutralidad, en la última fase, la mezcla oscila entre un valor de 7 y 8.

Mediante el seguimiento del pH, se puede tener una idea, de la aireación de la mezcla.

- **Tamaño de partícula**

Para evitar la compactación de los residuos durante el proceso de compostaje, es importante que el tamaño de la partícula no sea muy grande. Para alcanzar los tamaños de partícula deseados, normalmente se utilizan trituradoras y se mezclan con elementos auxiliares (Esteve Garcia, 2018).

4.6.2.2- Sistema de compostaje

- **Compostaje tradicional en hileras con volteo manual**

Es un sistema que requiere de gran extensión de terreno, se procesa a cielo abierto. Este método consiste en hileras de residuos orgánicos, con altura entre 1-4 metros y ancho entre 3-5 metros, es un método sencillo, considerado como el más lento proceso de compostaje, y su ventaja radica en que la implementación es económica. El tiempo óptimo de compostar son 3 meses.

El inconveniente de este método es mantener los niveles de oxígeno adecuados, ya que estos varían con la frecuencia de volteos. Los efectos de los volteos en el nivel de oxígeno se muestran en la Figura 23:

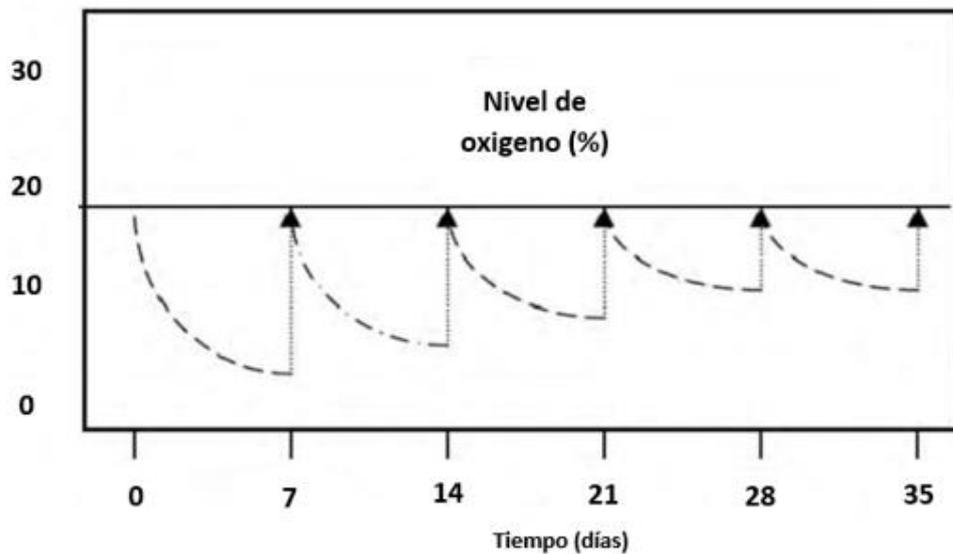


Figura 23: Variación del nivel de oxígeno con el tiempo.

Fuente: Gasser, 1985.

- Pila estática con aireación forzada

Consiste en una hilera que es aireada a presión, en este método no existen volteos, sino que se le inyecta oxígeno, se considera que el flujo de $0,2\text{m}^3/\text{t}/\text{min}$ es suficiente para alcanzar los niveles óptimos.

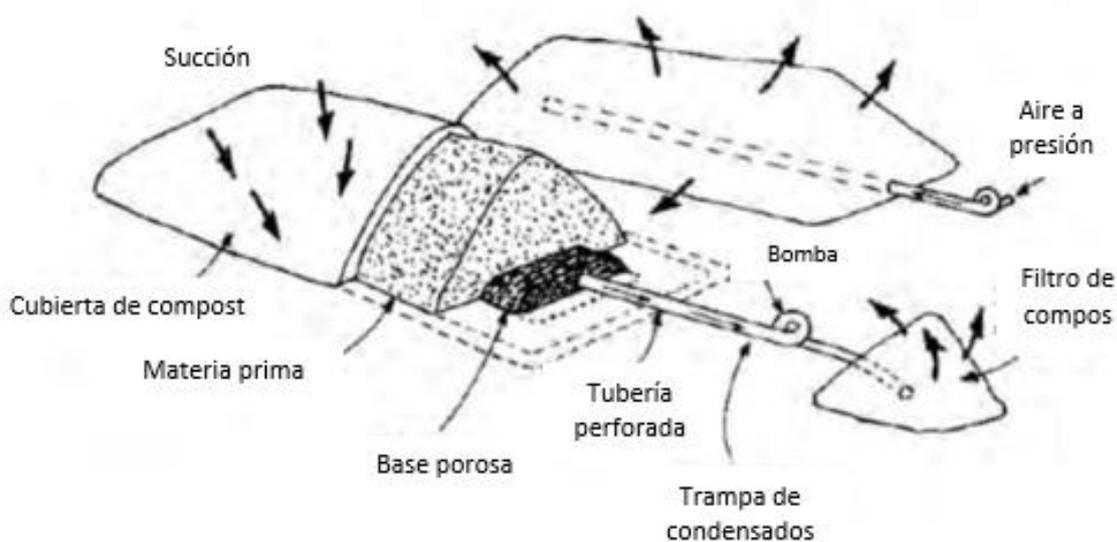


Figura 24: Esquema de funcionamiento de pila estática aireada.

Fuente: Rynk et al., 1992.

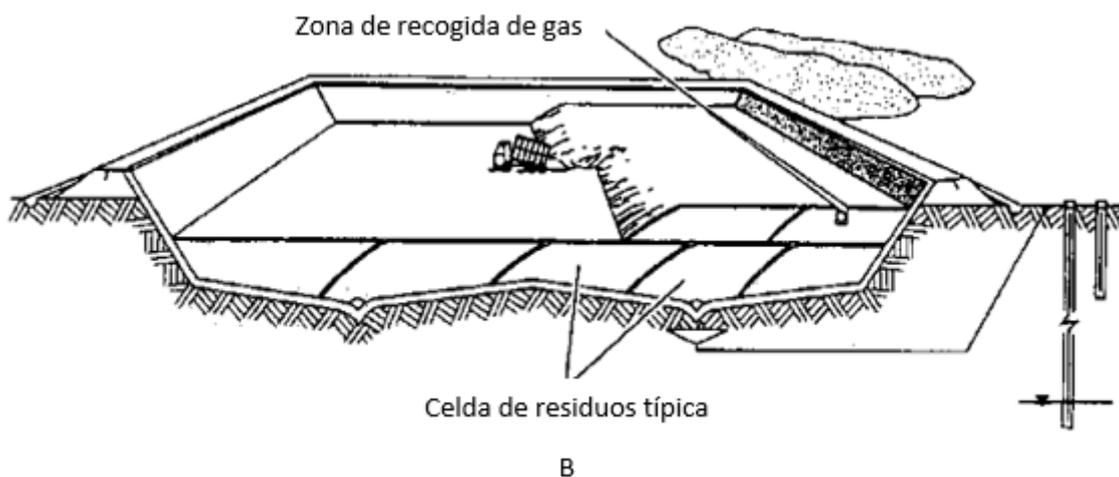
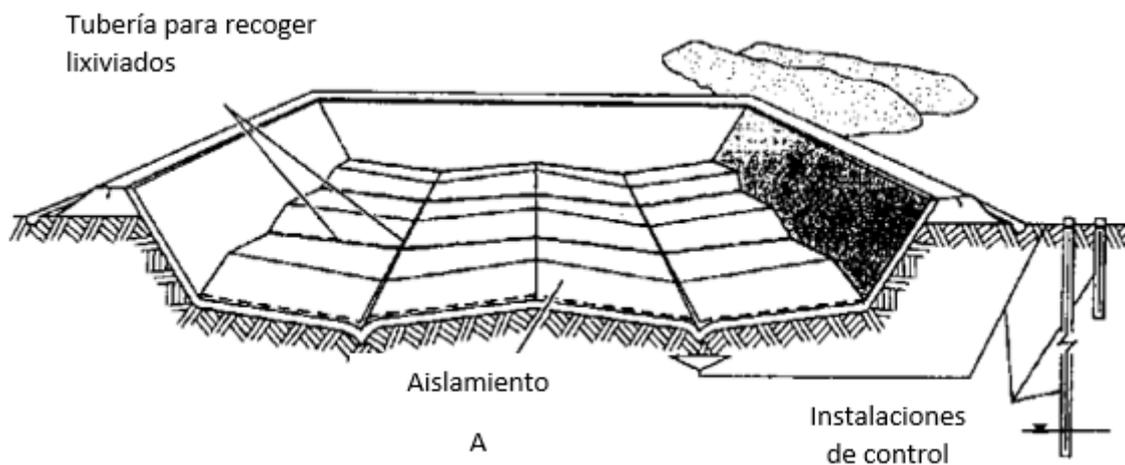
4.7.- Eliminación de residuos sólidos mediante depósito en vertedero

4.7.1- Vertedero o depósito controlado

El vertedero es un almacenamiento definitivo en superficie o subterráneo, para los residuos sólidos urbanos que deben ser controlados y vigilados desde su construcción hasta su clausura, siendo necesario realizar un mantenimiento post-clausura. Este control hace referencia a operaciones adecuadas en el diseño, realizando una impermeabilización correcta del suelo, sin causar daños ambientales o poner en riesgo la salud pública (Esteve Garcia, 2018).

Se pueden distinguir tres fases durante la operación de un vertedero:

- A. Excavación, impermeabilización y recubrimiento del vaso
- B. Llenado. Se realiza un llenado de forma progresiva mediante la formación de celdas
- C. Sellado. Una vez se alcanza el máximo de capacidad se clausura el vertedero y se coloca la cobertura final



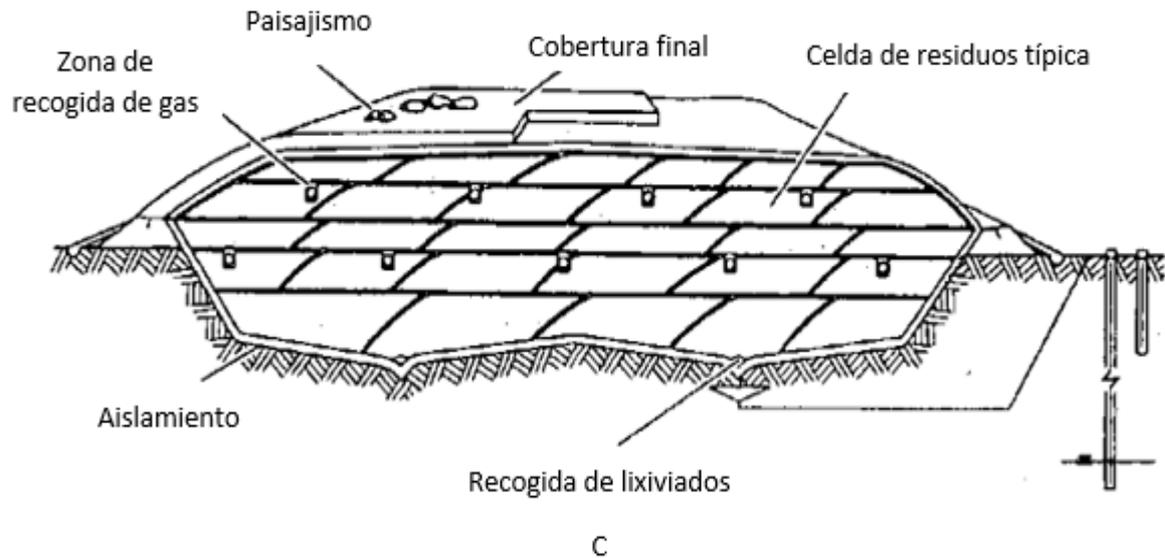


Figura 25:Fases de operación del vertedero

Fuente: (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1996).

4.7.2- Gestión de lixiviados

Los lixiviados son el resultado de la descomposición de los residuos orgánicos con un alto contenido de humedad o por someterse a percolación de agua debido a las precipitaciones. El balance hídrico es el método más fiable para la estimación de la producción de lixiviados, la cantidad potencial del lixiviado se calcula como el agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del vertedero.

En el balance hídrico se toman en consideración: la precipitación de la zona, la infiltración y evaporación en la superficie del vertedero, el escurrimiento superficial de agua, el consumo de agua por la descomposición de los residuos, el agua que contienen los residuos (el contenido de humedad), y la retención temporal de líquidos en los residuos.

Elementos de captación de lixiviados:

- Capa drenante
- Materiales geosintéticos de drenaje
- Tubería de drenaje ranuradas
- Protección del drenaje
- Capas de drenaje operacionales
- Balsa de drenaje de lixiviados

5. APLICACIÓN PRÁCTICA. DESCRIPCIÓN ACTUAL DEL CASO EN ESTUDIO

5.1.- Descripción del Municipio La Concepción La Vega



Figura 26: Ubicación del municipio La Concepción de La Vega

EL municipio de La Concepción La Vega es uno de los 4 municipios, que conforman la Provincia de La Vega, siendo La Concepción el municipio cabecero y considerada la sexta provincia de mayor tamaño de toda la República Dominicana. La provincia presenta unas condiciones climáticas muy diversas, ya que, está localizada en la cordillera central, ocupando una gran parte de la región montañosa y poseedora de las zonas más altas del País.

Las zonas montañosas están comprendidas por los municipios de Constanza y Jarabacoa, mientras que el valle lo constituye La Concepción La Vega y Jima Abajo. El municipio en estudio se encuentra ubicado a 100 msnm, con unas temperaturas Máximas y mínimas, de 33 y 19 C⁰ promedio diario.

5.1.1- Demografía

El municipio de La Vega cuenta con una superficie de 639. 85 Km² y una densidad poblacional de 386 hab/km², según IX Censo Nacional de Población y Vivienda, para el año 2010 la población del municipio era 248,089 habitantes, los cuales se distribuían entre el municipio y sus distritos municipales. De acuerdo a la (ONE, 2010) *“la población dominicana ha disminuido su ritmo de crecimiento de manera sostenida en las últimas décadas. En la actualidad, la tasa anual es de 1,21%.”*

En la actualidad se estima que el municipio de La Vega cuenta con una población de 269.451 habitantes, lo cual equivale a una densidad poblacional de 421,12 hab/km², con estos valores se estimará el diseño del sistema de tratamiento en el municipio.

5.1.2- Precipitación

La ciudad de La Vega es una de las ciudades donde más se registran precipitaciones en todo el año en Rep. Dom., siendo los meses de mayo y octubre donde se puntualizan mayores intensidades de lluvia.

Tabla 17: Registros mensuales de precipitación (mm) - La Vega.

AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1998	122,7	19,1	80,8	110,1	187,0	70,2	94,9	66,4	195,0	96,1	342,3	165,0	1549,6
1999	118,6	129,7	215,4	30,8	238,7	246,0	142,6	51,1	153,4	113,5	295,6	82,5	1817,9
2000	117,0	36,5	88,0	128,5	102,6	96,4	31,5	178,9	184,3	228,0	99,2	77,7	1368,6
2001	60,2	100,0	49,8	93,9	367,9	84,8	85,4	66,1	58,0	91,3	66,9	397,7	1522,0
2002	58,6	70,3	26,8	221,5	61,1	105,4	65,5	65,4	200,5	128,5	85,5	111,6	1200,7
2003	135,5	57,4	67,0	431,0	127,5	106,6	292,5	248,0	81,4	367,0	297,2	95,5	2306,6
2004	99,4	-	158,6	177,6	372,4	144,8	-	42,3	323,9	201,8	137,8	-	1658,6
2005	-	2,2	14,0	224,0	279,5	160,0	263,9	87,5	411,5	107,3	133,8	190,6	1874,3
2006	176,8	43,2	119,7	209,7	212,2	-	-	-	-	-	-	-	761,6
2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	501,4	449,1	-	533,1	471,2	562,9	-	-	-	-	-	-	2517,7
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	124,9	-	-	-	124,9
2011	85,3	33,5	15,3	88,3	270,9	131,5	-	149,3	63,3	39,3	-	97,3	974,0
2012	119,9	50,4	339,6	464,6	230,4	6,3	88,0	210,3	98,4	136,7	189,7	59,1	1993,4
2013	74,6	27,0	64,4	61,1	366,7	175,2	189,7	100,1	166,3	160,3	49,7	168,9	1604,0
2014	34,6	97,3	61,5	167,0	373,1	17,0	30,8	166,0	137,9	168,7	152,8	43,8	1450,5
2015	107,0	124,2	100,8	40,1	34,4	105,2	32,4	107,6	89,6	113,1	104,8	157,0	1116,2
2016	30,1	73,8	32,4	311,4	83,5	106,2	43,7	176,3	53,1	195,8	532,5	141,1	1779,9
2017	104,8	39,9	286,2	200,2	163,2	104,9	120,2	105,0	263,0	-	-	-	1387,4

Fuente: Oficina Nacional de Meteorología. Departamento de Climatología - División de Climatología Aplicada.

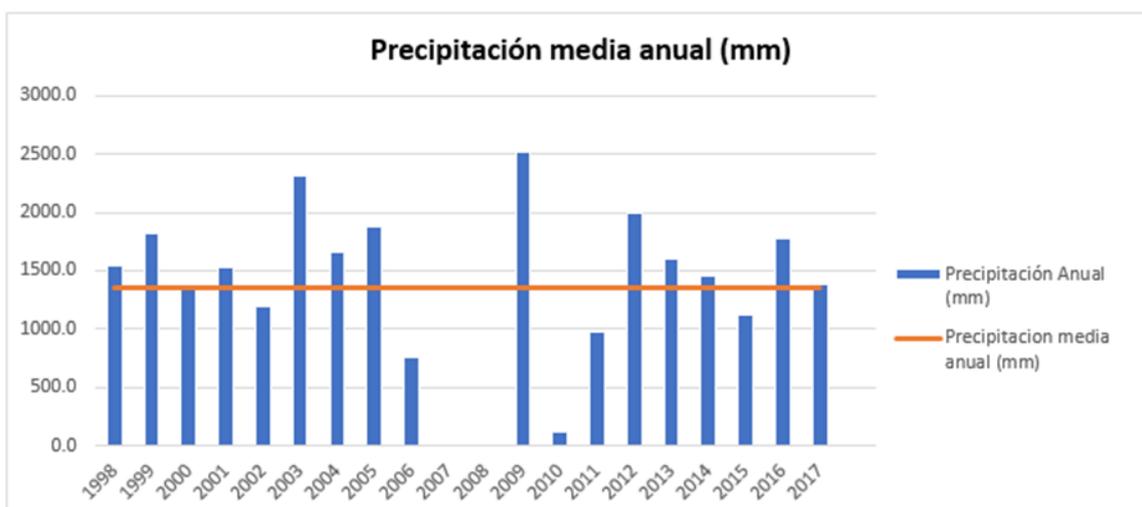


Figura 27: Precipitación media anual en (mm)

La precipitación media anual de la ciudad de La Vega según los registros de lluvia ofrecidos por la Oficina Nacional de Meteorología en la República Dominicana, es de 1350,4 mm.

5.2.- Metodología actual de la gestión de los residuos sólidos en el municipio

El servicio de la gestión de los residuos sólidos en el municipio de La Vega es responsabilidad del ayuntamiento, este servicio se basa en la recolección, transporte y disposición final en un vertedero municipal, conjuntamente incluye el servicio de la limpieza de las zonas públicas. Según el Censo Nacional del 2010 sobre el sistema de eliminación de los residuos, el 96,2% de los hogares de la población tienen el acceso al servicio de recogida de basura del ayuntamiento.

Tabla 18: Principales inconvenientes del sistema de gestión del municipio

Principales inconvenientes del sistema de gestión de residuos sólidos municipal en La Vega	
Contenedores de residuos	La cantidad y distribución de contenedores de residuos son una gran limitante del municipio, debido a que existen muy pocos contenedores destinados para el depósito de los residuos en las calles y áreas públicas, la mayoría están distribuidos en las zonas urbanas. El funcionamiento de estos contenedores es "Todo en uno" debido a que no existe un sistema de recogida selectiva.
Recogida selectiva	El ayuntamiento municipal de La Vega no cuenta con un sistema de recogida selectiva que garantice una caracterización de los RSU generados en el municipio, y que posterior a ésta, facilite el reciclaje, valorización y aprovechamiento energético de los residuos, así como también, el proceso de compostaje de toda la materia orgánica que llegue a planta.
Recolección continua	Uno de los problemas fundamentales en el servicio de la recogida es que no es continuo, sino esporádicamente, hay zonas donde los camiones pasan semanalmente, otras cada 3 días, a veces hay sectores donde duran hasta 10 días sin recolección, lo cual hace que se tenga que almacenar en bolsas plásticas los desechos domiciliarios y comerciales, en sus respectivos hogares o comercios.
Transporte	En la actualidad el ayuntamiento cuenta con 25 camiones destinados a la recolección de los residuos sólidos municipales, de los cuales algunos están en muy malas condiciones, y otro operando por encima de su vida útil, desplegando por su deterioro todos los malos olores que emiten los desechos sólidos que son transportados. Para los desechos de las rutas hospitalarias hay un servicio independiente llamado "Ruta Roja", en el cual se almacenan todos los desechos en fundas plásticas y luego van al vertedero.
Plantas de transferencias y tratamiento	El sistema de gestión actual no cuenta con plantas de transferencias, debido a esto es que las condiciones de los camiones que transportan los residuos sólidos se ven expuestos a largos trayectos y a tramos de vías en muy mal estado, todo esto como consecuencia provoca que se reduzca el rendimiento operacional de los mismos. Además, de que no existen plantas de tratamiento para los residuos sólidos municipales.

Disposición final

Todos los residuos sólidos municipales van al vertedero, sin ningún mecanismo medioambiental de seguridad, debido a que no existe una planta de tratamiento que permita recuperar los subproductos reciclables y reducir los volúmenes que van a ser eliminados, además de que no se fomenta la cultura del reciclaje, reutilización y técnicas para la elaboración de compost, que puede ser sostenible en un municipio que el 60% de su economía depende de la agricultura.

5.2.1- Vertedero municipal de La Vega

El vertedero del municipio de La Vega se encuentra ubicado a 6 Km del casco urbano aproximadamente, en la localidad de Soto, tiene una superficie de 200 tareas de tierra (125.131 m²). El vertedero procesa diariamente 275 toneladas de residuos sólidos, lo que se traduce en un total anual de 100.375 toneladas.

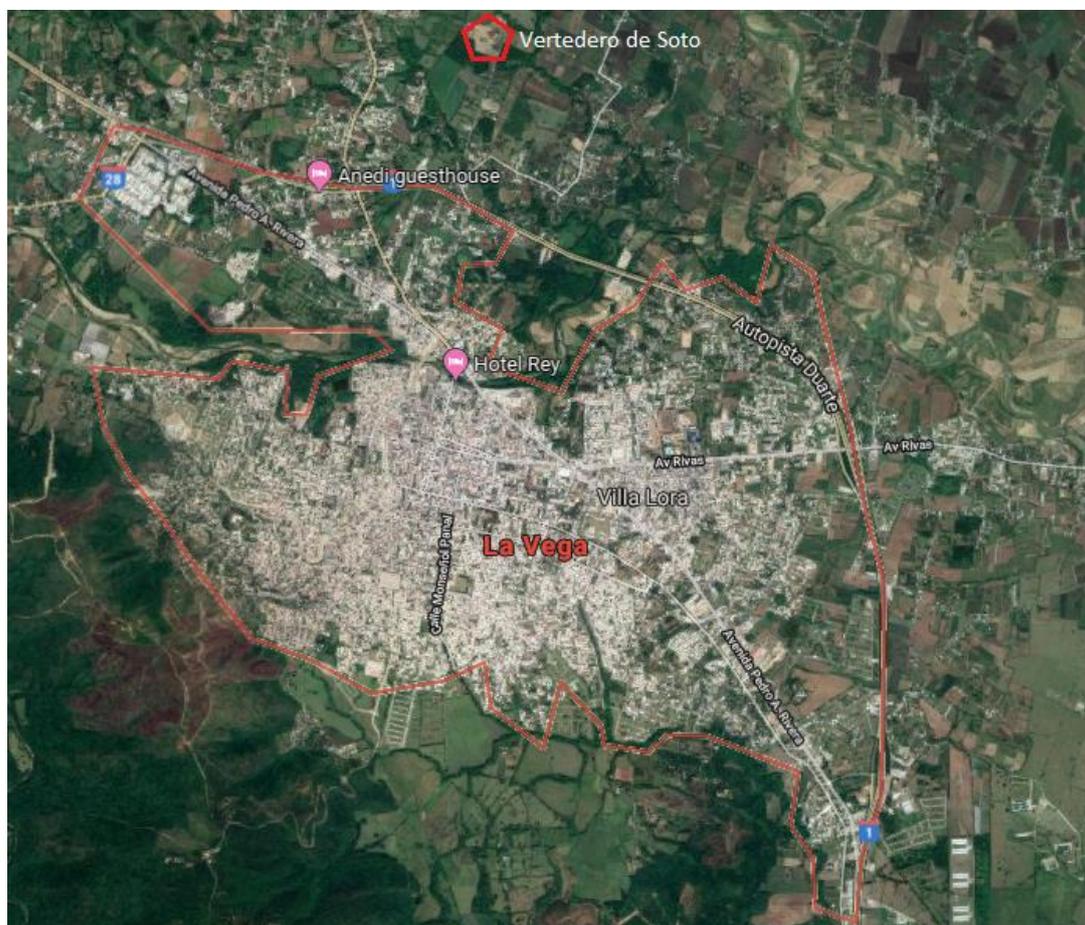


Figura 28: Ubicación geográfica del vertedero de Soto, La Vega.

Como no existe un sistema de clasificación de residuos, ni valorización de los mismos, todos son llevados al vertedero y dispuestos en una fosa, la cual posee una profundidad de 20 metros y un ancho de 60 x 60 metros. En la fosa los residuos sólidos se van colocando por capas de espesor de 0,5 metros, y luego se van recubriendo con un relleno de mina.

Según el encargado de la Dirección Operativa del Ayuntamiento Municipal de La Vega, el terreno donde se encuentra ubicado el vertedero es de topografía accidentada, y el nivel freático se encuentra a una profundidad de 15 metros, por lo que se han visto en la necesidad de aumentar los taludes de la fosa con el mismo material de mina que utilizan para recubrir los desechos sólidos una vez son colocados en la fosa.



Figura 29: Colocación de residuos sólidos urbanos en el vertedero de La Vega

Los residuos hospitalarios van a una fosa individual del resto de residuos sólidos no peligrosos, aunque la técnica de gestionarlo en el vertedero es la misma. Debido a su alta peligrosidad los manejos de estos residuos pueden traer como consecuencias elevados costos sociales, económicos y ambientales.



Figura 30: Tratamiento de residuos peligrosos en celda separada en el vertedero de La Vega.

Fuente: Política para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (RSM), 2014.

5.2.2- Reciclaje en el vertedero

En el sistema de gestión que presenta el ayuntamiento no contempla el reciclaje, ni la reutilización dentro de sus servicios, limitando la sostenibilidad de la gestión de los residuos sólidos urbanos en una ciudad donde el consumo y adquisición de bienes va en aumento, al igual que en todos los municipios del país, la composición de los residuos ha ido cambiando de contenido orgánico altamente biodegradable a componentes reciclables.

De los sectores marginados del municipio, un grupo de personas de muy bajo recursos económicos se ven en la necesidad de vivir del reciclaje en el vertedero, para poder sustentar a sus familias, otros lo hacen para satisfacer sus diferentes vicios, como lo son: las drogas y el alcohol. Cabe destacar que, el Ministerio de Trabajo no reconoce este tipo de actividad como un agente formal, sino que son actividades informales que no están organizadas ni reglamentadas, por lo que, realizar esta práctica de forma manual no está avalada por las leyes de seguridad ni de sanidad, como lo requiere el oficio, lo que podría conllevar a que se vean afectados por manipular desechos que pueden resultar altamente peligrosos.



Figura 31: Reciclaje por Buzos en el vertedero municipal de La Vega.

Las personas que se dedican a esta actividad son llamadas Buzos o de segregadores de residuos, los cuales una vez al finalizar el día, se dirigen a la entrada del vertedero a donde hay establecimientos de compras de los residuos reciclables, el mercado a nivel municipal es muy diverso para los diferentes puestos de compras, hay quienes únicamente compran hierro, cobre, aluminio y calamina, otros son exclusivos en vidrio, cartones, botellas plásticas y bolsas plásticas. Las botellas de vidrio son vendidas a las empresas embotelladoras para su fundición y posteriormente su reutilización.

5.3.- Diseño del modelo de gestión integral

5.3.1- Datos de partida

Para el diseño del modelo de gestión integral en el municipio La Concepción La Vega, se proyectará la producción anual de residuos a un horizonte de 10 años, en el cual se estima que la PPC (producción per cápita) de municipio permanecerá constante en el tiempo, siguiendo los alineamientos medioambientales de fomentar la reutilización, el reciclaje y promover la reducción de RSU mediante talleres y programas ambientales en todos los centros educativos, empresas e instituciones del municipio.

Se ha realizado un Plan Zonal en función de las características, actividades, residencias y extracto social del municipio, que permiten estimar la generación de residuos en cada una de las áreas delimitadas. El objetivo de esta distribución es conocer la composición de los residuos por zona, su generación y los posibles puntos estratégicos de ubicación de contenedores; así como la cantidad requerida a utilizar. En la Figura 32 se muestra la generación de residuos por zona en el municipio.

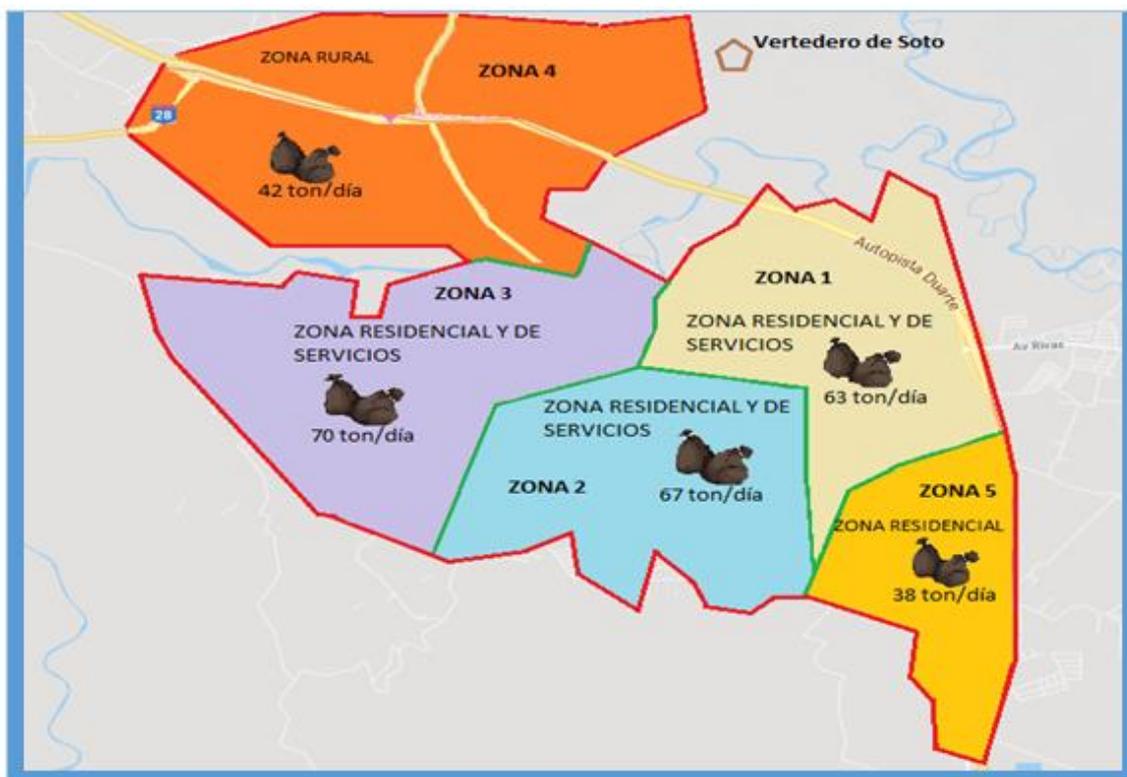


Figura 32: Generación de residuos por zona (t/día) en el municipio La Concepción La Vega

El número de zona no hace referencia ni a la generación de residuos, ni a la distancia con relación al vertedero, más bien corresponde a un instrumento de planeación en materia de gestión de RSU, que permite el ordenamiento del sistema de recogida (rutas y horarios). Cabe destacar que en este trabajo

no se contemplarán como parte del diseño, el sistema de recogida ni la ubicación de los contenedores, ya que estos dos últimos implican un estudio más profundo que involucran otros parámetros.

5.3.2- Caracterización de Residuos Sólidos

La composición de los RSU del municipio La Concepción La Vega quedan recogidos en la Tabla 19, hay que mencionar que la humedad de los componentes de los residuos se tuvo que estimar, ya que solo se conocía el peso de cada uno de ellos para una muestra de 100 kg. Los valores escogidos de humedad son valores típicos aplicable para cualquier ciudad, región o país.

Tabla 19: Composición de los RSU del municipio La Concepción La Vega

Componentes	Peso (kg)	Humedad (%)
Resto de comida	55	70
Papel - Cartón	11	20
Plástico	9,5	5
Vidrio	8,5	0
Textiles	2	10
Cuero	1	10
Residuos de Jardín	4	60
Madera	3	20
Metales	2	0
Otros	4	30
Total	100	

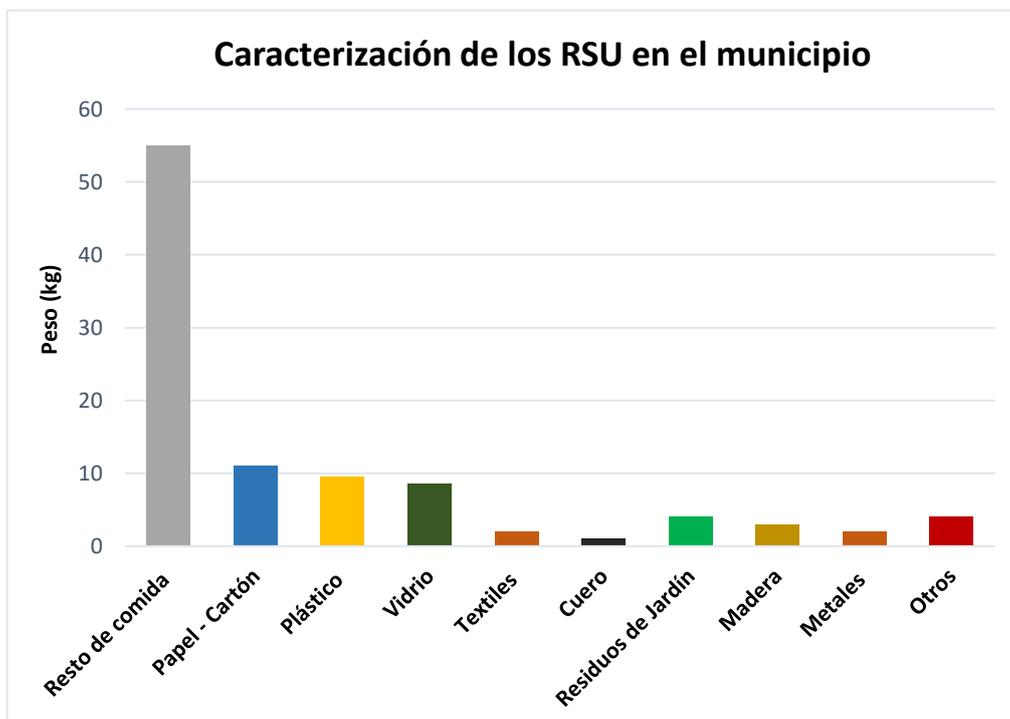


Figura 33: Composición que caracteriza los RSU del municipio

5.3.3- Ubicación de Sitio

El municipio no cuenta con muchos espacios disponibles para la ubicación de un relleno sanitario, ya que las condiciones geotécnicas y ambientales no son propicias para emplazamientos de vertederos, por lo que en este trabajo se diseñará una nueva celda en el vertedero de Soto, que permita mitigar y reducir las contaminaciones que se producen en el actual vertedero, hasta que se realicen los estudios pertinentes de un nuevo sitio, donde se pueda reubicar el nuevo relleno sanitario. La superficie de la nueva propuesta, se muestra en la Figura 34:

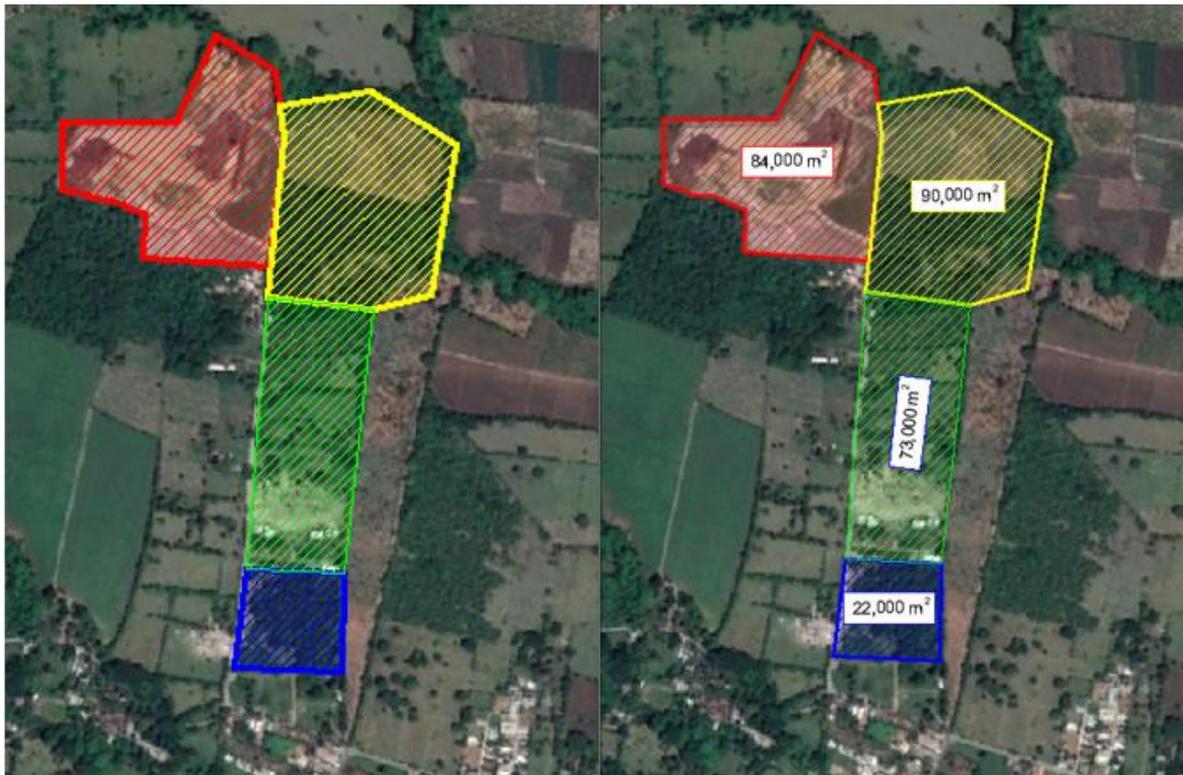


Figura 34: Ubicación del vertedero municipal y la propuesta de la nueva celda.

La superficie en rojo, representa la ubicación actual del vertedero, mientras que la amarilla representa la propuesta de la nueva celda controlada para el almacenamiento de los RSU. La superficie en azul, representa el área donde se propone la instalación de la planta de tratamiento de los RSM, y el área en verde es una superficie libre entre el vertedero y la propuesta de instalación de tratamiento.

5.3.4- Sistema de Valorización, Compost.

Con los datos obtenidos de la composición de los RSU en el municipio, se observa que el 55% corresponde a desechos orgánicos, debido a esta alta concentración se hace viable la implementación de una planta de compostaje que permita la valorización de los componentes orgánicos, el mejoramiento de los suelos para cultivo y la disminución del volumen de residuos a eliminar en vertedero.

La instalación de una planta de compostaje sería la mejor alternativa a desarrollar en el municipio como medida de reducción de los RSU, ya que el 60% de la economía del municipio depende de la agricultura y la producción de abono mediante el compostaje, ayudaría a un mejor desarrollo de los cultivos. El método de compostaje en hileras con volteo manual es un proceso de fácil implementación y no necesita una gran inversión.

5.3.5- Diseño de la planta de tratamiento RSU.

Para el diseño de la planta de tratamiento analizaremos tres escenarios posibles que permitan evaluar la mejor alternativa desde un punto de vista más viable con relación a la realidad del municipio, además estas alternativas deben garantizar un mayor tiempo de explotación del relleno sanitario, debido a que ambientalmente La Vega no cuenta con muchos espacios designados para la instalación de un vertedero. En la Tabla 20 se muestran los siguientes escenarios alternativos.

Tabla 20: Escenarios alternativos para el diseño de la planta de compostaje en el municipio

Escenarios alternativos para el diseño de la planta de compostaje en el municipio	
Escenario 0	Gestión actual de los RSU en el municipio La Concepción de La Vega
Escenario 1	Diseño de un sistema de tratamiento de los RSU que opere 80% manual
Escenario 2	Diseño de un sistema de tratamiento con separación en el origen
Escenario 3	Diseño optimista de un sistema de tratamiento de los RSU que opere 80% automatizado

Cabe destacar que el **Escenario 0**, no se incluye como un escenario alternativo, ya que representa la gestión actual de los RSU en el municipio, en este trabajo será usado como referencia y punto de partida. Para fines de este trabajo se desarrollarán los cálculos del escenario 1, mientras que los cálculos de los escenarios 2 y 3, se presentarán en los **Anexos 1 y 2**.

- **Escenario 1.**

Para el escenario 1, se asume que todos los residuos producidos en el municipio llegan a la planta sin ninguna separación en el origen, la misma deberá gestionar 280 ton/día, de esas el 55% son residuos orgánicos, los cuales serán gestionados en la planta de compostaje, de la planta de tratamiento, sólo pasarán al triaje manual 114,8 ton/día. Además, cabe mencionar que el 80% de la planta operará manualmente, los rendimientos estimados para este tipo de funcionamiento, fueron referenciados de plantas que operan manualmente.

- **Escenario 2.**

En el diseño del escenario 2, se evaluará la alternativa de un sistema de recogida selectiva de RSU en el municipio, el cual nos permitirá establecer diferencias con el escenario 1, y analizar el rendimiento

del triaje manual en el área de pretratamiento, asumiendo una reducción en peso de 40% de la fracción reciclable debido a la selectividad en el origen. Se asume que el 40% que se reduce por la selectividad de los residuos, se empieza a obtener a partir del quinto año desde su implementación.

Se estima que, implementando un sistema selectivo en el municipio, hará que la cinta transportadora de residuos disminuya su velocidad, al transportar menor volumen a disgregar, esto produce un aumento en el rendimiento del triaje manual, procesando un mayor porcentaje en peso en la línea de M.O y una disminución de los volúmenes de rechazos a disponer en vertedero.

- **Escenario 3.**

En el escenario 3, se plantea un diseño de un sistema de tratamiento de alto rendimiento, estimando como referencia los porcentajes alcanzados en la planta de tratamiento de Valencia, estimando que el 80% del funcionamiento de la planta es automatizado. Este escenario es optimista, debido a las condiciones actuales del municipio La Concepción de La Vega, con el cual se busca visualizar una alternativa que optimice la gestión y reduzca los volúmenes de residuos que son dispuestos a eliminación.

La planta de tratamiento RSU cuenta con dos tipos de instalaciones:

- Instalación de pretratamiento
- Instalación de compostaje

5.3.5.1- Diseño del área de pretratamiento

En esta instalación se van a recuperar todos los subproductos aprovechables, los mismos serán clasificados en un triaje manual, los porcentajes de recuperación estarán en función del rendimiento con que se realice la actividad. Los subproductos a recuperar serán:

- Papel – Cartón
- Vidrio
- Plástico
- Metales férreos
- Aluminio

Para determinar la cantidad de operarios a utilizar en la planta, se estableció una producción de 120 ton/día a gestionar por los mismos, se plantean tres horarios laborables: 6 am – 2 pm, 2 pm – 10 pm y 10 pm – 6 am. En cada turno se gestionará 40 toneladas, considerando que el triaje se realizará con dos bandas, se calcula los kg de residuos inorgánicos a gestionar y el número de trabajadores a necesitar:

- **Cálculo de los kg a gestionar**

Producción diaria: 120 t/día

Número de banda de triaje: 2 bandas

Turno: 3 turnos laborables

$$\frac{120 \frac{t}{\text{día}}}{3 \text{ turn/día}} = 40 \text{ t/turn}$$

$$\frac{40 \frac{t}{\text{turn}}}{2 \text{ bandas}} = 20 \text{ t/banda}$$

Se debe realizar un triaje manual de 20 toneladas por turno Y disponer de 60 personas por cada jornada laborables, por cada banda se dispondrá de 25 personas.

$$\frac{20000 \text{ kg}}{\text{turno}} \times \frac{1 \text{ turno}}{8 \text{ horas}} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 41.66 \text{ kg/min}$$

Se estima que por minutos se deben separar 41,66 kg de residuos inorgánicos, lo que equivale a 1.6 kg/min/personas.

$$\frac{41,66 \frac{\text{kg}}{\text{min}}}{25 \text{ personas}} = 1,6 \text{ kg/min/personas}$$

Lo cual se traduce que una persona debe separar **1,6 kg** por minutos.

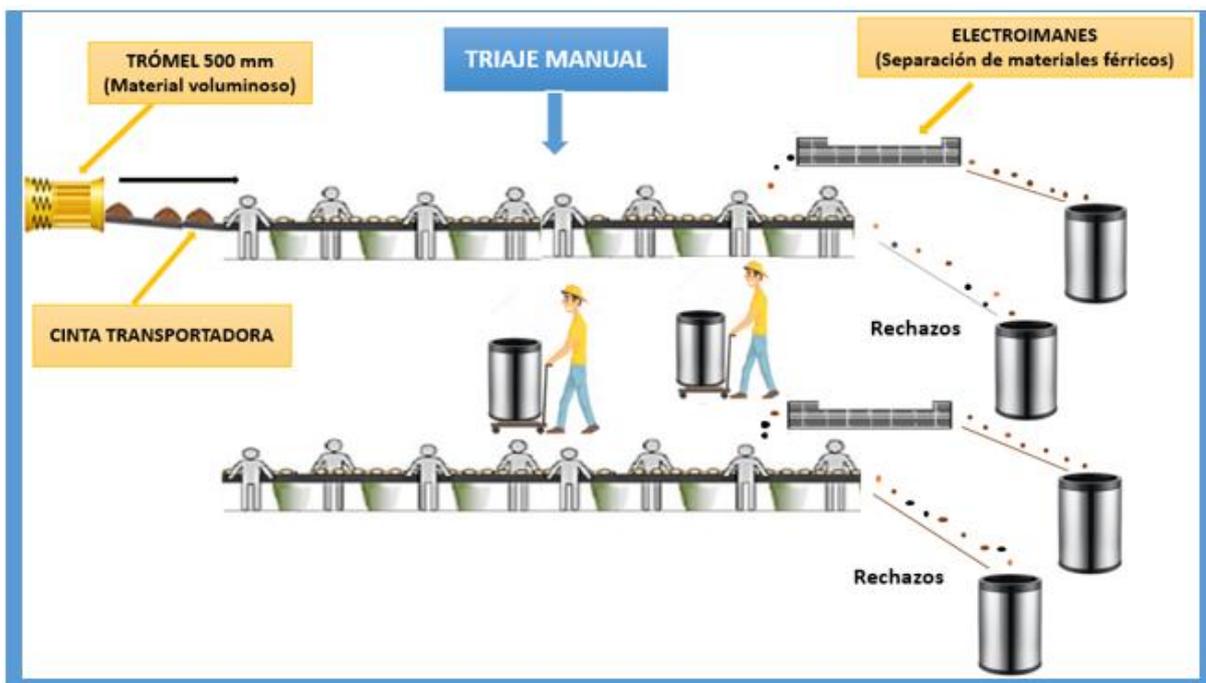


Figura 35: Esquema del área de pretratamiento.

Las bandas por lo general tienen una altura comprendida entre 0,5 – 1 metro y la velocidad de la cinta transportadora va 0,2 a 0,5 m/s, con la finalidad de que se pueda realizar un trabajo más óptimo es la selección. En este trabajo se considera una longitud de banda de 15 metros para que los operarios se puedan movilizar con facilidad, además del trómel, se dispondrá de un electroimán para recuperar los metales férricos, los cuales se colocarán a lo largo de las dos bandas del triaje manual.

Tabla 21: Equipos útiles para la operación manual de una instalación de pretratamiento.

Equipos a utilizar en una instalación de recuperación de materiales de operación manual		
Equipos	Características	Tipos
Prensa compactadora	Capacidad hasta 20 Toneladas.	
Balanza	Capacidad hasta 1,000 Kg.	
Carretilla de plataforma	Ideal de dos (2) ejes con capacidad hasta 300 Kg.	
Carretilla Manual	Capacidad hasta 150 Kg.	
Tanque tambor	Capacidad 200 litros.	

5.3.5.2- Diseño del área de compostaje

Para el diseño del área de compostaje se realizará un balance de masa que permita identificar de forma resumida los siguientes aspectos:

- Los residuos procesados en la línea de tratamiento de materia orgánica por compostaje.
- Los residuos procesados en la línea de rechazos.
- Obtención de los elementos que van a ser recuperados para su posterior reciclaje.
- Determinar la cantidad de residuos obtenidos como rechazo primario en la planta.

Una vez realizado el balance de masa, entonces se procede a dimensionar las áreas de fermentación y maduración, suponiendo que el tipo de proceso de compostaje es el tradicional en hileras y volteos periódicos.

5.3.5.2.1 Balance de masa

Conociendo la composición de los residuos del municipio y la humedad de los mismos, en este caso se asumieron valores típicos de humedad, ya que estos datos no existían en la caracterización. En la Tabla 22 se muestran los cálculos del peso seco y el peso en agua de cada componente de los RSU de entrada a la planta.

Tabla 22: Características de los RSU de entrada a la planta.

Componentes	Humedad (%)	Peso (kg)	Peso seco (kg)	Peso agua (kg)
Resto de comida	70	55	16,50	38,50
Papel - Cartón	20	11	8,80	2,20
Plástico	5	9,5	9,03	0,48
Vidrio	0	8,5	8,50	0,00
Textiles	10	2	1,80	0,20
Cuero	10	1	0,90	0,10
Residuos de Jardín	60	4	1,60	2,40
Madera	20	3	2,40	0,60
Metales	0	2	2,00	0,00
Otros	30	4	2,80	1,20
Total		100	54,33	45,68
Humedad con la cual llegan los RSU a planta = 45,68%				

Por el funcionamiento de otras plantas de tratamiento de RSU, se estima que alrededor de un 2% son residuos voluminosos que no deben incorporarse a la línea de tratamiento, solo el 98% es el que se procesa en planta. Como el escenario que se presenta es el realista, se establecen los siguientes porcentajes entre las dos líneas de tratamiento existente, los cuales están en función del rendimiento que se puede obtener cuando el 80% de los procesos en la planta son manuales, en la Tabla 23 se muestran los porcentajes de residuos por cada línea de tratamiento.

Tabla 23: Porcentaje de residuos por cada línea de tratamiento.

Línea de materia orgánica	Componentes	Línea de rechazos
65%	Resto de comida	35%
20%	Papel-Cartón	80%
5%	Plásticos	95%
5%	Vidrio	95%
5%	Textiles	95%
5%	Cuero	95%
50%	Residuos de jardín	50%
50%	Madera	50%
0	Metales	100%
20%	Otros	80%

Los residuos incluidos en la línea de materia orgánica son los que van a ser procesados para la obtención posterior del compost. Los residuos incluidos en la línea de rechazos van a ser procesados para obtener subproductos que posteriormente se reciclan. El rechazo de ambas líneas debe ser gestionado mediante depósito en vertedero.

- **Residuos procesados en la línea de tratamiento de materia orgánica**

Los residuos que van por la línea de materia orgánica son procesados en función de los porcentajes establecidos en el escenario realista, con los cuales se determinó el peso seco y el peso en agua de las respectivas componentes. En la Tabla 24 se observan los resultados del compost verde.

Tabla 24: Línea de materia orgánica (compost verde).

Porcentaje	Componentes	Peso inicial de RSU que entran en planta (kg)	Peso línea de M.O (kg)	Peso seco (kg)	Peso agua (kg)
65%	Resto de comida	55	35,75	10,73	25,03
20%	Papel-Cartón	11	2,20	1,76	0,44
5%	Plásticos	9,5	0,48	0,45	0,02
5%	Vidrio	8,5	0,43	0,43	0,00
5%	Textiles	2	0,10	0,09	0,01
5%	Cuero	1	0,05	0,05	0,01
50%	Residuos de jardín	4	2,00	0,80	1,20
50%	Madera	3	1,50	1,20	0,30
0%	Metales	2	0,00	0,00	0,00
20%	Otros	4	0,80	0,56	0,24
Totales			43,30	16,05	27,24
Humedad de Línea de M.O = 62,92%					

De manera que por cada 100 kg de RSU que entra a la planta, el 43,30% son procesados en la línea de M.O, de los cuales 16,05% son materia seca y 27,24% son peso en agua. El valor de la humedad de dicha línea se obtuvo al dividir los totales entre el peso en agua y el peso en la línea de M.O, el cual representa el porcentaje de humedad correspondiente al compost verde.

- **Residuos procesados en la línea de rechazos.**

En la línea de rechazo son procesados todos los residuos de composición inorgánica, y de estos son recuperados aquellos subproductos que se puedan insertar o incorporar nuevamente al ciclo de utilidad, para la creación de nuevos productos. Según las informaciones de las plantas de tratamiento de RSU en el país, se debe considerar:

Los siguientes rendimientos en la línea de rechazos:

- Un 30% del papel-cartón
- Un 40% de los plásticos
- Un 35% del vidrio
- Un 25% de los metales

Por tanto, se calculó el peso de cada componente en la línea de rechazo, como se muestra en la Tabla 25:

Tabla 25: Línea de rechazo

Porcentaje	Componentes	Peso inicial de RSU que entran en planta (kg)	Peso de línea de rechazo (kg)	Peso seco (kg)	Peso agua (kg)
35%	Resto de comida	55	19,25	5,775	13,475
80%	Papel-Cartón	11	8,80	7,04	1,760
95%	Plásticos	9,5	9,03	8,57	0,451
95%	Vidrio	8,5	8,08	8,08	0,000
95%	Textiles	2	1,90	1,710	0,190
95%	Cuero	1	0,95	0,86	0,095
50%	Residuos de jardín	4	2,00	0,80	1,200
50%	Madera	3	1,50	1,20	0,300
100%	Metales	2	2,00	2,00	0,000
80%	Otros	4	1,20	0,070	0,030
Totales			54,70	36,87	17,83
Humedad Línea de Rechazo = 32,60%					

De manera que por cada 100 kg de RSU que entra a la planta, el 54,70 kg son procesados en la línea de rechazo, de los cuales 38,87 kg son materia seca y 17,83 kg son peso de agua. El valor de la humedad de dicha línea se obtuvo al dividir los totales entre el peso en agua y el peso en la línea de rechazo.

- **Elemento que van a ser recuperados para su posterior reciclaje**

Para conocer el porcentaje en peso de los elementos que se van a recuperar para su posterior reciclaje, se multiplica el porcentaje de recuperación por sus respectivos pesos en la línea de rechazo, en la Tabla 26 se presenta la fracción recuperable de la línea de rechazo.

Tabla 26: Elementos recuperados

% Recuperación	Componentes	Peso (kg)	% en peso
35%	del papel-cartón	8,80	3,08
40%	de los plásticos	9,03	3,61
35%	del vidrio	8,08	2,83
25%	de los metales	2,00	0,50
Total			10,02%

- **Cantidad de residuos obtenidos para rechazo primario**

El rechazo primario se obtiene de la resta entre el peso total de la línea de rechazo y el total de los subproductos recuperados.

$$\text{Rechazo primario} = 54,70 - 10,02 = \mathbf{44,68\%}$$

En la siguiente Tabla 27, se presenta un resumen por cada 100 kg de RSU que entra a planta.

Tabla 27: Resumen escenario 1.

Por cada 100 kg de RSU que entran a la planta

Material voluminoso	2,00 kg	
Subproductos recuperados	10,02 kg	→ Venderlos
Total, de rechazo primario	44,68 kg	→ Relleno Sanitario
Línea de M.O.	43,30 kg	→ Compost

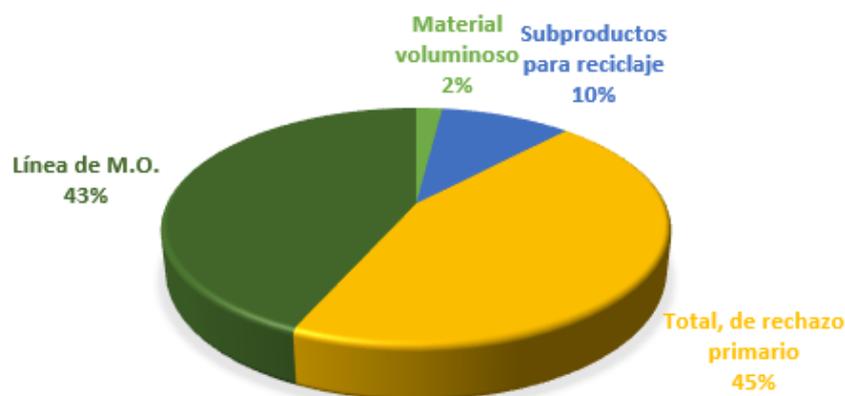


Figura 36: Porcentajes obtenidos en el escenario 1.

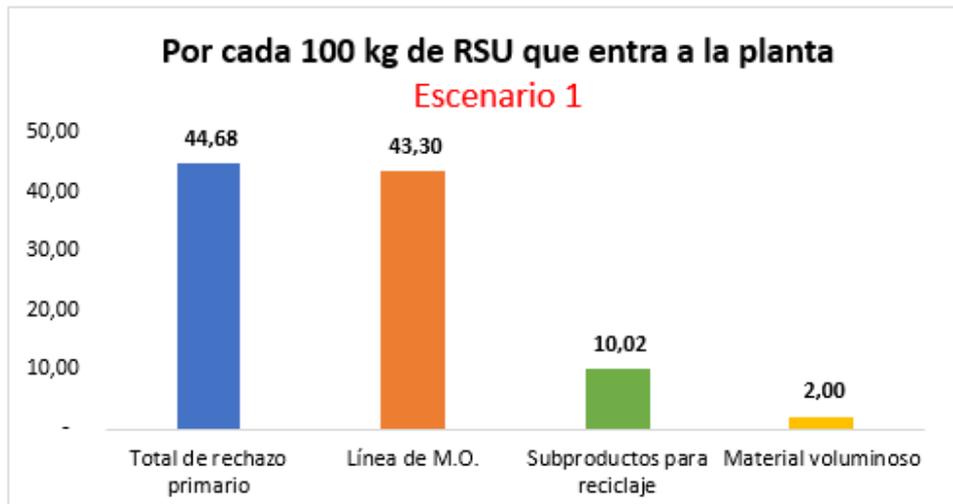


Figura 37: Distribución por cada 100 kg RSU que entra a la planta.

En la distribución de los residuos que llegan a planta se puede observar una ligera diferencia entre la fracción orgánica que será procesada para la elaboración de compost, y el volumen de rechazo primario que será llevado a eliminación en un depósito controlado, de la línea de rechazo solo un 10% de lo que se procesaba, fue recuperado como subproducto.

- **Relación C/N**

Una buena proporción de carbono y nitrógeno, favorece el crecimiento y reproducción de los microorganismos. El compost verde sin mezclar que llega a la planta de compostaje tiene las siguientes características:

Tabla 28: Relación C/N del compost verde a procesar

Componentes	Peso (kg)	Peso seco (kg)	C	N
Resto de comida	35,75	10,73	5,36	0,24
Papel - Cartón	2,20	1,76	0,77	0,022
Textiles	0,10	0,09	0,04	0,01
Cuero	0,05	0,05	0,01	0,00
Residuos de Jardín	2,00	0,80	0,39	0,02
Madera	1,50	1,20	0,60	0,0375
Total	43,3	16,06	7,17	0,33
Relación C/N = 21.84 , con una Humedad = 62,92%				

Con estas características la relación C/N está entre los valores óptimos para realizar el proceso de compostaje, recordar que la relación óptima para compostar va desde 20 a 25. Si la relación C/N hubiese sido inferior 20, entonces iba ser necesario mezclar el compost verde que llega a la planta con un material que le aporte una alta cantidad de carbono, hasta que la mezcla del compost resultante para compostar obtenga un valor óptimo.

5.3.5.2.2 Dimensionamiento de las áreas de Fermentación y Maduración

El proceso de compostaje a utilizar es el método tradicional en hileras con volteos periódicos, este proceso dura tres meses, incluyendo las fases de fermentación y de maduración. Se calculará la superficie necesaria para gestionar los residuos producidos en un mes, nos aseguraremos que la instalación permita gestionar adecuadamente la totalidad de los RSU generados por la población y para eso multiplicaremos por 4 meses, en vez de tres.

El proceso desarrollado en la planta una vez se ha separado la línea de materia orgánica (COMPOST VERDE) de la línea de rechazos es el siguiente:

1. Recepción
 2. Separación
 3. Tratamiento de la fracción orgánica de los residuos por separado
 4. Fermentación
 5. Maduración
 6. Afino
- **Análisis del proceso de fermentación**

El proceso de fermentación se analiza considerando la fracción orgánica biodegradable y la no biodegradable de los RSU que pasaron por la línea de materia orgánica. La FOB (fracción orgánica biodegradable) es la fracción que puede fermentar, la FONB (la fracción orgánica no biodegradable) irá junto al rechazo primario a vertedero, de la tabla 24 (compost verde) se toman los valores correspondientes a la FOB como se muestra en la siguiente Tabla 29:

Tabla 29: Fracción Orgánica Biodegradable de los RSU

Componentes	Peso seco línea M.O (kg)
Comida	10,73
Papel-cartón	1,76
Textiles	0,09
Cuero	0,05
Restos Jardín	0,80
Madera	1,20
TOTAL	14,62

El restante de los componentes corresponde a la FONB, el cual se considerará como parte del rechazo que se genera en el proceso de fermentación, también conocido como “afino”, este afino junto al rechazo primario y el material voluminoso, representan la totalidad de residuos a depositar en vertedero, el cual previo a su eliminación se le evaluará su contenido de humedad, acompañado de un análisis químico. En la Tabla 30 se presenta la fracción orgánica no biodegradable.

Tabla 30: Fracción Orgánica No Biodegradable de los RSU

Componentes	Peso seco Línea de M.O (kg)
Plástico	0,45
Vidrio	0,43
Metales	0,00
Otros	0,56
Total	1,44

Del 43,30% de la materia orgánica que entra al proceso de compostaje, 14,62% de la fracción orgánica biodegradable y 1,44% de la fracción no biodegradable, representan el peso seco de la línea de M.O, el restante 27,24% representa el peso en agua del compost verde. Las características del compost verde fueron determinadas en el balance de masa, dichos valores se muestran en la Tabla 31:

Tabla 31: Características del compost verde

CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST VERDE	
Peso	43,30 %
Humedad	62,92%
Peso seco	16,05 kg
Peso agua	27,24 kg
Peso seco de la FOB	14,62 kg

Durante el proceso de fermentación se producen unas pérdidas de agua por evaporación y pérdidas de materia seca por transformación biológica de los Sólidos Totales de la FOB. Estas pérdidas las podemos estimar del siguiente modo:

1. Pérdidas de agua por evaporación = 40% de vapor de agua en peso
2. Pérdidas por transformación biológica de los ST = 30% de ST Biodegradables (secos)

En la Tabla 32 se muestran las pérdidas del compost fermentado en función de los porcentajes estimados para el peso en agua del compost verde y la FOB.

Tabla 32: Pérdida del compost fermentado

Pérdidas	% pérdida	Peso (kg)	Peso resultante	Unidad
Por evaporación	40	27,24	10,90	kg agua
Por transf. biológica	30	14,62	4,39	kg materia seca
Total			15,29	kg

Luego de calculadas las pérdidas del compost fermentado, entonces se le resta al peso seco y al peso en agua del compost fermentado, estas pérdidas debido a la evaporación y transformación biológica

ST, permiten obtener la caracterización final del compost fermentado, como se presenta en la Tabla 33:

Tabla 33: Característica final del compost fermentado

Característica final de compost fermentado			
Peso seco del compost fermentado	16,05 – 4,39	11,66	kg
Peso agua en compost fermentado	27,24 – 10,90	16,34	kg
Peso total del compost fermentado	16,34 + 11,66	28	kg

Una vez restadas las pérdidas, se obtiene la producción total de compost fermentado, representando el 28% del total de RSU que entra a la planta en el escenario 1.

- **Parámetros de diseño del área de compostaje**

Para el diseño del área de compostaje se hace necesario los datos de la población, generación per cápita y una estimación de la producción mensual de los RSU en el municipio, en la Tabla 34 están los datos de partida para el diseño del área de compostaje.

Tabla 34: Datos del municipio La Concepción La Vega

Datos		
Producción	1,04	Kg/hab/día
Población	269451	Hab
Producción mensual	8407	ton/mes
Producción diaria	280,23	ton/día

Conocida la producción mensual de los RSU y los porcentajes en peso del compost verde de 43.30% y 28% del compost fermentado, se determinará la producción mensual del compost bruto, del compost fermentado y la media entre ambos, la cual se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35: Producción mensual de compost

Producción mensual de compost		
Producción mensual compost bruto	$8407 \cdot 0,4330 = 3640,23$	ton/mes
Producción mensual compost fermentado	$8407 \cdot 0,28 = 2353,96$	ton/mes
Producción mensual compost media	$0,5 \cdot (3640,23 + 2353,96) = 2997,10$	ton/mes

El diseño del área de compostaje se realizará con la producción media mensual, para la cual el área requerida se calculará en función de la longitud, ancho, altura, sección, separación de hileras de compost, además de la densidad del compost. Las dimensiones de las hileras como parámetro de diseño se muestran detalladas en la Figura 38:

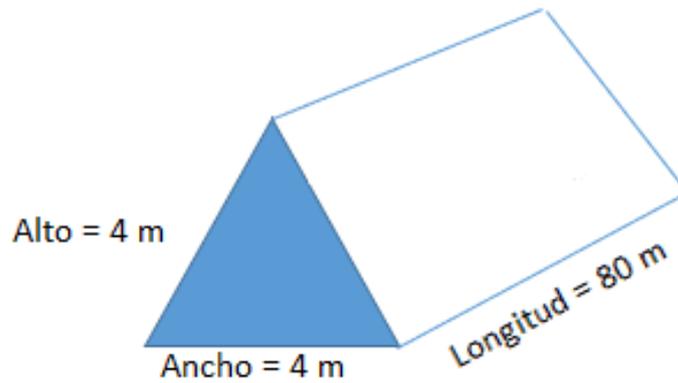


Figura 38: Dimensiones de hileras de compost



Figura 39: Hileras de compost

Fuente: <https://www.hortalizas.com/miscelaneos/evita-usar-composta-mal-hecha/>

Parámetros de diseño:

- Densidad del compost = 0,5 t/m³
- Ancho de las hileras = 4 m
- Alto de las hileras = 4 m
- Sección de las hileras triangular
- Separación entre hileras = 2 m
- Longitud de las hileras = 80 m

A partir del volumen medio de compost producido, vamos a calcular la superficie necesaria, el tiempo de compost establecido fueron 3 meses, más un mes adicional para que actúe como pulmón de carga y descarga del compost, en total sería 4 meses. El dimensionamiento se presenta en la Tabla 36.

Tabla 36: Dimensiones del área de compostaje

Dimensionamiento del área de compostaje		
Volumen de Compost Mensual	$2997,10/0,5 = 5995,49$	m ³ /mes
Vol. Almacenado por Hileras	$0,5*4*4*80 = 640$	m ³ /hileras
Número de hileras al mes	$5995,49/640 = 10$	hileras
Tiempo del compost	$3+1 = 4$	meses
Número total de hileras	$10*4 = 40$	hileras
Superficie de un grupo de hileras	$((11*2)+40)*80 = 4960$	m ²
Superficie total ocupada	$4*4960 = 19840$	m ²

Como el tiempo que se estableció fueron 4 meses, entonces se obtuvo 4 bloques de 10 hileras, el total de hileras serían 40 hileras, en la Figura 40 se muestra un esquema de un bloque de compost.

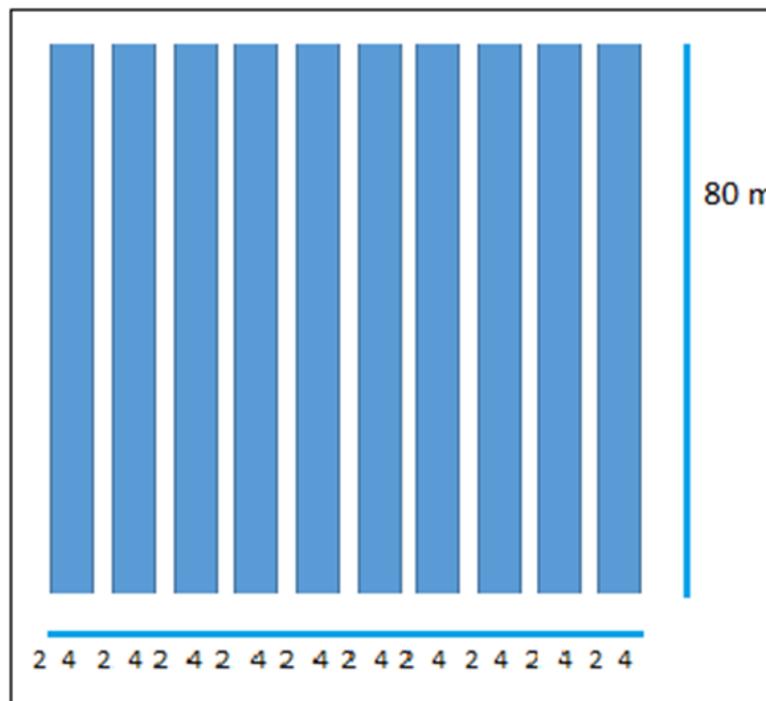


Figura 40: Esquema de un bloque de compost.

- **Calcular la producción diaria de compost.**

Una vez ya efectuada la fase de fermentación, se realiza la etapa de maduración, en esta se producen unas pérdidas 10% de agua por evaporación en el compost fermentado, al igual que en los sólidos totales de la FOB en el compost fermentado, además al finalizar la etapa de maduración, se efectúa el proceso de afino, de donde se eliminan los SNB (sólidos no biodegradables), los cuales van a vertedero.

- **Cálculo del compost maduro y afinado.**

Podemos calcular el compost maduro a partir de los datos del compost fermentado en la (tabla 33).

Característica final de compost fermentado

Peso seco del compost fermentado	11,66	kg
Peso agua en compost fermentado	16,34	kg
Peso seco de la fracción no biodegradable	1.44	kg

Por tanto, podemos realizar los cálculos de la producción de compost maduro y afinado, como la diferencia entre el peso seco del compost fermentado y el peso seco de la FNB, esa diferencia se multiplica por eficiencia que en este caso es 90%. El peso en agua, en el compost maduro y afino, se obtiene de multiplicar el peso en agua del compost fermentado por la eficiencia 90%. En la Tabla 37 se muestran los cálculos del compost maduro y afino.

Tabla 37: Cálculo del compost maduro y afino

Característica final de compost fermentado			
Peso seco del compost maduro tras afino	$(11,66 - 1,44) * 0,9$	9,20	kg
Peso agua en compost maduro y afino	$16,34 * 0,9$	14,71	kg
Peso total del compost maduro afinado	$14,71 + 9,20$	23.91	kg

El valor obtenido como el peso total del compost maduro afinado nos indica que, por cada 100 kg de RSU se obtiene 23,91 kg compost. Por consiguiente, la producción diaria de compost maduro y afinado es igual:

Producción diaria de compost = $(280 \text{ ton RSU/día}) * (0,2391 \text{ ton compost/ton RSU}) = 66,95 \text{ ton compost/día}$.

Considerando la densidad de los RSU de $0,5 \text{ ton/m}^3$, entonces obtendríamos un volumen de:
Producción diaria de compost en volumen = $(66,95 \text{ ton compost/día}) \div (0,5 \text{ ton/m}^3) = \mathbf{133,90 \text{ m}^3/\text{día}}$

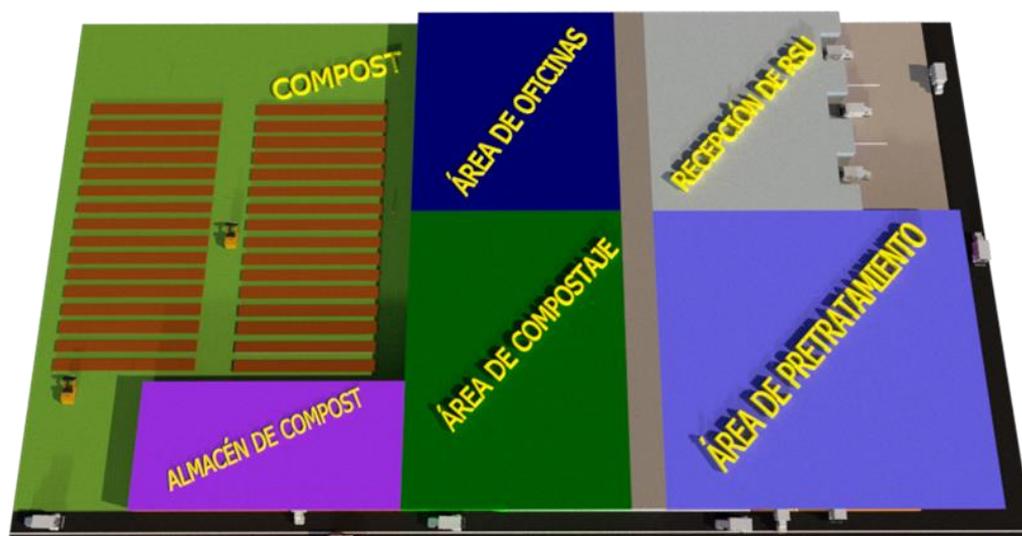


Figura 41: Esquema del sistema de tratamiento de RSU.

5.3.6- Diseño de Relleno Sanitario

Una vez agotada la superficie disponible en el vertedero municipal, se deberán reubicar nuevos espacios para la construcción de nuevas celdas controladas, las cuales cumplan con unos parámetros técnicos de diseño, que garanticen la sostenibilidad ambiental y la reducción de las emisiones de los gases producidos en las mismas, además, mitigar la contaminación a los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, mediante frecuencias de monitoreo durante su explotación y post-clausura. Según la legislación española, esta vigilancia se realiza durante los primeros 30 años de su clausura.

Para el diseño de unas nuevas celdas en el vertedero Soto, se tomarán en consideraciones los tres escenarios planteados en el diseño de la planta de tratamiento, partiendo de cada una de las alternativas se determinará:

- El volumen requerido para gestionar los RSU producidos por 10 años
- La vida útil o capacidad del vertedero para cada escenario
- La producción anual de biogás
- La generación de lixiviados (m³/años)

Como no existe ningún tipo de estudio geotécnico en la zona, y sólo se conoce el tipo de suelo y la profundidad a la que se encuentra el nivel freático, se estimará la conductividad hidráulica de la superficie, en función del tipo de suelo. En la Tabla 38 se presentan los coeficientes de permeabilidad, dependiendo el tipo de suelo.

Tabla 38: Coeficiente de permeabilidad K

Terreno	K (cm/seg)
Grava	$10^{-1} < k < 10^2$
Arena	$10^{-3} < k < 10^{-1}$
Limo y arena arcillosa	$10^{-7} < k < 10^{-3}$
Arcilla	$10^{-11} < k < 10^{-7}$
Rocas	$10^{-10} < k < 10^{-8}$

Fuente: J. Costet, curso práctico de mecánica de suelos

Tabla 39: Características del suelo donde se emplazará la nueva celda del vertedero de Soto.

Tipo de suelo	Arenoso arcilloso
Conductividad Hidráulica (K) (m/s)	1×10^{-5}
Nivel freático (m)	15

Cabe destacar que estos valores deberán ser comprobados en campo, para certificar su veracidad.

5.3.6.1- Volumen requerido para gestionar los RSU producidos por 10 años

El volumen requerido de terreno en las nuevas celdas del vertedero de Soto, se determinará en función de los datos obtenidos por la generación per cápita del municipio y su población, los mismos serán proyectados para una vida útil de 10 años, en la Tabla 40 se muestra la producción anual de RSU a gestionar en el municipio.

Tabla 40: Producción de RSU a gestionar en el municipio

Datos generales de la producción de RSU		
Producción de RSU	1,04	kg/hab/día
Población actual	269451	habitantes
Producción mensual de RSU	85167	ton/mes
Producción Diaria de RSU	280	ton/día
Producción anual	102200	ton/año
Producción vida útil (10 años)	1022000	ton

Suponiendo que los residuos a gestionar en las nuevas celdas del vertedero de Soto son de baja y alta densidad, se calculará el volumen de RSU según su tipo. En la Tabla 41, se observa el porcentaje de material de recubrimiento en función del tipo de residuo.

Tabla 41: Porcentaje de material de recubrimiento en función del tipo de residuo.

Tipo de residuos	Densidad (t/m ³)	% Material de recubrimiento
Baja densidad	0,6	5%
Densidad alta (bala)	0,9	3%
Densidad alta (compactación in situ)	1,2	0%

Los volúmenes ocupados por cada tipo de residuos se calculan a partir del cociente entre la producción vida útil (10 años), y el producto de la densidad por el porcentaje de material de recubrimiento, los cálculos se presentan en la Tabla 42:

Tabla 42: Volumen de residuos según su tipo

Volumen de RSU según su tipo		
Baja densidad	$1022000 / (0,6 * (1 - 0,05))$	1792982,46 m ³
Densidad alta (bala)	$1022000 / (0,9 * (1 - 0,03))$	1170675,83 m ³
Densidad alta (in situ)	$1022000 / (1,2 * (1))$	851666,67 m ³

Luego de haber calculado el volumen de RSU según su tipo, se procederá a calcular el volumen por capas, para la impermeabilización en el fondo del vaso, más el sellado superior. Se establecerán los espesores de cada capa, según las especificaciones de la legislación española en la Tabla 43.

Tabla 43: Características de las celdas y sus espesores por capas

Celda para residuos no peligrosos	
Superficie	80.000 m ²
Profundidad	10 m + 5 m por encima del nivel del terreno en talud = 15 m
Capa de impermeabilización	(1 de arcilla + 0,5 grava) = 1,5 m
Capa de sellado superior	(0,3 de grava + 0,5 de arcilla + 0,5 de grava + 1 tierra vegetal) = 2,3 m
Celda para residuos peligrosos	
Superficie de celda	1024 m ²
Capa de impermeabilización	(5 de arcilla + 0,5 de grava) = 5,5 m
Capa de Sellado superior	(0,5 de arcilla + 0,3 de grava + 1 de tierra vegetal) = 1,8 m

En esta tabla se muestran las características que conforman las celdas de los residuos por su clasificación, dentro de las contemplaciones de este trabajo, sólo se realizará el diseño de la celda de residuos no peligrosos, debido a que no se obtuvo ninguna información de las características de los residuos peligrosos, simplemente su producción por día, para la cual se calculó el volumen necesario y sus respectivos espesores por capas, en función de la normativa española, con una vida útil de 10 años. En la figura 43 se presenta un esquema de la capa de impermeabilización en el fondo del vaso para residuos no peligrosos.



Figura 42: Esquema de impermeabilización en el fondo del vaso para residuos no peligrosos



Figura 43: Esquema de la capa de sellado superior para residuos no peligrosos

Ya conocido los espesores de las diferentes capas y la superficie de la celda para residuos no peligrosos, entonces se procede a calcular los volúmenes por capas, como se muestra en la Tabla 44:

Tabla 44: Volumen total de capas

Volumen de capa de impermeabilización	$80000 \text{ m}^2 * 1,5 \text{ m}$	120000 m^3
Volumen de capa de sellado superior	$80000 \text{ m}^2 * 2,3 \text{ m}$	184000 m^3
Volumen total de capas	$120000 \text{ m}^3 + 184000 \text{ m}^3$	304000 m^3

Este volumen se obtuvo por el producto entre la superficie de la celda y la suma de los espesores en las diferentes capas, y el volumen total de capas es la adición de los volúmenes de ambas capas. El volumen requerido o necesario para gestionar los RSU por el tipo de residuos, se calcula en la Tabla 45:

Tabla 45: Volumen requerido según el tipo de residuo

Volumen total necesario según el tipo de residuo		
Volumen total (baja densidad)	$1792982,46 + 304.000$	$2096982,46 \text{ m}^3$
Volumen total (bala)	$1170675,83 + 304.000$	$1474675,83 \text{ m}^3$
Volumen total (alta densidad)	$851666,67 + 304.000$	$1155666,68 \text{ m}^3$

El volumen requerido o necesario se calcula como la adición entre el volumen de residuo según su tipo y el volumen total de capas.

5.3.6.2- Vida útil de la nueva celda para residuos no peligrosos en el vertedero de Soto

Los cálculos para la obtención de la vida útil de la nueva celda para residuos no peligrosos estarán en función de cada uno de los escenarios planteados, sólo desarrollaran los del Esc. 1, los demás se incluirán en los **Anexos 1 y 2**. En el Esc.1 se establecieron unos porcentajes de recuperación en la línea de rechazos, con los cuales se recuperaron una fracción de los subproductos aprovechables previo a su eliminación y que posteriormente serán valorizados, esto implica que solamente serán dispuestos en la nueva celda del vertedero de Soto, el volumen de rechazo primario (incluye el 2% de material voluminoso), más afino (FONB), los resultados de los residuos a eliminar se presenta en la Tabla 46:

Tabla 46: Resultados de los residuos a eliminar en el Esc. 1.

Material voluminoso	280 * (2/100)	5,6 t/día
Rechazo primario	280 * (44,68/100)	125,104 t/día
Afino (FONB)	280 * (1,44/100)	4,032 t/día
Total de residuos a eliminar	280 * (48,12/100)	134,74 t/día

De la 280 t/día que se gestionan en la planta de tratamiento, solo un 48,12% va a eliminación en la nueva celda, lo que equivale a 134,74 t/día. Por consiguiente, la producción anual que va a vertedero es igual:

$$\text{Producción anual a vertedero} = 134,74 * 365 = \mathbf{49180,10 \text{ t/años}}$$

Luego que se establece la producción anual que se depositará a vertedero, se determina el volumen a ocupar por tipo de residuo. El volumen se determina como, el cociente de la producción anual a vertedero entre el producto de la densidad por el porcentaje de recubrimiento, los cálculos se presentan en la Tabla 47.

Tabla 47: Volumen de la producción anual a vertedero, según la densidad de los residuos

Volumen de RSU según la densidad de los residuos		
Volumen de RSU (baja densidad)	$49180,10 / (0,6 * (1-0,05))$	86280,88 m ³
Volumen de RSU (bala)	$49180,10 / (0,9 * (1-0,03))$	56334,59 m ³
Volumen de RSU (alta densidad)	$49180,10 / (1,2 * (1))$	40983,42 m ³

Determinado el volumen a ocupar por los residuos, se procede a calcular la vida útil de la nueva celda en el vertedero de Soto, en función de los residuos a depositar, primero se determina el volumen útil de la nueva celda, el cual se calcula como la diferencia entre el volumen disponible menos el volumen total de capas, como se indica en la Tabla 48.

Tabla 48: Volumen útil de la nueva celda

Volumen útil de la nueva celda	1200000 - 304000	896000 m³
---------------------------------------	------------------	-----------------------------

La vida útil según la densidad de los residuos, se calcula como el cociente, del volumen útil y el volumen de la producción anual a vertedero, los resultados se presentan en la Tabla 49.

Tabla 49: Vida útil de la nueva celda en el vertedero de Soto, para residuos no peligrosos según su densidad.

Vida útil de la nueva celda, según la densidad de los residuos		
Vida útil (baja densidad)	896000/86280,88	10 años
Vida útil (bala)	896000/56334,59	16 años
Vida útil (alta densidad)	896000/40983,42	22 años

La vida útil de la nueva celda en el vertedero, dependerá de la densidad con la cual se depositen los residuos a eliminar, a mayor compactación, se garantiza mayor tiempo de explotación. La implementación de un sistema de tratamiento de los RSU, con un horizonte de 10 años en su producción, responde a mayor vida útil en un vertedero según la densidad con la cual se eliminen los residuos.

5.3.6.3- Producción anual de biogás en la nueva celda del vertedero de Soto

La generación de lixiviados y biogás, son las dos problemáticas ambientales de mayor importancia en un relleno sanitario, estas formaciones son producto, de unos procesos químicos y biológicos que se producen por la descomposición de los residuos orgánicos y con alto contenido de carbono, los cuales, depositado en vertedero, se ven sometidos a condiciones aerobias y anaerobias. En el presente acápite se determinará la producción de biogás, producto de la descomposición anaeróbica de los residuos.

Es importante establecer la diferencia de humedad con la cual los residuos van a vertedero, esta diferencia será usada posteriormente en el cálculo de la generación de lixiviados, a mayor humedad, mayor será el volumen de lixiviación, primero se calculará, el contenido total en humedad de los residuos que van a vertedero, y para eso se deberá contemplar los residuos que fueron procesados en la línea de rechazos, sin incluir los subproductos recuperados en dicha línea.

Tabla 50: Humedad con la cual llegan los residuos a vertedero en el Esc.1

Componentes	Peso de línea de rechazo (kg)	% Recuperación	Peso (kg)	Peso seco (kg)	Peso agua (kg)
Resto de comida	19,25		19,25	5,78	13,48
Papel-Cartón	8,80	35%	5,72	4,58	1,14
Plásticos	9,03	40%	5,42	5,14	0,27
Vidrio	8,08	35%	5,25	5,25	0,00
Textiles	1,90		1,90	1,71	0,19
Cuero	0,95		0,95	0,86	0,10

Residuos de jardín	2,00		2,00	0,80	1,20
Madera	1,50		1,50	1,20	0,30
Metales	2,00	25%	1,50	1,50	0,00
Otros	1,20		1,20	0,84	0,36
Total	54,70		44,68	27,65	17,03
Humedad de residuos que van a vertedero = 38%					

Con esta humedad de 38% es que llegan los RSU a la nueva celda en el vertedero de Soto, una vez procesados en la planta de tratamiento, a diferencia de los 45,68% con los que llegan a planta, sin ser tratados.

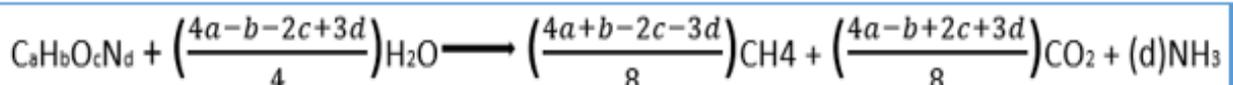
El biogás que se genera con los RSU en condiciones anaeróbicas, posee una composición química, que se caracteriza en un análisis químico elemental, el cual se muestra en la tabla 13, debido a que no se conoce el análisis químico elemental de los residuos generados en el municipio, se estimaran unos porcentajes, en base al análisis químico elemental que se realizó con los RSU de Valencia, dicho análisis deberá ser comprobado en campo, para certificar su veracidad o diferencias.

Las proporciones de los elementos que forman biogás, están relacionadas con el peso de los componentes, por consiguiente, se establecerá el análisis químico en función a los pesos de los RSU que se caracterizaron en la línea de rechazos. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 51:

Tabla 51: Análisis químico de los RSU a gestionar en la nueva celda del vertedero de Soto.

Componentes	Humedad %	Peso (kg)	Peso seco	Peso húmedo	C	H	O	N	S CENIZAS
Resto de comida	70	19,25	5,78	13,48	2,89	0,39	1,73	0,13	0,64
Papel - cartón	20	5,72	4,58	1,14	2,00	0,29	2,00	0,06	0,23
Plástico	5	5,42	5,14	0,27	-	-	-	-	-
Vidrio	0	5,25	5,25	0,00	-	-	-	-	-
Textiles	10	1,90	1,71	0,19	0,67	0,19	0,67	0,10	0,10
Cuero	10	0,95	0,86	0,10	0,28	0,09	0,28	0,09	0,09
Residuos de Jardín	60	2,00	0,80	1,20	0,39	0,03	0,03	0,02	0,03
Madera	20	1,50	1,20	0,30	0,6	0,08	0,45	0,04	0,04
Metales	0	1,50	1,50	0,00	-	-	-	-	-
Otros	30	1,20	0,84	0,36	-	-	-	-	-
Total		44,68	27,65	17,03	6,83	1,07	5,17	0,43	1,12

La fracción que formará biogás, es la fracción con carbono, las demás son inertes. Considerando que toda la fracción orgánica biodegradable se descompone, la ecuación que rige el proceso de formación de biogás es la siguiente:



Una vez calculado los porcentajes de la composición química de los residuos, se procede a calcular el número de mol que contiene cada elemento, el cual se obtiene como el cociente del total de cada elemento entre sus respectivos pesos moleculares, sabiendo que el peso molecular de C=12, H=1, O=16, N=14, y despreciando azufre y cenizas. En la Tabla 52 se muestran los resultados del número de mol de cada elemento.

Tabla 52: Número de mol contenido en cada elemento.

Peso molecular	C = 12	H = 1	O = 16	N = 14
Totales	6,83/12	1,07/1	5,17/16	0,43/14
Número de mol	0,57	1,07	0,32	0,03
Número entero de moles	19	35	10	1

El número entero de moles se determinó como el cociente de cada elemento entre el número de mol del nitrógeno, también conocida como función nitrógeno, estos valores corresponden a:

a	b	c	d
19	35	10	1

Luego la fórmula es $C_{19}H_{35}O_{10}N_1$, sustituyendo los valores en la ecuación para el metano, dióxido de carbono y amoníaco, en la Tabla 53 se presentan los resultados.

Tabla 53: Valores de CH₄, CO₂, NH₃, H₂O

CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ O
10,53	7,88	1	5,31

En el resultado del análisis químico de los RSU que van a ser eliminado en el vertedero de Soto, se obtuvo, un peso molecular de 437 g/mol y una composición molar que nos indica, que cada mol de M.O está constituida por 10,53 moles de CH₄ + 7,88 moles de CO₂ + 1 mol de NH₃. Ya calculado los valores de los gases que se generan por la descomposición de los residuos, se procede a calcular el peso molecular de cada uno de ellos, los resultados se muestran en la Tabla 54:

Tabla 54: Peso molecular de los componentes de la materia orgánica biodegradable

CH₄	16*10,53	169
CO₂	44*7,88	347
NH₃	17*1	17

Teniendo en cuenta que por cada 100 kg de RSU que entra a vertedero, se tiene 14,92 kg de materia orgánica seca, y por cada 437 g/mol de materia orgánica, se tiene 169 g/mol de CH₄, 347 g/mol CO₂,

17 g/mol de NH_3 , entonces se deben establecer los g/mol de CH_4 , CO_2 y NH_3 , presentes en 14,92 kg, estos valores se recogen en la Tabla 55:

Tabla 55: Kg presentes en la materia orgánica.

CH₄	12,08	kg
CO₂	24,87	kg
NH₃	1,22	kg

Es necesario establecer el volumen producido de CH_4 , CO_2 y NH_3 , por cada 100 kg de RSU producidos, de manera que deben fijar los pesos específicos, siendo para el CH_4 y $\text{CO}_2 = 0,718 \text{ kg/m}^3$ y $\text{NH}_3 = 1.977 \text{ kg/m}^3$, en la Tabla 56, se expresan los resultados obtenidos.

Tabla 56: Volumen producido por cada 100 kg de RSU.

CH₄	16,83	m³
CO₂	12,58	m³
Total	29,41	m³

El volumen de biogás que generaran los residuos depositados en la nueva celda del vertedero de Soto durante un año, para una producción anual de RSU de 100800 ton, se obtiene:

- Producción anual de $\text{CH}_4 = 17199653 \text{ m}^3$
- Producción anual de $\text{CO}_2 = 12856882 \text{ m}^3$

5.3.6.4- Modelación matemática de la producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto.

El volumen de lixiviado que se produce en vertedero, varía según las condiciones ambientales, tipo de residuo y la temperatura a la cual se ven sometidos. Los parámetros más importantes para estimar la producción de lixiviados son: la humedad de los residuos a disponer en un relleno sanitario y la pluviometría de la zona.

Para el análisis de la producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto, se contemplará el cálculo del caudal de lixiviados por tres métodos, con los cuales se puedan establecer diferencias y ponderar su producción, los métodos a implementar son:

- Cálculo del caudal de lixiviados por el método suizo.
- Cálculo del cuadro de generación de lixiviados fundamentado en la precipitación y modo de operación.
- Cálculo de la producción de lixiviados aplicando el Método de Bilitewski

Además, se realizará el cálculo de la capacidad de la balsa de lixiviados para la nueva celda.

5.3.6.4.1 Cálculo del caudal de lixiviados por el método suizo.

Este método estima la producción de lixiviados en función de la precipitación anual media de la zona, el área del relleno sanitario y un coeficiente que depende de la compactación de los residuos.

Para estimar el caudal se aplica la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{1}{t} * P * A * k$$

Donde:

Q= Caudal medio de lixiviados

t= Número de segundos en un año

P= Precipitación anual media

A=Área de la celda emergente

k= Coeficiente que depende del grado de compactación de los RSU. El factor “k” está en función del peso específico de los RSU dispuestos en vertedero, de acuerdo a los siguientes rangos como lo indica la Tabla 57:

Tabla 57: Coeficiente de compactación.

ESO ESPECÍFICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS EN EL VERTEDERO (ton/m ³)	k
0,4	0,5
0,7	0,25
0,9	0,15

Fuente: (Castillo M, 2014)

Se estimó una compresión de 600 kg/m³, equivalente a 0,6 t/m³, según referencias de compactación típicas en vertederos, por medio de una interpolación se adquirió un k=0,33. La precipitación media anual fue calculada de acuerdo a los datos ofrecidos por la Oficina Nacional de Meteorología en la Rep. Dom., se tomó un periodo desde el año 1998 al 2017, del cual se obtuvo una precipitación media anual de 1350,40 mm/año.

El área de la nueva celda en el vertedero de Soto es de 80.000 m², una vez establecidos todos los datos se prosigue al cálculo.

$$Q = \frac{1}{31536000s} * 1350,40 \text{ mm} * 80000 \text{ m}^2 * 0.33$$

$$Q = 1,13 \text{ l/seg} \longrightarrow Q = 97,67 \text{ m}^3/\text{día}$$

5.3.6.4.2 Cálculo del cuadro de generación de lixiviados fundamentado en la precipitación y modo de operación.

Este método se fundamenta en el tipo de compactación de los residuos, en base a eso se establece la producción de lixiviados m³/ha*día, en la Tabla 58 se observa la producción de lixiviados por el tipo de relleno.

Tabla 58: Producción de lixiviados por tipo de relleno.

TIPO DE RELLENO	Porcentaje (%) de la precipitación para la producción de lixiviados.	PRODUCCIÓN DE LIXIVIADOS (m ³ /ha*día)		
		Precipitación 700 mm/año	Precipitación 1500 mm/año	Precipitación 3000 mm/año
Relleno manual	60	11,51	24,66	49,32
Relleno compactado con maquina liviana	40	7,67	16,44	32,88
Relleno compactado con maquinaria pesada	25	4,79	10,27	20,55

Fuente: (Castillo M, 2014)

Si se considera un relleno compactado con maquinaria liviana, el porcentaje de la producción para la producción de lixiviados es 40%, para el cual se tendría una producción de lixiviados 16,44 m³/ha*día, entonces se procede a realizar los cálculos correspondientes.

$$\frac{\text{m}^3}{\text{ha} * \text{día}} = \frac{\left(1350,40 \frac{\text{mm}}{\text{año}}\right) * 16,44}{1500 \frac{\text{mm}}{\text{año}}}$$

$$\frac{\text{m}^3}{\text{ha} * \text{día}} = 14,80$$

Calculada la producción 14,80 m³/ha*día, ahora se procede a calcular con el área de la nueva celda (80000 m²), con la que se obtiene la producción de lixiviados generada en la misma.

$$\text{Producción de lixiviados} = 14,80 \frac{\text{m}^3}{\text{ha} * \text{día}} * 8 \text{ ha}$$

$$\text{Producción de lixiviados} = 118,4 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Producción de lixiviados} = 43.216,96 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

l/seg	m ³ /día	m ³ /año
1,37	118,4	43.216,96

5.3.6.4.3 Cálculo de la producción de lixiviados aplicando el Método de Bilitewski.

El método de Bilitewski considera el balance hídrico (las aportaciones menos todas las pérdidas o consumos de agua), entre otros parámetros, que hacen de este método uno de los más completos para el cálculo de la producción de lixiviados, porque toma en consideración todos los parámetros que intervienen en un balance hídrico en vertedero.

$$QL = (Pi - Ei - Esi - dAi + dRi - LPi)$$

Dónde:

QL = Caudal de lixiviados (m³/año).

Pi = Precipitación (m³/año).

Ei = Evaporación (m³/año).

Esi = Escurrimiento superficial de aguas (m³/año).

dAi = Consumo de agua (descomposición de residuos, generación y extracción de biogás) (m³/año).

dRi = Agua proveniente de los residuos (humedad que excede a la capacidad de campo o que proviene de la descomposición) (m³/año).

LPi = Retención temporal de líquidos (debido a la capacidad de retención de los residuos y del material de cobertura) (m³/año).

BALANCE HÍDRICO

- **Precipitación total**

$$P_{total} = P * A$$

$$P_{total} = 1350,40 \text{ mm/año} * 80000 \text{ m}^2$$

$$P_{total} = 108.031,60 \text{ m}^3/\text{año}$$

- **Esorrentía**

$$Es = C * P_{total}$$

El coeficiente de esorrentía "C" viene en función de la permeabilidad del terreno y de la pendiente de la zona, para nuestro caso práctico, la pendiente de la zona es suave, con un 2%, y se caracteriza por tener un suelo arenoso arcilloso de permeabilidad de 10⁻⁵ m/seg, considerándose un suelo semipermeable, con estas características se estima el coeficiente de esorrentía, en la Tabla 59 se muestran las características establecidas para la obtención de la "C" en función del tipo de terreno y la pendiente del mismo.

Tabla 59: Coeficiente de escorrentía.

Cobertura Vegetal	Permeabilidad del suelo	PENDIENTE DEL TERRENO				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		>50%	>20%	>5%	>1%	<1%
Sin vegetación	Impermeable	0,8	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,50	0,55	0,50

Fuente: <http://ingenieriacivil.tutorialesaldia.com/todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-el-coeficiente-de-escorrentia/>

$$E_s = 0,55 * 108.031,60 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$E_s = 59417,38 \text{ m}^3/\text{año}$$

- **Infiltración**

$$I = P_{\text{total}} - E_s$$

$$I = 108.031,60 - 59417,38 = 48614,22 \text{ m}^3/\text{año}$$

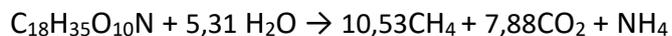
- **Evaporación total**

$$E_{\text{total}} = 0,2 * I$$

$$E_{\text{total}} = 0,2 * 48614,22 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$E_{\text{total}} = 9722,84 \text{ m}^3/\text{año}$$

- **Consumo y extracción debido a gas**



$$\text{Agua consumida} = \frac{5,31(2(1,01)+16)}{18(12)+35(1,01)+10(16)+14} = \frac{0,225 \text{ kg agua}}{\text{kg RSU}}$$

$$\text{Residuos a vertedero} = 49180,10 \text{ t/años} = 49180100 \text{ kg/año}$$

Asumiendo un peso específico del agua = 1000 kg/m³

$$\frac{0,225 \text{ kg agua}}{\text{kg RSU}} * 49180100 \frac{\text{kg RSU}}{\text{año}} = 11065522,5 \text{ kg} \frac{\text{agua}}{\text{año}}$$

$$\text{Consumo debido a gas} = 1106572,5 \text{ kg} \frac{\text{agua}}{\text{año}} \div 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 11065,52 \text{ m}^3/\text{año}$$

- **Aporte de agua de humedad residuos**

El porcentaje de humedad de los residuos sólidos que irán a vertedero, fue calculado en la tabla 49, este valor depende del tipo de escenario que se ha de implementar, en este trabajo se está desarrollando los cálculos del Esc. 1, el cual estima una humedad del 38%.

Como la densidad de los RSU que van a vertedero es de 600 kg/m^3 . Por consiguiente, el agua que aportan los residuos es de 300 kg/m^3 .

$$dRi = \% \text{ de humedad de los residuos} * \text{volumen de los residuos}$$

$$dRi = 0,38 * (49180100 \text{ kg/año} \div 300 \text{ kg/m}^3)$$

$$dRi = 62294,79 \text{ m}^3/\text{año}$$

- **Retención temporal de líquidos.**

Se estima que entre un 5 a un 10% de los líquidos son retenidos temporalmente por los residuos.

$$LPi = \% \text{ de retención} * I$$

$$LPi = 0,05 * 48614,22 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$LPi = 2430,71 \text{ m}^3/\text{año}$$

Aplicando el Método de Bilitewski.

$$QL = (Pi - Ei - Esi - dAi + dRi - LPi)$$

$$QL = (108031,60 - 59417,38 - 9722,84 - 11065,52 + 62294,79 - 2430,71) \text{ m}^3/\text{año}$$

$$QL = 87689,89 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$QL = 240,25 \text{ m}^3/\text{día}$$

5.3.6.4.4 Cálculo de la capacidad de la balsa de lixiviados para la nueva celda en el vertedero de Soto

La balsa de lixiviados para la nueva celda del vertedero de Soto, se construirá en función del caudal diario esperado, consiste en un tanque de tormentas, cuya capacidad volumétrica permita almacenar tres veces el caudal diario esperado.

La legislación española demanda que la balsa de lixiviados debe tener la capacidad de almacenamiento considerando la situación más desfavorable, para estas condiciones se estimará la precipitación

máxima en 24 horas, con un periodo de retorno de 25 años, según la Dirección General de Reglamentos y Sistemas en la Rep. Dom., en su reglamento R-008 (Anexo 3), la precipitación máxima 600 mm/día.

DATOS DE PARTIDA.

Precipitación: 600 mm/día

Superficie: 80000 m²

Pendiente: 2%

$$\text{Capacidad de balsa de lixiviados} = 600 \text{ mm} \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 80000 \text{ m}^2$$

$$\text{Capacidad de balsa de lixiviados} = 48000 \text{ m}^3$$

El volumen necesario sería 48480 m³, estableciendo un factor de seguridad de 10%.



Figura 44: Diseño de la nueva celda del vertedero de Soto.

6. RESULTADOS Y COMPARACIONES

6.1.- Resultados y comparaciones del sistema de tratamiento en los distintos escenarios

En este acápite se presenta un resumen detallado de los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios planteados, de los cuales se analizarán los parámetros técnicos implementados que permiten gestionar de una manera integral los RSU generados en el municipio, además se hace una comparación con las hipótesis desarrolladas, sopesando la solución más viable a implementar.

Tabla 60: Resumen de los resultados obtenidos en cada escenario

Procesados	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Por cada 100 kg de RSU que entran a planta:			
Material Voluminoso	2,00	2,00	2,00
Línea de M.O (Compost Verde)	43,30	50,44	63,18
% de humedad línea de M.O.	62,92	62,60	62,93
Línea de rechazos	54,70	47,56	34,83
% de humedad línea de rechazos	32,60	28,39	15,27
Subproductos recuperados	10,02	10,05	12,76
Rechazo primario	44,68	37,51	22,10
Del compost verde que va a ser gestionado en la planta de compostaje se obtuvo en kg:			
Compost maduro afinado	23,92	27,83	34,86
Rechazo (afino)	1,44	1,76	2,17
Total de rechazo a vertedero kg:			
Rechazo total	48,12	41,27	26,27
% de humedad del rechazo total	38%	34%	20%

La humedad con la cual los RSU llegan a la planta de tratamiento, es de 45,68% en todos los escenarios, además se consideró un 2% de material voluminoso, que posteriormente será eliminado en vertedero, junto al rechazo primario y el afino generado en el área de compostaje (FONB). El porcentaje de humedad de los componentes orgánicos no difieren mucho con las alternativas planteadas, debido a que su contenido de humedad es muy elevado, con relación a la fracción inorgánica.

Cabe mencionar que la cantidad de subproducto en el escenario 2, hay que sumarle la fracción recuperada por la recogida selectiva, la cual se estima que para el quinto año de su implementación estará recuperando 11,60% en peso de los subproductos aprovechables (papel-cartón, plástico, vidrio). La comparación de los resultados entre los distintos escenarios, se presenta en la Tabla 61:

Tabla 61: Comparación de los resultados entre los distintos escenarios, según el tipo de instalaciones donde son procesados los RSU.

Instalaciones	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Planta de Tratamiento	permiten generar 180 empleos a un sector marginal que vive de la desegregación de residuos, sin ninguna protección sanitaria.	permiten generar 180 empleos.	Solo permite generar 45 empleos.
Planta de pretratamiento	Permite recuperar un 10,02% de los subproductos que pueden valorizarse e insertarse al mercado.	Permite recuperar un 10,05% de los subproductos en la planta, más un 11,60% en la recogida selectiva.	Permite recuperar un 12,76% de los subproductos en la planta.
Planta de compostaje	Permite obtener un 23,92% de compost maduro afinado, que posteriormente puede ser vendido a los agricultores, tanto del municipio como de otras ciudades.	Permite obtener un 27,83% de compost maduro afinado, que posteriormente puede ser vendido a los agricultores, tanto del municipio como de otras ciudades.	Permite obtener un 34,86% de compost maduro afinado, que posteriormente puede ser vendido a los agricultores, tanto del municipio como de otras ciudades.
Disposición en vertedero	Permite depositar en vertedero 48,12% de los residuos generados en el municipio.	Permite depositar en vertedero 41,27% de los residuos generados en el municipio.	Permite depositar en vertedero 26,27% de los residuos generados en el municipio.

En esta tabla se muestran las diferentes comparaciones que existen entre las alternativas desarrolladas, en la cual se puede observar que para los escenarios 1 y 2, el porcentaje de recuperación en la línea de rechazos son casi similares, teniendo en consideración que el rendimiento en el triaje manual del Esc. 2, sufre una ligera optimización al reducirse el volumen de los subproductos que llegan a planta, este factor eleva un poco el rendimiento de las actividades que se ejecutan en la misma, reflejándose en los porcentajes a obtener por cada línea (materia orgánica y rechazos) a procesar, esto produce un aumento de 16,35% del compost maduro y una disminución de 16,60% de rechazos a eliminar en vertedero, con relación al Esc. 1

En el Esc. 3, con una planta operando al 80% automatizada, se garantiza una mayor producción de compost maduro, con un 45,75% más que el Esc. 1, y un 25% más que el Esc. 2. La recuperación de los subproductos es de 27% mayor, en comparación con las demás alternativas. Además, se deposita un 45,41% menos de rechazos al vertedero, que en el Esc. 1, y un 36,35% menos que en el Esc. 2. En la figura 37 se muestra gráficamente la comparación de los porcentajes que serán procesados en las distintas líneas de tratamientos.

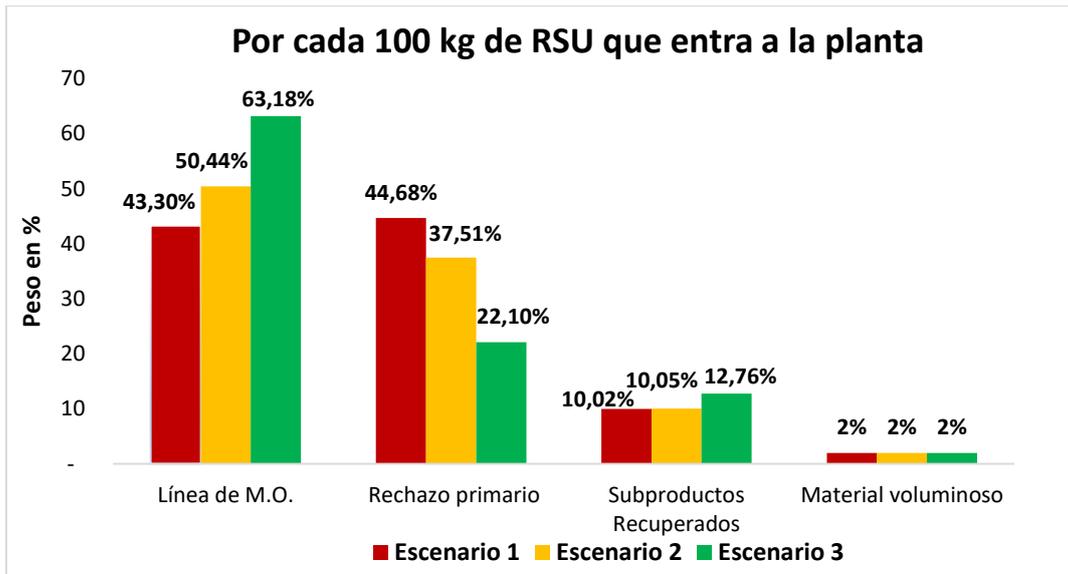


Figura 45: Comparación de resultados obtenidos en cada escenario.

De la gráfica se puede analizar que aproximadamente un 46% de los residuos orgánicos en el Esc. 3, van hacer compostado con relación al Esc. 1, y un 25% con relación al Esc. 2. Del rechazo primario (sin incluir el material voluminoso, ni el afino), el Esc. 1 deposita al vertedero aproximadamente 51% más que el Esc. 3, y un 16% por encima del Esc. 2. Los porcentajes de los subproductos recuperados en los Esc. 1 y 2, son similares, pero el porcentaje del Esc. 2, está en base a 60% de la fracción reciclable que llega a la planta, el otro 40% fue recuperado en el sistema selectivo, mientras que el Esc. 3 recupera un 20% por encima que las demás alternativas.

Se estima que el vertedero de Soto en la actualidad depositando 280 t/día, su volumen disponible agotaría su capacidad en 5 años, la densidad de compactación con la cual llegan los residuos al vertedero es baja al momento de su colocación. En la Tabla 62 se observa la evolución del volumen disponible en el vertedero de Soto, en función de la implementación de cada uno de los escenarios.

Tabla 62: Volumen disponible en el vertedero de Soto.

Escenarios	Volumen a depositar	Volumen disponible	Vida útil
Esc. 0	$(280 \text{ t/día} * 1000 * 365) \div 600 = 170333,3 \text{ m}^3/\text{año}$	851666,5 m ³	5 años
Esc. 1	$(134,74 \text{ t/día} * 1000 * 365) \div 600 = 81966,83 \text{ m}^3/\text{año}$		10 años
Esc. 2	$(102,14 \text{ t/día} * 1000 * 365) \div 600 = 62135,16 \text{ m}^3/\text{año}$		14 años
Esc. 3	$(73,56 \text{ t/día} * 1000 * 365) \div 600 = 44749 \text{ m}^3/\text{año}$		19 años

En esta tabla se puede analizar que, para un mismo volumen disponible existente en el vertedero actual de Soto, su volumen útil se prolonga en el tiempo, según el tipo de alternativa que se aplique.

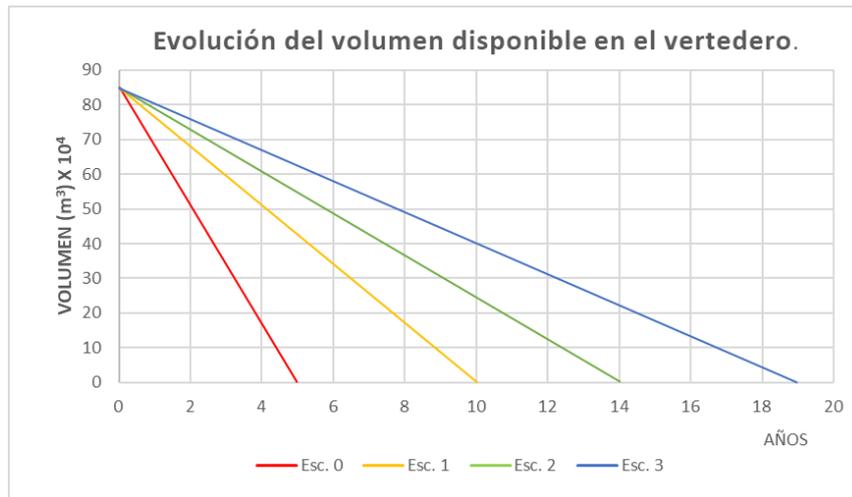


Figura 46: Evolución del volumen disponible en el vertedero de Soto.

En esta figura se ilustra gráficamente la evolución del volumen disponible en el vertedero de Soto, en función de la implementación de cada una de las alternativas, asumiendo que el volumen a gestionar es el actual, para poder establecer una comparación en el tiempo, y así poder estimar la vida útil del mismo. Se puede observar que gestionando un volumen 280 t/día y una densidad baja de compactación 600 kg/m³, el Esc. 1 deposita 134,74 t/día al vertedero, tardaría 10 años en agotar la capacidad del mismo, en el Esc. 2 se depositan 102,14 t/día, tardaría 14 años, mientras que el Esc. 3 depositando 73,56 t/día, tardaría 19 años en agotar la vida útil del mismo.

A continuación, se muestran unas distribuciones de los volúmenes de RSU en cada etapa de la gestión.

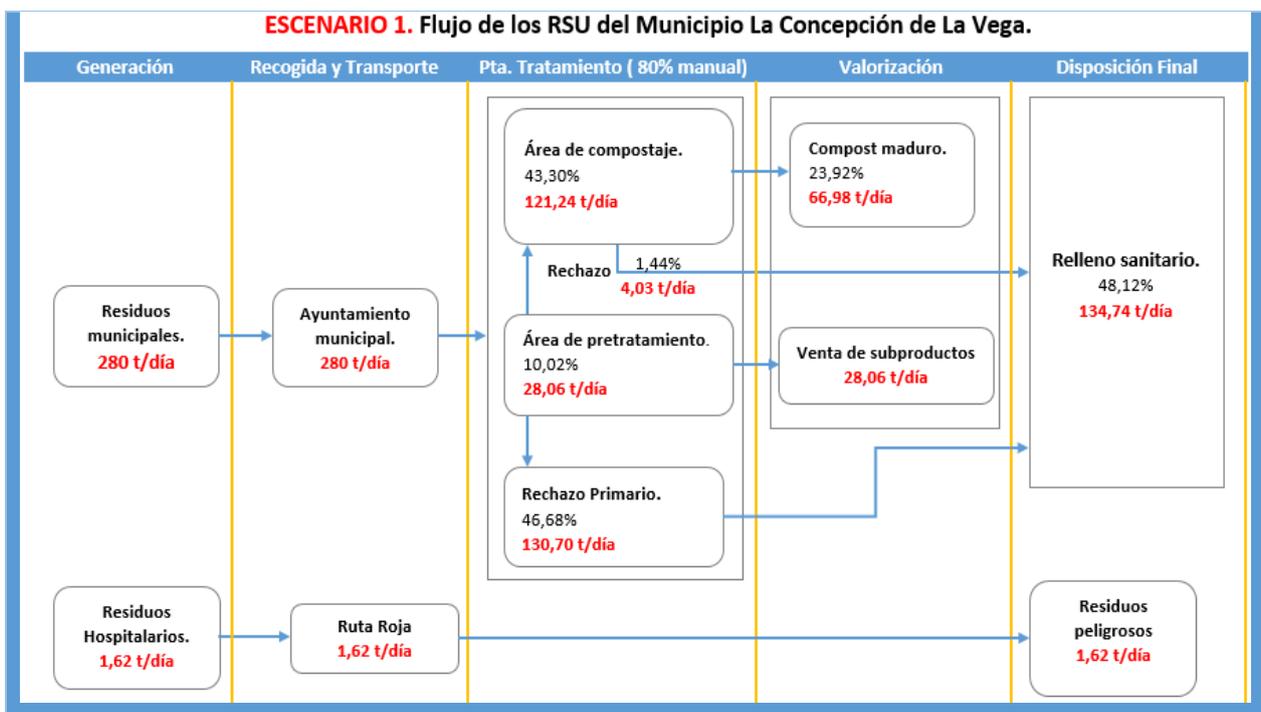


Figura 47: Flujo de los RSU del Municipio La Concepción de La Vega. Escenario 1.

Los residuos peligrosos son gestionados por el ayuntamiento, en la denominada “Ruta Roja” los cuales son depositados en una celda independiente de los residuos no peligrosos. En el diagrama de flujo del Esc. 1 y 2, la planta de tratamiento opera un 80% manual.

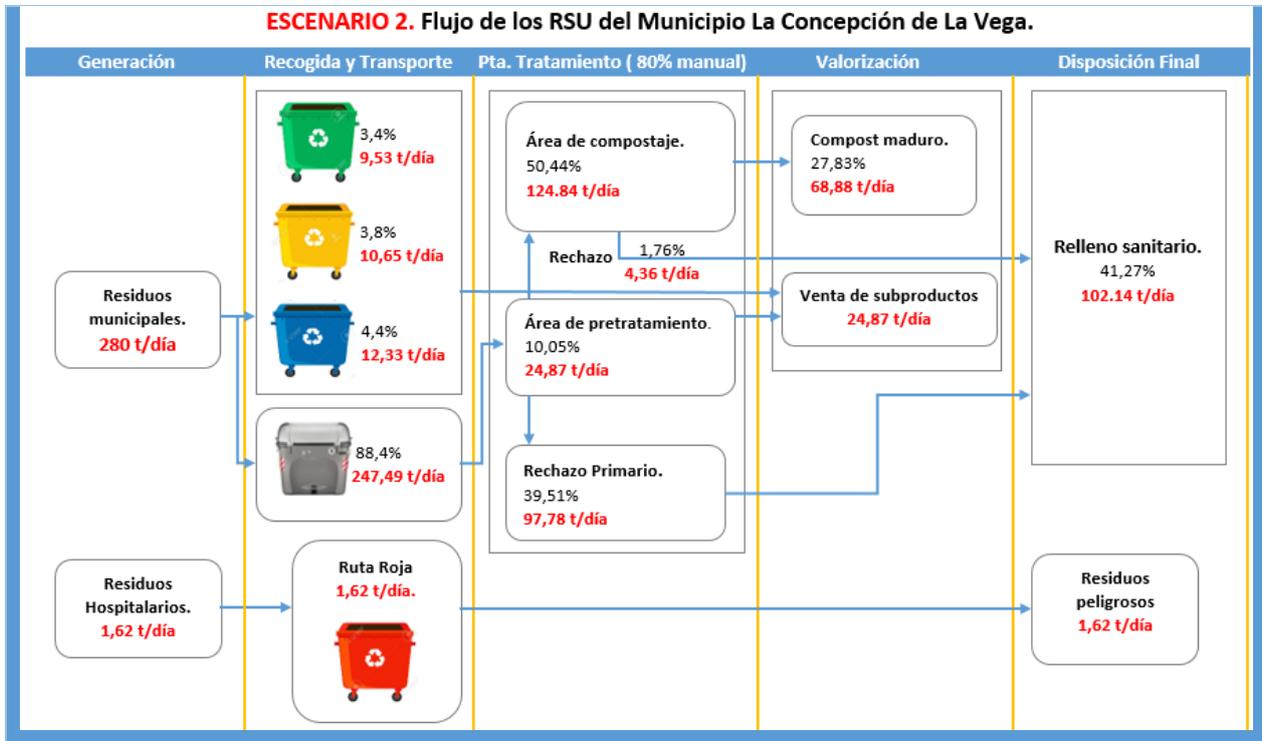


Figura 48: Flujo de los RSU del Municipio La Concepción de La Vega. Escenario 2.

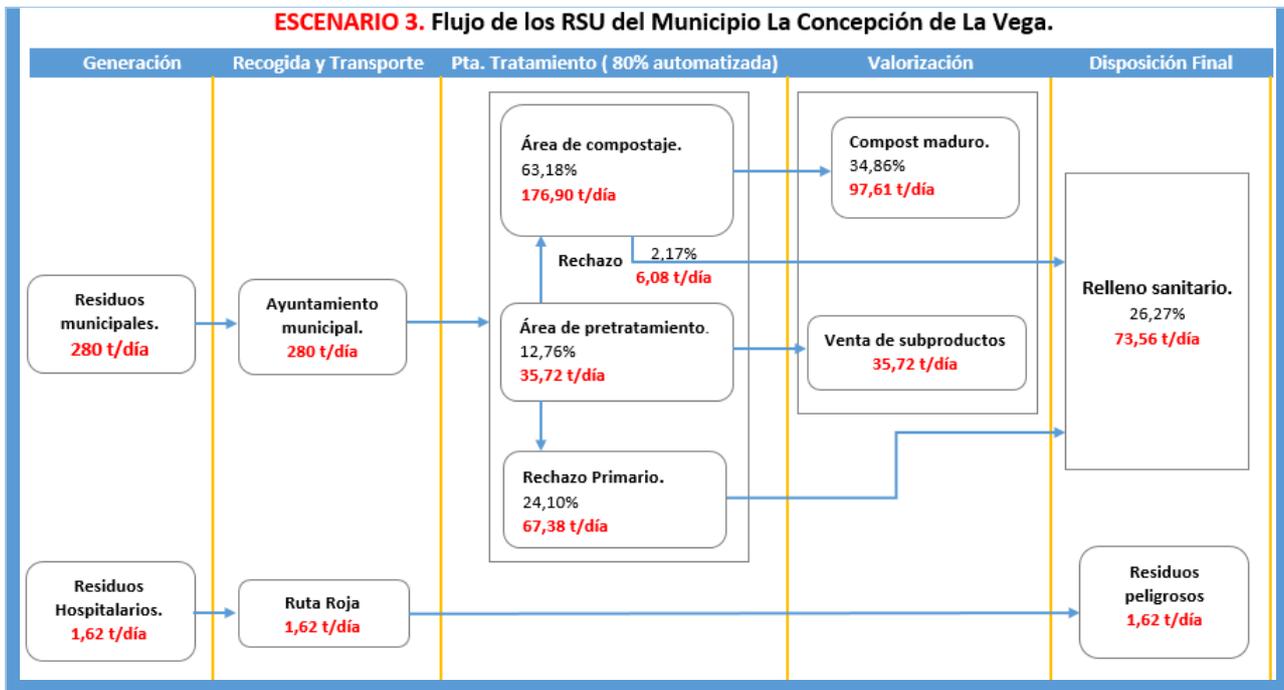


Figura 49: Flujo de los RSU del Municipio La Concepción de La Vega. Escenario 3.

6.2.- Resultados y comparaciones de la vida útil de la nueva celda del vertedero de Soto.

La vida útil de la nueva celda estará en función del volumen útil, y del volumen de residuos sólidos a depositar en la misma. Los cálculos fueron realizados, considerando los tres escenarios alternativos, para los que se contemplaron tres tipos de densidades (baja, balas y alta), con las cuales pueden llegar los RSU a un vertedero.

Tabla 63: Resultados de la vida útil de la nueva celda del vertedero de Soto.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Volumen disponible	1200000 m ³	1200000 m ³	1200000 m ³
Volumen total capas	304000 m ³	304000 m ³	304000 m ³
Producción anual a vertedero	49180,10 t/año	37289,81 t/año	26847,94 t/año
Volumen de RSU (baja densidad)	86280,88 m ³ /año	65420,72 m ³ /año	47101,65 m ³ /año
Volumen de RSU (balas)	56334,59 m ³ /año	42714,56 m ³ /año	30753,65 m ³ /año
Volumen de RSU (alta densidad)	40983,42 m ³ /año	31074,84 m ³ /año	22373,28 m ³ /año
Vida útil de la nueva celda (baja densidad)	11 años	14 años	19 años
Vida útil de la nueva celda (balas)	16 años	21 años	29 años
Vida útil de la nueva celda (alta densidad)	22 años	29 años	40 años

En esta tabla se puede observar que, en función de la alternativa que se aplique en el municipio, se puede garantizar menor disposición de volumen a eliminar, lo que se traduce a mayor tiempo de vida útil en la nueva celda del vertedero de Soto, todo esto se refleja como un ahorro económico, debido a que no será necesario construir periódicamente una celda emergente.

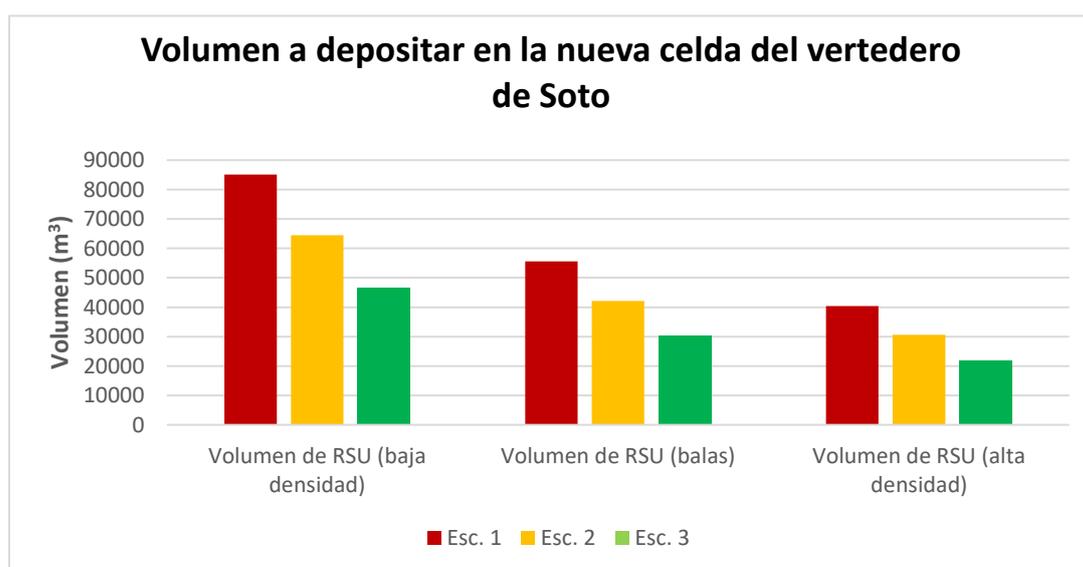


Figura 50: Volumen a depositar según su densidad en la nueva celda del vertedero de Soto.

En la Figura se puede observar gráficamente que la densidad con la cual se depositan los RSU a la nueva celda, permite que sean gestionados menores volúmenes de residuos, el implementar un escenario u otro, también contribuye a una reducción sustancial de los volúmenes, así como el porcentaje de humedad.

Con un volumen de RSU de alta densidad, se reduce un 52,50% del volumen a eliminar, con relación al volumen de RSU de baja densidad en todos los escenarios, mientras que con un volumen balas, se reduce 34,71%, con relación al volumen de baja densidad y un 27,25% mayor que el volumen de alta densidad. En la Figura 51 se muestra la vida útil de la nueva celda, según el tipo de densidad de los RSU a depositar.

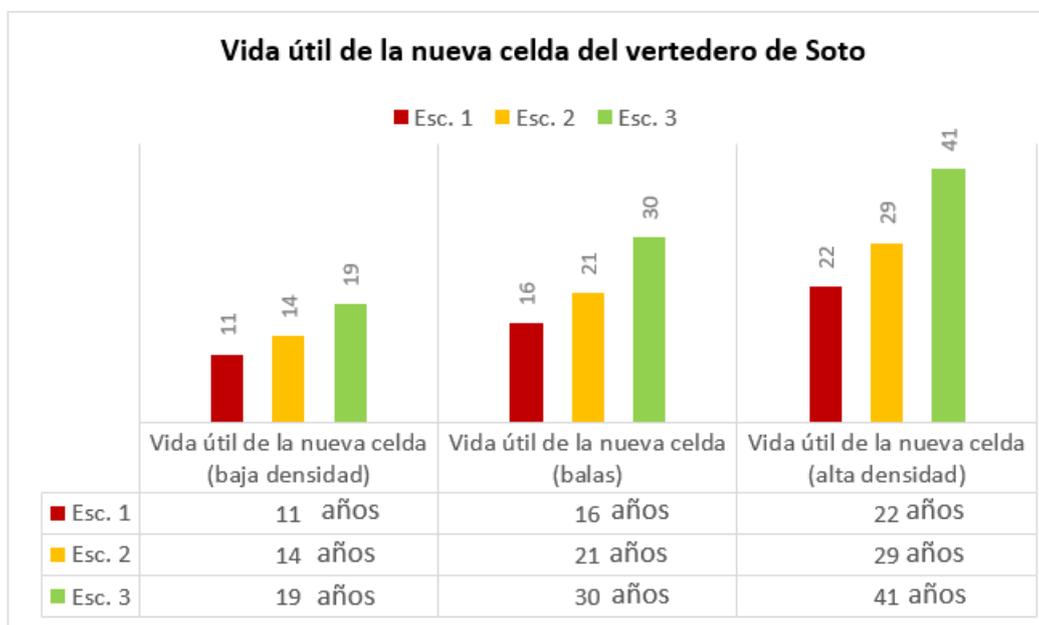


Figura 51: Vida útil según el tipo de densidad de los RSU en la nueva celda del vertedero de Soto.

En esta figura para un mismo volumen disponible en la nueva celda, se obtuvo según el tipo de escenario y la densidad de los RSU a depositar, la vida útil en cada alternativa. Para una profundidad fija de 15 m (condicionante de la zona de estudio), el área de la nueva celda puede disminuirse en los escenarios 2 y 3, y garantizar el mismo periodo de vida que el Esc. 1, lo que implica menor área de emplazamiento y menores costes de construcción.

6.3.- Resultados y comparaciones de la producción de biogás en la nueva celda.

La producción de biogás que se genera para los distintos escenarios en la nueva celda del vertedero de Soto, se determinó mediante un análisis químico elemental, de la composición de la materia orgánica. Esta producción de biogás responde a un consumo de agua, a los contenidos de nitrógeno, carbono y oxígeno, constituidos en la fracción biodegradable en condiciones anaeróbicas.

Tabla 64: Resultados de la producción anual de biogás en la nueva celda del vertedero de Soto.

	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Composición	C ₂₂ H ₃₉ O ₁₂ N	C ₁₈ H ₃₅ O ₁₀ N	C ₁₇ H ₃₄ O ₁₀ N	C ₁₄ H ₃₀ O ₉ N
Volumen de CH₄	42095965 m ³	17199653 m ³	60133540 m ³	3993994 m ³
Volumen de CO₂	32318468 m ³	12856882 m ³	4468357 m ³	2852970 m ³
Biogás producido	74414433 m ³	30056535 m ³	10481897 m ³	6846964 m ³

Con estos resultados se muestra la producción anual de biogás en los distintos escenarios, representando el Esc. 0, la situación actual, sin ningún tipo de tratamiento previo a la eliminación de los RSU. En la Figura 52 se observa gráficamente la producción anual de biogás en los diferentes escenarios.

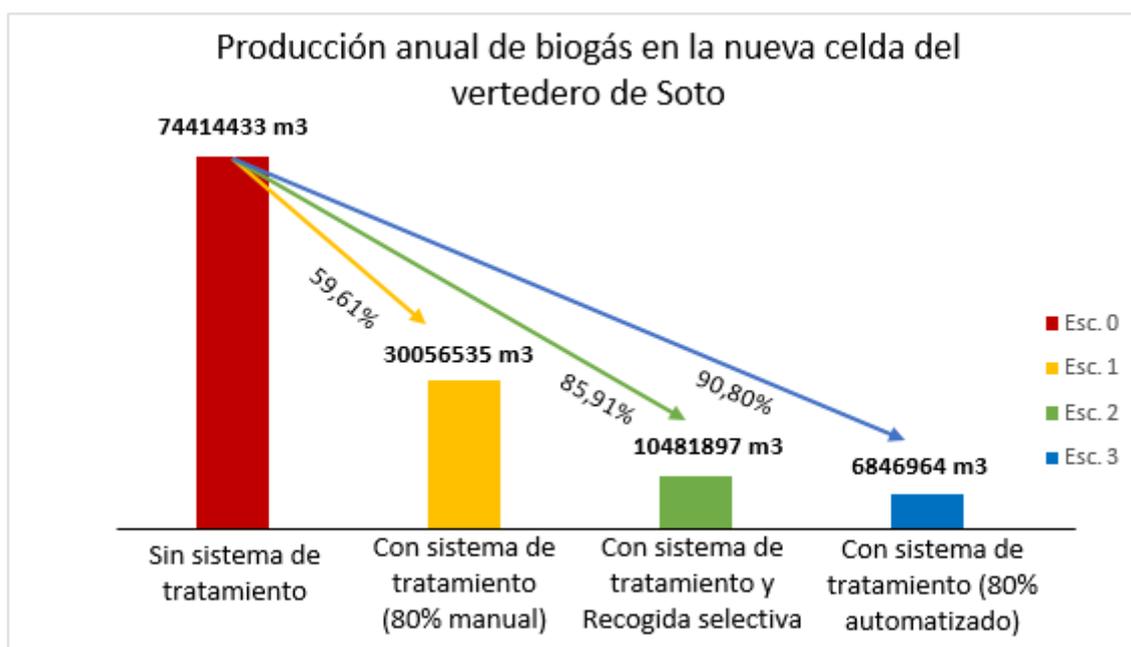


Figura 52: Producción anual de biogás en la nueva celda del vertedero de Soto.

En esta gráfica se refleja la producción anual de biogás que genera en el vertedero de Soto, sin ningún tipo de tratamiento. Implementando una planta de tratamiento en el municipio, la producción anual de biogás se reduce un 60% comparado con el escenario actual. Además de un sistema de tratamiento, si se implementa un sistema selectivo de los RSU en el origen, se reduce un 26% más, que implementar únicamente un sistema de tratamiento. La implementación de un sistema de tratamiento automatizado conllevaría un alto costo para la realidad del municipio, pero asegura una reducción 91% de la producción anual del biogás comparado con el escenario actual. También pueden surgir numerosas soluciones, como lo es el aprovechamiento del mismo, con una planta de Biometanización.

6.4.- Resultados y comparaciones de la producción de lixiviados en la nueva celda.

La producción de lixiviados se determinó por diferentes métodos, para los cuales se tomó en consideración la humedad de los residuos que van a vertedero, el área de la nueva celda, el coeficiente de escorrentía y pendiente de la zona, la precipitación máxima de un día, para un período de retorno 25 años y el porcentaje de retención de líquido de los residuos. En la Tabla 65 se recogen los resultados de la producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto, excluyendo el Esc. 0.

Tabla 65: Producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto.

Métodos	Esc. 0	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Método Suizo	152,77 m ³ /día	97,67 m ³ /día	97,67 m ³ /día	97,67 m ³ /día
Por modo de operación	185,20 m ³ /día	118,40 m ³ /día	118,40 m ³ /día	118,40 m ³ /día
Método Bilitewski	475,04 m ³ /día	240,25 m ³ /día	195,14 m ³ /día	139,29 m ³ /día

El Método Suizo y el método fundamentado en la precipitación y modo de operación, son métodos poco fiables, debido a que solamente incluyen tres variables en el cálculo de la producción de lixiviados, como son: precipitación, área de emplazamiento y coeficiente de compactación, en cambio el método de Bilitewski considera la producción anual a vertedero, el porcentaje de humedad de los residuos, la escorrentía, la evaporación, entre otras variables. Una comparación real de las diferencias entre cada escenario, sobre la producción de lixiviados, se muestra gráficamente en la Figura 53:

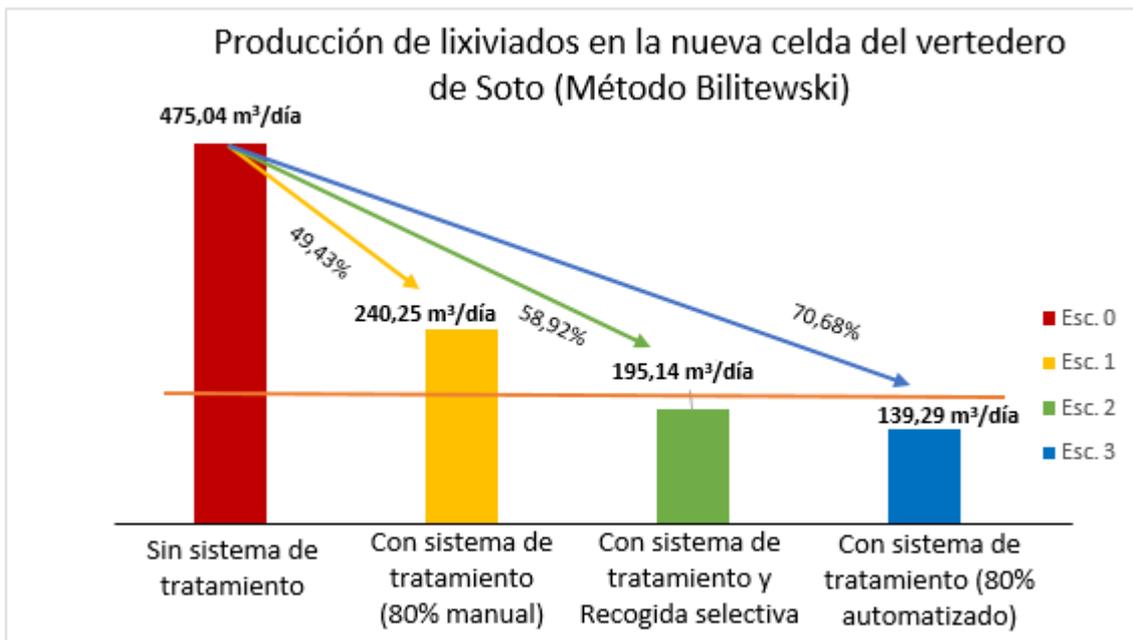


Figura 53: Producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto.

6.5.- Evaluación económica de los ingresos generados con un sistema de tratamiento.

Los subproductos recuperados en la línea de rechazos son posteriormente vendidos a las diferentes compañías recicladoras y embotelladoras del país. Gran parte de estos subproductos son exportados a EEUU, países europeos y asiáticos, esto hace económicamente viable y ambientalmente sostenible el mercado del reciclaje en la República Dominicana.

Para analizar la rentabilidad de los subproductos en cada escenario, se realizó una estimación económica de los componentes recuperados, por el precio de cada uno de ellos en el mercado, en este análisis se considera el mismo volumen a gestionar en todos los escenarios, para poder comparar los beneficios que se obtendrían en cada uno de ellos. En las Tablas 66, 67 y 68 se muestran los análisis económicos de los subproductos recuperados en cada escenario.

Tabla 66: Análisis Económico de los Subproductos Recuperados en el Esc. 1

COMPONENTES	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO RD\$	COSTO US\$	US\$/DÍA
Papel-Cartón	libra	19012,67	0,40	0,008	152,10
Plástico	libra	2226,67	4	0,089	198,17
Vidrio	kg	7924	2,95	0,058	462,43
Metal férreo	kg	840	12	0,237	132,72
Metal no férreo	libra	1190,5	24	0,475	879,64
Total					1825,06

En este análisis se estima que el 40% del metal recuperado es no férreo, las unidades establecidas son las que predominan en el mercado dominicano, las cantidades fueron tomadas del porcentaje de recuperación (tabla 23), y los precios por componentes varían en el tiempo, los mismo están en función de una tasa de cambio RD\$ 50,55 = US\$ 1.

Tabla 67: Análisis Económico de los Subproductos Recuperados en el Esc. 2

COMPONENTES	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO RD\$	COSTO US\$	US\$/DÍA
Papel-Cartón	libra	93952,2	0,40	0,008	751,62
Plástico	libra	87532,34	4	0,079	6915,05
Vidrio	kg	34608	2,95	0,058	2007,26
Metal férreo	kg	1344	12	0,237	318,53
Metal no férreo	libra	1975,34	24	0,475	938,29
Total					10930,70

Estas cantidades representan el 40% de los subproductos recuperados en el sistema selectivo, más el porcentaje de recuperación en la línea de rechazos, para los cuales se obtuvieron un total por día de US\$10930,70. Este beneficio se empezaría a reflejar 5 años después de haberse implementado el sistema selectivo en el municipio, lo cual representa un 83,30% de beneficios más que el Esc. 1, y un 64,54% por encima que el Esc. 3.

Tabla 68: Análisis Económico de los Subproductos Recuperados en el Esc. 3

COMPONENTES	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO RD\$	COSTO US\$	US\$/DÍA
Papel-Cartón	libra	23765,83	0,40	0,008	190,13
Plástico	libra	26420,2	4	0,079	2087,20
Vidrio	kg	11312	2,95	0,058	656,10
Metal férreo	kg	1008	12	0,237	238,90
Metal no férreo	libra	1481,51	24	0,475	703,72
Total					3876,05

Si se implementa una planta de tratamiento de alto rendimiento en el municipio, los beneficios que se obtendrían con la recuperación de los subproductos, corresponderían a US\$3876,05 por día, lo que equivaldría a US\$ 116281,50 mensual, esto representa un 52,91% de beneficios, por encima de una planta de tratamiento manual.

En la Figura 54 se muestra gráficamente una comparación de los beneficios obtenidos, por la venta de los subproductos recuperados en cada uno de los escenarios.

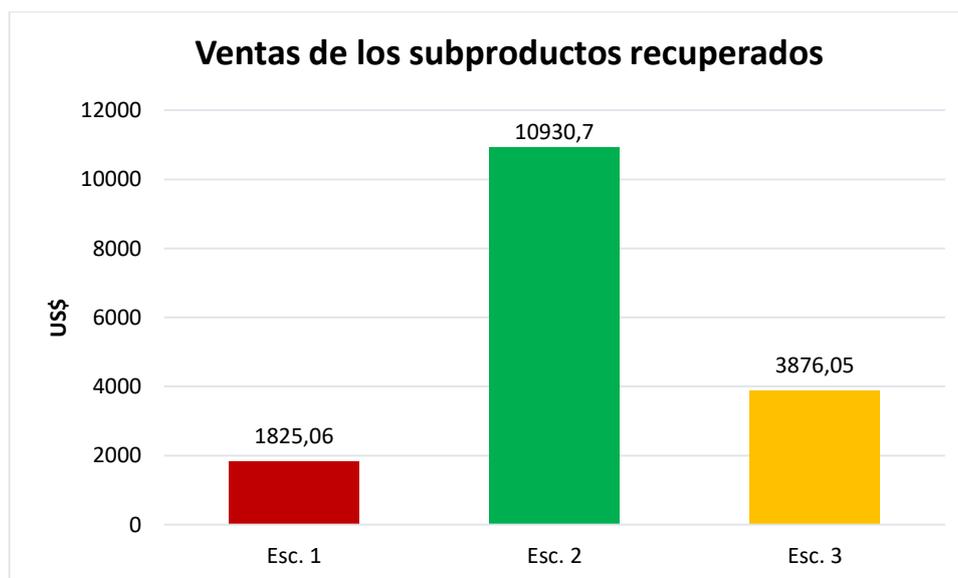


Figura 54: Beneficios Obtenidos por las Ventas de los Subproductos Recuperados

En esta figura se puede observar gráficamente que la implementación de un sistema selectivo en el origen, permite recuperar más subproductos reciclables, lo cual se transcribe en valor económico, haciendo más rentable la selectividad de los RSU en su origen, obteniendo un 83,30% de beneficios, por encima del Esc. 1, y un 64,54% que el Esc. 2.

En el área de compostaje los ingresos generados estarán en función de las ventas de los metros cúbicos de compost generados, el cual es utilizado por los agricultores como fertilizante orgánico (abono), el precio por metros cúbicos de compost se detalla en la Tabla 69:

Tabla 69: Análisis económico del compost generado

ESCENARIOS	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO RD\$	COSTO US\$	US\$/DÍA
Esc. 1	m ³	133,9	368,42	7,29	976,13
Esc. 2	m ³	137,76	368,42	7,29	1004,27
Esc. 3	m ³	195,16	368,42	7,29	1422,72

Este análisis permite observar los ingresos generados por día en la venta del compost, estos ingresos se pueden comparar gráficamente en la Figura 55:

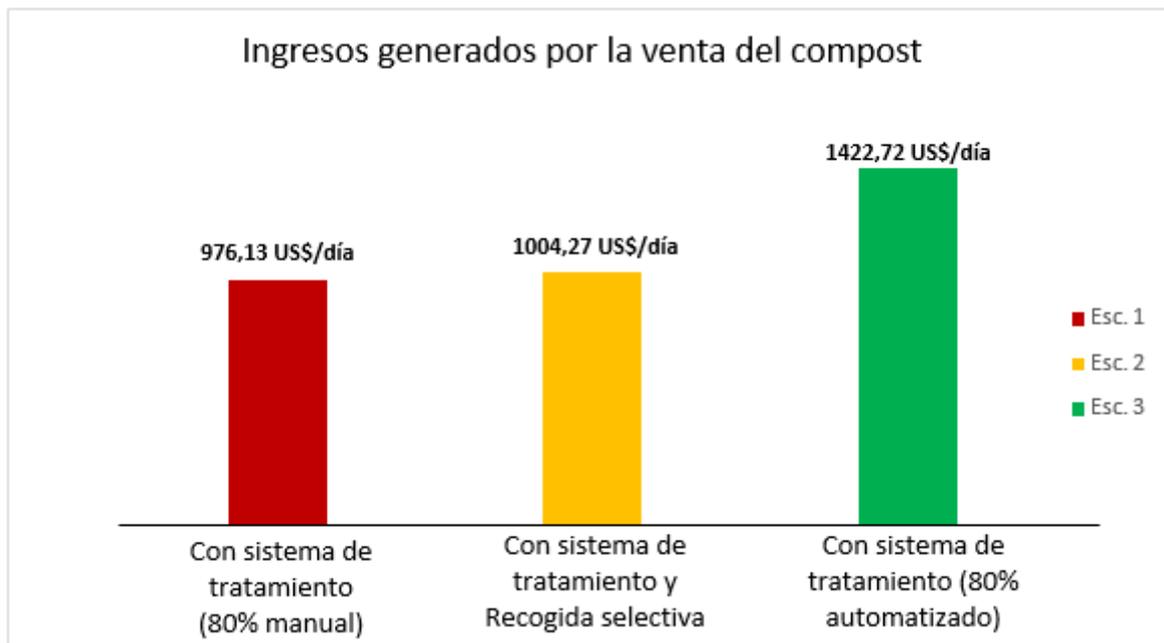


Figura 55: Ingresos generados por la venta del compost.

Con un sistema de tratamiento se logra apreciar que en el área de compostaje se obtiene 976,13 dólares por día, implementando un sistema selectivo en el municipio, produce un ligero aumento del rendimiento en el área de pretratamiento, por lo cual se obtendría casi un 3% de ingresos, por encima

del Esc. 1, esto se traduce a que no sería tan rentable desde el punto de vista de la producción de compost, implementar un sistema selectivo en el municipio. La instalación de una planta de tratamiento automatizada genera unos ingresos por día, de 1422,72 dólares, lo cual representa 31,39% de ingresos, por encima del Esc. 1, lo que sí haría más rentable la implementación del Esc. 3.

El ingreso total que generaría el sistema de tratamiento en el municipio, sería la suma de los ingresos de los subproductos, más los ingresos del compost, en la Figura 56 se muestra el ingreso total para cada escenario.

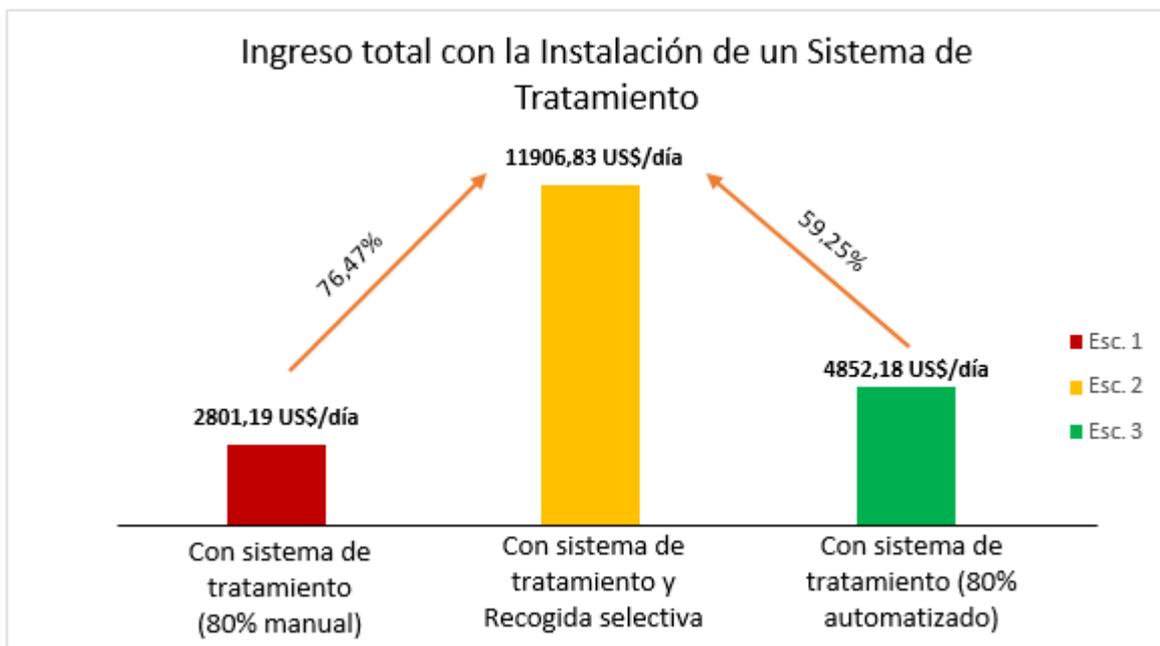


Figura 56: Ingreso total con la Instalación de un Sistema de Tratamiento.

La combinación de los sistemas (tratamiento + recogida selectiva), proporcionan más ingresos por día, que la implementación de una planta de tratamiento automatizada, generando un 59,25% de ingresos, más elevados que el Esc. 3. Hay que destacar que estas estimaciones serán fiables, si a partir del quinto año de la implementación del sistema selectivo, se logra recuperar un 40% de todos los subproductos reciclables, además deben cumplirse las estimaciones en los porcentajes de las diferentes líneas a procesar, en las áreas de compostaje y de rechazos.

6.5.1- Evaluación económica de los contenedores requeridos para el sistema selectivo.

El tipo y capacidad de los contenedores, fue seleccionado en el Catálogo General de ALQUI-ENVAS.

Tabla 70: Referencia y capacidad del tipo de contenedor de RSU.

Referencia	Capacidad	Largo	Ancho	Alto	Peso en v.	Peso máx.
RL.320	3200 lit.	188 cm	143 cm	181 cm	200 kg	1000 kg

Los contenedores que se utilizarán en el municipio serán calculados en función de las distribuciones de los RSU por zonas, para las cuales se estimarán una combinación de cuatro (4) contenedores (verde, amarillo, azul y gris), la representación de los colores fue explicada en el Cap. 4, en “Recogida y transporte.”

Tabla 71: Análisis económico de los contenedores de RSU requeridos en el municipio.

ZONAS	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO €\$	PRECIO US\$	US\$
ZONA 1	UD	66	1200	1344	88704
ZONA 2	UD	70	1200	1344	94080
ZONA 3	UD	73	1200	1344	98112
ZONA 4	UD	44	1200	1344	59136
ZONA 5	UD	40	1200	1344	53760
TOTAL		293			393.792,00

Para estimar la cantidad de contenedores por zona, se utilizó un peso específico 300 kg/m³, el cual representa un valor medio de referencia de RSU dentro de un contenedor, cada contenedor tiene una capacidad 3,2 m³. El precio de los contenedores varía en el tiempo, se calculó en base a una tasa de cambio de: 1 € = 1,12 US\$.

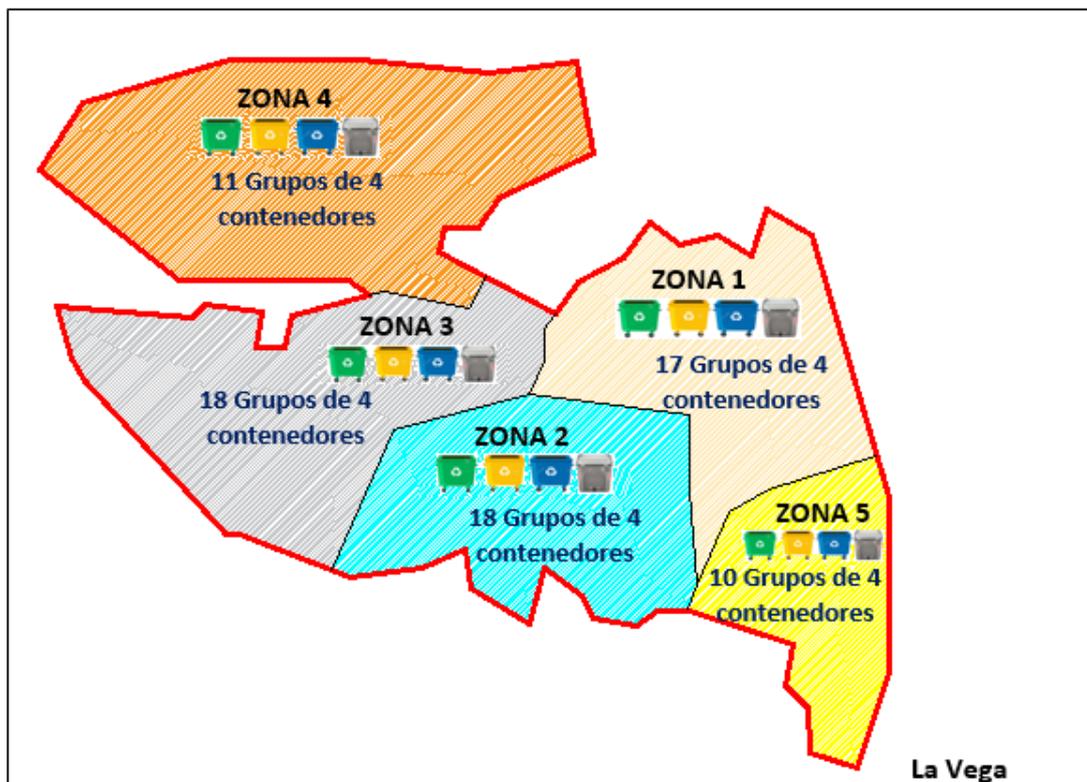


Figura 57: Grupos de contenedores por zona.

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

El diseño de un modelo de gestión integral de RSU dentro de sus complejidades, no sólo se encuentran los parámetros técnicos de diseño, sino que también, se ve involucrado por el factor social que, dependiendo el nivel de educación, facilita o no, las políticas que buscan reducir la generación de residuos mediante talleres de prevención, programas de reutilización y concientización sobre el reciclaje. En esa misma línea, se pretende disminuir al máximo la disposición de los desechos al vertedero, ya que no le favorece al medio ambiente este sistema de eliminación de los residuos.

En el presente estudio, se ha desarrollado un modelo de gestión integral de los RSU del municipio La Concepción de La Vega, para el cual se ha realizado un predimensionamiento de un sistema de tratamiento, que involucra dos instalaciones: área de pretratamiento y de compostaje, además del diseño de una nueva celda en el vertedero de Soto. Todo esto se planteó con diferentes alternativas, que permitieran sopesar la solución que más se adaptara a la realidad del municipio.

Dentro de las conclusiones fundamentales de todo el desarrollo del TFM, se citan:

1. La necesidad de promulgar nueva legislación que regule los procedimientos de eliminación de los RSU en la República Dominicana, que contemple y establezca mediante una normativa los valores de los parámetros, criterios técnicos y límites permisibles para la instalación de un relleno sanitario, que garanticen la reducción o mitigación de la contaminación ambiental. Además, debe garantizarse la incorporación de políticas de control y monitoreo ambiental con la frecuencia adecuada, que comprometan a las autoridades ambientales a la supervisión del cumplimiento jurídico, ya que, en República Dominicana, en la práctica existe una débil gestión en el control y seguimiento de las normativas ambientales por parte de los organismos reguladores.
2. En este trabajo se estimaron los valores de humedad y los porcentajes utilizados en el sistema de tratamiento, en base a los porcentajes que maneja la planta de tratamiento de Valencia, se hizo una relación en función del peso de los componentes de residuos, que caracterizan al municipio. El análisis químico elemental se obtuvo como un porcentaje del análisis que caracteriza los residuos a depositar en el vertedero de Valencia, que luego estos valores deberán ser comprobados en la zona de estudio.
3. Respecto a las características actuales del vertedero de Soto, frente al diseño técnico realizado en este trabajo, se puede ver de manera clara la contaminación que el sistema actual está provocando al medio ambiente, donde no existe ningún tipo de control de los residuos que se están depositando en el mismo, además de que no siguen un lineamiento técnico, ni medio ambiental que garanticen la impermeabilización del fondo del vertedero y mucho menos la producción de lixiviados que se infiltra hacia las aguas subterráneas.

4. De los escenarios planteados como alternativas o hipótesis en este TFM, tenemos:

- Un sistema de tratamiento de RSU que opere 80% manual (Esc. 1).
- Un sistema de tratamiento de RSU que opere 80% manual + un sistema de selectividad en el origen, de cual se estimó que, para el quinto año de su implementación, recuperaría un 40% de los subproductos reciclables (Esc. 2).
- Un sistema de tratamiento de RSU que opere 80% automatizado (Esc. 3)

El escenario 3, presentó mejores resultados, teniendo mayor producción de compost por día, menor volumen de rechazos al vertedero, menor producción de biogás, menor producción de lixiviados y mayor tiempo de vida útil a la nueva celda del vertedero de Soto. Para la misma vida útil que el escenario 1, se requiere de menor área de emplazamiento en el escenario 3.

El escenario 2, presentó mejores ingresos por día, al recuperar más subproductos con un sistema selectivo, pero tiene un costo previo asociado a una inversión que se debe realizar en la adquisición de 293 contenedores y una flotilla de 30 camiones, además para este sistema selectivo se estimó que a partir del quinto año es que se empezará a recuperar un 40% de los subproductos aprovechables.

Cabe destacar que la mejor alternativa a implementar en el municipio La Concepción de La Vega, debe ir acompañada de un análisis económico que encierre todas las partidas a financiar, por ello, queda como futura línea de investigación realizar un análisis económico general, que permita elegir la mejor alternativa adecuada a la realidad del municipio.

7.1.- Futuras líneas de investigaciones

Dentro de las futuras líneas de investigación de este trabajo, se proponen los 7 aspectos siguientes:

- Determinar el porcentaje de humedad que caracteriza a los residuos producidos en el municipio.
- Establecer una “ruta - horario” que garantice de manera continua la recogida de los RSU.
- Realizar un análisis químico elemental de los RSU que permita estimar la producción real de biogás que se genera en el vertedero.
- Plantear el diseño de una planta de Biometanización que permita el aprovechamiento de biogás generado.
- Realizar un análisis económico de las instalaciones diseñadas, y comparar su rentabilidad con las necesidades y realidad del municipio.
- Desarrollar un plan zonal que garantice la recogida y gestión óptima de los residuos según su tipología.
- Evaluar nuevas áreas que cumplan con los parámetros ambientales, para el emplazamiento de un nuevo vertedero.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Bogaert, L. (2013). *Evaluación para la implementación de un proyecto de gestión integral de residuos sólidos en el municipio de Constanza provincia La Vega, Rep. Dom.* Barcelona.
- Castillo M. (2014). *Estudio y Diseño Definitivos para la Gestión Integral de los Desechos Sólidos de la Mancomunidad el Guabo - Ponce Enriquez.*
- Castillo Tió, I. (15 de Marzo de 2001). Perfil Ambiental de la República Dominicana. Santo Domingo.
- Castillo Tió, R. (2016). *Diagnóstico Situacional Preliminar de los Residuos Sólidos al 2016 en República Dominicana.* Santo Domingo, República Dominicana.
- Cattafesta, C. (Febrero de 2003). Proyecto para la Creación De Capacidades y el Perfeccionamiento en la Formulación de Políticas y de la Capacidad de Negociación en Medio Ambiente (Unctad/Field). Santo Domingo, República Dominicana.
- Chalas, M. (2002). *Diagnóstico Ambiental Municipal sobre Residuos Sólidos. Caracterización de los Vertederos Municipales (Estudios de Caso). Tesis de Maestría para la Universidad de Bélgica.*
- Esteve Garcia, D. (2018). *Diseño medioambiental de una instalación de pretratamiento y valorización energética mediante compostaje de residuos sólidos urbanos. Aplicación en la Comunidad Valenciana.* Valencia, España.
- FOCIMIRS. (Mayo de 2017). Fortalecimiento de la Capacidad Institucional en el Manejo Integral de los Residuos Sólidos. "*Manual de Caracterización Y Proyección de los Residuos Sólidos Municipales*".
- FOCIMIRS. (Mayo de 2017). Fortalecimiento de la Capacidad Institucional en el Manejo Integral de los Residuos Sólidos. "*Manual de Tratamiento Intermedio y Reciclaje*".
- La Norma para la Gestión Ambiental de Residuos Sólidos No Peligrosos. (Junio de 2003). Santo Domingo, República Dominicana: BÚHO.
- Ley 64-00 General Sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales. (18 de Agosto de 2000). Santo Domingo, República Dominicana.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). *Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales (RSM).* Santo Domingo, República Dominicana.
- Observatorio de Políticas Sociales y Desarrollo. (2017). Residuos Sólidos Urbanos en República Dominicana. Santo Domingo.
- ONE. (2010). Oficina Nacional de Estadísticas. *IX Censo Nacional de Población y Viviendas, 2010.*
- OPS. (2003). *Evaluación Regional De Los Servicios De Manejo De Residuos Sólidos Municipales, Informe Analítico De República Dominicana / Diciembre.*
- OPS. (2005). Organización Panamericana de la Salud. *Informe de la Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe.*
- Real Decreto 1481/2001, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. (27 de Diciembre de 2001). España.



- Rodrigo Clavero, M. E. (2016). *BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU*. Valencia, España.
- Rodrigo Ilarri, J., Rodrigo Clavero, M. E., & Fernández González, J. (s.f.). *Alternativas de Valorización y Eliminación de Residuos Sólidos Urbanos*. Valencia.
- SEA. (1993). Ministerio de Agricultura SEA. "Informe Final de inventario de Fuentes Terrestres de Contaminación Marina en República Dominicana. Santo Domingo". Santo Domingo.
- Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (05 de Enero de 2006). "Reglamento para la Gestión de Sustancias y Desechos Químicos Peligrosos en la República Dominicana". Santo Domingo.
- SEMARENA. (2003). *Proyecto para la creación de capacidades y el perfeccionamiento en la formulación de políticas y de la capacidad de negociación en medio ambiente. (UNCTAD/FIELD), Diagnostico preliminar República Dominicana*.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1996). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Madrid: McGraw-Hill.

ANEXOS

ANEXO 1

• Escenario 2.

1. Diseño del área de compostaje.

Tabla 1: Sistema de recogida selectiva de RSU.

Componentes	Porcentaje recuperado	Peso (ton/día)
Papel - Cartón	$11 * 0,4 = 4,4\%$	12,33
Plástico	$9,5 * 0,4 = 3,8\%$	10,65
Vidrio	$8,5 * 0,4 = 3,4\%$	9,53
Total	11,6%	32,51
Residuos a gestionar	$280 - 32,51$	247,49 t/día

Tabla 2: Porcentaje de residuos por cada línea de tratamiento.

Línea de materia orgánica	Componentes	Línea de rechazos
75%	Resto de comida	25%
25%	Papel-Cartón	75%
7%	Plásticos	93%
5%	Vidrio	95%
5%	Textiles	95%
5%	Cuero	95%
60%	Residuos de jardín	40%
60%	Madera	40%
0	Metales	100%
25%	Otros	75%

Tabla 3: Línea de materia orgánica (compost verde).

Línea de M.O.	Componentes	Peso inicial de RSU que entran en planta (kg)	Peso línea de M.O.	Peso seco (kg)	Peso agua (kg)
75%	Resto de comida	55	41,25	12,38	28,88
25%	Papel-Cartón	11	2,75	2,20	0,55
7%	Plásticos	9,5	0,67	0,63	0,03
5%	Vidrio	8,5	0,43	0,43	0,00
5%	Textiles	2	0,10	0,09	0,01
5%	Cuero	1	0,05	0,05	0,01
60%	Residuos de jardín	4	2,40	0,96	1,44
60%	Madera	3	1,80	1,44	0,36
0%	Metales	2	0,00	0,00	0,00
25%	Otros	4	1,00	0,70	0,30
Totales		100	50,44	18,87	31,57
Humedad línea M.O. = 62,60%					

Tabla 72: Línea de rechazo.

Línea de rechazo	Componentes	Peso inicial de RSU que entran en planta (kg)	Peso de línea de rechazo (kg)	Peso seco (kg)	Peso agua (kg)
25%	Resto de comida	55	13,75	4,125	9,625
75%	Papel-Cartón	11	8,25	6,60	1,650
93%	Plásticos	9,5	8,84	8,39	0,442
95%	Vidrio	8,5	8,08	8,08	0,000
95%	Textiles	2	1,90	1,71	0,190
95%	Cuero	1	0,95	0,86	0,095
40%	Residuos de jardín	4	1,60	0,64	0,960
40%	Madera	3	1,20	0,96	0,240
100%	Metales	2	2,00	2,00	0,000
75%	Otros	4	1,00	0,70	0,300
Totales		100	47,56	34,06	13,50

Humedad línea de rechazo = **28,39%**

Tabla 73: Elementos recuperados.

% Recuperación	Componentes	Peso (kg)	% en peso
35%	del papel-cartón	8,25	2,89
40%	de los plásticos	8,84	3,53
35%	del vidrio	8,08	2,83
40%	de los metales	2,00	0,80
Total			10,05%

Tabla 74: Resumen escenario 2.

Por cada 100 kg de RSU que entran a la planta

Material voluminoso	2,00 kg	
Subproductos para reciclaje	10,05 kg	→ Venderlos
Total, de rechazo primario	37,51 kg	→ Relleno Sanitario
Línea de M.O.	50,44 kg	→ Compost

Tabla 75: Relación C/N de compost verde a procesar.

Componentes	Peso (kg)	Peso seco (kg)	C	N
Resto de comida	41,25	12,38	6,19	0,27
Papel – Cartón	2,75	2,20	0,9625	0,0275
Textiles	0,10	0,09	0,04	0,01
Cuero	0,05	0,05	0,01	0,00
Residuos de Jardín	2,40	0,96	0,46	0,024
Madera	1,80	1,44	0,72	0,045
Total	50,44	18,87	8,38	0,38

Relación C/N = **21.95**, con una Humedad = **62,60%**

Tabla 76: Fracción Orgánica Biodegradable de los RSU.

Componentes	Peso seco línea M.O (kg)
Comida	12,38
Papel-cartón	2,20
Textiles	0,09
Cuero	0,05
Restos Jardín	0,96
Madera	1,44
TOTAL	17,11

Tabla 77: Fracción Orgánica No Biodegradable de los RSU.

Componentes	Peso seco Línea de M.O (kg)
Plástico	0,63
Vidrio	0,43
Metales	0,00
Otros	0,70
Total	1,76

Tabla 78: Características del compost verde.

CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST VERDE	
Peso	50,44 %
Humedad	62,60%
Peso seco	18,87 kg
Peso agua	31,57 kg
Peso seco de la FOB	17,11 kg

Tabla 79: Pérdida del compost fermentado.

Pérdidas	% pérdida	Peso (kg)	Peso resultante	Unidad
Por evaporación	40	31,57	12,63	kg agua
Por transf. Biológica	30	17,11	5,13	kg materia seca
Total			17,76	kg

Tabla 80: Característica final del compost fermentado.

Característica final de compost fermentado			
Peso seco del compost fermentado	18,87 – 5,13	13,74	kg
Peso agua en compost fermentado	31,57 – 12,63	18,94	kg
Peso total del compost fermentado	13,74 + 18,94	32.68	kg

Tabla 81: Producción mensual de compost.

Producción mensual de compost		
Producción mensual compost bruto	$7424,7 * 0,5044 = 3745,02$	ton/mes
Producción mensual compost fermentado	$7424,7 * 0,3268 = 2426,39$	ton/mes
Producción mensual compost media	$0,5 * (3745,02 + 2426,39) = 3085,71$	ton/mes

Tabla 82: Dimensiones del área de compostaje.

Dimensionamiento del área de compostaje		
Volumen de Compost Mensual	6171,42	m ³ /mes
Vol. Almacenado por Hileras	640	m ³ /hileras
Número de hileras al mes	10	hileras
Tiempo del compost	3	meses
Número total de hileras	40	hileras
Superficie de un grupo de hileras	4960	m ²
Superficie total ocupada	19840	m ²

Tabla 83: Calculo del compost maduro y afino.

Característica final de compost fermentado			
Peso seco del compost maduro tras afino	$(13,74 - 1,76) * 0,9$	10,78	kg
Peso agua en compost maduro y afino	$18,94 * 0,9$	17,05	kg
Peso total del compost maduro afinado	$10,78 + 17,05$	27,83	kg
Producción diaria de compost	$247,49 * 0,2783$	68,88	t compost/día
Producción diaria de compost en m ³	$68,88 \div 0,5$	137,76	m³/día

2. Diseño de la nueva celda del vertedero de Soto

Tabla 84: Producción de RSU a gestionar en el municipio.

Datos generales de la producción de RSU		
Producción de RSU	1.04	kg/hab/día
Población actual	269451	habitantes
Producción mensual de RSU	7528	ton/mes
Producción Diaria de RSU	247,49	ton/día
Producción anual	90333,85	ton/año
Producción vida útil (10 años)	903338,5	ton

Tabla 85: Volumen requerido según el tipo de residuo.

Volumen total necesario según el tipo de residuo		
Volumen total (baja densidad)	1584804,39 + 304.000	1888804,39 m3
Volumen total (bala)	1034752,01 + 304.000	1338752,01 m3
Volumen total (alta densidad)	752782,08 + 304.000	1056782,08 m3

Tabla 86: Volumen de la producción anual a vertedero, según la densidad de los residuos.

Volumen de RSU según la densidad de los residuos		
Volumen de RSU (baja densidad)	$37289,81 / (0,6 * (1 - 0,05))$	65420,72 m3
Volumen de RSU (bala)	$37289,81 / (0,9 * (1 - 0,03))$	42714,56 m3
Volumen de RSU (alta densidad)	$37289,81 / (1,2 * (1))$	31074,84 m3

Tabla 87: Vida útil de la nueva celda en el vertedero de Soto.

Vida útil de la nueva celda, según la densidad de los residuos		
Vida útil (baja densidad)	$896000 / 65420,72$	14 años
Vida útil (bala)	$896000 / 1338752,01$	21 años
Vida útil (alta densidad)	$896000 / 31074,84$	29 años

Tabla 88: Análisis químico de los RSU a gestionar en la nueva celda del vertedero de Soto.

Componentes	Humedad %	Peso (kg)	Peso seco	Peso húmedo	C	H	O	N	S	CENIZAS
Resto de comida	70	13,75	4,13	9,63	2,06	0,28	1,24	0,09	0,46	
Papel - cartón	20	5,36	4,29	1,07	1,88	0,27	1,88	0,05	0,21	
Plástico	5	5,30	5,04	0,27						
Vidrio	0	5,25	5,25	0,00						
Textiles	10	1,90	1,71	0,19	0,67	0,19	0,67	0,10	0,10	
Cuero	10	0,95	0,86	0,10	0,28	0,09	0,28	0,09	0,09	
Residuos de Jardín	60	1,60	0,64	0,96	0,31	0,03	0,03	0,02	0,02	
Madera	20	1,20	0,96	0,24	0,48	0,06	0,36	0,03	0,03	
Metales	0	1,20	1,20	0,00						
Otros	30	1,00	0,70	0,30						
Total		37,52	24,77	12,75	5,68	0,92	4,45	0,38	0,91	

Tabla 89: Valores de CH₄, CO₂, NH₃, H₂O.

CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ O
9,97	7,42	1	4,61

Tabla 90: Volumen producido por cada 100 kg de RSU.

CH4	6,66	m ³
CO2	4,95	m ³
Total	11,60	m ³

Producción anual de biogás = **10481897 m³**

3. Calculo de la producción de lixiviados

Tabla 91: Producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto.

Métodos	Esc. 2
Método Suizo	97,67 m ³ /día
Por modo de operación	118,40 m ³ /día
Método Bilitewski	195,14 m ³ /día

ANEXO 2

• Escenario 3.

1. Diseño del área de compostaje.

Tabla 1: Porcentajes alcanzados por cada línea de tratamiento en la ciudad de Valencia.

Línea de materia orgánica	Componentes	Línea de rechazos
75%	Resto de comida	25%
25%	Papel-Cartón	75%
7%	Plásticos	93%
5%	Vidrio	95%
5%	Textiles	95%
5%	Cuero	95%
60%	Residuos de jardín	40%
60%	Madera	40%
0	Metales	100%
25%	Otros	75%

Tabla 2: Línea de Materia Orgánica (Compost Verde).

Línea de M.O.	Componentes	Peso inicial de RSU que entran en planta (kg)	Peso línea de M.O.	Peso seco (kg)	Peso agua (kg)
95%	Resto de comida	55	52,25	15,68	36,58
30%	Papel-Cartón	11	3,30	2,64	0,66
10%	Plásticos	9,5	0,95	0,90	0,05
5%	Vidrio	8,5	0,43	0,43	0,00
5%	Textiles	2	0,10	0,09	0,01
5%	Cuero	1	0,05	0,05	0,01
70%	Residuos de jardín	4	2,80	1,12	1,68
70%	Madera	3	2,10	1,68	0,42
0%	Metales	2	0,00	0,00	0,00
30%	Otros	4	1,20	0,84	0,36
Totales		100	63,18	23,42	39,76

Humedad línea M.O. = **62,93%**

Tabla 3: Línea de rechazo.

Línea de rechazo	Componentes	Peso inicial de RSU que entran en planta (kg)	Peso de línea de rechazo (kg)	Peso seco (kg)	Peso agua (kg)
5%	Resto de comida	55	2,75	0,83	1,93
70%	Papel-Cartón	11	7,70	6,16	1,54
90%	Plásticos	9,5	8,55	8,12	0,43
95%	Vidrio	8,5	8,08	8,08	0,00
95%	Textiles	2	1,90	1,71	0,19
95%	Cuero	1	0,95	0,86	0,095
30%	Residuos de jardín	4	1,20	0,48	0,72
30%	Madera	3	0,90	0,72	0,18
100%	Metales	2	2,00	2,00	0,00
70%	Otros	4	0,80	0,56	1,08
Totales		100	34,83	29,51	5,32

Humedad línea de rechazo = **15,27%**

Tabla 4: Elemento que van a ser recuperados para su posterior reciclaje.

% Recuperación	Componentes	Peso (kg)	% en peso
50%	del papel-cartón	7,70	3,85
50%	de los plásticos	8,55	4,28
50%	del vidrio	8,08	4,04
30%	de los metales	2,00	0,60
Total			12,76%

Tabla 5: Resumen de los resultados obtenidos en el escenario 3.

Por cada 100 kg de RSU que entran a la planta

Material voluminoso	2,00 kg	
Subproductos para reciclaje	12,76 kg	→ Venderlos
Total, de rechazo primario	22,10 kg	→ Relleno Sanitario
Línea de M.O.	63,18kg	→ Compost

Tabla 6: Relación C/N de compost verde a procesar.

Componentes	Peso (kg)	Peso seco (kg)	C	N
Resto de comida	52,25	15,68	7,84	0,35
Papel – Cartón	3,30	2,64	1,16	0,033
Textiles	0,10	0,09	0,04	0,01
Cuero	0,05	0,05	0,01	0,00
Residuos de Jardín	2,80	1,12	0,54	0,028
Madera	2,10	1,68	0,84	0,053
Total	63,18	23,42	10,42	0,47

Relación C/N = **22,07**, con una Humedad = **62,93%**

Tabla 7: Fracción Orgánica Biodegradable de los RSU.

Componentes	Peso seco línea M.O (kg)
Comida	15,68
Papel-cartón	2,64
Textiles	0,09
Cuero	0,05
Restos Jardín	1,12
Madera	1,68
TOTAL	21,25

Tabla 8: Fracción Orgánica No Biodegradable de los RSU.

Componentes	Peso seco Línea de M.O (kg)
Plástico	0,90
Vidrio	0,43
Metales	0,00
Otros	0,84

Total	2,17
--------------	-------------

Tabla 9: Características del compost verde.

CARACTERÍSTICAS DEL COMPOST VERDE	
Peso	63,18%
Humedad	62,93%
Peso seco	23,42 kg
Peso agua	39,76 kg
Peso seco de la FOB	21,25 kg

Tabla 10: Pérdida del compost fermentado.

Pérdidas	% pérdida	Peso (kg)	Peso resultante	Unidad
Por evaporación	40	39,76	15,90	kg agua
Por transf. Biológica	30	21,25	6,38	kg materia seca
Total			22,28	kg

Tabla 11: Característica final del compost fermentado.

Característica final de compost fermentado			
Peso seco del compost fermentado	23,42 – 6,38	17,04	kg
Peso agua en compost fermentado	39,76 – 15,90	23,86	kg
Peso total del compost fermentado	17,04 + 23,86	40,90	kg

Tabla 12: Producción mensual de compost.

Producción mensual de compost		
Producción mensual compost bruto	$8407 \cdot 0,6318 = 5821,55$	ton/mes
Producción mensual compost fermentado	$8407 \cdot 0,4090 = 3768,94$	ton/mes
Producción mensual compost media	$0,5 \cdot (5821,55 + 3768,94) = 4795,20$	ton/mes

Tabla 13: Dimensiones del área de compostaje.

Dimensionamiento del área de compostaje		
Volumen de Compost Mensual	8749,20	m ³ /mes
Vol. Almacenado por Hileras	640	m ³ /hileras
Número de hileras al mes	14	hileras
Tiempo del compost	3+1= 4	meses
Número total de hileras	56	hileras
Superficie de un grupo de hileras	6880	m ²
Superficie total ocupada	27520	m ²

Tabla 14: Calculo del compost maduro y afino.

Característica final de compost fermentado			
Peso seco del compost maduro tras afino	$(17,04 - 2,17) * 0,9$	13,38	kg
Peso agua en compost maduro y afino	$23,86 * 0,9$	21,47	kg
Peso total del compost maduro afinado	$13,38 + 21,47$	34,85	kg
Producción diaria de compost	$280 * 0,3485$	97,58	t compost/día
Producción diaria de compost en m ³	$107,05 \div 0,5$	195,36	m³/día

2. Diseño de la nueva celda del vertedero de Soto

Tabla 15: Producción de RSU a gestionar en el municipio.

Datos generales de la producción de RSU		
Producción de RSU	1.04	kg/hab/día
Población actual	269451	habitantes
Producción mensual de RSU	8517	ton/mes
Producción Diaria de RSU	280	ton/día
Producción anual	102200	ton/año
Producción vida útil (10 años)	1022000	ton

Tabla 16: Volumen requerido según el tipo de residuo.

Volumen total necesario según el tipo de residuo		
Volumen total (baja densidad)	$1792982,46 + 304.000$	2096982,46 m ³
Volumen total (bala)	$1170675,83 + 304.000$	1474675,83 m ³
Volumen total (alta densidad)	$851666,67 + 304.000$	1155666,67 m ³

Tabla 17: Volumen de la producción anual a vertedero, según la densidad de los residuos.

Volumen de RSU según la densidad de los residuos		
Volumen de RSU (baja densidad)	$26847,94 / (0,6 * (1 - 0,05))$	47101,65 m ³
Volumen de RSU (bala)	$26847,94 / (0,9 * (1 - 0,03))$	30753,65 m ³
Volumen de RSU (alta densidad)	$26847,94 / (1,2 * (1))$	22373,28 m ³

Tabla 18: Vida útil de la nueva celda en el vertedero de Soto.

Vida útil de la nueva celda, según la densidad de los residuos		
Vida útil (baja densidad)	$896000 / 47101,65$	19 años
Vida útil (bala)	$896000 / 30753,65$	29 años
Vida útil (alta densidad)	$896000 / 22373,28$	40 años

Tabla 19: Análisis químico de los RSU a gestionar en la nueva celda del vertedero de Soto.

Componentes	Humedad %	Peso (kg)	Peso seco	Peso húmedo	C	H	O	N	S
CENIZAS									
Resto de comida	70	2,75	0,83	1,93	0,4125	0,06	0,2475	0,02	0,09
Papel - cartón	20	3,85	3,08	0,77	1,3475	0,1925	1,3475	0,0385	0,154
Plástico	5	4,28	4,06	0,21	-	-	-	-	-
Vidrio	0	4,04	4,04	0,00	-	-	-	-	-
Textiles	10	1,90	1,71	0,19	0,67	0,19	0,67	0,10	0,10
Cuero	10	0,95	0,86	0,10	0,28	0,09	0,28	0,09	0,09
Residuos de Jardín	60	1,20	0,48	0,72	0,23	0,02	0,02	0,012	0,02
Madera	20	0,90	0,72	0,18	0,36	0,045	0,27	0,0225	0,0225
Metales	0	1,40	1,40	0,00	-	-	-	-	-
Otros	30	0,80	0,56	0,24	-	-	-	-	-
Total		22,07	17,73	4,33	3,30	0,60	2,83	0,28	0,47

Tabla 20: Valores de CH₄, CO₂, NH₃, H₂O.

CH ₄	CO ₂	NH ₄	H ₂ O
2,60	7,97	5,70	1

Tabla 21: Volumen producido por cada 100 kg de RSU.

CH ₄	3,91	m ³
CO ₂	2,79	m ³
Total	6,70	m ³

Producción anual de biogás = **6846964 m³**

3. Calculo de la producción de lixiviados

Tabla 22: Producción de lixiviados en la nueva celda del vertedero de Soto.

Métodos	Esc. 2
Método Suizo	97,67 m ³ /día
Por modo de operación	118,40 m ³ /día
Método Bilitewski	139,29 m ³ /día

ANEXO 3

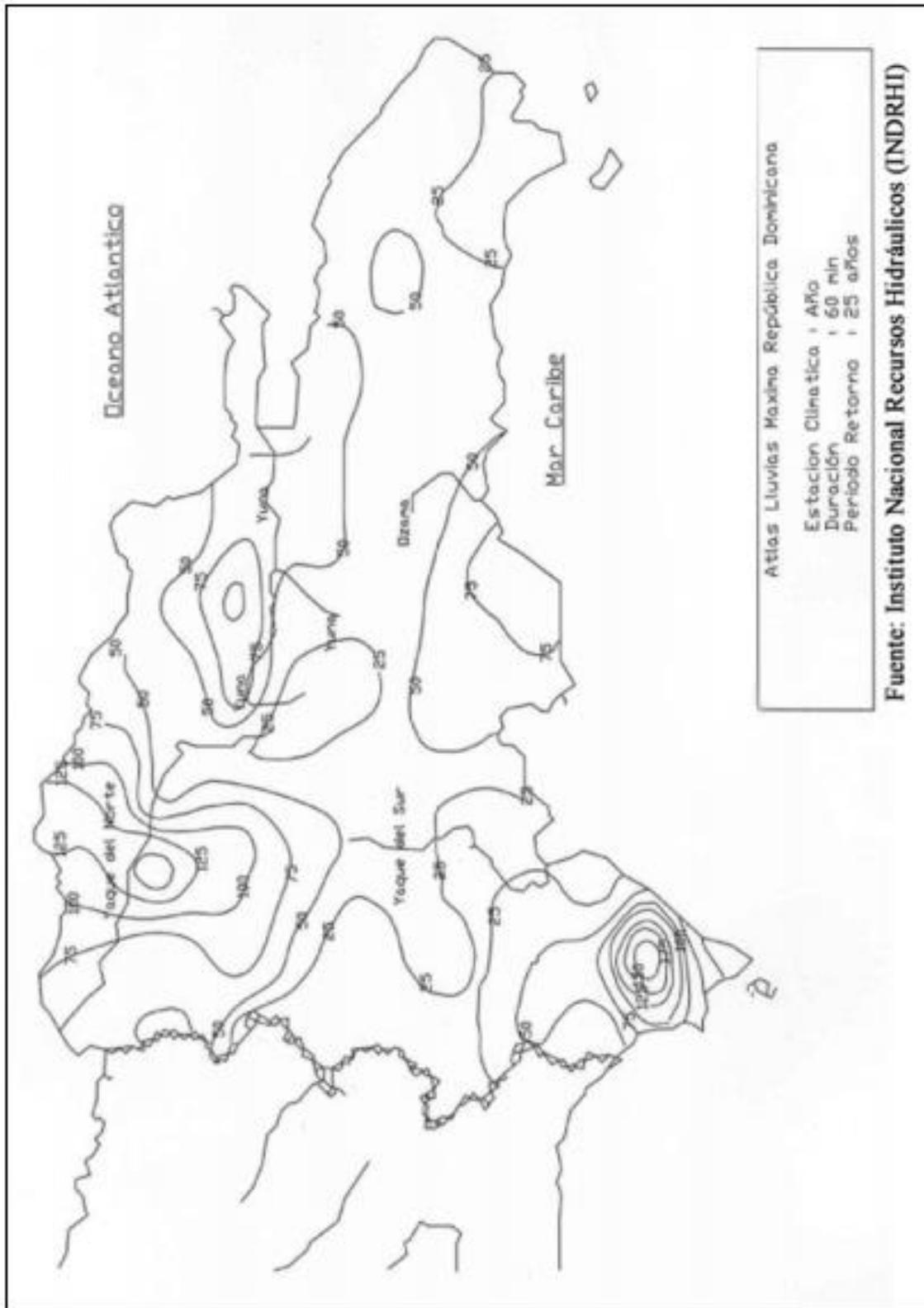


Figura: Atlas lluvia máxima en República Dominicana.