

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ELABORACIÓN DE UNA PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS POR PROCESAMIENTO MECÁNICO-BIOLÓGICO PARA LOS
CANTONES URBANOS DE HEREDIA**

PROYECTO DE GRADUACIÓN SOMETIDO A CONSIDERACIÓN DE LA ESCUELA DE
INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO FINAL PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

SEBASTIÁN ÁLVAREZ MÉNDEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2017

COMITÉ ASESOR

Proyecto de graduación presentado ante la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Sustentante

Sebastián Álvarez Méndez

Tribunal Examinador

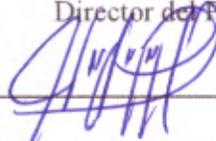


M.Sc. Randall Ramírez Loría.

Presidente del Tribunal

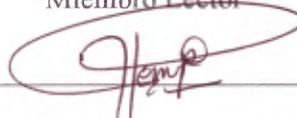
M.Sc. Bernardo Hernán Mora Gómez

Director del Proyecto



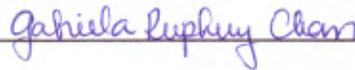
M.Sc. Alexander Vásquez Calvo

Miembro Lector



Ing^a. Jenny Andrea Calderón Castro

Miembro Lector



Dra. Gabriela Ruphuy Chan

Miembro invitado

Dedicatoria

A mi querida madre, que durante toda mi vida se esmeró por verme feliz. Que desde el cielo me está viendo orgullosa de todo lo que logre y de las grandes cosas que ella sabe que voy a realizar en el futuro.

Agradecimientos

A mi madre, quien en toda mi vida universitaria estuvo presente y dándome apoyo hasta en aquellos momentos que quería dejar todo botado.

A mi papá y a mi hermano que han sido un apoyo total ante las malas circunstancias de la vida.

A mi hermana que se convirtió en mi segunda madre y que siempre está pendiente del bienestar de sus hermanos menores.

A todos mis amigos de la carrera que sin ellos de verdad no hubiera logrado llegar hasta este punto.

A la Empresa de Servicios Públicos de Heredia, en especial a Ingrid Rodríguez, Daniela Segura, Don Pablo Soto y a todo el personal de la DAID, que, sin la inquietud de mejorar el cantón, este proyecto no se hubiera realizado.

Al profesor Bernardo Mora Gómez, que sin sus conocimientos y todas sus clases optativas, mi gusto por el área ambiental nunca hubiera incrementado tanto.

A la profesora Jenny Calderón Castro y el profesor Alexander Vásquez Calvo, que me conocen desde que empecé esta carrera y han sido un apoyo en cuanto a la revisión y comentarios de este proyecto.

Resumen

El documento adjunto se desarrolló con el fin de plantear un perfil de proyecto para el tratamiento de los residuos sólidos municipales de los cantones de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo por medio de tratamiento mecánico-biológico. Esto se realizó a solicitud de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia SA. La primera etapa del proyecto se enfocó en la cuantificación de los residuos municipales de dichos cantones y los estudios de composición. Esto se llevó a cabo con el fin de determinar el volumen de trabajo que podría tener la planta. Se implementaron conocimientos de separación mecánica, digestión anaerobia para lograr determinar la capacidad de operación de los distintos equipos que conforman la planta y así mismo determinar la capacidad instalada de la misma. Con la capacidad de material que puede recibir se efectuó una posible localización de la planta bajos diversos criterios. Se investigó posibles receptores del material valorizable y la posible tendencia de la oferta de la planta para los siguientes 10 años.

Bajo este marco se logró determinar que la planta podría tener una capacidad diaria de tratamiento de 182 toneladas por día para la planta de separación mecánica y 90 toneladas por día para la parte de tratamiento biológico. Dada la falta de datos para la caracterización de la fracción orgánica de los cantones del proyecto, se estimó con base en estudios de composición que la humedad promedio podría ser de al menos 80 %. Con base en estas suposiciones se recomienda el uso de un digestor de una sola etapa y que podía operar bajo condiciones secas y húmedas dependiendo del acondicionamiento de la materia prima.

Índice General

Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Índice General.....	xi
Índice de Cuadros	xiii
Índice de Figuras.....	xv
Capítulo I: Antecedentes del Proyecto.....	1
Alternativas de solución que se han planteado o desarrollado en Costa Rica	5
Tecnologías de incineración-gasificación Costa Rica.....	9
Situación actual de residuos en Costa Rica	11
Implementación de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos	11
Capítulo II: Descripción de alternativa de biodigestión anaerobia para residuos sólidos urbanos ...	17
Selección de material.....	17
Tratamiento biológico-mecánico en condiciones anaerobias	17
Tipos de biomasa.....	18
Biodigestor	19
Lodos del biodigestor	19
Parámetros de diseño	20
Agitación y mezclado	20
Variables que afectan el proceso.....	20
Usos del biogás	21
Biodigestores en Costa Rica	22
Características de la alternativa seleccionada	23
Capítulo III: Flujo de residuos sólidos urbanos de Heredia y Alajuela	27
Capítulo IV: Operaciones unitarias del paquete tecnológico de separación mecánica y digestión anaerobia (factores de diseño y condiciones de operación)	39
Unidad de pesaje	41
Área de recibimiento	41
Área de almacenaje.....	41
Bandas.....	41
Filtración por discos	42
Tambores rotatorios.....	42

Separación magnética.....	42
Separador por flotación.....	42
Separador Eddy	42
Triturador	43
Digestor.....	43
Dranco.....	45
Kompogas	45
Valorga	45
Biocel.....	46
Wasa	46
Deshidratado del compost.....	47
Purificación de biogás y motores de cogeneración	47
Capítulo V: Balances de masa y diseño dentro del proceso de tratamiento mecánico biológico de los RSM.	49
Balance de energía para el digestor.....	56
Lodos y lixiviado.....	56
Equipos necesarios para operar.....	57
Localización del proyecto.....	63
Área de influencia y análisis de sitio.....	69
Tendencia futura de la oferta de productos y servicios	70
Análisis de la producción histórica de RSM, proyecciones y análisis de crecimiento demográfico	76
Identificación y demanda de usuarios y beneficiarios e información sobre consumo	78
Estimaciones de consumo o empleabilidad para definir la tendencia de la demanda futura.....	82
Disposición de desechos del proceso de tratamiento mecánico biológico de los RSM	83
Capítulo VII: Evaluación preliminar de impacto ambiental mediante una matriz.	87
Capítulo VIII: Programación y organización del proyecto.	95
Capítulo IX: Estimación preliminar de inversión de capital inicial y costos de operación de forma anual del proyecto.	99
Capítulo X: Conclusiones y recomendaciones	104
Capítulo XI: Bibliografía	108
Capítulo XII: Nomenclatura.....	113
APÉNDICE	114
A. Muestra de Cálculo	118

Índice de Cuadros

Cuadro 1.1 Porcentaje de separación de residuos en un promedio de 200 000 viviendas por provincia (Ovares, El Manejo de los Residuos en Costa Rica, 2013).....	7
Cuadro 1.2 Panorama de incineración-gasificación en Costa Rica (Rodríguez, 2014).....	9
Continuación Cuadro 1.2 Panorama de incineración-gasificación en Costa Rica (Rodríguez, 2014).	10
Cuadro 2.1 Proyectos identificados en Costa Rica de biodigestión en el 2015 (Hernández, 2015).22	
Cuadro 3.1. Tipo y cantidad de residuos generados considerados como valorizables en la Municipalidad de San Isidro.....	28
Cuadro 3.2. Flujo de residuos sólidos (ton/mes) recolectados llevados al sitio de disposición final en la Municipalidad de San Isidro.	28
Cuadro 3.3. Toneladas de residuos sólidos recolectados llevados al sitio de disposición final 2015 en la Municipalidad de San Rafael.	29
Cuadro 3.4. Generación total de residuos en el cantón de Belén.	30
Cuadro 3.5. Cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos en el cantón de Belén.	30
Continuación Cuadro 3.5. Cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos en el cantón de Belén.	31
Cuadro 3.6. Toneladas de residuos sólidos recolectados llevados al sitio de disposición final 2015 en la Municipalidad de Barva.....	31
Cuadro 3.7. Cantidad de material valorizable llevados al sitio de disposición final 2015 en la Municipalidad de Barva.	32
Cuadro 3.8. Cantidad de residuos sólidos recolectados llevados al sitio de disposición final 2010- 2015 en la Municipalidad de Flores (Sánchez, 2016).....	32
Cuadro 3.9. Cantidad de material valorizable recolectado por la municipalidad de Flores (Sánchez, 2016).	33
Cuadro 3.11. Datos ponderados de la composición de residuos sólidos ordinarios generados en viviendas pertenecientes a la Municipalidad de Heredia (Municipalidad de Heredia, 2013).	34
Cuadro 3.12. Generación de RSU a partir de poblaciones estimadas en el 2015 según INEC para el proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos.....	35
Cuadro 3.14. Volumen de digestores para el tratamiento biológico para un tiempo de residencia de 30 días.	37
Cuadro 4.1. Operaciones unitarias para la separación de material valorizable de los residuos sólidos municipales (Pitchell, 2005).....	40
Cuadro 5.1. Generación de RSU a partir de poblaciones estimadas en el 2015 según INEC para el proyecto delimitado de aprovechamiento de residuos sólidos.	50
Cuadro 5.3. Volúmenes anuales y diarios de RSU y de fracciones orgánicas para el proyecto delimitado de aprovechamiento de residuos sólidos en el año 2015.	52
Cuadro 5.4. Porcentaje de composición promedio de materiales valorizables en las municipalidades de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo en el año 2015.	53
Cuadro 5.6. Estimación de producción de biogás y los componentes asociados al mismo en el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales de Heredia, San Rafael, San Pablo y San Isidro.	54
Cuadro 5.7. Lista de equipos para el proyecto de aprovechamiento de los residuos sólidos municipales de los cantones de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo.	62
Continuación Cuadro 5.7. Lista de equipos para el proyecto de aprovechamiento de los residuos sólidos municipales de los cantones de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo.	63

Cuadro 5.8. Matriz de criterio para escogencia de localización del proyecto.....	64
Continuación Cuadro 5.8. Matriz de criterio para escogencia de localización del proyecto.	65
Cuadro 6.1. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar el vidrio en Costa Rica en el año 2016. (Ministerio de Salud, 2016)	79
Cuadro 6.2. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar el papel y el cartón en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).	79
Cuadro 6.3. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar los metales en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).....	80
Cuadro 6.4. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar plásticos y aluminio en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).	80
Cuadro 6.5. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar residuos orgánicos en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).	81
Cuadro 6.6. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar residuos electrónicos, llantas y otros materiales en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).....	84
Continuación Cuadro 6.6. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar residuos electrónicos, llantas y otros materiales en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).	85
Cuadro 7.1. Matriz de importancia de impactos ambientales.	89
Cuadro 7.2. Mitigaciones de los impactos significativos a partir de una puntuación mayor a 25. ...	92
Cuadro 8.1. Programación en el tiempo del proyecto de tratamiento de RSU de los cantones urbanos de Heredia.....	95
Cuadro 9.1. Costos de inversión y operación para una planta DRANCO (Juniper for Renewables East, 2007).....	101
Cuadro 9.2. Costos de inversión y operación para plantas recuperadoras de materiales (Asian Development Bank, 2013).....	102

Índice de Figuras

Figura 1.1 Proyección de masa de residuos sólidos ordinarios en la Gran Área Metropolitana (GAM), fuera de la GAM y el total (Programa Competitividad y Medio Ambiente, 2008).....	2
Figura 1.2 Residuos generados en las provincias de Costa Rica en los últimos 30 años (Soto Córdoba, 2007).	3
Figura 1.3 Residuos recolectados/no recolectados en las provincias de Costa Rica en los últimos 30 años (Soto Córdoba, 2007).	4
Figura 1.4 Disposición de residuos sólidos en las provincias de Costa Rica (Soto Córdoba, 2007). 5	
Figura 1.5 Mapa con los porcentajes de cobertura de los servicios de recolección de residuos por cantón (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).	13
Figura 1.6 Mapa con el porcentaje de residuos recuperados mediante recolección selectiva por los gobiernos locales (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).....	14
Figura 1.7 Cantidad de residuos recuperados (en toneladas) y residuos enviados a los sitios de disposición final por las 81 municipalidades 2010 a 2014 (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).....	15
Figura 2.1 Capacidad instalada en biogás en Costa Rica (Hernández, 2015).....	23
Figura 4.1. Clasificación de digestores y tipos de tecnologías recomendados para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (Winter, Hahn, & Endar, 2009).....	43
Figura 4.2. Tipos de tecnologías recomendados para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (Biocel (A), Kompogas (B), Valorga (C), Shwirting (D), Dranco (E), Linde (F)) (Winter, Hahn, & Endar, 2009).	44
Figura 5.1 Diagrama de flujo de proceso para la separación mecánica de los residuos municipales de Heredia.....	60
Figura 5.2 Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia para la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales de Heredia.	61
Figura 5.1. Ubicación de terrenos en Santo Domingo de Heredia.....	66
Figura 5.2. Ubicación de terrenos en Ulloa de Heredia.	66
Figura 5.3. Ubicación de terrenos en Flores de Heredia.	66
Figura 5.4. Ubicación de terrenos en Belén de Heredia.	67
Figura 5.5. Ubicación de terrenos en Heredia Sur.	67
Figura 5.6. Ubicación de terrenos en Lagunilla de Heredia.	67
Figura 5.7. Ubicación de terrenos en Miraflores de Heredia.....	68
Figura 6.1. Proyección de producción de desechos orgánicos en el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia	70
Figura 6.2. Proyección de generación de desechos orgánicos en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia.....	71
Figura 6.3. Proyección de producción de cartón y papel en el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia.....	71
Figura 6.4. Proyección de generación del papel y cartón en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia.....	72
Figura 6.5. Proyección de producción de metal en el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia	72
Figura 6.6. Proyección de generación de metales en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia	73
Figura 6.7. Proyección de producción de vidrio en el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia	73

Figura 6.8. Proyección de generación de vidrio en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia 74

Figura 6.9. Proyección de producción de plástico para el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia 74

Figura 6.10. Proyección de producción de plástico en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia 75

Figura 6.11. Proyección de generación de materiales no metálicos en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia 75

Figura 6.12. Proyección de población para el cantón de Heredia del año 2010 hasta el 2015 según proyecciones del INEC. Elaboración propia con bases de datos de (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011) 76

Figura 6.13. Proyección de población para los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo del año 2010 hasta el 2015 según proyecciones del INEC. Elaboración propia con bases de datos de (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011). 77

Figura 6.14. Proyección de generación de RSM del cantón de Heredia del año 2015 hasta el 2025 con un índice constante de generación de residuos por habitante. Elaboración propia con bases de datos de (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011)..... 77

Figura 6.15. Proyección de generación de RSM para los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo del año 2015 hasta el 2025 con un índice constante de generación de residuos por habitante. Elaboración propia con bases de datos de (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011)..... 78

Figura 6.16. Valor total de exportación de abonos desde el año 2010 al 2015. Elaboración propia con base de datos de (Central America Data, 2016) 82

Figura 6.17. Valor total de importación de abonos desde el año 2010 al 2015. Elaboración propia con base de datos de (Central America Data, 2016)..... 83

Figura 8.1. Diagrama de barras con tiempos estimados de ejecución, simultaneidad y dependencia de actividades del proyecto de tratamiento de residuos sólidos de los cantones de Heredia, San Rafael, San Pablo y San Isidro. Elaboración propia 96

Figura 9.1. Costos de inversión inicial asociados a plantas de tratamiento de RSU para el año 2006 (Raport, 2008)..... 99

Figura 9.2. Costos de operación asociados a plantas de tratamiento de RSU para el año 2006 (Raport, 2008). 100

Figura 9.3. Costos de operación e inversión asociados a plantas recuperadoras de material (Chang & Pires, 2015)..... 103

Capítulo I: Antecedentes del Proyecto

La problemática del manejo de residuos sólidos es una situación que lleva más de 30 años en planes de solución en todo el país, este hecho ha ido empeorando con diversos factores poblacionales que se han ido desarrollando durante las últimas décadas. En este apartado se hará una revisión de los orígenes de esta situación y a partir de cuándo pasó a ser algo insostenible y por qué llegó a considerarse una necesidad la solución del mismo.

En 1981 se producían cerca de 500 000 toneladas métricas por año de desechos sólidos en Costa Rica, cifra que al presente ha aumentado considerablemente. En el relleno sanitario de Río Azul, que sirvió al área metropolitana, se recibieron más de 160 000 toneladas métricas de desechos sólidos en 1986. Esta última cifra no considera todos los desechos sólidos producidos en el área metropolitana, pues grandes cantidades se depositan en botaderos locales (Soto Córdoba, 2007).

Sobre la disposición de los desechos sólidos para el año 1990, el 37 % de las municipalidades sepultan sus desechos sólidos (rellenos sanitarios), 34 % los creman generalmente a cielo abierto, 21 % los depositan a cielo abierto sin ningún tratamiento (botaderos), y 8 % los depositan en ríos (Soto Córdoba, 2007).

El problema de los desechos sólidos urbanos contaminando el ambiente es grave y tiene varios orígenes y consecuencias. Se puede notar que los cuatro métodos municipales de disposición citados arriba representan diversos grados de contaminación ambiental. Aún, incluso el mejor relleno sanitario se ve plagado de malos olores, animales e insectos y contaminación. Es obvio también, que el problema comienza con el individuo y su desinterés personal en el manejo de sus propios desechos sólidos, lo que se evidencia en los desperdicios que se encuentran en las calles urbanas.

Existe además una creciente serie de desechos sólidos injustificados, producto del consumismo instaurado como parte de la globalización. Como ejemplo puede citarse los cubiertos y vajilla desechables empleados indiscriminadamente en ciertos restaurantes, y los envases desechables (Soto Córdoba, 2007).

Avanzando a inicios de milenio en Costa Rica persistían modelos de manejo de residuos sólidos que consistían en recolectar en forma indiscriminada los materiales, transportarlos y verterlos en rellenos sanitarios en el mejor de los casos, o bien en botaderos o vertederos. El sector municipal no lograba resolver los problemas de recolección y tratamiento de los residuos sólidos domiciliarios, siendo esta una deuda pendiente. Según informaciones del IFAM y las Municipalidades y luego de un análisis, se logró determinar que aún el 64 % de las Municipalidades del país disponen sus residuos sólidos

ordinarios en botaderos a cielo abierto, vertederos y vertederos semi controlados, no recubiertos, sin protección de aguas freáticas ni control de lixiviados (Soto Córdoba, 2007).

El 92 % de las municipalidades con elevada población urbana (más de un 70 % de población urbana) disponen sus residuos sólidos ordinarios en rellenos sanitarios, en tanto que el 83 % de las municipalidades con elevada población rural disponen sus residuos sólidos ordinarios en botaderos a cielo abierto, vertederos y en vertederos semi controlados. Se mantiene la costumbre de depositar los materiales peligrosos y patogénicos provenientes de las zonas residenciales, industriales y comerciales en los rellenos sanitarios o botaderos municipales y privados, provocando con esto una dispersión de contaminación indeseable. La mala disposición de los residuos ha provocado contaminación de aguas subterráneas con materiales tóxicos, el aumento de situaciones emergencias en periodos de alta precipitación debido a los estrangulamientos de drenajes con desechos sólidos, la contaminación visual y paisajística de los sitios de vertido, daños a los ecosistemas aledaños a los sitios de vertido, sin dejar de lado los ecosistemas no tan aledaños como las playas y mares) (Soto Córdoba, 2007).

En la Figura 1.1 se pueden observar proyecciones de los residuos a partir del 2006 hasta el 2022. Como los datos están en toneladas por día, al multiplicar estos valores por 365 se obtienen datos alarmantes, tomando como referencia el último año de estudio se observa un aumento a 13 000 000 toneladas de residuos en todo el país y 1 000 000 en la GAM, valores preocupantes puesto que para el 2004 solo en Río Azul llegaban 200 000 toneladas.

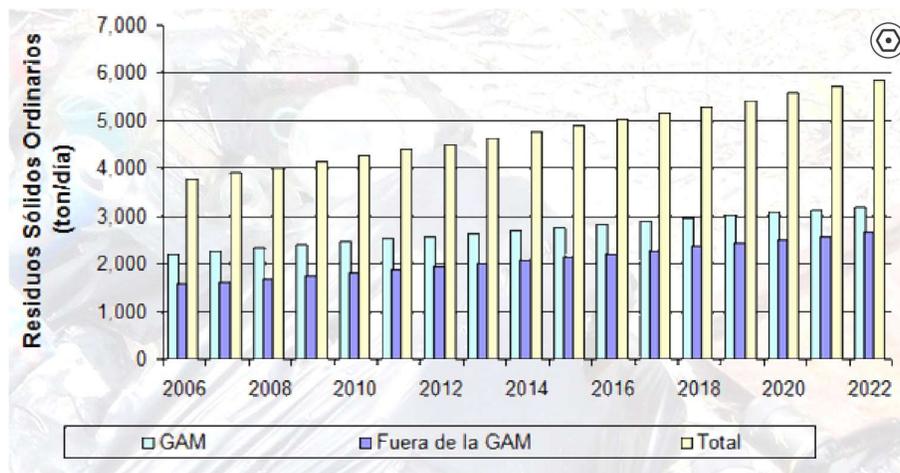


Figura 1.1 Proyección de masa de residuos sólidos ordinarios en la Gran Área Metropolitana (GAM), fuera de la GAM y el total (Programa Competitividad y Medio Ambiente, 2008).

Registros históricos de la municipalidad de San José indican que la generación de residuos sólidos en el año 1978 era de aproximadamente 60 000 toneladas métricas, y para el año 2006 dicha generación incrementó a más de 120 000 toneladas métricas.

En el ámbito nacional, el comportamiento en la generación y recolección de residuos sólidos a finales del año 2006 en cada provincia muestra marcadas diferencias. Como puede verse en la Figura 1.2, la provincia de San José es la que presenta un mayor índice de generación de residuos sólidos por habitante (0,945 kg/persona/día), si consideramos que en la provincia habitaban 1 496 898 habitantes, esto implica una generación total de residuos del orden de 516 145 toneladas al año. La provincia con menor índice de generación es Limón con 0,65 kg/persona/día, con una generación de 92 947 toneladas al año. Por su parte Heredia y Alajuela perfilan con una generación de residuos sólidos cercanas al 0,7 kg/persona/día, mostrando así que son provincias con un alto índice de generación de residuos, comparado con el resto de provincias del país (Soto Córdoba, 2007).

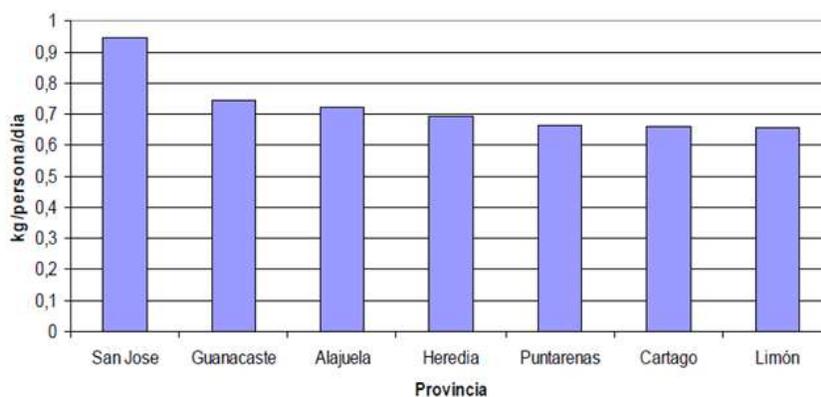


Figura 1.2 Residuos generados en las provincias de Costa Rica en los últimos 30 años (Soto Córdoba, 2007).

Al determinar el porcentaje de residuos sólidos ordinarios no recolectados por provincia, se observa que en Guanacaste no se recolecta la mitad de los residuos sólidos producidos, lo cual pone en serio riesgo la actividad turística y la salud de los habitantes, por su parte, en la provincia de Limón solamente el 67 % de los residuos sólidos son recolectados (Soto Córdoba, 2007).

Se puede observar que el cantón de Heredia se perfila como una provincia modelo en lo que respecta a la recolección de residuos sólidos, seguida por la provincia de San José y Alajuela.

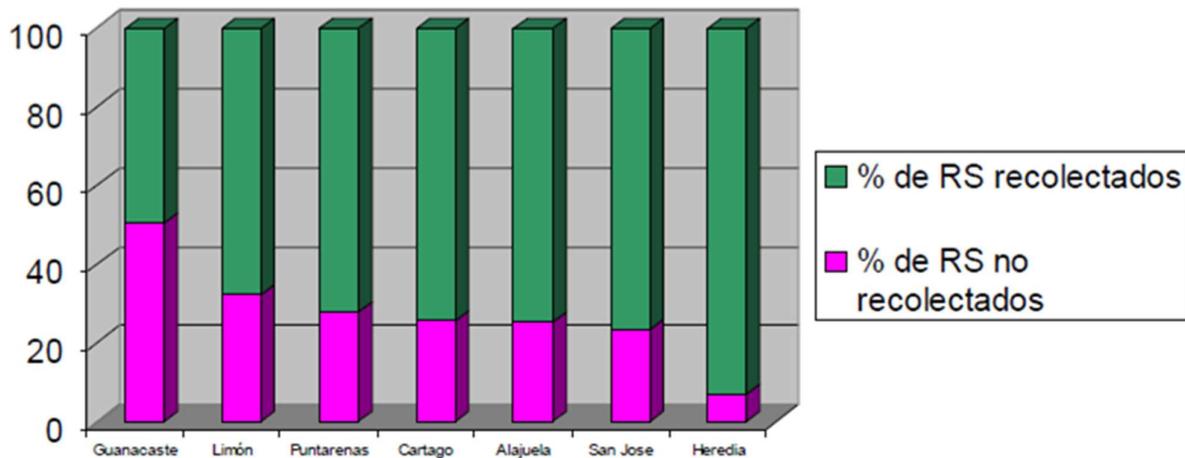


Figura 1.3 Residuos recolectados/no recolectados en las provincias de Costa Rica en los últimos 30 años (Soto Córdoba, 2007).

Como puede verse en la Figura 1.4 en la provincia de Heredia se están tratando apropiadamente más del 90 % de los residuos sólidos recolectados, mientras que las provincias costeras de Guanacaste, Puntarenas y Limón prácticamente no están tratando los residuos sólidos.

Por estimaciones visuales del gráfico anterior, se infiere que la provincia de San José no recolecta casi el 40 % del total de los residuos sólidos generados. Alajuela tiene un gran margen de mejora, ya que casi el 20 % de los residuos no recolectados pertenecen a esta provincia. De la misma forma, con base en la Figura 1.4 el porcentaje asociado a disposición en botaderos es considerable, comparado con provincias como Heredia y San José donde los porcentajes de disposición en botaderos son menos del 5 %.

Según las revisiones de los planes anuales operativos de las municipalidades en el país realizados por Silvia Soto, el eje correspondiente al manejo de los desechos sólidos ronda entre un 15 a 20 % del presupuesto municipal total, por lo que la inversión adicional en este rubro resulta prácticamente imposible para la mayoría de las municipalidades (Soto Córdoba, 2007).



Figura 1.4 Disposición de residuos sólidos en las provincias de Costa Rica (*Soto Córdoba, 2007*).

De los datos anteriores se nota como la cantidad de material recolectado se limita a una disposición en rellenos sanitarios y botaderos, y una parte considerable ni siquiera llega a ser recolectada.

Alternativas de solución que se han planteado o desarrollado en Costa Rica

Como se vio planteado en apartados anteriores, en el país existe un descontrol por parte de la deposición y manejo de los residuos sólidos municipales. A lo largo de los últimos años se han venido implementando medidas, leyes, planes que regulen todo lo asociado a los residuos sólidos en Costa Rica. Se va a realizar un repaso por las alternativas planteadas o ya desarrolladas. Con afán de mantener un orden cronológico, se van a mostrar las leyes y regulaciones conforme fueron suscritas y acatadas por los poderes de la república.

Con la publicación de la Ley para la Gestión Integral de Residuos en julio del 2010, Costa Rica obtiene un marco jurídico moderno en un tema crucial en aspectos no solo de salud, sino que también en protección del ambiente e inclusive en aspectos socio económicos del ser costarricense (Ministerio de Salud, 2011).

Parte de este marco jurídico ha hecho que en el país se implanten métodos de revalorización para ciertos desechos, mejoramiento de la recolección de desechos, concientización en la población general, mediante campañas informativas y otras soluciones que buscan minimizar el aumento desmedido en generación de residuos municipales.

Los intentos de solución antes y después de esta ley está basada fundamentalmente en los programas de reciclaje, aunque actualmente en el país existen otros métodos de tratamiento o existen propuestas que quieren mejorar esta problemática, a continuación, se hará un repaso y las estadísticas de que evidencian el éxito parcial de estos intentos de solución.

Reciclaje en Costa Rica

Lo que respecta a los programas de reciclaje, para el año 2010 se habían localizado muchos grupos comunales en pro de la recuperación de materiales valorizables. A la fecha no existe un detalle nacional que identifique todas las iniciativas de reciclaje comunal. Existen algunas informaciones fragmentadas, por ejemplo, la empresa Vical reporta cerca de 411 grupos recolectores que incluyen escuelas, colegios, negocios privados (bares, comercios), centros de acopio, hoteles, etc. Por su parte, la ONG Terranostra en su página informa de 62 centros de acopio ubicados en diferentes partes del país. Y la fundación CEPRONA informa en su página Web de 64 centros comunitarios de recuperación de materiales, 67 empresas recuperadoras y 42 empresas recicladoras (Ministerio de Salud, 2011).

En estos momentos uno de los centros con mayor flujo de materiales es el Centro de Acopio en la Violeta de Frailes de Desamparados, que fue inaugurado el 18 de mayo del 2010, proyecto conjunto entre la Municipalidad de Desamparados y la Asociación de Mujeres pro bienestar de la Violeta y apoyado por el Programa CYMA. Por su parte el sector municipal en atención a la nueva Ley GIR debe contar con oficinas ambientales, estructuras para la recolección por separado, planes de gestión de residuos sólidos, reglamentos específicos para la gestión integral de los residuos sólidos y es deseable que para poder construir todas estas actividades soporten sus datos en estudios de generación y composición de materiales. A fin de tener un panorama del avance municipal se realizó una consulta telefónica entre los meses de abril y junio del 2011 a todas las Municipalidades del país, además de recolectar información en el Ministerio de Salud y el programa CYMA a fin de identificar las Municipalidades que cuentan con la mayor cantidad de las actividades demandadas en la Ley y adicionalmente que cuenten con estudios de generación y composición de materiales (Ministerio de Salud, 2011).

A la fecha en el país solo 19 cantones (23 % de los cantones del país) realizan recolecciones de residuos separando algunas fracciones para su posterior recuperación y reciclamiento o reúso. El cantón de Jiménez cuenta con recolección separada hace 5 años, por su parte la Municipalidad de Alvarado implementó esta recolección hace durante el año 2010, otros cantones que cuentan con recolección separada son Desamparados, Escazú, San Rafael de Heredia, Santa Ana, Montes de Oca, Esparza, Curridabat, Parrita, Perez Zeledón (Ministerio de Salud, 2011).

La situación actual entre las provincias céntricas del país denota distintas situaciones, por un lado, Alajuela cuenta con la menor recolección de residuos a través de un camión; esto se debe a un mayor porcentaje de casas en zona rural que San José, Heredia y Cartago. De hecho, a nivel nacional, Alajuela provee una cuarta parte de los residuos enterrados o botados en huecos, así como un 22 % de los que son quemados. Pero los alajuelenses han avanzado en separación de residuos, al punto que casi 100.000 hogares separan plástico, vidrio, aluminio y restos de comida. Un caso sobresaliente es Zarcero, con un 67,5 % de las residencias que separan plástico, vidrio y aluminio, según el Censo Nacional 2011. Sus números en restos de comida y papel son también plausibles, con un 65,4 % y un 62,4 %, respectivamente (Ovares, El Manejo de los Residuos en Costa Rica, 2013).

En Heredia si no fuese por un solo cantón, que se sale de la norma, las estadísticas serían prácticamente perfectas en cuanto a la disposición de los residuos. Aun así, a los heredianos les alcanza para posicionarse como los más sobresalientes del Valle Central y del país como un todo. En 9 de los 10 cantones las formas anómalas de gestionarlos son casi nulas. Incluso, San Rafael, San Isidro, Flores y San Pablo se fueron invictos en los ítems “La botan en un lote baldío” y “La botan en un río, quebrada o al mar”. Heredia sobresale en plástico, vidrio y aluminio, pues casi la mitad de las casas los separa del resto de materiales. De hecho, los cantones de Heredia son bastante parejos en sus calificaciones, salvo Sarapiquí. En este cantón, tan solo un 58 % de las viviendas hace uso del camión recolector, mientras que son 3.585 las que queman sus residuos, es decir, un 93 % de las incineraciones de toda la provincia. Por añadidura, las proporciones más bajas de separación de plástico, vidrio, aluminio y papel son de este cantón (Ovares, El Manejo de los Residuos en Costa Rica, 2013).

Cuadro 1.1 Porcentaje de separación de residuos en un promedio de 200 000 viviendas por provincia (Ovares, El Manejo de los Residuos en Costa Rica, 2013).

Provincia	Tipo de Residuos		
	Plástico, Vidrio y Aluminio (%)	Papel (%)	Restos de Comida (%)
San José	45	40	38
Alajuela	41	34	40
Cartago	39	33	34
Heredia	48	32	36

Tecnologías de compostaje y digestión en Costa Rica

Además del reciclaje existen iniciativas como el compostaje y la biodigestión, son una alternativa a evaluar dentro de la búsqueda de soluciones a la emisión de gases de efecto invernadero del país. Las experiencias actuales respecto al compostaje de la parte orgánica de los residuos domiciliarios son a nivel de proyectos piloto. Ejemplos de este tipo de proyectos son el desarrollado en la Universidad de la EARTH en Guápiles y también la experiencia desarrollada por la municipalidad de Jiménez. En Jiménez, además de realizar recolección separada de inorgánico y otros residuos, también se realizan compostaje de material orgánico (10-12 toneladas semanales) mediante el uso de microorganismos eficientes con el que generan lombricompost (Ambero IP, 2007).

A parte de la EARTH existen otros establecimientos que aprovechan la materia orgánica para incentivar la reducción de residuos sólidos como la empresa Porcina Americana ubicada en Coris de Cartago, esta con ayuda de los digestores genera el 100% de la energía eléctrica que consume.

La Universidad de Costa Rica ha impulsado cursos impartidos en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEFBM), con el apoyo de la Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional, fue impartido en línea en una primera etapa, y luego durante una semana en forma presencial, por especialistas de la Academia de Energías Renovables de Berlín (RENAC) y de la empresa AD Solutions UG, ambas de Alemania (Marín, 2014). Hasta ahora el tema del biogás en Costa Rica se ha reducido a un uso muy limitado por parte de los agricultores, especialmente productores de leche, quienes, con la boñiga y la orina de las vacas en un biodigestor, producen calor para cocinar y calentar el agua o la leche para la fabricación de quesos. A diferencia de Costa Rica, en Alemania con la promulgación de una legislación sobre bioenergía en 1999, se han instalado cerca de ocho mil plantas de biogás con diversas aplicaciones y en las que se tratan distintos tipos de residuos sólidos y sustratos (Marín, 2014).

Carsten Linnenberg, consultor de AD Solutions UG, quien ya planificó y construyó una planta de biogás para la empresa Porcina Americana de Cartago, la experiencia acumulada en su país, le permite pensar que este tipo de tecnología es fácilmente replicable en Costa Rica, donde hasta hoy existen muy pocas plantas de biogás y muchas de residuos orgánicos y estiércol de vacas y cerdos inutilizados (Marín, 2014). En la parte industrial si se realiza el compostaje para algunos de los residuos orgánicos generados. Un detalle los residuos orgánicos industriales más relevantes y de su compostaje se encuentran en el El mercado para el abono orgánico o compost que se puede generar con este proceso no está desarrollado y no existen datos sobre el potencial de demanda ni de los precios estimados (Ambero IP, 2007).

Tecnologías de incineración-gasificación Costa Rica

En el país desde el año 2010, con la aprobación de la Ley gestión integral de residuos sólidos, sigue pendiente la autorización para el tratamiento de residuos sólidos municipales mediante tecnologías avanzadas como la incineración, gasificación, pirólisis entre otros. Pero muchos entes municipales evalúan utilizar esta opción, pues lo que se busca con estas tecnologías es minimizar el depósito de material valorizable y no valorizable en botaderos clandestinos o rellenos sanitarios que terminaron su vida útil, pero siguen recibiendo material. Actualmente en el país existen muchas consultas y disponibilidad de empresas extranjeras para implementar sus equipos en sustitución de los tradicionales rellenos sanitarios y vertederos no controlados. A continuación, se detalla una lista con el panorama de estas tecnologías en en el país y las municipalidades que han cotizado o considerado la idea de uso. El 11 de junio del 2014, el Gobierno firmó un decreto declarando una moratoria nacional para las actividades de transformación térmica de residuos sólidos ordinarios, hasta que se comprobara que dichas actividades no causarán impactos negativos a la salud y al ambiente (Villalobos, 2015).

Cuadro 1.2 Panorama de incineración-gasificación en Costa Rica (Rodriguez, 2014).

Fecha	Empresa y Tecnología	Municipalidad
24/01/2014	The Hoskinson Group, Gasificación de DSM Planta Gasificadora de desechos ordinarios.	Coopeguanacaste, Carrillo
09/2012	Bioenergía Tica, subsidiaria de la trasnacional Urban Partners Ltd., Fábrica de pellets en base de DSM y en el futuro planta de incineración	Cañas, Tilarán, Bagaces.
	Green Way Solutions. Incineración (“Biopower“) de DSM (técnica de carbonizador).	Las Juntas de Abangares. Goicoechea
29/10/2012	Cementera Cemex. Incineración Coopeolica, con tecnología de disociación molecular termocatalítica.	Colorado de Abangares Santo Domingo de Heredia.

Continuación Cuadro 1.2 Panorama de incineración-gasificación en Costa Rica (Rodríguez, 2014).

Fecha	Empresa y tecnología	Municipalidad
7/12/2011	Grupo-RAD, Propuesta: 75% del material que se recibe será incinerado de forma controlada, el 25% restante será material para el reciclaje. Las cenizas restantes, también llamadas áridos, representan entre un 15%-20% del tonelaje procesado, el cual puede ser utilizado para efectos de construcción	
06/2012	Federación Metropolitana de Municipalidades firmó convenio con el ICE para producción de energía a partir de los residuos sólidos. Se desconoce tecnología a utilizar.	FEMETROM firmó convenio y promueve fuertemente la incorporación de las 81 municipalidades.
07/2013	Renewable Power Holdings Incorporated, utiliza gasificación térmica. Formó un consorcio público-privado en diciembre de 2012 llamado EcoCiclo Los Mangos que un consorcio de compañías que se han unido para diseñar, construir y operar una instalación de Reciclaje, Conversión de Desechos y Generación de Energías Limpias.	Adyacente a Los Mangos, Alajuela.
2014	Wastelectric, Gasificación	Municipalidad de Alajuela

Situación actual de residuos en Costa Rica

Algunos de los rellenos sanitarios o vertederos municipales tienen proyectada la finalización de su ciclo operativo en el año 2017 y la gran mayoría ya excedieron su capacidad y todavía hoy en día siguen recibiendo residuos sólidos municipales. Esta situación es preocupante debido a que la mayoría de los rellenos o botaderos que necesitan un cierre técnico, son los que reciben los residuos de la GAM.

En el caso de los cantones de Heredia y Alajuela y la disposición de sus residuos, estos se enfocan en su mayoría en la recolección y disposición en rellenos sanitarios o vertederos como se expuso anteriormente. Para el caso de Heredia los vertederos situados en Santo Domingo, San Pablo, San Rafael y el Parque Tecnológico Ambiental de la Uruca (que recibe parte de los residuos del cantón central mencionado) han agotado su capacidad de recibir materia y el cantón está en busca de alternativas para disponer sus residuos. Por su parte Alajuela vive la misma problemática, ya que el Relleno Sanitarios Los Mangos agotó su área de trabajo. Actualmente el cantón cuenta con el aval de Setena para la construcción de un nuevo relleno sanitario en Bajo Pital en el límite suroeste del cantón de Alajuela (Bosque, 2016).

Implementación de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos

A partir de la publicación de la Ley se dio un importante avance en cuanto a la adopción de algunas obligaciones municipales incluidas en la misma, sin embargo, con el paso del tiempo, esta aceleración inicial ha vuelto a disminuir.

Para el año 2013 según el informe de la Contraloría General de la República, el Ministerio de Salud, aunque cuenta con el Plan de Gestión de Residuos y la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos, los mismos no están vinculados con el Plan Estratégico Institucional 2011-2015 ni con el presupuesto institucional. Tampoco se cuenta con el reglamento de la ley, ni existen los reglamentos técnicos en los temas de funcionamiento de los rellenos sanitarios, tratamiento de residuos de manejo especial y peligroso, límites máximos permitidos de emisiones de contaminantes en suelos, por lo que prácticamente no se ha podido tener control en estos temas (Soto S. , A 2 años de la Ley Gestión Integral de Residuos, 2013).

En Costa Rica se continúa con la tendencia de utilizar los rellenos sanitarios y botaderos para la disposición de los residuos sólidos municipales (RSM), el uso de los primeros bajo condiciones controladas y la debida fiscalización es una alternativa viable tanto económica como ambientalmente, sin embargo, el uso de los botaderos es una clara violación a la normativa ambiental. Los rellenos

sanitarios en el país están agotando su vida útil como se expuso en la sección inicial de este apartado, y se prevén conflictos sociales intensos en el caso de la instalación de nuevos servicios sanitarios, por lo que algunos alcaldes han visto la oportunidad de migrar a otros tipos de tecnologías (Soto S. , A 2 años de la Ley Gestión Integral de Residuos, 2013).

Ante la dificultad inminente del rechazo social por la instalación de nuevos rellenos sanitarios, se han presentado en los últimos dos años muchas empresas que exhiben soluciones emergentes para tratar los residuos sólidos. Dichas soluciones abarcan el espectro de las tecnologías como el uso de plasma, pirólisis, biogasificación, etc. Las cuales por sus características incluyen altos costos de inversión, operaciones de elevada dificultad y peligrosidad en caso de fallos, y elevados riesgos de generación de subproductos indeseables si las condiciones de trabajo no son lo suficientemente bien fiscalizadas y operadas (Soto S. , A 2 años de la Ley Gestión Integral de Residuos, 2013).

Para el año 2016 en 70 de los 81 gobiernos locales, existían algunas comunidades que no tienen acceso al servicio de recolección de residuos municipal. De acuerdo con los datos suministrados por los 81 gobiernos locales, se estima que son 87 distritos de 481, los que no tienen acceso a dicho servicio municipal. En consecuencia, los habitantes de estas comunidades, por lo general, recurren a utilizar métodos o prácticas no controladas para disponer de sus residuos, tales como: enterrarlos, quemarlos o botarlos en un lote baldío o en cuerpos de agua, lo que deviene en un eventual perjuicio del ambiente, la salud y un deterioro del paisaje natural (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

Por otra parte, a pesar de que existen esfuerzos orientados a recolectar los residuos de manera selectiva (aluminio, cartón, vidrio y materiales similares) por parte de algunas corporaciones municipales, lo cierto es que el acceso y la frecuencia de un servicio que le garantice a los ciudadanos una recolección de este tipo, sigue siendo limitado, ya que en la mayoría de gobiernos locales la recolección selectiva no se realiza, se carecen de datos para demostrar el avance, solo ofrecen campañas de recolección ocasionales o los porcentajes de recuperación de residuos son poco significativos (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

Estas situaciones incidieron para que, en el año 2014, el porcentaje nacional de recuperación de residuos municipal destinados al reciclaje y compostaje, no superara el 1,26 %. Esto provoca que se desperdicien los residuos como recurso económico, un agotamiento más acelerado de los sitios de disposición final, incrementos en el costo del servicio de disposición de residuos hasta de un 118 %, el desaprovechamiento de oportunidades de empleo, y se continúe motivando a los habitantes a enviar sus residuos mezclados en una bolsa.

Lograr implantar un sistema de recolección eficaz en todos los cantones, es un tema pendiente por

parte de 70 de las 81 municipalidades del país según la Contraloría General de la República. A continuación, se detalla en la Figura adjunta un mapa con los porcentajes de cobertura de servicio de recolección de residuos sólidos por cantón.

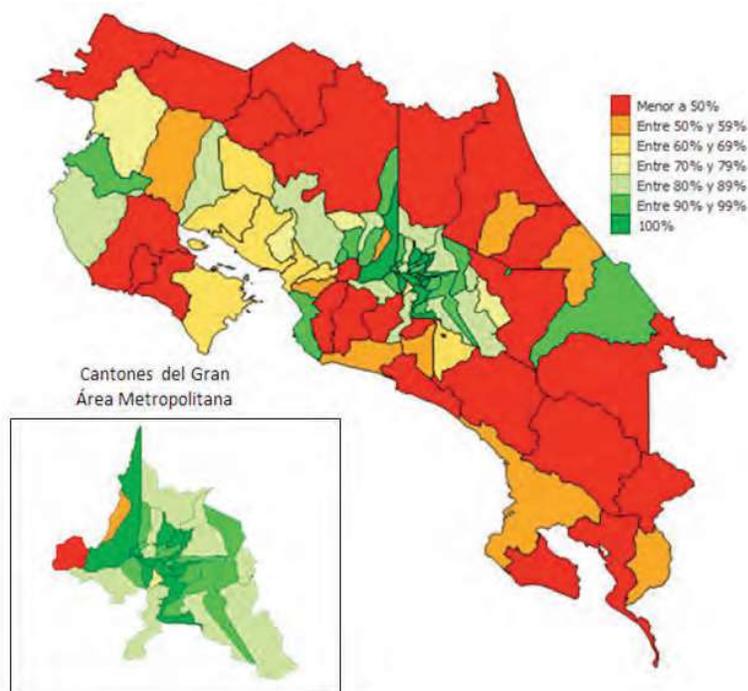


Figura 1.5 Mapa con los porcentajes de cobertura de los servicios de recolección de residuos por cantón (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

Como se puede observar los cantones que tienen mayor recolección de residuos sólidos se ubican en la GAM. En la zona norte del país y en el Pacífico Sur del país y algunas zonas de Guanacaste se observan porcentajes menores al 50 %, aspecto preocupante debido a que ya van 6 años desde que se implanto la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos.

La cobertura promedio del servicio en las 31 municipalidades del Gran Área Metropolitana (GAM) es de un 94 %, mientras la cobertura promedio de las 50 municipalidades ubicadas fuera del GAM es de un 54 %. En otras palabras, se observa, en términos generales, una brecha entre los porcentajes de cobertura del servicio de recolección de residuos de las municipalidades ubicadas en estas dos áreas del país. De la misma forma aquellas municipalidades que cuentan con porcentaje de recolección menor al 50 %, la forma en que tratan sus residuos son enterrándolos o quemándolos, este tratamiento asciende a más del 53 % del total de los residuos sólidos de estos municipios (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

La Ley para la Gestión Integral de Residuos, dispuso en su artículo 8 que la municipalidad debe garantizar que en su territorio se provea del servicio de recolección de residuos en forma selectiva para todos los habitantes. Cinco años después de la emisión de la citada norma, los esfuerzos logrados

por las administraciones municipales para establecer dicha recolección selectiva, se traducen a que solo 39 municipalidades brindan recolección selectiva en la fuente generadora, de forma que realizan esta recolección de un modo diferenciado e individualizado en las casas, comercios e instituciones públicas de una parte o todo el cantón; o bien, mediante algún sistema alternativo (En 33 de esas 39 municipalidades se estima que atienden en promedio un 38 % de las viviendas de sus cantones. En las seis municipalidades restantes no se tiene datos sobre la cobertura de tal servicio). Por el contrario 42 municipalidades no realizan recolección selectiva en la fuente generadora, En 13 gobiernos locales, si bien no se brinda ese servicio individualizado, se han venido realizando esfuerzos mediante campañas de recolección en un punto determinado. En 29 gobiernos locales, no se realiza ningún tipo de recolección selectiva (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

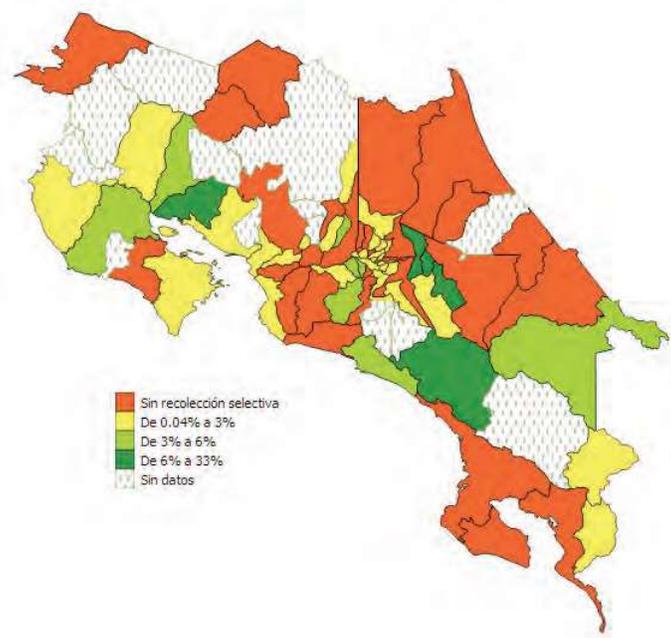


Figura 1.6 Mapa con el porcentaje de residuos recuperados mediante recolección selectiva por los gobiernos locales (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

En el mapa anterior se puede apreciar, que 29 gobiernos locales no realizan una recolección selectiva de ningún tipo como se mencionó anteriormente. Además, se observa que en 14 no se tienen datos sobre los porcentajes de recuperación de residuos. Por otro lado, se observa que a nivel nacional predominan en las municipalidades los porcentajes de recuperación de residuos menores a un 6 % (25 cantones en amarillo y 8 en verde claro). Por otra parte, las Municipalidades de Alvarado, Abangares, Pérez Zeledón, Jiménez y Oreamuno, revelan porcentajes de recuperación de residuos más alentadores en lo que se refiere a la recolección selectiva, los cuales se ubican en el rango de 6 % a 33 % (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

Con estas cifras de recolección se reconocen los esfuerzos realizados por aquellas municipalidades

que avanzan hacia una recolección selectiva en sus cantones, aún la cantidad de residuos recuperados a nivel nacional para ser enviados al reciclaje, compostaje u otra técnica de valorización, no es tan significativa en comparación con la cantidad de residuos que han sido enviados en los últimos cinco años por las municipalidades a los rellenos sanitarios y vertederos municipales (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

La cantidad de residuos recuperados por los 81 gobiernos locales en el 2014, creció alrededor de 9 mil toneladas (casi tres veces más) en comparación con lo que se recuperó en el 2010. No obstante, se aprecia también que del 2010 al 2014, los residuos enviados a los sitios de disposición final crecieron en 263,5 mil toneladas. Particularmente se observa que, de los residuos recolectados por los 81 gobiernos locales en el 2014, únicamente se recuperó el 1,26% de ese total. Es decir, de 961,5 mil toneladas recolectadas en ese año, se recuperaron para la valorización 12,1 mil toneladas. Las restantes 949,4 mil toneladas se enviaron a rellenos sanitarios y vertederos (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).



Figura 1.7 Cantidad de residuos recuperados (en toneladas) y residuos enviados a los sitios de disposición final por las 81 municipalidades 2010 a 2014 (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2106).

Capítulo II: Descripción de alternativa de biodigestión anaerobia para residuos sólidos urbanos

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno, que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. La materia prima preferentemente utilizada para ser sometida a este tratamiento es cualquier biomasa residual que posea un alto contenido en humedad, como restos de comida, restos de hojas y hierbas al limpiar un jardín o un huerto, residuos ganaderos, lodos de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas y aguas residuales domésticas e industriales (Lorenzo & Obaya, 2005).

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 % a 70 %) y dióxido de carbono (30 % a 50 %), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí. La cantidad de gas producido es muy variable, aunque generalmente oscila alrededor de los 350 L/kg de sólidos degradables, con un contenido en metano del 70 %. Aunque su potencia calorífica no es muy grande, puede sustituir con ventaja al gas de ciudad, utilizándose en aplicaciones tan diversas como: fuente de calor (cocina, alumbrado), combustión en calderas de vapor para calefacción y combustible de motores acoplados a generadores eléctricos. Por otro lado, la masa restante biodegrada por las bacterias puede utilizarse como abono para la fertilización de suelos, así como en alimentación animal (Lorenzo & Obaya, 2005).

Selección de material

Previo a la etapa de digestión, los materiales tienen que sufrir una clasificación previa. En este paso generalmente se utilizan tecnologías manuales, como bandas de transporte que tienen a personas clasificando material recuperable como lo es plástico, vidrio, papel, tetrabrik entre otros. Además de esto se utilizan rodillos magnéticos que eliminan restos metálicos que puedan afectar el rendimiento de etapas posteriores (Castells, 2012). Aquellos materiales que no son recuperables son desechos y generalmente son llevados a rellenos sanitarios.

Tratamiento biológico-mecánico en condiciones anaerobias

La técnica anaerobia para el procesamiento de los desechos agrícolas, animales y urbanos orgánicos, es una forma conveniente, económica y efectiva para tratar estos desechos y explorar formas nuevas de energía. La fermentación anaerobia consiste en tres etapas principales, independientes de la

composición específica del desecho y del tipo de digester, las cuales se mencionan a continuación:

La primera etapa se conoce como la hidrólisis o periodo de licuefacción donde se da la hidrólisis externa de la materia orgánica compleja debida a la acción de las enzimas extracelulares excretadas por bacterias fermentativas (Shah Y. T., 2015).

La segunda etapa es un periodo de acetogénesis; se lleva a cabo por las bacterias acetogénicas, las cuales consumen los productos de la primera etapa para producir compuestos micromoleculares simples tales como hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. Por medio de este proceso se evita la acumulación de ácidos grasos volátiles mayores, que inhiben la última etapa (Shah Y. T., 2015).

La tercera etapa se conoce como periodo productor de metano o metanogénesis, en esta etapa se utilizan dos tipos de bacterias metanogénicas que requieren de un ambiente estrictamente anaerobio.

En la primera clase figuran bacterias como *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanosarcina* y *Methanococcus*; las cuales reducen el dióxido de carbono a metano y en la segunda clase se encuentran bacterias como *Methanosarcina* y *Methanotherix* las que descarboxilan el ácido acético a metano y dióxido de carbono (Ziemiński & Frac, 2012).

Las reacciones se muestran a continuación:



La presencia de microorganismos productores de hidrógeno en la última etapa es fundamental ya que éste debe estar presente para desplazar la reacción del dióxido de carbono hacia la derecha y mantener la producción de metano (Shah, Mahmood, & Pervez, 2014).

Tipos de biomasa

Existen muchos materiales que pueden utilizarse como materia prima para la producción de biogás, lo que se acostumbra es utilizar desechos que tengan una biodegradabilidad alta, es decir que sean biodegradables fácilmente y que produzcan metano a partir de su descomposición anaeróbica (Dahlquist, 2103). Por lo tanto el término biomasa se refiere entonces a cualquier tipo de materia orgánica que tiene su origen en un proceso biológico, siendo ejemplo de esta biomasa la madera, los desechos agrícolas y el estiércol animal.

La biomasa se clasifica de acuerdo con las siguientes categorías: natural, que corresponde a la que se produce espontáneamente en la naturaleza, como bosques, matorrales, hierbazales, entre otros; residual, obtenida de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, como los estiércoles que son

usados como materia prima para la producción del biogás; y de plantaciones energéticas, que corresponde a cultivos energéticos, es decir plantaciones que están dedicadas a la producción de un combustible, como la caña de azúcar, el maíz, especies de palma, entre otros (Delgado, 2014).

Las bacterias fermentan el material orgánico (cadenas carbonatadas con hidrógeno, oxígeno y nitrógeno) en ausencia de aire y producen biogás; este material de fermentación está constituido por sustancias sólidas orgánicas, inorgánicas y agua (el cual incrementa la fluidez del material de fermentación, característica importante para el funcionamiento de una planta de biogás), y su componente inorgánico no sufre modificación alguna durante el proceso de fermentación (Dahlquist, 2103).

Biodigestor

Un biodigestor es un contenedor anaeróbico utilizado en el procesamiento de los desechos agrícolas, industriales y urbanos orgánicos, es una forma económica y efectiva para el tratamiento de estos desechos y a su vez resultan como una fuente alternativa de energía (Ramírez, 2004).

Un aspecto esencial es definir el tipo de biodigestor que se va a utilizar. Estos se clasifican en biodigestores de alta y de baja tasa. Los de alta tasa se caracterizan porque el tiempo de retención hidráulico (TRH) es bajo, pero con retención alta de lodos, es decir de masa microbiana del biodigestor, además cuentan con un mecanismo para la retención de lodos o bien una recirculación de los efluentes (Nijaguna, 2007).

Varios modelos consisten en tanques cerrados de forma alargada, que se construye bajo tierra. Tiene una pileta de carga pequeña y de poca profundidad, que se encuentra en la parte superior, donde se deposita y homogeniza la mezcla con que se alimenta al biodigestor. En el otro extremo del biodigestor se encuentra el pozo de descarga, el cual recibe la mezcla usada que viene del biodigestor. Es un pozo de mayor profundidad que el tanque, debe estar abierto para recoger y retirar la mezcla usada. Para recolectar y almacenar el biogás se utiliza un tubo conectado en la parte superior del biodigestor y una bolsa de hule u otro material en la que se guarda el biogás (Piedra, 2001).

Lodos del biodigestor

El residuo de la digestión, llamado digesto, digestato o lodos. Estos materiales resultantes de las etapas previas contienen nutrientes como nitrógeno, potasio y magnesio, los cuales se encuentran más disponibles para su absorción en comparación con el sustrato, debido al proceso de mineralización que ocurre en la digestión anaeróbica. Por ello una de las formas de denominar a ese residuo del biodigestor es biofertilizante. Este producto, además de aportar nutrientes, mejora las características físicas del suelo como la estructura y la porosidad. Es importante destacar que, si bien se disminuye

el poder contaminante de los materiales de ingreso, el volumen del mismo no varía mucho durante la digestión anaerobia, por lo que generalmente este se dispone en piletas de recolección para eliminar la humedad del lodo y poder ser comercializado como fertilizante (Martí Herrero, 2008).

Parámetros de diseño

La experiencia ha demostrado, que una de las dificultades que se presenta para la construcción de los biodigestores, es la determinación de sus parámetros constructivos. El cálculo resulta una tarea compleja ya que de ellos depende el correcto funcionamiento y eficiencia del biodigestor (Campos, 2011). La forma más usual para diseñarlo es utilizando como regla o parámetro, el tiempo de retención hidráulico (TRH), que es el período que tarda, hidráulicamente hablando, el material que se alimenta (afluente) hasta salir (efluente). Es común escuchar el uso de 30 días de retención para los de baja tasa.

Agitación y mezclado

Mediante la agitación se busca alcanzar la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, otros de los objetivos es evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor. La agitación aumenta la producción de gas y disminuye el THR (Varnero, 2011).

Variables que afectan el proceso

Entre las variables principales que intervienen en el proceso de producción de biogás a partir de la fermentación anaeróbica se tienen (Deublein & Steinhauser, 2011):

- **Temperatura:** Existen dos ámbitos de temperatura importantes en el proceso anaeróbico, el mesofílico que va de 20 °C a 35 °C y el termofílico que va de 40 °C a 60 °C; los tanques digestores pequeños operan con bacterias mesofílicas, con una temperatura óptima de generación máxima de bacterias a los 35 °C. Sin embargo, este tipo de bacterias (mesofílicas) pueden morir si ocurren cambios drásticos de temperatura y por debajo de 10 °C el proceso se detiene.
- **Relación carbono-nitrógeno:** La composición de la materia orgánica que se utilice para la fermentación debe estar proporcionada adecuadamente de carbono y nitrógeno, ya que una cantidad de nitrógeno baja hace que las bacterias no puedan aprovechar adecuadamente el carbono, mientras que si hay mucho nitrógeno puede inhibir el desarrollo de las bacterias, principalmente las metanogénicas, como relación óptima se tiene 30 a 1 de carbono a nitrógeno.

- **Tiempo de residencia:** Se define como el tiempo promedio en que la materia orgánica se encuentra reaccionando con los microorganismos dentro del tanque de fermentación.
- **Relación sólidos-agua de la materia prima:** Se ha comprobado que la proporción en que se encuentran los sólidos y el agua en la materia prima que se alimenta al digestor influye en la producción de gas.
- **Control del pH:** El pH extremo ya sea una mezcla muy básica o muy ácida inhibe el crecimiento de las bacterias metanogénicas, causando una producción mayor de dióxido de carbono y consecuentemente una disminución de gas metano. Para controlar el pH se pueden añadir sustancias alcalinas para tratar de mantenerlo entre 6,5 y 7,5, que es el intervalo óptimo.

Usos del biogás

En cuanto al uso que se le pueda dar al biogás generado, una de las aplicaciones más importantes es para la generación eléctrica, donde básicamente lo que se hace es alimentar el motor de combustión interna con biogás, que está conectado a un generador. Estos motores pueden consumir GLP, gasolina o diesel y para ser adaptado para el uso de biogás requiere de ciertas modificaciones o consideraciones (Ramírez, 2004).

Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia

El tratamiento anaerobio tiene muchas ventajas comparadas a otros métodos de tratamiento (Lorenzo & Obaya, 2005):

- El consumo de energía es muy bajo con el tratamiento anaerobio. Por ejemplo, no tiene que ser provisto oxígeno y no es necesario un mezclado intenso.
- La mayoría del material orgánico en el agua residual se convierte en biogás, que puede ser combustionado con el fin de obtener energía o vapor. La energía se puede utilizar en la planta de producción de biogás o se puede proveer a la red de la energía.
- La producción de lodo en el tratamiento anaerobio es muy baja (ya estabilizados y espesados), porque la mayoría del material orgánico se convierte en biogás, no en lodo. Además, el lodo anaerobio se estabiliza y se puede desecar fácilmente por gravedad. Se puede utilizar para la arrancada de nuevos reactores anaerobios, o se puede utilizar como bioabono en la tierra. Los gastos de transportación del lodo son por consiguiente mínimos.
- Son sistemas que asimilan altas y bajas cargas orgánicas.
- La remoción de materia orgánica se encuentra entre el 60 y 80 % según el tipo de agua residual.

- El lodo anaerobio puede ser almacenado y conservado fácilmente, lo que simplifica los arranques sucesivos después de paradas o los períodos con cargas orgánicas reducidas.
- Los costos de inversión son bajos, porque se aplican altas cargas orgánicas al reactor y los tiempos de la retención son cortos. Además, el diseño y la construcción de un reactor anaerobio es simple, lo que reduce aún más los costos. El tratamiento anaerobio es lo más comúnmente aplicado como pretratamiento para los lodos. Los efluentes en el tratamiento anaerobio todavía contienen un poco de material orgánico, a pesar de la alta eficacia de tratamiento por lo que el post tratamiento es necesario en muchos casos.

Biodigestores en Costa Rica

Como se estudió previamente la operación y factores de diseño en la digestión anaerobia, a continuación, se va a hacer un breve repaso sobre cómo esta tecnología ha sido implementada en el país por diversos entes. El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) es pionero en el país por promover la generación de energía a partir del biogás obtenido de la biodigestión anaeróbica de los residuos biomásicos, esto para contribuir con el ahorro energético y a la diversificación de las fuentes de generación. En Costa Rica existen biodigestores cuya materia prima está asociada a desechos de animales, de lecheras y material vegetal principalmente, en el Cuadro siguiente se detalla la capacidad instalada con la que cuenta el país y la cantidad de metano generado en el año 2015.

Cuadro 2.1 Proyectos identificados en Costa Rica de biodigestión en el 2015 (Hernández, 2015).

Producción	Capacidad kW	Cantidad	Biogás Generado m ³ /d	Metano generado m ³ /d
Bovinos	270	20	390	234
Porcinos	590	11	3 540	2 124
Matadero	0	4	5 400	3 240
Avícola	70	1	410	246
Vegetal	1 400	7	18 000	10 800
Lácteos	1 250	3	6 836	4 102
Varios	1 700	1	0	0
Total	5 280	47	34 576	20 746

Se puede observar como la capacidad de producción de metano casi en su totalidad está asociada a proyectos que vinculan materia vegetal y varios. En los últimos años la capacidad instalada en el país ha aumentado como se puede observar en la Figura 19. Esto por el apoyo del proyecto de Biogás del ICE.

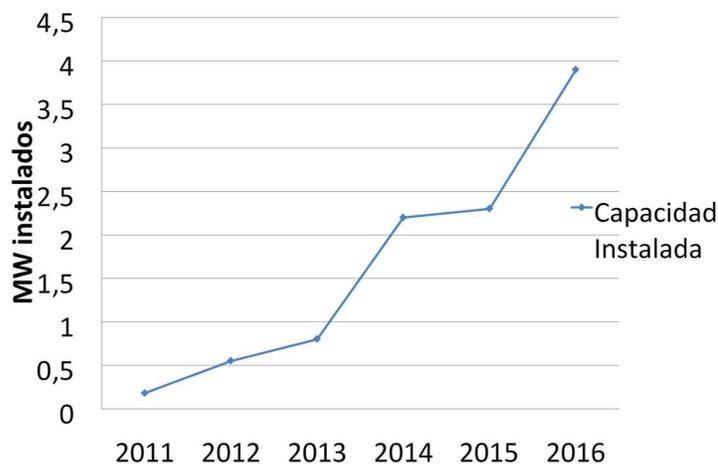


Figura 2.1 Capacidad instalada en biogás en Costa Rica (Hernández, 2015).

Características de la alternativa seleccionada

La decisión de una alternativa tiene que tener un fuerte respaldo técnico y económico que justifique la escogencia de cierta tecnología, ya que, en la mayoría de las opciones, se ve involucrada inversiones considerables y costos de operación asociados.

Para considerar como adecuada una tecnología en el entorno en que se quiere desarrollar se deben plantear ciertas preguntas, ¿La tecnología propuesta es la que mejor cubre las necesidades específicas de su comunidad?, ¿Cuáles son los costos y los requerimientos de operación y mantenimiento del sistema?

Entre los factores importantes a considerar es si el tipo de residuo que se quiere procesar puede ser tratado por la tecnología escogida. Además de esto verificar si se necesita un pre procesamiento de los residuos que entran al sistema, si este va a ser mecánico o manual. Factor importante que considerar es el servicio de recolección que hay en la zona, si este es eficiente y constante. De la misma verificar que grado de conocimiento o experiencia laboral requiere el personal que mantendrá el sistema funcionando. También un factor determinante son las condiciones climáticas locales (temperatura, humedad, precipitaciones, vientos). Analizar el mercado y la posibilidad que tienen los productos de incursionarse en el mismo. Un aspecto muy importante son los impactos ambientales que pueda generar el proyecto, si existen impactos negativos, como se van a abordar, para disminuir los mismos. Por último, aspectos como la regulación local de la planta que se quiera a construir influyen en la decisión y la posibilidad de crecimiento a futuro y vida útil del proyecto. (Sistema Nacional de Información Ambiental de Chile, 2001). En el caso de Costa Rica usar desechos orgánicos para producir energía, se permite desde 1990, por la Ley N.º 7.200, y se obtiene principalmente a partir de residuos agropecuarios, como caña de azúcar, palma, arroz, café y piña.

Sin embargo, la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (Aresep) solo ha establecido el precio del kWh generado con el bagazo de la caña (\$ 0,08), vigente desde el 2010 (Fornaguera, 2015).

A continuación, se muestra varias secciones que son un resumen de las características de un proyecto de biodigestión anaerobia, muchas descripciones facilitan el entendimiento de porque usar esta tecnología, todo esto justificado bajo condiciones técnicas, de espacio, desde el punto de vista ambiental, su vida útil y el costo de inversión asociado.

Descripción

Proceso de Fermentación-Oxidación desarrollada por medio de digestores y calor la fermentación de los Residuos Sólidos Municipales, sin enviar contaminantes al Medio Ambiente; eliminando la emisión de humos, olores, etc. Comercialmente se considera un proceso completamente limpio (Orta, Monge, & Toscano, 2009).

Características residuos por tratar

Fracción orgánica presente en RSU. Se necesita que estos sean previamente separados. También puede procesar lodos y residuos agrícolas (Orta, Monge, & Toscano, 2009).

Principales Componentes de una Planta

- Sistema de control y acceso
- Sistema de pesaje
- Oficina administrativa
- Instalaciones para el personal
- Bodegas y talleres
- Patio de descarga
- Depósito de acopio
- Planta separadora
- Trituradora y sistema de alimentación del digestor
- Digestor Anaeróbico
- Depósito de lodo
- Sistema de alimentación de lodo
- Sistemas de salida de los efluentes del digestor
- Deshidratación del material sólido
- Almacenamiento

Localización y Necesidad de Espacio

Debe considerarse como una instalación de tipo industrial. Considerando los componentes clásicos de una planta de este tipo, se estima que para una instalación con capacidad para 1000 ton/día son necesarias entre 4 a 6 hectáreas (Orta, Monge, & Toscano, 2009).

Proceso

En esta planta, los RSU que entren, serán canalizados a un proceso de pretratamiento donde se seleccionarán los productos a recuperar, los rechazos y la materia válida para la digestión anaerobia. Luego se realizará un proceso de biometanización de esta materia para extraer biogás, con el cual se autoabastecerá la planta en sus necesidades energéticas, vendiendo el sobrante a la red eléctrica. El material digerido se someterá a un proceso de maduración y afino de donde se sacará composta para ser comercializada y otra serie de residuos (Orta, Monge, & Toscano, 2009).

Normativa

Sin un proyecto de ley específico. Solo reglamentos asociados como el de vertido y reuso de aguas residuales, ubicación y aprobación de sistemas de tratamiento de aguas residuales, ley gestión integral de residuos sólidos, reglamento sobre manejo de residuos sólidos ordinarios (Orta, Monge, & Toscano, 2009).

A manera resumen general esta tecnología tiene un panorama favorecedor en el país ya que en análisis presentes en el Capítulo III se observará que el componente mayoritario de los residuos sólidos en Costa Rica son los desechos orgánicos, por lo que este factor es una ventaja dentro del mercado de captación de residuos sólidos. En cuanto a los parámetros físico-químicos de los residuos que ingresan el proceso, lo más importante para el diseño y correcto funcionamiento de este sistema es el porcentaje de humedad y el peso o cantidad del material que ingresa. No se requieren parámetros más complicados como el poder calorífico, se puede considerar necesario previo al arranque de la planta un estudio de biodegradabilidad de los residuos de entrada. En cuanto al área requerida para la instalación de la tecnología, está en promedio ocupa 4 hectáreas, en comparación con otro tratamiento biológico como el compost, este puede llegar a ocupar 24 hectáreas, de la misma forma el equipo por utilizar es poco y no requiere de tanta inversión inicial, en comparación con tecnologías como la incineración (Orta, Monge, & Toscano, 2009).

Ante la necesidad de tratamiento o disposición final del rechazo de la tecnología, este proceso no genera ningún tipo de rechazo que requiera de un tratamiento alternativo o disposición final fuera del proceso de la misma tecnología. Pero si se requiere de tratamiento alternativo o disposición final del 100 % de residuos inorgánicos que no pueden ser procesados por esta tecnología. Para los criterios

ambientales no existe una proliferación de fauna nociva, siempre y cuando el manejo inicial de desechos se adecuado, la emanación de olores desagradables es normal en estos procesos, pero un control adecuado de los mismos puede ser implementado para no considerar este factor como algo negativo. La contaminación acuática no es un factor apreciable, puesto que no se necesita disponer de ningún líquido específico, solo la humedad y tal vez del substrato de digestión. Como no existe un reglamento o ley específico para el distanciamiento de zonas urbanas, este factor no se considera. La contaminación atmosférica es despreciable puesto que el metano, aunque en 21 veces carbono equivalente para el efecto invernadero, este es contenido y utilizado luego para motores de cogeneración. La contaminación acústica es mínima, ya que el proceso de retención hidráulica dura 30 días en promedio y el proceso de selección manual no involucra motores, turbinas ni equipos específicos, para la parte de conversión eléctrica si puede haber ruido en las inmediaciones. La afectación de los suelos es nula, puesto que más bien el abono orgánico, producto secundario del proceso, se utiliza para fertilizar. En cuanto al impacto social que pueda generar, es que se requiere poca mano de obra calificada, ya que los procesos de selección previos a la digestión, no requiere de personal con altos conocimientos técnicos. Puede ser positivo para zonas aledañas pues se va a requerir personal para la selección manual de residuos valorizables (Orta, Monge, & Toscano, 2009).

Capítulo III: Flujo de residuos sólidos urbanos de Heredia y Alajuela

Como parte del estudio para el tratamiento de RSU por medio del tratamiento mecánico biológico, se definieron cantones meta para proyectar la iniciativa. Dentro de la zona de Heredia se seleccionaron los cantones de Heredia, Barva, San Pablo, Santo Domingo, San Isidro, San Rafael, Belén, Flores y Santa Bárbara. Como población meta además se proyectan los cantones de Alajuela y Poás.

Para los cantones de San Isidro, San Rafael, Belén, Barva, Flores, Heredia se cuentan con datos producción de RSU anuales por lo menos desde el 2014. En el caso de San Pablo, Santo Domingo, Santa Bárbara, Alajuela y Poás no se conocen datos de generación de residuos sólidos por año. En secciones posteriores se va a realizar el análisis para estas poblaciones.

En este capítulo se va a mostrar también la composición de los RSU de estas zonas. Solo los cantones de Heredia y San Rafael tienen estudios diagnósticos de la gestión integral de residuos sólidos, por lo que sirven como base para estimar la composición de los demás cantones que no tienen dicho análisis.

La cantidad de población presente en dichos cantones se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Censo. Estos datos sirven como base para determinar la producción por kg/hab*día y ayudar a proyectar los datos de los cantones que no hay datos de RSU recolectados por año.

Adjunto se encuentran los datos de la Municipalidad de San Isidro. Esta municipalidad cuenta con estudios de composición para residuos valorizables (para una muestra representativa de 30 casas de la zona) y de la misma forma cuenta con datos de depósito de RSU en el Relleno Sanitario La Carpio.

Dentro de este cantón el 83 % son residuos valorizables, mientras que el 17 % son residuos no valorizables. En el Cuadro 3.1 se muestran los porcentajes de composición de residuos valorizables brindados por la misma Municipalidad.

Cuadro 3.1. Tipo y cantidad de residuos generados considerados como valorizables en la Municipalidad de San Isidro.

Tipo de Residuo	Porcentaje (%)
Orgánico	55,2
Papel	15,4
Bolsas Plásticas	8,7
Cartón	5,4
Vidrio	5,15
Tetrabrik	2,8
Plástico alta densidad	2,5
Plástico baja densidad	1,7
Latón	1,8
Plástico-otros	0,7
Cable (cobre)	0,6
Aluminio	0,05

En el Cuadro 3.2 se muestran los datos de disposición final de los residuos sólidos recolectados en la Municipalidad de San Isidro. Los datos para el 2016 se incluyen hasta abril, debido a que la solicitud de datos fue ejecutada en ese mes.

Cuadro 3.2. Flujo de residuos sólidos (ton/mes) recolectados llevados al sitio de disposición final en la Municipalidad de San Isidro.

	Toneladas 2014	Toneladas 2015	Toneladas 2016
Enero	450	478	455
Febrero	373	402	459
Marzo	388	444	484
Abril	424	424	447
Mayo	418	420	
Junio	399	451	
Julio	438	473	
Agosto	396	409	
Septiembre	438	470	
Octubre	452	455	
Noviembre	390	439	
Diciembre	478	508	
Total	5 042	5 372	1 845

En el caso de la Municipalidad de San Rafael, como ya se mencionó, existen datos de disposición final de RSU en rellenos para el año 2015. Asimismo, esta municipalidad sí cuenta con estudios detallados de composición. Este informe está basado en la metodología impuesta por el Ministerio de Salud para la elaboración de estudios de generales y composición de los residuos ordinarios de tipo domiciliario y comercial (Aguilar, 2013).

Por tanto, de estos estudios se obtuvo que la mayor proporción de residuos residenciales, con un 43,47 %, corresponde a residuos biodegradables (cáscaras de frutas y verduras, desechos de jardín y otros), 10,06 % a papel y cartón, 15 % a plástico, 3,56 % a vidrio, 2,50 % a metales, 3,58 % a textiles, 0,73 % a polialuminados, 0,21 % a peligrosos, 0,03 % a electrónicos y eléctricos y un 20,81 % corresponde a otros como pañales, papel higiénico, empaques metalizados y estereofón (Aguilar, 2013).

En el Cuadro 3.3 se puede observar el tonelaje total dispuesto en relleno sanitario por la municipalidad, este análisis solo está disponible para el año 2015.

Cuadro 3.3. Toneladas de residuos sólidos recolectados llevados al sitio de disposición final 2015 en la Municipalidad de San Rafael.

Mes	Tonelada 2015
Enero	1 112,82
Febrero	950,08
Marzo	1 034,19
Abril	1 030,4
Mayo	1 009,23
Junio	852,51
Julio	1 187,37
Agosto	1 042,19
Septiembre	1 654,36
Octubre	1 264,63
Noviembre	1 112,44
Diciembre	1 264,14
Total	13 514,36

Para el sector comercial de este cantón se encontró que la mayor proporción corresponde a biodegradable, con un 55 %, 16,12 % de papel y cartón, 21 % de plástico, 1,02 % de vidrio, 1,01 % de metales, 1,05 % de textiles, 1,4 % de poli aluminados, 0,64 % de peligrosos y un 3,10 % corresponde a otros como residuos sanitarios, estereofón, entre otros. En promedio para este cantón

del total de RSU tratados en este estudio, el 49,06 % son residuos orgánicos biodegradables. Se podría decir que aproximadamente la mitad de los residuos del cantón podrían llegar a ser aprovechados en tecnologías de biodigestión.

Para el caso de la Municipalidad de Belén esta cuenta con la generación mensual de residuos ordinarios del cantón, además que cuantifica cuanto son los residuos orgánicos que recolecta.

Cuadro 3.4. Generación total de residuos en el cantón de Belén.

Mes	Toneladas 2010	Toneladas 2011	Toneladas 2012	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Enero	580,65	505,34	587,92	629,71	628,11	656,66
Febrero	543,14	540,5	573,31	563,77	578,59	631,72
Marzo	629,09	616,6	614,35	591,98	584,08	688,61
Abril	599,86	597,79	581,22	680,29	653,28	620,39
Mayo	599,86	692,95	700,18	667,74	713,63	714,48
Junio	679,76	621,78	677,14	623,73	642,1	771
Julio	661,16	639,11	646,66	682,77	684,17	716,96
Agosto	649,85	645,055	664,38	669,87	683,25	661,62
Septiembre	591,87	630,54	578,29	617,66	689,03	740,69
Octubre	626,04	566,68	663,81	702,24	559,26	724,39
Noviembre	632,02	659,17	645,21	680,27	560	673,62
Diciembre	599,78	642,1	594,8	663,83	702,57	775,61

Cuadro 3.5. Cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos en el cantón de Belén.

Mes	Toneladas 2010	Toneladas 2011	Toneladas 2012	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Enero	290,32	293,1	337,5	362,78	356,85	359,96
Febrero	271,57	313,49	329,33	321,63	326,16	344,59
Marzo	314,54	352,2	351,1	338,79	330,83	380,99
Abril	299,93	345,25	329,86	389,16	371,25	343,69
Mayo	299,93	397,12	402,02	382,04	406,69	396,21
Junio	339,78	360,63	389,01	355,45	363,92	427,51
Julio	330,58	370,68	368,47	389,36	387,39	394,94
Agosto	324,92	371,815	381,47	382,49	385,5	361,74

Continuación Cuadro 3.5. Cantidad de Residuos Sólidos Orgánicos en el cantón de Belén.

Mes	Toneladas 2010	Toneladas 2011	Toneladas 2012	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Septiembre	295,93	365,71	332,73	352,07	390,9	411,72
Octubre	313,02	324,67	382,49	399,85	315,28	405,52
Noviembre	316,01	379,21	371,01	385,54	315,28	373,98
Diciembre	299,89	369,37	341,65	383,01	398,94	427,27
Total	3 696,42	4 243,245	4 316,64	4 442,17	4 348,99	4 628,12

Para el año 2015 el porcentaje de residuos orgánicos representaba un 57% del total de RSU del cantón de Belén. Cabe destacar que no se cuenta con datos de porcentaje de composición de los demás residuos valorizables.

En el caso de Barva solo se cuenta con la producción mensual de RSU para el año 2015 y la recolección de valorizables por parte de la municipalidad, pero sin el porcentaje de composición.

Cuadro 3.6. Toneladas de residuos sólidos recolectados llevados al sitio de disposición final 2015 en la Municipalidad de Barva.

Mes	Toneladas 2015
Enero	830,77
Febrero	732,04
Marzo	789,35
Abril	834,36
Mayo	854,13
Junio	847,43
Julio	888,6
Agosto	788,09
Septiembre	911,02
Octubre	870,89
Noviembre	803,1
Diciembre	947,71
Total	10 097,49

Cuadro 3.7. Cantidad de material valorizable llevados al sitio de disposición final 2015 en la Municipalidad de Barva.

Mes	Cantidad (kg)
Enero	12 844
Febrero	9 417
Marzo	7 800
Abril	11 100
Mayo	8 905
Junio	8 900
Julio	9 044
Agosto	7 441
Septiembre	8 400
Octubre	6 576
Noviembre	7 953
Diciembre	7 947
Total	106 327

Para el cantón de Flores, este solo cuenta con los mismos datos del cantón de Barva.

Cuadro 3.8. Cantidad de residuos sólidos recolectados llevados al sitio de disposición final 2010-2015 en la Municipalidad de Flores (Sánchez, 2016).

Mes	Toneladas 2010	Toneladas 2011	Toneladas 2012	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Enero	450,7	451,83	498,2	560,36	533,52	540,95
Febrero	426,49	450,9	519,16	502,02	462,88	488,06
Marzo	498,28	518,53	571,09	484,41	502,2	510,09
Abril	459,82	486,3	509,72	573,8	505,7	540,15
Mayo	532,22	543,08	647,41	572,2	576,07	676,7
Junio	494,85	575,74	572,87	558,7	536,21	598,64
Julio	552,55	539,03	503,18	619,9	529,7	584,93
Agosto	518,25	572,7	528,94	643,36	526,9	606,45
Septiembre	517,5	503,2	547,14	596,75	550,79	563,81
Octubre	488,07	556,72	583,41	768,48	598,18	606,62
Noviembre	487,23	523,07	502,52	542,65	519,1	562,9
Diciembre	505,38	555,71	582,07	551,35	600,43	614,98
Total	5 931,34	6 276,81	6 565,71	6 973,98	6 441,68	6 894,28

Cuadro 3.9. Cantidad de material valorizable recolectado por la municipalidad de Flores durante el período 2011 a 2015 (Sánchez, 2016).

Materiales	Toneladas 2011	Toneladas 2012	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Periódico	0,02	0,05	5,36	5,86	3
Cartón	0,03	1,16	5,84	6,4	3,27
Papel	0,01	0,01	0,58	0,64	0,33
Aluminio	0	0	0,4	0,44	0,22
Plástico	0,01	0,01	0,55	0,6	0,3
Tetra Pack	0	0	0,04	0,04	0,02
Vidrio	0	0	0,02	0,02	0,01
Total	0,056	1,23	12,79	14	7,15

A diferencia de las demás municipalidades (excluyendo la de San Rafael), la de Heredia cuenta un diagnóstico de la gestión integral de residuos sólidos del cantón central de Heredia. Este incluye aspectos relevantes para el proyecto como el estudio de caracterización y composición de residuos sólidos del cantón, además de la categorización de los residuos. Este estudio está enfocado en los distritos de Ulloa, San Francisco y Vara Blanca (Municipalidad de Heredia, 2013).

Cuadro 3.10. Toneladas de residuos sólidos recolectados llevados al sitio de disposición final 2011-2015 en la Municipalidad de Heredia.

Mes	Toneladas 2011	Toneladas 2012	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Enero	2 712,93	3 154,50	3 218,34	3 397,22	3 448,94
Febrero	2 738,71	2 931,77	3 427,21	2 867,60	3 086,12
Marzo	3 353,99	3 108,88	2 790,40	3 238,79	3 264,51
Abril	2 530,44	3 143,33	3 649,12	3 186,46	3 291,73
Mayo	3 804,70	3 651,42	3 264,68	3 626,23	3 462,54
Junio	3 082,87	3 313,38	3 332,82	3 290,98	3 598,32
Julio	2 027,64	3 211,89	3 506,33	3 368,31	2 998,42
Agosto	3 369,86	3 283,15	3 421,20	3 361,29	3 417,13
Septiembre	3 259,34	2 961,00	3 283,42	3 402,38	3 055,95

Continuación Cuadro 3.10. Toneladas de residuos sólidos recolectados llevados al sitio de disposición final 2011-2015 en la Municipalidad de Heredia.

Mes	Toneladas 2011	Toneladas 2012	Toneladas 2013	Toneladas 2014	Toneladas 2015
Octubre	3 303,37	3 500,04	2 716,15	3 471,79	3 626,80
Noviembre	3 172,58	3 169,56	3 395,60	3 352,12	2 800,78
Diciembre	3 328,46	3 282,61	3 444,72	3 624,95	3 072,77
Total	36 684,89	38 711,53	39 449,99	40 188,12	39 124,01

Dentro de los resultados de este estudio, se determinó que por día se producen 0,76 kg de residuos sólidos ordinarios por habitante. En el Cuadro 3.11 se puede encontrar el promedio de composición de los RSU de la Municipalidad de Heredia, los resultados son un promedio de los cantones de Ulloa, San Francisco y Vara Blanca.

Cuadro 3.11. Datos ponderados de la composición de residuos sólidos ordinarios generados en viviendas pertenecientes al cantón de Heredia (*Municipalidad de Heredia, 2013*).

Tipo de Compuesto	Porcentaje (%)
Biodegradable	54,80
Papel y Cartón	8,16
Plástico	9,43
Vidrio	1,87
Metales	1,61
Textiles	2,99
Polilaminados	0,7
Peligrosos	0,84
Eléctricos/Electrónicos	0,80
Otros	18,79

De acuerdo con estudios previos en otros cantones, la mayor cantidad de residuos sólidos generados en las viviendas corresponde a la categoría de biodegradables (casi un 55 %), en el estudio se encontró que estos eran principalmente restos de comida y residuos de jardín. El plástico (con más de un 9 %) y el papel y cartón (aproximadamente 8 %) siguen como categorías con pesos importantes, lo cual resulta interesante de cara al planteamiento de esfuerzos de valorización. En este tema también sobresalen los vidrios y los metales, incluyendo latas de aluminio, con menos del 2 % cada uno (*Municipalidad de Heredia, 2013*).

Con datos del Instituto Nacional de Censo y Estadística (INEC) se obtuvo la población proyectada para el año 2015 en los cantones de estudio. Se obtuvo un promedio para el consumo de residuos sólidos por kg y habitante por día para todos los cantones y con esto se estimó la generación total de RSU para las poblaciones de San Pablo, Santo Domingo, Santa Bárbara, Alajuela que no tienen datos de generación. Los resultados mencionados se pueden encontrar en los Cuadros 3.12 y 3.13 (cabe destacar que los promedios de generación de residuos sólidos para la población de los últimos cantones mencionados son el promedio de los demás cantones, puesto que estos municipios no brindaron datos tiempo real de sus residuos). De la misma forma para el porcentaje de biodegradables, los datos de los cantones faltantes que no se especificaron anteriormente son un promedio de los demás. Para determinar la generación de residuos en varios cantones que no brindaron los datos se utilizó el factor poblacional como base y la generación de residuos por habitante por día de la siguiente manera (esta fórmula de cálculo es para Alajuela, Poás, Santo Domingo, Santa Bárbara y San Pablo):

$$G_A = \frac{293\,601 * 0,74}{1000} * 365 = 79\,715 \frac{t}{a}$$

Para estimar la generación de residuos biodegradables, solo se toma el porcentaje y se multiplica por la generación total de residuos del cantón correspondiente.

Cuadro 3.12. Generación de RSU a partir de poblaciones estimadas en el 2015 según INEC para el proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos.

Cantón	Población	Generación Residuos (kg/hab*día)	% de biodegradables
Alajuela	293 601	0,74	0,50
Poás	31 583	0,74	0,50
Heredia	135 292	0,76	0,50
Barva	43 776	0,63	0,50
Santo Domingo	46 710	0,74	0,50
Santa Bárbara	39 843	0,74	0,50
San Rafael	51 736	0,72	0,49
San Isidro	21 985	0,67	0,46
Belén	25 296	0,88	0,57
Flores	23 426	0,81	0,50
San Pablo	30 144	0,74	0,50

Cuadro 3.13. Generación total RSU y de la fracción de orgánicos a partir de poblaciones estimadas en el 2015 según INEC para el proyecto de aprovechamiento de residuos sólidos.

Cantón	Generación Total de Residuos (t)	Residuos Orgánicos (t/a)
Alajuela	79 715,23	40 231,48
Poás	8 575,06	4 327,75
Heredia	39 124,01	19 562,01
Barva	10 097,49	5 096,10
Santo Domingo	12 682,17	6 400,57
Santa Bárbara	10 817,72	5 459,60
San Rafael	13 514,36	6 630,15
San Isidro	5 372,46	2 461,45
Belén	8 119,51	4 628,12
Flores	6 894,28	3 479,47
San Pablo	8 184,36	4 130,56

A partir de los resultados mostrados el total de toneladas producidas anualmente por estos cantones es de 102 407,25 (280,57 toneladas diarias). La densidad promedio de los RSU según estudios en el cantón de Goicochea de Costa Rica es de 164, kg/m³ (Elizondo, Martén, & Astorga, Determinación de la generación y la composición de residuos sólidos ordinarios en el cantón de Goicoechea, 2011), pero esto para la fracción total de desechos, considera la fracción orgánica y los demás residuos valorizables y no valorizables. Existen estudios que muestran que solo la fracción orgánica presenta una densidad de 750 kg/m³ (Campusano & González, 2016), se va a tomar este dato como base, ya que los estudios de residuos sólidos para Heredia no realizan este dato. Con este dato se puede realizar una estimación del volumen que se va a manejar en la tecnología impuesta en función del tiempo. Pero el dato más relevante es el tiempo de residencia en el digestor, que es generalmente de 15 a 30 días con calentamiento u otros métodos de control alternativos. Cabe destacar que este dato es relativo, puesto que se tienen que hacer estudios más exhaustivos de degradación biológica para cada sector o zona donde se quiera desarrollar el proyecto. En general existe un promedio de tiempo de residencia de 2 a 4 semanas y como el tiempo máximo va a mostrar los volúmenes máximos se va a trabajar con 30 días (Campusano & González, 2016). Como se muestra en el Cuadro 3.14 para el tiempo de residencia escogido se pueden ver los volúmenes requeridos para tratar los residuos sólidos municipales de los cantones seleccionados por la Empresa de Servicios Públicos de Heredia. Con

base en lo expuesto anteriormente este volumen previo se calcula para el cantón de Alajuela y por consiguiente los demás de la siguiente forma:

$$V_D = \frac{40\,231,48 \frac{t}{a} * 30 d}{365 \text{ días} * 750 \frac{kg}{m^3}} = 4\,408,94 m^3$$

Cuadro 3.14. Volumen de digestores para el tratamiento biológico para un tiempo de residencia de 30 días.

Cantón	Volumen (m ³)
Alajuela	4 408,93
Poás	474,27
Heredia	2 143,78
Barva	558,48
Santo Domingo	701,43
Santa Bárbara	598,31
San Rafael	726,59
San Isidro	269,75
Belén	507,19
Flores	381,31
San Pablo	452,66

Como se puede observar en el cuadro anterior los volúmenes requeridos para operar el digestor con la tecnología condicionada, especialmente es muy grande. Por lo que una planta de este tipo, para el tratamiento de todos estos cantones es imposible.

Pueden existir digestores para cada cantón o más, se puede tomar parte de la producción de metano para mantener condiciones mesófilicas de temperatura y disminuir los tiempos de residencia. Mantener la temperatura constante en tan grandes volúmenes es muy difícil de lograr. Haciendo una sumatoria de volúmenes para los resultados mostrados en el cuadro anterior, se tiene un total de 11 200 m³.

De la misma forma los tiempos de residencia no van a ser menores a 15 días y los volúmenes no van a disminuir en un factor considerable, y van a seguir siendo insostenibles para condiciones de agitación mecánica o manual.

Existen tecnologías patentadas que tienen digestores de tamaño promedios de 1 500 m³ y con tiempos de residencia mínimos de 15 días (Campusano & González, 2016), por lo que se puede intuir de estas tecnologías aplicadas, que los tonelajes a tratar de residuos sólidos municipales, no puede ser tratada con digestión anaerobia en una sola etapa, si no que se tiene que adecuar a varias etapas de aplicación para el proyecto.

Por esto se decidió realizar el dimensionamiento para una planta de tratamiento mecánico biológico para el cantón de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo, esto a solicitud de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia.

Capítulo IV: Operaciones unitarias del paquete tecnológico de separación mecánica y digestión anaerobia (factores de diseño y condiciones de operación)

Parte esencial del dimensionamiento y selección de la tecnología es adecuar y sintetizar las opciones existentes y ver cuales se adecuan al proceso. Como etapa inicial se puede mostrar un área de almacenamiento para los residuos, estos con capacidad de almacenar por lo menos materia de trabajo para 3 o 2 días, debido a que la frecuencia de recolección en el país está limitada a ser solo de 2 veces por semana.

La parte de clasificación manual puede ser sustituida por una serie de operaciones unitarias mecánicas, que se van a detallar más adelante. No se puede dejar de lado los separadores magnéticos para recuperar material valorizable.

De la misma forma se encuentra un almacenamiento posterior del material valorizable ya clasificado por su tipo y separado de la fracción orgánica, que necesita ser dispuesta en los digestores. Al tratar por medios biológicos se puede necesitar un tanque de preparación de la materia orgánica y considerar un método de agitación adecuado.

Debe existir un almacenador de biogás para prever fallas en las máquinas de conversión a energía eléctrica y térmica. El diagrama real por utilizar se va a explicar con más detalle en las secciones siguientes y de la misma forma se van a barajar las opciones existentes en el mercado para reactores/digestores industriales que tratan la fracción orgánica de los residuos municipales.

Existen diversas formas de aplicar la separación mecánica de los residuos municipales, su complejidad depende de la cantidad y tipo de material que se quiere recuperar, la calidad del mismo y el grado de separación que se requiera.

Para seleccionar las operaciones pertinentes se diseñó con base en la recuperación de papel y cartón, vidrio, polilaminados, residuos orgánicos, no metales, plástico y los residuos sólidos. Hay partes del proceso que requieren almacenaje o espacio para el tratamiento del material entrante, muchas de estas zonas dependen de la logística final que se trate en la planta. Se va a hacer un recuento por las unidades principales y el funcionamiento y objetivo de las mismas. Todas estas unidades en conjunto se les denominan centros de recuperación de materiales (*material recovery facilities*, MRF) y son clasificadas en 2, en MRF limpias o en sucias, la primera trata material ya separado de los residuos sólidos, solo material valorizable ingresa a la planta. Las MRF sucias son aquellas en donde ingresa

sin previa clasificación los residuos municipales, para nuestro caso aplica esta última (Chandrappa, 2012).

Previo a estos existen ya unidades establecidas dependiendo de la operación unitaria que se requiera y el objetivo principal de la misma en el Cuadro 4.1 se pueden observar las distintas opciones para utilizar.

Cuadro 4.1. Operaciones unitarias para la separación de material valorizable de los residuos sólidos municipales (Pitchell, 2005).

Operación Unitaria	Función y Material Procesado
Trituración	
Molinos de Martillo	Reducción de Tamaño
Molino para desgarrar	Reducción de Tamaño, se usa también como rompedor de bolsa
Trituradora de cizalla	Reducción de Tamaño, se usa también como rompedor de bolsa
Quebrador de Vidrio	Reducción de tamaño, vidrio
Cribado	Separación de materia por tamaño, tambor rotatorio también se puede utilizar como rompedor de bolsas
Separador Magnético	Separación de materiales ferrosos
Densificadores	
Empacadoras	Compactación de material como papel, cartón, plástico, textiles y aluminio
Separador Eddy	Separación de materiales con aluminio
Pesadoras	
Balanzas de Plataforma	Record de pesaje de material entrante o saliente
Pequeñas Balanzas	Record de pesaje de material entrante o saliente
Manejo Manual y de Almacenamiento	
Cintas Transportadoras	Transporte de materiales dentro de la planta
Cintas Transportadoras Recolección Manual	Separación manual de residuos, separado en fuente o separado en planta
Espacio de Almacenamiento	Almacenaje para todos los materiales valorizables

Unidad de pesaje

Este paso es importante en una planta de este tipo, ya que es importante determinar la cantidad de residuo entregado, la cantidad que se tiene que recuperar y lo que se tiene que remover. Estas varían dependiendo del tonelaje o totalidad de material dispuesto, generalmente las que se utilizan son las balanzas grandes para manejar el material dispuesto por los camiones de residuos sólidos (Pitchell, 2005).

Área de recibimiento

Después del pesado, los camiones recolectores llevan el residuo a un área de recibimiento para el almacenamiento temporal y su posterior tratamiento (Pitchell, 2005).

Área de almacenaje

El almacenamiento de los residuos sólidos municipales en la MRF es una preocupación importante, desde el punto de vista de eficiencia que se le pueda ofrecer y la seguridad. Se tiene que realizar consideraciones importantes en la logística de entrega de la materia prima de la planta y de la misma forma considerar el espacio necesario para el almacenamiento de los productos clasificados. Los residuos se pueden apilar, si es necesario, por un cargador frontal a una altura de 6 a 8,5 metros. Los cargadores frontales deben cargar los residuos a un transportador que alimenta al sistema de procesamiento (Pitchell, 2005).

Bandas

Estas son utilizadas, para transferir residuos desde una locación a otra (también para remoción manual o mecánica de algunos componentes). Para utilizar una banda se debe tomar en cuenta ciertos factores importantes como: capacidad, largo, peso, características del material, espesor de la misma. Dentro de este mismo escenario en esta operación de traslado pueden existir separación manual, para el retiro de material peligroso (baterías, chatarra, materiales electrónicos, envases de medicinas, de pintura entre otros) o las mismas bolsas que se rompieron en etapas previas. Cabe destacar que hay que considerar como parte del diseño de la banda que para recolección manual esta no puede medir más de 60 cm de ancho para recolección de un solo lado de la banda o 120 cm para recolección en ambos lados. La velocidad de la misma puede estar en un rango de 270 (0,075 m/s) a 1620 m/h (0,45 m/s), estos criterios dependen de la velocidad de procesamiento manual que se logre. Generalmente se adaptan velocidades menores a 540 m/h (0,15 m/s). El espesor que debe tener los residuos municipales no debe ser mayor de 15,64 cm (Pitchell, 2005).

Filtración por discos

Esta operación está diseñada para separar material de diferentes tamaños, estos son denominados los de tamaño superior y los de inferior. Generalmente los de tamaño inferior son los papeles, cartón y periódico. Se puede llevar a cabo de forma húmeda o seca, aunque la más usada es de forma seca (Pitchell, 2005).

Tambores rotatorios

El uso de estos equipos es muy común en las MRF. Es un separador primario, este equipo es un cilindro perforado con un diámetro de 0,6 a 3 cm con una superficie separadora. Este equipo tiene cierta inclinación y tienen espigas para romper las bolsas si se requiere, posee un motor que rota el cilindro de 10 a 15 rev/min. El largo y el diámetro tienen una relación directa con la eficiencia del tambor, mientras más largo el tambor, más tiempo va a estar en contacto los residuos con la superficie separadora y mientras más grande el diámetro va ser más efectivo el tambor rompiendo grandes objetos como las bolsas. Los tambores largos (2,5 a 3 m de diámetro y de 15 m de largo) y los pequeños (de 0,3 a 0,6 de diámetro y de 1,2 m de largo) dependen su uso del flujo de entrada y del grado de separación y el material que ingresa (Pitchell, 2005).

Separación magnética

Esta operación es realmente simple y está diseñada para recuperar material magnético, principalmente material ferroso de los residuos sólidos municipales. Este se puede encontrar en tres configuraciones: el tambor, polea de cabeza magnética y la banda magnética (Pitchell, 2005).

Separador por flotación

Esta parte del proceso generalmente utiliza una pila con agua para separar material denso como vidrio de materia orgánica que puede ser utilizada en procesos de compostaje o de descomposición anaerobia (Pitchell, 2005).

Separador Eddy

Esta operación unitaria separa el aluminio de otros materiales no metálicos. Se utiliza un campo magnético permanente o un campo electro magnético para generar una corriente eléctrica que puede lograr que materiales no ferrosos como las latas de aluminio sean expulsadas y separadas de otros materiales. Esta separación es basada en el uso de un rotor magnético con polaridad alternada, que gira rápidamente dentro de un tambor no metálico. Mientras los materiales no ferrosos atraviesan el tambor, el campo magnético alterno, crea corrientes Eddy en las partículas y repele el material lejos de la banda o la línea principal (Pitchell, 2005).

Triturador

Esta operación mejor conocida por la reducción de tamaño o de volumen es esencial en cuanto al almacenaje o transporte de los materiales valorizables. Hay una variedad muy grande en cuanto a formas y tamaños para estos equipos, los más comunes en estas plantas son los molinos de martillo, los desgranados y los de cizalla. El más común es el de martillos y generalmente tienen una relación de ancho/diámetro mayor a 1, las velocidades de rotación van desde 700 a 3000 rpm con un consumo de 500 a 700 kW (Pitchell, 2005).

Digestor

Existen diversas formas de implementar el diseño de digestores que van a descomponer la fracción orgánica de los residuos municipales, estos dependen típicamente del modo de alimentación (de forma continua en una sola etapa, en 2 etapas o de forma batch), hay una dependencia directa con el contenido de humedad en el sustrato (digestión húmeda con un 85 % de humedad o más o digestión seca con 60 a 80% de humedad). Además de estos arreglos básicos se puede clasificar estos digestores en mesofílicos (25 °C a 35 °C) o termofílicos (45 °C a 55 °C) dependiendo del rango de temperatura en el que se trabajen y es importante considerar la forma del reactor que puede llegar a ser vertical u horizontal (Winter, Hahn, & Endar, 2009).

Como se puede ver en la Figura 4.2 existen diversas tecnologías que se pueden adaptar al tratamiento de la fracción orgánica de los residuos municipales, estas a su vez dependen de la caracterización que muestre los desechos orgánicos.

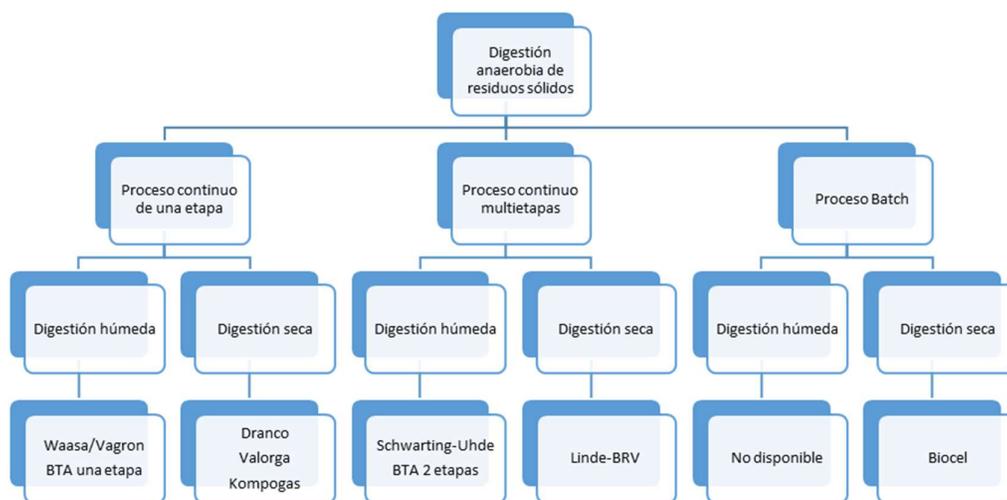


Figura 4.1. Clasificación de digestores y tipos de tecnologías recomendados para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (Winter, Hahn, & Endar, 2009).

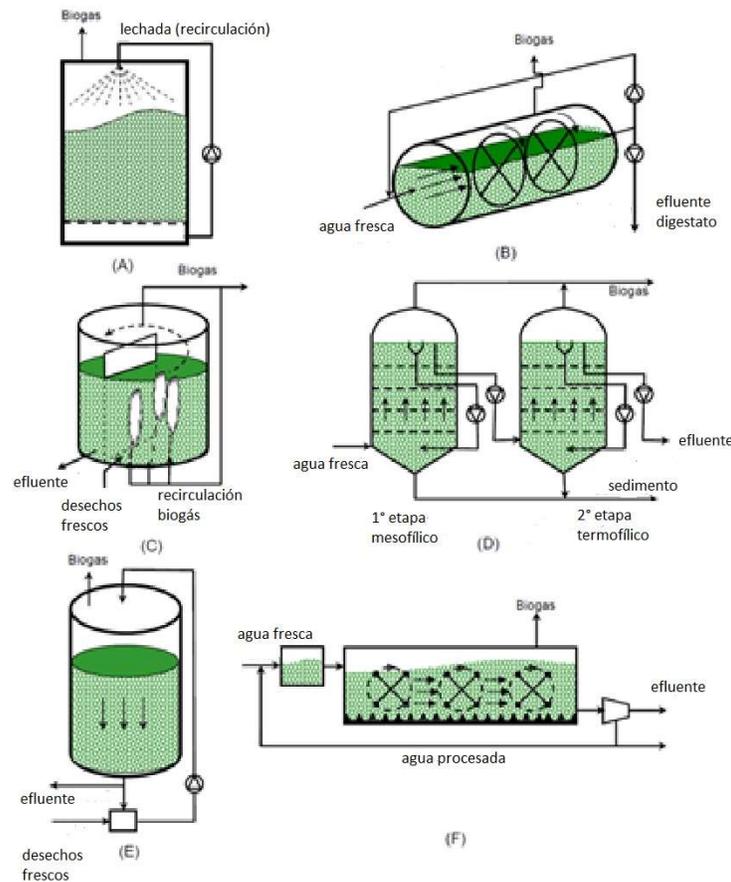


Figura 4.2. Tipos de tecnologías recomendados para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (Biocel (A), Kompogas (B), Valorga (C), Shwartzing (D), Dranco (E), Linde (F)) (Winter, Hahn, & Endar, 2009).

Como se puede observar en las figuras anteriores, la adaptación de las tecnologías de tratamiento biológico depende mucho de las características, la temperatura de operación que se quiera trabajar y el grado de humedad con el que se quiera trabajar el material entrante y la forma de alimentarlo, a continuación, se describirá con cierto detalle las tecnologías que apliquen a este proyecto, describiendo parámetros de operación como la temperatura y el calentamiento de la materia orgánica. Como se puede ver en la Figura 4.2 existen tecnologías para una etapa o batch (estas son las más utilizadas industrialmente), en cuanto al contenido de humedad en el país no existen estudios claros sobre este tema, solo un estudio de composición que se usará como base para ciertos aspectos de consideraciones de diseño, que indica que el contenido de humedad es aproximadamente de 80 %, lo que limita a un tratamiento por tecnologías industrial como Dranco, Valorga, Kompogas, Biocel y Wasa. A continuación, se detalla la forma de operación de cada una:

Dranco

El compostaje anaeróbico seco conocido en inglés como *dry anaerobic composting* (Dranco) es un proceso de un sistema de una sola etapa de descomposición anaeróbico, que es seguido por un tratamiento aerobio de corto periodo para la maduración del digestato. La mayoría bajo condiciones termofílicas de 50 °C a 55 °C, pero también existen en condiciones mesofílicas de 35 °C a 40 °C (se puede usar también para el tratamiento de aguas residuales). El proceso Dranco típicamente es reactor vertical PFR, este es alimentado desde lo alto del reactor y el digestato es removido desde el fondo al mismo tiempo. Usualmente parte del digestato es utilizado como un inóculo y es mezclado de 6 a 8 partes con la fracción orgánica fresca. Se introduce en el reactor pequeñas corrientes de vapor de agua para mantener la temperatura deseada. La mezcla precalentada es bombeada a lo más alto del reactor a través de tubos de alimentación. No hay dispositivos de mezclado más que el descenso natural por el flujo pistón causado por la alimentación de la alimentación de materia orgánica fresca y la salida del digestato por la parte inferior. Al resto del digestato se le remueve el agua y se estabiliza anaeróbicamente durante 2 semanas. Es adecuado cuando el contenido total de sólidos es de 20 % a 50 %. Los tiempos típicos de retención son de 15 a 30 días y la producción de biogás varía de 100 a 200 m³ por tonelada de material de ingreso fresco (Winter, Hahn, & Endar, 2009).

Kompogas

El sistema Kompogas es un sistema de una sola etapa y es un proceso en seco. La fermentación se lleva a cabo en un reactor PFR horizontal a temperaturas de 50 °C a 55 °C. El reactor está equipado con impulsores que rotan lentamente y aseguran el mezclado y ayudan a la re suspensión de materiales pesados. La alimentación tiene un contenido total de sólidos entre 23 % y 28 %. Si el contenido de sólidos es más bajo que este rango partículas pesadas como arena y vidrio pueden incrustarse dentro del reactor y valores más altos pueden ocasionar una resistencia al flujo pistón. El tiempo de retención es de 15 a 20 días. Debido a razones mecánicas el volumen de estos reactores es limitado, si la generación de residuos sólidos es muy alta se puede instalar en la planta varios reactores de este tipo de forma paralela. Cada uno tiene una capacidad de 15 000 a 25 000 toneladas por año. Generalmente tienen una producción de biogás de 820 m³/tonelada sólidos volátiles (Winter, Hahn, & Endar, 2009).

Valorga

Este sistema es de una sola etapa y es una digestión anaeróbica seca, que utiliza un cilindro vertical como reactor que puede operar en condiciones termofílicas o mesofílicas. Para obtener un flujo horizontal pistón el digestor debe de estar equipado con una pared que divida al equipo en dos en aproximadamente 2/3 de su diámetro. El sustrato de la fracción orgánica es alimentado en una entrada

ubicada de un lado de la pared divisora y la salida del digestato es colocada del otro lado de la pared. La mezcla en el reactor se lleva a cabo con la inyección de biogás cada 15 minutos.

El pretratamiento de la alimentación incluye una trituración de la materia hasta un tamaño de partícula de menos de 80 mm y para un ajuste de sólidos de 25 % a 32 % y existe un precalentamiento por inyección de vapor. El tiempo de retención para este sistema típicamente es de 18 a 25 días en condiciones mesofílicas y se da una producción de biogás entre 80 y 160 m³ por tonelada alimentada (Winter, Hahn, & Endar, 2009).

Biocel

Este sistema es una digestión por tandas de forma seca. La concentración de sólidos se mantiene entre 30 % a 40 % de materia seca. El proceso es logrado en digestores de concentrado rectangulares en condiciones mesofílicas. El piso es perforado y equipado con cámaras de recolección de la lechada. Previo a la alimentación de la materia orgánica esta debe ser inoculada con digestato de previas operaciones y es mezclado con palas o métodos mecánicos. Cuando ya se realizó la descarga en el digestor se cierra y se controla la temperatura de 35 °C a 40 °C rociando la lechada que se produce que es precalentada por un intercambiador. Se retiene la materia orgánica de 15 a 21 días. Tienen una capacidad de procesar 35.000 toneladas por año. Por cada tonelada procesada se produce 310 kg de compost, 455 kg de agua, 100 kg de arena, 90 kg de biogás con 58 % de biogás y 45 kg de residuos sólidos inerte (Winter, Hahn, & Endar, 2009).

Wasa

Este proceso es húmedo y se lleva a cabo en una sola etapa, se puede operar de manera mesofílica o termofílica. Este proceso completamente mezclado se da en un reactor vertical que se divide internamente para crear cámaras de predigestión. Se debe de realizar un pre tratamiento complejo incluido la separación manual y el lavado de los residuos sólidos previo a la alimentación.

El proceso de separación de los residuos sólidos municipales separa los materiales inertes y la arena de la fracción orgánica por medio de una separación húmeda. Se añade agua al sustrato para lograr concentraciones de sólidos de 10 % a 15 % de sólidos totales. La mezcla formada se mezcla con una pequeña cantidad de inóculo, se precalienta con inyección de vapor de agua y se bombea a una pre cámara que opera en flujo pistón con un tiempo de retención de 1 o 2 días previo a la digestión en el reactor principal. La mezcla en el reactor se lleva a cabo con paletas mecánicas y con una porción del biogás recogido en el fondo de reactor. Se puede operar en temperaturas mesofílicas o termofílicas. En promedio se tienen tiempos de retención de 20 días. Se pueden producir de 100 m³ a 150 m³ por tonelada de residuos sólidos alimentada, utilizando de esto de un 20 % a un 30 % para el

precalentamiento del sustrato. Se da una reducción de peso para el digestato de 50 % a 60 % en peso (Winter, Hahn, & Endar, 2009).

Deshidratado del compost

Posterior a la digestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, la materia orgánica restante que es generalmente un 60 % menos de lo que ingresó, puede disponerse como un abono para la tierra, mas no fertilizante, ya que se requeriría de una digestión aerobia de esta masa, ya que generalmente esta no tiene los nutrientes necesarios para ser considerada como fertilizante en algunos países. El digestato generalmente tiene una humedad superior al 75 % y para ser utilizada como abono tiene que tener una humedad de 55 %, esto también para evitar malos olores en el posible abono. Generalmente se pueden llegar a utilizar filtros prensa especiales para deshidratar lodos de restos de RSM (Frost, Lukehurst, & Al Seadi, 2010).

Purificación de biogás y motores de cogeneración

La generación de biogás y el consumo del mismo no siempre se da al mismo tiempo, por lo que es necesario tener un almacenamiento temporal del mismo. Este se puede almacenar por largos periodos de tiempo sin perder su contenido energético. Todos estos almacenadores deben tener material flexible y resistentes a la presión y si no está en condiciones sin sol, deben ser resistente a rayos UV y temperaturas altas y contra agua. El tamaño que estas deben de tener, se debe de ajustar a al radio de consumo y uso del biogás. De acuerdo al uso que se le quiera dar al mismo se requiere implementar ciertas operaciones de purificación, si el rango de uso es medio, es decir que se va a utilizar para calentar el digestor, para calentar edificios adyacentes al proceso, calentar agua para uso industrial, precalentar agua hirviendo o para plantas combinadas de calor y energía (CHP). El nivel de tratamiento que requiere para uso medio solo considera remoción de partículas y humedad y remoción de ácido sulfhídrico. Generalmente las tecnologías que se usan son un tanque de *knockout* o un separador de humedad y para la remoción del ácido se usa generalmente industrialmente carbón activado o esponjas de hierro. Utilizar un motor de gas para producir energía eléctrica va a generar calor. Como resultado estos motores están rodeados por una chaqueta de agua fría, muchas veces se utiliza bombas para transferir el calor de los motores a otras unidades que lo requieran, generalmente el digestor. Generalmente se utiliza de un 20 % a 40 % del biogás para calentar el reactor, esto claramente depende del tamaño, la configuración y el clima local. El agua que se logra calentar mediante CHP llega a temperaturas de 90 °C a 115 °C (David, 2013).

Capítulo V: Balances de masa y diseño dentro del proceso de tratamiento mecánico biológico de los RSM.

Dentro de las limitaciones de la tecnología de tratamiento de residuos sólidos municipales, está la cantidad de material orgánico que se puede tratar, esto debido al elevado tiempo de residencia que debe tener en los reactores (aunque se trabajen temperaturas termofílicas entre 50 °C y 55 °C). Dentro de estas limitaciones, se procedió a definir una cantidad a tratar dentro de la zona de interés inicial, esto fundamentando principalmente en los intereses de la empresa y en los límites técnicos que tiene la digestión anaerobia. Parte de este análisis es sustentado en las tecnologías implementadas en zonas como Alemania, España, Suiza y otros países europeos y de la misma forma la capacidad instalada de las mismas sirve como base para establecer el límite máximo que se tiene pensado trabajar en el país. Otro aspecto que no se puede dejar de lado es la inexperiencia que se tiene en el país con este tipo de tratamientos de residuos sólidos en un nivel de gran escala, puesto que en la mayoría de casos la utilización de tecnologías de digestión anaerobia está limitada a granjas porcinas, vacunas y el tratamiento de algunos materiales vegetales. Todo este tipo de instalaciones que utilizan la tecnología de digestión anaerobia instaladas en el país, no superan el volumen de 100 m³, por lo que en este campo se puede considerar al país con total desconocimiento en cuanto a la gran escala. Por lo anteriormente expuesto, se limitó la idea original que se tenía de tratar todos los residuos de los cantones urbanos de Heredia y los cantones de Poás y Alajuela. En esta sección se va a encontrar la cantidad de residuos sólidos que se producen en Heredia, San Pablo, San Isidro y San Rafael y la composición promedio de la zona, posterior a esto se realizaron los respectivos balances de masa para cuantificar la cantidad posible de material valorizable y del proceso biológico.

La fracción orgánica que es base para la digestión anaerobia, se cuantificó y se tienen estudios que permiten describirla, se cuenta con estudios de humedad de la misma, poder calorífico y tamaño promedio.

Se realizó con base en esta cantidad de materia orgánica un balance de masa para la posible producción de metano con base en condiciones de 50 °C y un 20 % de sólidos totales.

Y con base en lo posible producción de biogás se puede estimar cuanto kW se puede aprovechar, esto con base en una planta combinada de calor y electricidad. Todo se va a explicar con más detalle a continuación, el primer cuadro muestra la totalidad de residuos municipales y el aporte de cada municipalidad a esta cifra, de la misma forma se expone la composición de orgánicos para cada cantón de interés.

Cuadro 5.1. Generación de RSU a partir de poblaciones estimadas en el 2015 según INEC para el proyecto delimitado de aprovechamiento de residuos sólidos.

Cantón	Total de Población	Generación Residuos (kg/hab*día)	Composición de Biodegradables	Generación Total de Residuos 2015 (t)
Heredia	135 292	0,76	0,50	39 124,01
San Rafael	51 736	0,72	0,49	13 514,36
San Isidro	21 985	0,67	0,46	5 372,46
San Pablo	30 144	0,74	0,50	8 184,36
Total	239 157	-	-	66 195,19

De la misma forma en el Cuadro 5.2 se muestra la totalidad de residuos orgánicos anuales y por días, para este tipo de residuos para lograr una producción adecuada de biogás, se deben de mantener condiciones de temperatura superior a los 35 °C y hasta los 58 °C y los sólidos tienen que tener un tiempo de residencia hidráulico entre 15 a 30 días.

Dependiendo de la tecnología se estiman tiempos máximos de 22 días para fracciones orgánicas de residuos sólidos municipales en el caso que las condiciones de humedad sean alrededor de 80 % y se mantenga una temperatura de 50 °C (David, 2013). Es importante recalcar que se debe de hacer un diagnóstico más exhaustivo y actual de las condiciones de los residuos y las fracciones orgánicas en la zona de tratamiento, ya que los que se tienen son de otras zonas del país y del año 2011.

Se toma como base la caracterización de humedad del estudio de composición del cantón de Goicochea, ya que las municipalidades de Heredia no cuentan con un estudio de este tipo, se tiene una humedad del 83 % para la fracción orgánica (Elizondo, Martén, & Astorga, Determinación de la generación y la composición de residuos sólidos ordinarios en el cantón de Goicochea, 2011). De la misma forma la densidad de la fracción orgánica es estimada en 790 kg/m³ para una separación mecánica como es esperada, no se cuenta con un dato de este dato para Costa Rica, por lo que se usa como base estudios realizados en México (Campuzano & González, 2016).

Cuadro 5.2. Generación total de la fracción de orgánicos a partir de poblaciones estimadas en el 2015 para el proyecto delimitado de aprovechamiento de residuos sólidos.

Cantón	Residuos Orgánicos (t/a)	Residuos Orgánicos (t/d)	Volumen (m ³) (22 días)
Heredia	19 562,01	53,59	1 492,51
San Rafael	6 630,15	18,16	505,85
San Isidro	2 461,45	6,74	187,80
San Pablo	4 130,56	11,32	315,15
Total	32 784,16	89,82	2 501,31

En el Cuadro 5.3 se puede ver el volumen a manejar de residuos sólidos municipales y de la fracción orgánica, como base para la densidad de los RSU se tomó el estudio realizado en Goicochea, donde se estimó una densidad promedio de 164,3 kg/m³ (Elizondo, Martén, & Astorga, Determinación de la generación y la composición de residuos sólidos ordinarios en el cantón de Goicochea, 2011).

Para calcular los volúmenes de carga orgánica se dispuso un tiempo de residencia promedio de 21 días, este se calcula de la siguiente forma para el cantón de Heredia y por consiguiente los demás:

$$V_H = \frac{53,59 \frac{\text{t}}{\text{d}} * \frac{1\,000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} * 21 \text{ d}}{750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1492,51 \text{ m}^3$$

De la misma para calcular la carga volumétrica de desechos anuales y orgánicos, se usa el valor de densidad promedio para los RSU:

$$F_{des} = \frac{39\,124,01 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{\frac{1\,000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} * 164,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 238.125,44 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$$

$$F_o = \frac{19\,562,01 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{\frac{1\,000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} * 164,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 24.762,03 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$$

Con respecto a los valores diarios es tomar los valores calculados previamente y dividirlos por 365 días y así se obtiene el flujo volumétrico diario.

Cuadro 5.3. Volúmenes anuales y diarios de RSU y de fracciones orgánicas para el proyecto delimitado de aprovechamiento de residuos sólidos en el año 2015.

Cantón	RSU	Desechos	RSU (m ³ /d)	Desechos Orgánicos
	(m ³ /a)	Orgánicos (m ³ /a)		Diarios (m ³ /d)
Heredia	238 125,44	24 762,03	652,40	67,84
San Rafael	82 254,17	8 392,59	225,35	22,99
San Isidro	32 699,09	3 115,75	89,59	8,54
San Pablo	49 813,51	5 228,56	136,48	14,32
Total	402 892,20	41 498,94	1 103,81	113,70

Para realizar las estimaciones del material valorizable se utilizaron los estudios de composición ya mencionados en la sección de tonelaje y proyecciones de residuos sólidos urbanos de los cantones urbanos de Heredia y Alajuela. Los datos de densidades utilizados para calcular los volúmenes de los materiales valorizables son parte de un libro de ingeniería ambiental y sirve como base para este estudio, para el caso de tetrabrik se tomó la densidad del cartón, puesto que es el mayor componente de este material (Henry & Heinke, 1999). Se tomó un promedio de la zona de interés y se realizó un balance de masa con base en el flujo de entrada limitado a las 4 municipalidades mencionadas previamente.

Para calcular los porcentajes de composición de la zona se tomaron promedios de los estudios de composición de las diferentes municipalidades, para el caso de San Pablo que no tiene estudios de composición de los desechos de su cantón, se usó el valor promedio asignado. Para el caso de los desechos orgánicos se tomó como referencia los datos del Cuadro 5.1 y de la misma forma para el resto de materiales valorizables y los no valorizables del Capítulo 3.

$$P_{porc} = \frac{50 \% + 50 \% + 46 \% + 49 \%}{4} = 49 \%$$

Por lo tanto, para estimar la posible generación de material valorizable, se toma la cantidad anual de desechos y se multiplica por el porcentaje promedio, como se muestra para el material orgánico. En el caso del flujo volumétrico este se obtuvo con valores de densidades reportados para materiales valorizables como papel y cartón, vidrio, plástico, metales, tetrabrik y no metales. Dichos valores respectivamente son 80 kg/m³, 160 kg/m³, 65 kg/m³, 480 kg/m³, 80 kg/m³. Se calcula para el papel y cartón, pero se realiza de la misma forma para todos los demás.

$$\text{Cantidad de material orgánico} = 66\,195,85 * 49,95 \% = 32\,784,16 \frac{\text{t}}{\text{a}}$$

$$f_p = \frac{8\,498,14 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1\,000 \text{ kg}}{1 \text{ t}}}{365 \text{ d} * 24 \text{ h}} = 291,03 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Cuadro 5.4. Porcentaje de composición promedio de materiales valorizables en las municipalidades de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo en el año 2015.

Tipos de Residuos	Porcentaje (%)	Cantidad (t/a)
Orgánico	49,95	32 784,16
Papel y Cartón	12,84	8 498,14
Vidrio	28,12	1 861,08
Plástico	12,90	8 543,15
Metales	16,82	1 113,73
Tetrabrik	13,63	902,24
No metales	20,34	1 346,08
Residuos sólidos	16,84	11 147,27
Total	-	66 195,85

Cuadro 5.5. Tonelaje de generación y volúmenes de los residuos valorizables en los cantones de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo en el año 2015.

Tipos de Residuos	(t/a)	(t/d)	(t/h)	(m ³ /d)	(m ³ /h)	kg/mensual	t/mensual
Orgánico	3 2784,16	89,82	3,74	118,97	4,96	273 2013,38	2 732,01
Papel y Cartón	8 498,14	23,28	0,97	291,03	12,13	70 8178,20	708,18
Vidrio	1 861,08	5,10	0,21	31,87	1,33	155 089,81	155,09
Plástico	8 543,15	23,41	0,98	360,09	15,00	711 929,26	711,93
Metales	1 113,73	3,05	0,13	6,36	0,26	92 811,17	92,81
Tetrabrik	902,24	2,47	0,10	30,90	1,29	75 186,70	75,19
No metales	1 346,08	3,69	0,15	23,05	0,96	112 173,26	112,17
Basura	1 1147,27	30,54	1,27	185,88	7,75	928 939,15	928,94
Total	6 6195,85	181,36	7,56	1 048,14	43,67	5 516 320,94	5 516,32

Con base en las toneladas diarias promedio de fracción orgánica que se van a procesar en la planta de 89,82 toneladas/diarias, se puede estimar la producción de biogás promedio. Existen estudios técnicos que muestran se producen entre 0,10 m³-0,15 m³ de biogás por cada kilogramo de residuos sólidos que se trate a condiciones de 1 atm y 50 °C (Raport, 2008). Estimando con la mayor producción como medida de rendimiento para el proceso y haciendo hincapié en que se deben de tomar en cuenta las condiciones climatológicas que pueden afectar el valor de tasa de producción de biogás y de la misma forma la composición para este biogás procedente de residuos generalmente es de 55 % de metano, 44 % de dióxido de carbono, 0,02 % de ácido sulfhídrico y el restante 0,08 % de amoníaco, vapor de agua y otras trazas poco importantes.

$$BG = 89,82 \frac{t}{d} * 0,15 \frac{m^3}{kg} * \frac{1\,000\,kg}{1\,t} * 22\,d = 296.404,7\,m^3$$

Para obtener una tasa de producción volumétrica por día solo se divide el valor obtenido entre el tiempo de retención de 22 días.

Para calcular la composición del metano, dióxido de carbono y demás componentes solo se toma el valor total de la corriente de biogás y se multiplica por el porcentaje, en el caso del metano:

$$M = 296\,404,7\,m^3 * 55\% = 163\,022,60\,m^3$$

Esto se hace de la misma forma el dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y las trazas de amoníaco y vapor de agua.

Cuadro 5.6. Estimación de producción de biogás y los componentes asociados al mismo en el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales de Heredia, San Rafael, San Pablo y San Isidro.

Componente	Producción en los 22 días (m ³)	Producción (m ³ /d)	m ³ /h
Biogás	296 404,74	13 472,94	561,4
Metano	163 022,60	7 410,12	308,8
Dióxido de Carbono	130 418,08	5 928,09	247
Ácido Sulfhídrico	592,81	26,95	1,12
Trazas de Amoníaco, Vapor de agua,...	2 371,24	107,78	4,49

Por cada metro cubico de biogás se puede obtener una energía asociada de 6 kWh (Vogeli, Gallardo, & Zurbrugg, 2014). Por lo que en promedio diariamente se pueden producir:

$$E = 13\,472,94\,m^3 * \frac{6\,kWh}{1\,m^3} = 80\,837,66\,kWh$$

Esto sería el equivalente a:

$$e = \frac{80\,837,66 \text{ kWh}}{24 \text{ h}} = 3\,368,24 \text{ kW}$$

Se debe de utilizar una planta combinada de energía y calor, estas por lo general tienen una eficiencia eléctrica promedio del 30% y una eficiencia térmica de 55%. Por lo que se puede obtener:

$$C_{elect} = 3\,368,24 \text{ kW} * 30 \% = 1\,010,47 \text{ kW}$$

$$C_c = 3\,368,24 \text{ kW} * 55 \% = 1\,852,53 \text{ kW}$$

Sumando en total una capacidad de 2,86 MW.

En el caso de la restante materia orgánica dentro del digestor, este generalmente puede utilizarse como fertilizante, previo al secado del mismo. La mayoría de veces se reduce en un 50% los sólidos totales y lo restante corresponde a la humedad presente y el agua producida en la digestión anaerobia.

Por lo que según esta información y los datos brindados anteriormente se sabe que se tiene un ingreso de 89,82 toneladas en promedio por día y se sabe que el contenido orgánico que tiene la totalidad de la fracción orgánica es de apenas un 17 % en promedio (ya que son datos realizados para una fracción que no corresponde a Heredia, sino a el cantón de Goicochea). Lo que equivale a la introducción de material orgánico de apenas 15,27 toneladas por día. Según la información vista todos los sólidos reducen su tamaño en un 50 % del total de ingreso por lo que se estima una producción de lodos de 7,63 toneladas por día.

$$m_o = 89,82 \frac{\text{t}}{\text{d}} * 17 \% = 15,27 \frac{\text{t}}{\text{d}}$$

$$\text{Digestato} = 89,82 \frac{\text{t}}{\text{d}} * 17 \% * 50 \% = 7,63 \frac{\text{t}}{\text{d}}$$

Esta producción sería lo máximo que se podría obtener por día (por el tiempo total de retención de 22 días se estima una producción de 167,96 toneladas), existen otros datos para conversión a digestato, pero estos son inferiores. Cabe destacar que el rendimiento que se obtiene depende también del tipo de tecnología asociado a tratar la fracción orgánica. Como se expuso anteriormente existen por lo menos 5 tecnologías asociadas al tratamiento de la fracción orgánicas los residuos sólidos municipales y estas a su vez se clasifican dependiendo de la caracterización que tengan los productos de entrada. Por ejemplo, la tecnología Dranco tiene un rendimiento orgánico de 60 %, Valorga entre 40 % a 50 %, Kompogas de 68 %. Se recomienda reajustar estos valores, previo a la selección de tecnología y más importante realizar pruebas de campo y ajustes a los rendimientos asociados a conversión de biogás.

Balance de energía para el digestor

Los requerimientos de calentamiento para la fracción orgánica van a depender de la composición de la materia orgánica entrante, principalmente del contenido de humedad que esta tenga. Dentro del marco investigativo encontrar la capacidad calorífica en función de la humedad para la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales es difícil puesto que este tipo de tecnologías son muy recientes y poco investigadas, se manejan rangos de 5,299 J/kg °C (Desideri, Manfrida, & Sciubba, 2012) a 1715 J/kg °C (Sliusar & Armisheva, 2013) para una humedad de la fracción orgánica de 80 %, cercana al valor que se maneja en el país. Por lo tanto, para aumentar la temperatura en el tanque de preparación de esta fracción a condiciones de 50 °C desde temperatura ambiente aproximada a 25 °C para las 89,82 toneladas diarias se requiere entre

$$Calor = 1,715 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * \frac{1\ 000\ \text{kg}}{1\ \text{t}} * 89,82 \frac{\text{t}}{\text{d}} * \frac{1\ \text{d}}{24\ \text{h}} * \frac{1\ \text{h}}{3\ 600\ \text{s}} * (50\ ^\circ\text{C} - 25\ ^\circ\text{C}) = 44,57 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$Calor = 5,299 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * \frac{1\ 000\ \text{kg}}{1\ \text{t}} * 89,82 \frac{\text{t}}{\text{d}} * \frac{1\ \text{día}}{24\ \text{h}} * \frac{1\ \text{h}}{3\ 600\ \text{s}} * (50\ ^\circ\text{C} - 25\ ^\circ\text{C}) = 137,71 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Todos estos detalles son aproximados, puesto que se espera que 25 °C sea la temperatura ambiental promedio en Heredia y la temperatura que tenga de ingreso la fracción orgánica y los 50 °C es la temperatura a la que se tiene que encontrar el digestor para una tasa adecuada de producción de biogás. Existen relaciones empíricas para capacidades caloríficas que siguen modelos termodinámicos más complejos, pero para este fin este método se considera adecuado. Las capacidades caloríficas usadas para este cálculo fueron tomadas a una temperatura y presión específicas de un experimento, diferente a las condiciones ambientales que se manejan en el país. Se debe de realizar la cuantificación de la capacidad calorífica en planta cuanto esté en la planta en condiciones de arranque, con experimentos de cuánto tiempo dura en elevar 1 °C los residuos sólidos urbanos y otras relaciones empíricas, aunque este no es el objetivo de esta sección. De la misma forma, estos valores son base para el calentamiento en digestor, puesto que la mayoría de las tecnologías industriales no utiliza chaquetas ni serpentines, lo que se hace es rociar el lixiviado caliente por lo menos 2 veces al día y tener un buen aislamiento en la estructura.

Lodos y lixiviado

Con respecto a lo que es la cuantificación de materiales sólidos o lixiviados que quedan después de la digestión anaerobia no existe información que cuantifique este residuo dentro del proceso. Se ha estudiado y se ha logrado tomar en cuenta que aproximadamente el 60% de la materia orgánica puede ser reducida (Cecchi, Pavan, Musacco, Mata, & Vallini, 1993), pero no existe un estudio que especifique en cuanto a lixiviados.

Equipos necesarios para operar

Como se puede observar en el Cuadro 5.7 y las Figuras adjuntas 5.1 y 5.2, está la lista total de los equipos necesarios para poner en marcha el proyecto de tratamiento de los residuos sólidos municipales de los cantones de Heredia, San Isidro, San Pablo y San Rafael, esto basado en el análisis técnico realizado en capítulos anteriores y las necesidades de recuperación de material valorizable.

Se realizó un diagrama de flujo de proceso para la planta de separación mecánica y la de tratamiento biológico, se identificaron y se clasificaron las corrientes de las plantas, por medio de los cálculos previos y otros balances de masa necesarios que se muestra en la Figura 5.1 y 5.2.

Una vez realizado esto, se puede detallar las capacidades que deben tener los equipos para poder mantener la línea productiva continua, así como ciertas especificaciones definidas que tienen algunas de las maquinarias, con base en requerimiento técnicos de plantas operativas.

Para el cálculo del tambor rotatorio S-106 y su capacidad de procesamiento, viene implementada por el flujo de entrada al sistema de separación mecánica, que esta mostrada en el primer diagrama de flujo por la línea de flujo 1 y este corresponde a $43,67 \text{ m}^3/\text{h}$ ($7,56 \text{ t/h}$). Esta cifra corresponde al flujo volumétrico calculado de los residuos de toneladas de las municipalidades escogidas.

Entre la línea 7 hay una separación de materiales importante. Se retira en su mayoría el vidrio y el material orgánico. Dentro de esta también se puede encontrar trazas de material ferroso y plástico. Dentro de la línea 2 se espera la obtención de aluminio, material ferromagnético, cartón, papel y residuos no valorizables.

Por lo tanto, la línea 7 sería la suma de material ferroso, orgánico y vidrio. Y esta sería la capacidad que tiene que tener el separador magnético S-107.

$$L_7 = 4,96 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 1,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 0,26 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 6,55 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Después de este equipo sigue un separador por flotación S-108 este va a separar el material orgánico del vidrio y trazas de plástico. El cuál tiene una capacidad de procesamiento de:

$$L_8 = 6,55 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 0,26 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 6,28 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Se implementa una banda transportadora para retirar de la corriente 9 algunas trazas de plástico. Esta corriente tiene un valor según el Cuadro 5.5 de $4,96 \text{ m}^3/\text{h}$, este valor sería el que tiene el equipo S-109.

Para el caso de la línea 2 esta corresponde a la suma del material plástico, aluminio, trazas de material ferromagnético, cartón, papel y residuos, como se mencionó anteriormente o bien restar el valor de la línea 7. Tomando los valores que se tienen en el Cuadro 5.5 la capacidad que debe tener el equipo S-104 debe ser de:

$$L_2 = 43,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 6,55 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 37,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

En este equipo se retira manualmente los residuos no valorizables y bolsas plásticas que corresponden a un valor de 7,75 m³/h, por lo que la capacidad del equipo siguiente S-105 el separador de estrella debe ser:

$$S_e = 37,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 7,75 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 29,38 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

En este equipo se retira el cartón y el papel de lo demás, según el cuadro 5.5 este material tiene un valor de 12, 13 m³/h por lo que el equipo siguiente debe tener una capacidad de:

$$S_{mag} = 29,38 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 12,13 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 17,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

El separador magnético S-110 con una capacidad aproximada de 17,25 m³/h va a tener en su corriente de salida plástico y aluminio y por aparte algunas trazas de material ferromagnético. En el caso del separador Eddy S-111. Como las trazas de material ferroso no se pueden cuantificar con un valor específico, se toma que el material que ingresa a S-111 es el mismo del que sale del S-110. Este va ser también la capacidad del separador Eddy en el cual se separa 2,24 m³/h de aluminio de una corriente con aproximadamente 15 m³/h.

En el caso de la segunda planta de generación de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales, que corresponde al segundo diagrama de flujo. Se sabe que el plano 1 tenía una corriente de salida de material orgánico de 4,96 m³/h que corresponde a 89,82 t/d.

El molino O-101 para triturar el material orgánico debe tener esta capacidad de flujo mencionada y el tanque de preparación debe tener la capacidad de por lo menos retener 1 día de trabajo en la planta por lo que su volumen debe ser de:

$$V_t = 4,96 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 24 \text{ h} = 120 \text{ m}^3$$

En el caso del digestor según el Cuadro 5.2 se tiene un volumen aproximado de 2500 m³ que debe tomarse como prevención un factor de 1,2 para determinar su volumen recomendado.

$$V_d = 2500 \text{ m}^3 * 1,20 = 3000 \text{ m}^3$$

Operativamente, espacialmente y según limitaciones de la tecnología de digestión industrial, se recomienda un volumen de entre 1000 m³ a 1500 m³. Por lo tanto, se pueden tener de 3 a 2 digestores según la capacidad escogida para trabajar. En cuanto a la altura y el diámetro estos deben mantener una relación de 2. Para un volumen de 1000 m³ se puede trabajar con una altura de 18 m y un diámetro de 8,6 m. Si se escoge un volumen de 1500, se puede utilizar una altura de 20 m y un diámetro de 10 m. Estas relaciones pueden variar según el diseño o tecnología a implementar, esto debido a las patentes (Winter, Hahn, & Endar, 2009). Generalmente estos reactores son verticales u horizontales, pero con una altura en relación con el diámetro superior a 2.

La trampa de sólidos O-104 debe tener una capacidad de procesar 13.472,94 m³/d para una densidad de biogás de 1,27 kg/m³ a 25 °C sería:

$$\text{Trampa de sólidos} = 13.472,94 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 1,27 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ tonelada}}{1000 \text{ kg}} = 17,11 \frac{\text{t}}{\text{d}} = 561,37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

En el caso del retenedor de gases G-105 este debe tener capacidad de almacenar la producción de 1 días de biogás, por lo que el volumen debe ser de por lo menos:

$$R = 13.472,94 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} * 1 \text{ día} = 13.472,94 \text{ m}^3$$

En cuanto al purificación del biogás, como se mencionó anteriormente solo debe quitarse el ácido sulfhídrico y las trazas de humedad. Con respecto al diagrama de flujo la torre de purificación T-106 y el chiller T-108 puede describirse su capacidad operativa como una sola debido a que los componentes que se retiran en ambos es muy poco en comparación con el resto de la corriente. Por lo tanto la capacidad de la torre de purificación debe ser de:

$$Ch = 561,37 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 1,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 560,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Con respecto al motor de cogeneración N-109 y N-110 su capacidad viene dada por la remoción de agua y otras trazas de la corriente anterior.

$$Mot = 560,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 4,49 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 555,76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

En el caso del filtro prensa o centrifugador que tiene que separar la humedad del digestato, generalmente hay una disminución de masa de 60% de los 89,82 que ingresa como fracción orgánica por lo tanto la capacidad del equipo S-116 sería:

$$F = 89,82 \frac{\text{t}}{\text{d}} * 0,60 = 54 \frac{\text{t}}{\text{d}}$$

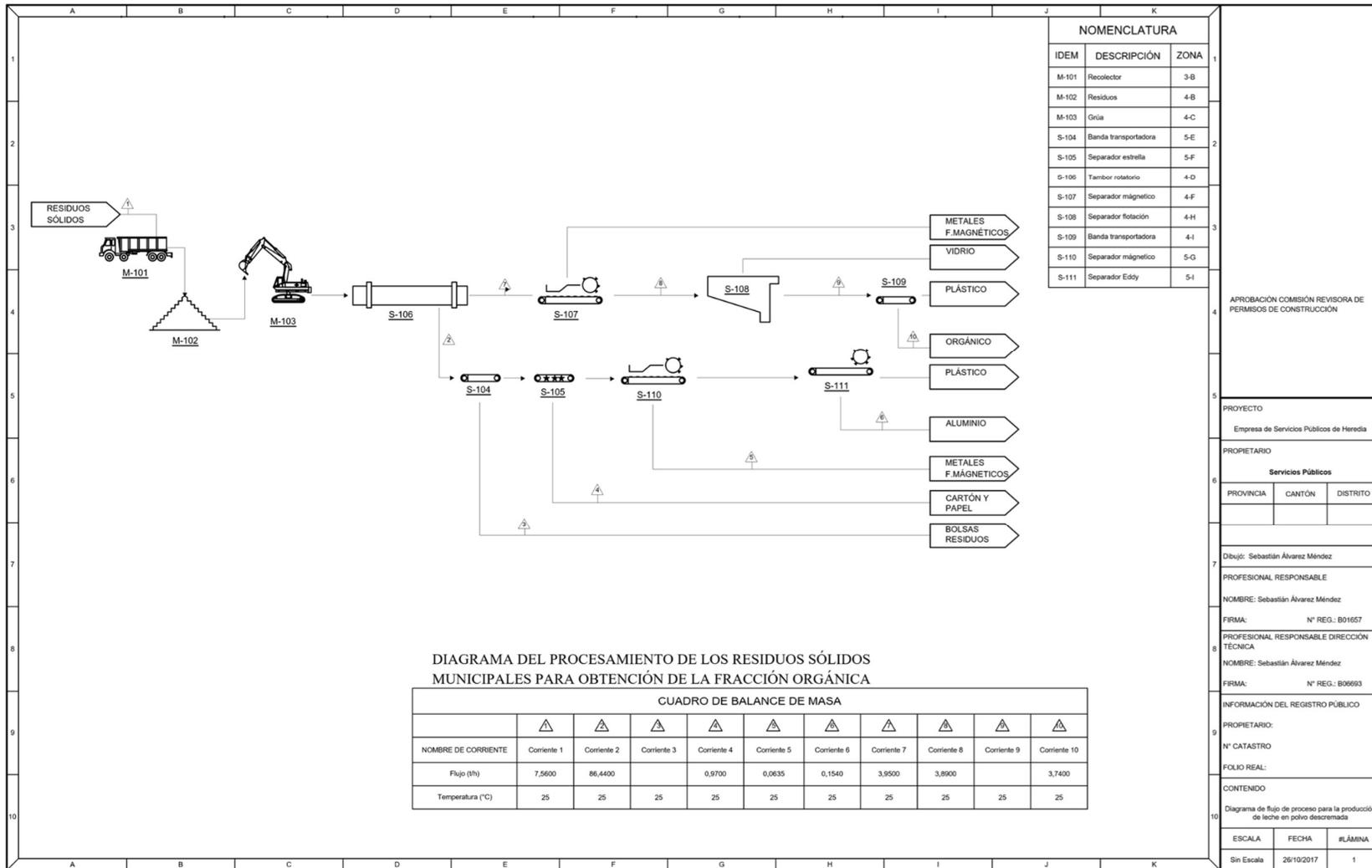


Figura 5.1 Diagrama de flujo de proceso para la separación mecánica de los residuos municipales de Heredia.

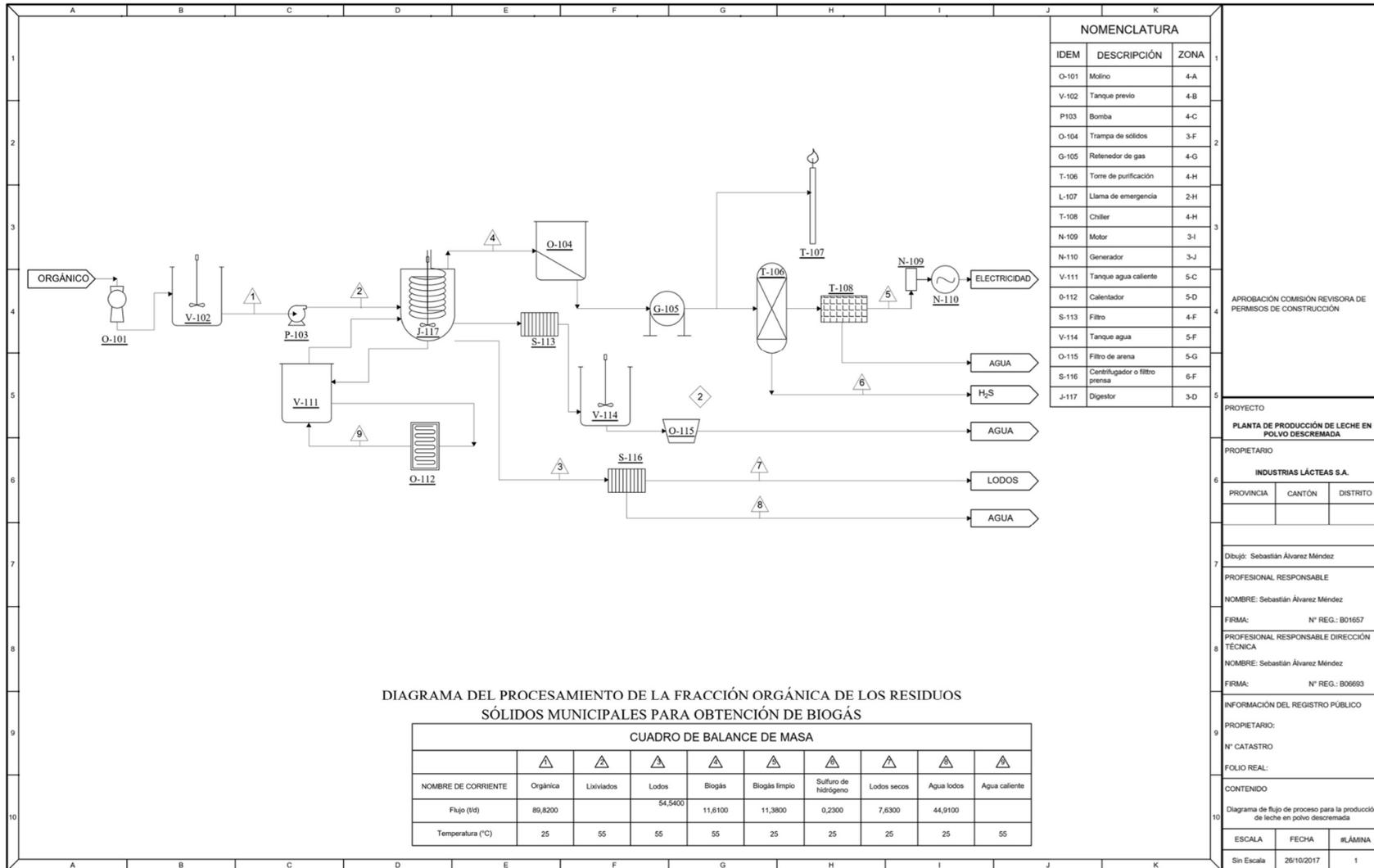


Figura 5.2 Diagrama de flujo del proceso de digestión anaerobia para la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales de Heredia.

Cuadro 5.7. Lista de equipos para el proyecto de aprovechamiento de los residuos sólidos municipales de los cantones de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo.

Equipo	Descripción/Capacidad
Banda transportadora	Ancho mínimo de 16 pulgadas, velocidad máxima de 10 m/s Capacidad de Procesar como mínimo 44 m ³ /h
Separador de Estrella	Capacidad de procesar por lo menos 30 m ³ /h
Tambor Rotatorio	Capacidad de procesar por lo menos 44 m ³ /h
Separador magnético	Capacidad de procesar por lo menos 20 m ³ /h
Separador Eddy	Capacidad de procesar por lo menos 20 m ³ /h
Separador por densidad	Capacidad de procesar por lo menos 7 m ³ /h
Equipo de Trituración para Reciclaje (para disminuir tamaño de materia orgánica)	Capacidad de procesar por lo menos 5 m ³ /h. Disminución de tamaño de un tamaño promedio de 10 cm a 5 cm
Digestores de acero o tanques de material similar	1000 m ³
Planta combinada de calor y energía	Capacidad de trabajar un flujo de gas de al menos 14.000 m ³ /día (600 m ³ /h)
Purificador de gas de esponja de hierro	Capacidad de trabajar un flujo de gas de al menos 14.000 m ³ /día (600 m ³ /h)
Purificador de Biogás	Capacidad de trabajar un flujo de gas de al menos 14.000 m ³ /día (600 m ³ /h)
Filtro prensa o Centrifugador deshidratador de digestato (Retirar el contenido de humedad del digestato)	Capacidad de procesar 3 m ³ /h
Trampa de Agua	Capacidad de procesar la corriente de biogás de por lo menos de 600 m ³ /h
Contenedor de Biogás	Capacidad de almacenamiento de 16.000 m ³
Bomba sólidos o bomba horizontal chopper (movilizar fracción orgánica de tanque de preparación al digestor)	Capacidad de movilizar en promedio 5 m ³ /h
Bomba para movilizar el slurry (digestato después de la digestión)	Capacidad de movilizar en promedio 11,38 m ³ /h

Continuación Cuadro 5.7. Lista de equipos para el proyecto de aprovechamiento de los residuos sólidos municipales de los cantones de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo.

Equipo	Descripción/Capacidad
Tanque de Preparación	Para alimentar al digestor diariamente y mantener el flujo pistón se requiere un tanque para preparar la fracción orgánica, este debe ser de 120 m ³ , adicional a esto se debe considerar el sustrato que dependiendo de la tecnología que se use se debe mantener una relación 1:6 entre fracción orgánica y sustrato.
Intercambiador de calor	Depende de las condiciones de operación y temperaturas en digestores.

Localización del proyecto

La localización de este proyecto va a estar limitada a las zonas centrales del cantón de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo. Puesto que inicialmente y por condiciones técnicas fue limitado el alcance total del proyecto, se recomienda para seleccionar un terreno tomar en cuenta variables como: acceso a servicios de agua, energía eléctrica, alcantarillado, recorridos para la materia prima y los productos generados, tráfico de las zonas cercanas, las disposiciones ambientales para la instalación de este tipo de industria en las diversas zonas preseleccionadas, cercanía a fuentes móviles de agua y disponibilidad de grandes espacios para colocar la separación mecánica y biológica en una misma etapa. El espacio total requerido para la planta está limitado por los digestores que son los que ocupan más espacio, cada uno de estos tienen un área aproximada de 55 m² si se toman como base los reactores verticales y para el área de almacenadores, tanques de preparación, generación eléctrica, se ocupa un área de por lo menos 2000 m². Para esta etapa se ocupan al menos 5500 m² entrando a considerar un espaciamiento adecuado de los equipos y considerando espacios para el acomodo temporal de materia orgánica, puesto que la recolección en las zonas no es diaria. También existen plantas de 40 000 toneladas anuales de residuos municipales que tienen un tamaño de 7 000 m² (Department for environment food and rural affairs, 2007), que se considera en comparación con el área estimada un tamaño definido para esta parte del proyecto como adecuado.

Para la separación mecánica no se tienen tamaños de los equipos, pero existen datos de tamaño de plantas instaladas según el tonelaje total que procesen por hora. Para una planta que procese 875 000 toneladas al año se ocupa un espacio de 65 000 m² (Dubanowitz, 2000), por regla de 3 se van a requerir por lo menos 5 000 m². Generando un área total por lo menos 10500 m². En el Cuadro 5.8 se va a observar los criterios mencionados previamente. De acuerdo a las variables seleccionadas entre todos los terrenos no existe una diferencia significativa, excepto por la variable de recorridos, donde existe una menor distancia recorrida se encuentra el terreno en la zona industrial de Santa Rosa y el encontrado en la zona aledaña de Miraflores.

Cuadro 5.8. Matriz de criterio para escogencia de localización del proyecto.

Terreno	Acceso a servicios básicos	Acceso de vehículos pesados	Recorrido de materia prima y productos	Disposiciones ambientales	Cercanía a fuentes de agua móviles	Disponibilidad de espacio
Santa Rosa, Santo Domingo	Con todos los servicios básicos	Si hay acceso controlado	Existe una distancia promedio entra cada cantón y la zona industrial de 6 km	Es una zona industrial, se pueden establecer operaciones unitarias	Si hay cerca 2 vertientes del río Pirro a 100 m aproximadamente	Hay disponibilidad de terreno de hasta 36.700 m ²
Ulloa	Con todos los servicios básicos	Si hay acceso controlado ya que es zona industrial Metropark	Existe una distancia promedio entre cada cantón y la zona industrial de 10 km	Es una zona industrial, se pueden establecer operaciones unitarias	Río Pirro a 1 km	Terrenos disponible de 8.500 m ²
Flores	Con todos los servicios básicos	A 600 m de la carretera hacia Alajuela, por el MegaSuper de San Joaquín	Entre los cantones del proyecto existe una distancia a este terreno promedio de 10 km	Uso de suelo industrial comercial, mixto.	Afluente del Río Pirro a 1 km	Terreno disponible de 8.600 m ²

Continuación Cuadro 5.8. Matriz de criterio para escogencia de localización del proyecto.

Terreno	Acceso a servicios básicos	Acceso de vehículos pesados	Recorrido de materia prima y productos	Disposiciones ambientales	Cercanía a fuentes de agua móviles	Disponibilidad de espacio
Belén	Con todos los servicios básicos	Aledaño a Intel Costa Rica	A una distancia de los cantones de servicio de 15 km	Uso industrial y manufactura	Cerca del Río Segundo	Sin disponibilidad de área disponible
Heredia Sur	Con todos los servicios básicos	Cerca del Hospital Nuevo de Heredia	A una distancia de cantones de servicio de 9 km en promedio	Se desconoce tipo de tierra	A 500 m del Río Pirro	Sin disponibilidad de área disponible, pero en vista aérea superior a 5000 m ²
Lagunilla	Con todos los servicios básicos	Cerca del campus de Lagunilla de la UNA y con acceso frontal a calle principal	A una distancia de cantones de servicio de 11 km en promedio	Tipo de tierra industrial	Cerca del Río Virilla a menos de 1 km	Sin disponibilidad de área disponible, pero en vista aérea superior a 5000 m ²
Miraflores	Con todos los servicios básicos	Cerca de la Fábrica Nacional de Chocolates	Existe una distancia de cantones de servicio de 9 km en promedio	Tipo de tierra industrial	A menos de 100 m del afluente del Río Pirro	Sin disponibilidad de área disponible, pero en vista aérea superior a 5000 m ²



Figura 5.1. Ubicación de terrenos en Santo Domingo de Heredia.



Figura 5.2. Ubicación de terrenos en Ulloa de Heredia.

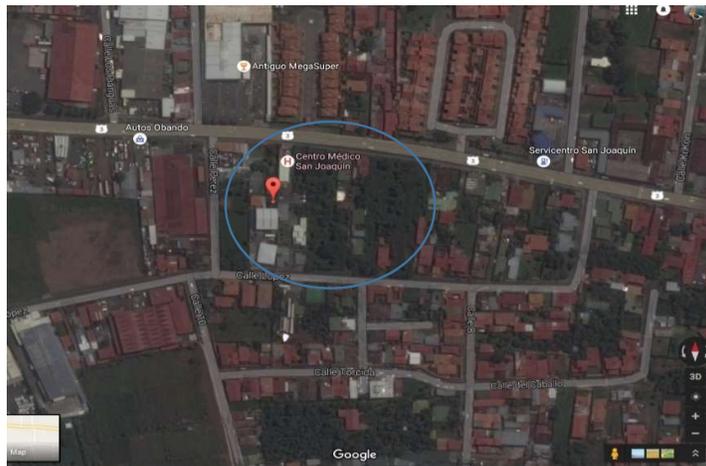


Figura 5.3. Ubicación de terrenos en Flores de Heredia.



Figura 5.4. Ubicación de terrenos en Belén de Heredia.

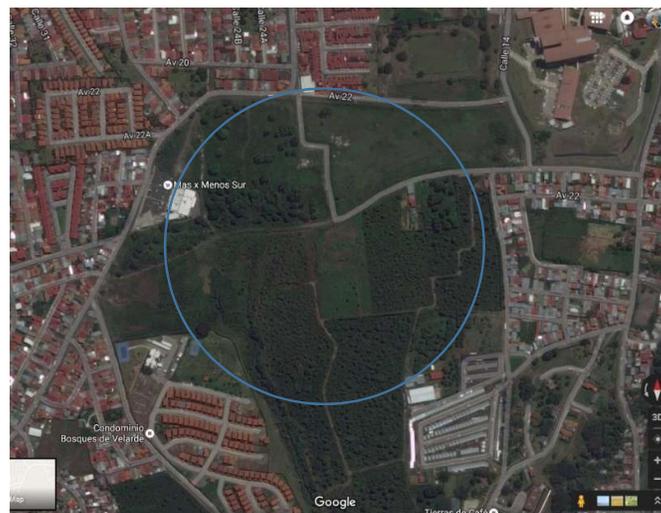


Figura 5.5. Ubicación de terrenos en Heredia Sur.

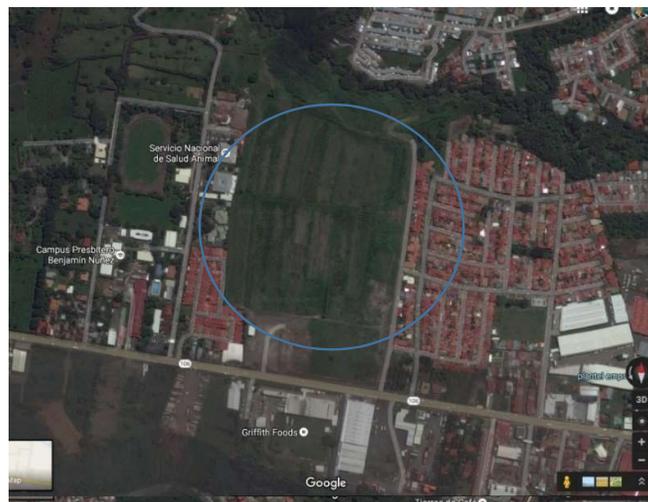


Figura 5.6. Ubicación de terrenos en Lagunilla de Heredia.



Figura 5.7. Ubicación de terrenos en Miraflores de Heredia.

Capítulo VI: Productos y subproductos y demanda de los mismos del proyecto de tratamiento mecánico biológico en algunos cantones urbanos de Heredia.

Los productos generados mediante la separación mecánica y que son importantes dentro del marco de reciclaje del país son el cartón y papel, metales, vidrio, plástico y aluminio. Dentro del marco de productos del tratamiento biológico está el digestato (restos de residuos luego de la digestión de los residuos sólidos municipales), el lixiviado (fracción líquida que se puede generar durante la digestión de los residuos orgánicos) y el biogás que se transforma en energía eléctrica y como fuente de calor. El posible biogás generado teóricamente debe de tener una composición de 55 % metano, 45 % dióxido de carbono y el resto trazas de ácido sulfhídrico, vapor de agua, entre otros.

Los proyectos asociados a tratamientos biológicos están en un rango de vigencia de no menos de 5 años y como máximo de 15 a 20 años. Para el caso de las plantas recuperadoras de materiales estas tienen una vida media de 10 años.

Área de influencia y análisis de sitio

Dentro del marco de beneficiarios de este proyecto se encuentra todos los residentes de las zonas de Heredia, San Isidro, San Pablo y San Isidro. En el caso de Heredia centro se ofrecería el servicio a 32.307 unidades habitacionales, a 2.792 unidades comerciales, a 68 instituciones públicas y a 1.461 asentamientos informales (ranchos y viviendas) (Municipalidad de Heredia, 2013).

Para el caso del distrito de San Rafael, este cuenta con una población de 9668 aproximadamente. El distrito está conformado por 2945 viviendas y 331 comercios (Aguilar, 2013).

En el cantón de San Isidro hay una población estimada de 20.633 habitantes para un total de viviendas de 6167 y en el cantón de San Pablo existe una población de 27.671 habitantes para un total de viviendas de 8.603 (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011).

Según estimaciones del INEC para el año 2015 en el cantón de Heredia existiría una población de 135.292 si se incluye el cantón de Vara Blanca, en San Rafael 51.736, San Isidro 21.985 y en San Pablo de 30.144 (Instituto Nacional de Censo y Estadística de Costa Rica, 2011).

En cuanto al área de influencia del proyecto este abarca 282,6 km² del cantón de Heredia, 48,4 km² del cantón de San Rafael, 27 km² del cantón de San Isidro y 7,5 km² del cantón de San Pablo. Este proyecto tendría un área de influencia total de 365,5 km². El total de personas por kilómetro cuadrado para Heredia es de 437, para San Rafael de 950, San Isidro de 765 y San Pablo de 3.675 (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011).

Tendencia futura de la oferta de productos y servicios

Para establecer la oferta futura de los productos, se necesita estimar las proyecciones de población para el área de influencia del proyecto, estas se encuentran en el siguiente apartado. Con ayuda de las proyecciones de población realizadas por el INEC y el factor de generación de residuos sólidos tomada constante para un período de evaluación de 10 años, se realizaron las proyecciones de generación de residuos sólidos municipales. Una vez con estos datos y sabiendo las composiciones promedio del área de estudio se puede estimar el incremento en la oferta de los residuos valorizables de Heredia, San Rafael, San Isidro y San Pablo.

Como se puede observar en las siguientes figuras el aumento de desechos orgánicos proyectado incrementa en el cantón central de Heredia aproximadamente 2 000 toneladas en un lapso de 10 años, en el caso de los otros cantones se observa un aumento promedio de 700 toneladas para cada sector. Cabe considerar que aproximadamente la mitad de estos desechos tienen la posibilidad de convertirse en bio abono.

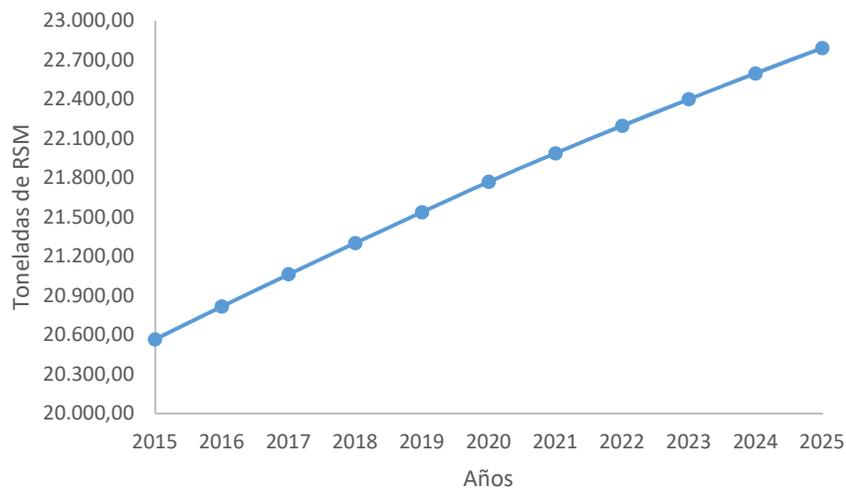


Figura 6.1. Proyección de producción de desechos orgánicos en el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

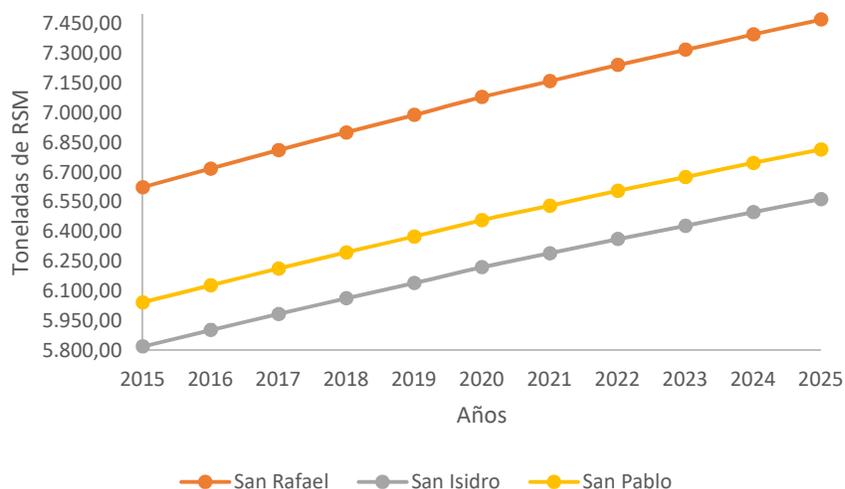


Figura 6.2. Proyección de generación de desechos orgánicos en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

Para el caso del cartón en el cantón de Heredia se observa que existe un incremento de 300 toneladas en el periodo de evaluación, en caso aparte para los cantones restantes tienen un aumento en promedio de 200 toneladas. Lo que da un incremento por año de aproximadamente 20 toneladas por año.

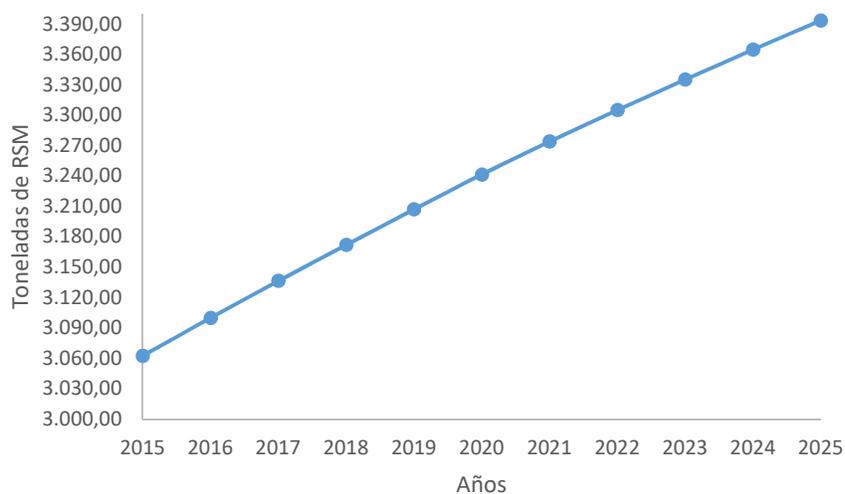


Figura 6.3. Proyección de producción de cartón y papel en el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

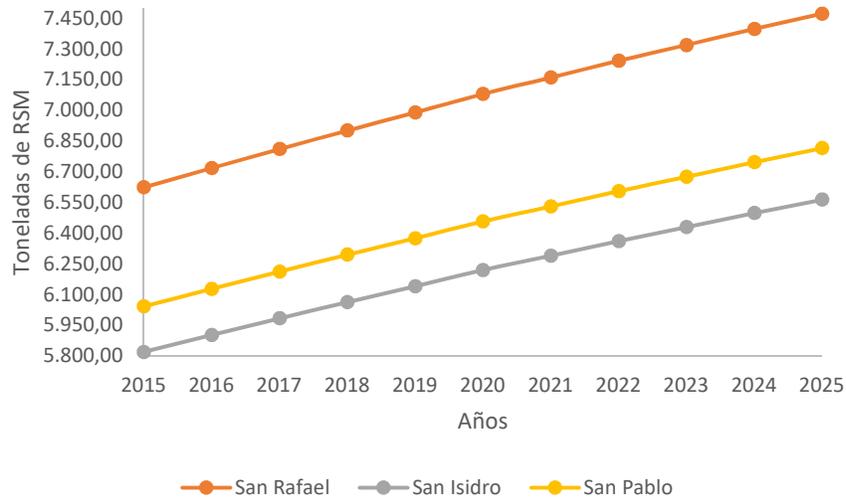


Figura 6.4. Proyección de generación del papel y cartón en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

Para el caso de los metales en los estudios de composición del cantón de San Isidro no se contempla este producto, por lo que dentro de la proyección no se va a contemplar los posibles valores que se puedan obtener por generación de estos materiales. En el caso de Heredia se puede presentar un aumento de 60 toneladas de estos productos y para los demás cantones se puede deducir un incremento de al menos 30 toneladas para este residuo.

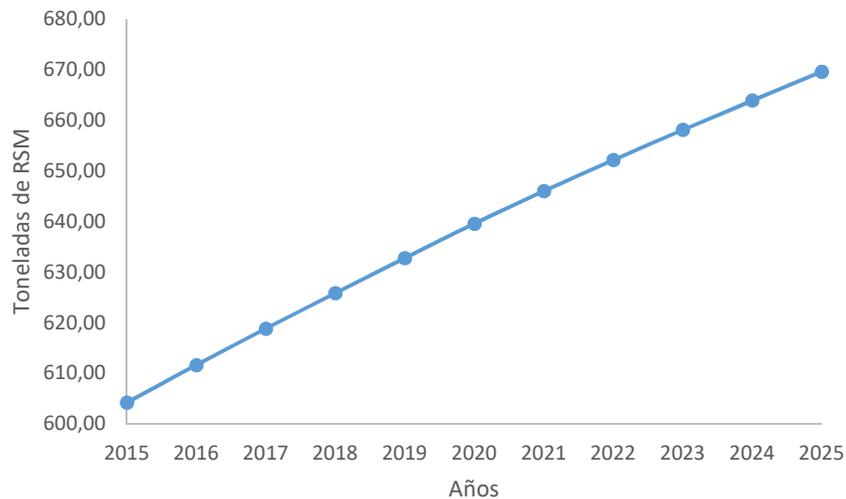


Figura 6.5. Proyección de producción de metal en el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

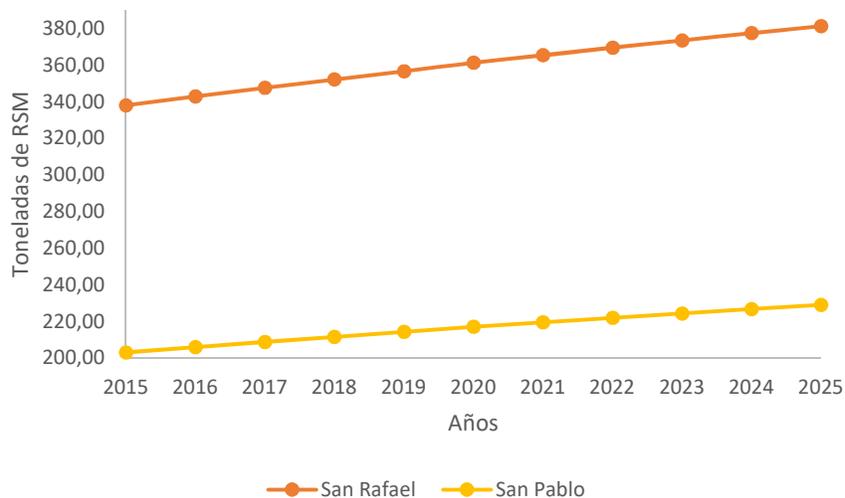


Figura 6.6. Proyección de generación de metales en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

El caso del vidrio es el que muestra un aumento menos elevado, debido a que en los estudios de composición era el material menos presente. Para Heredia se puede ver un aumento de por lo menos 60 toneladas, mostrando así un aumento aproximado por año de 70 toneladas. Para los otros cantones urbanos seleccionados se puede observar un crecimiento de 50 toneladas en el todo el período.

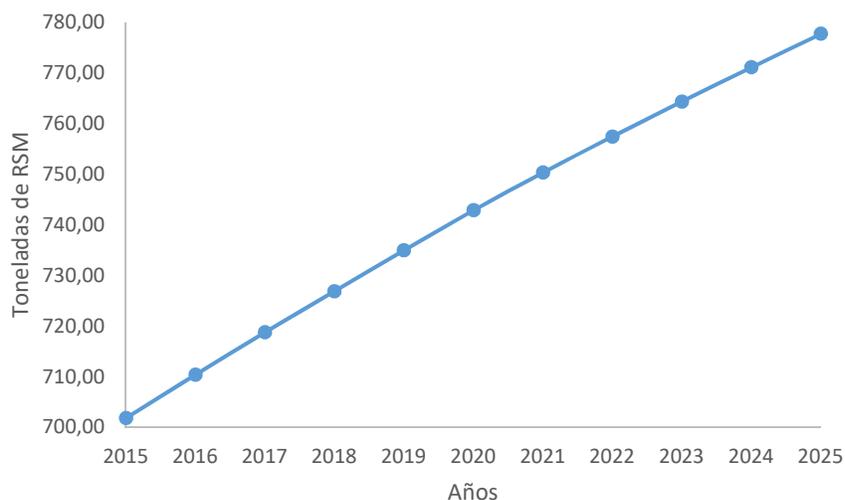


Figura 6.7. Proyección de producción de vidrio en el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

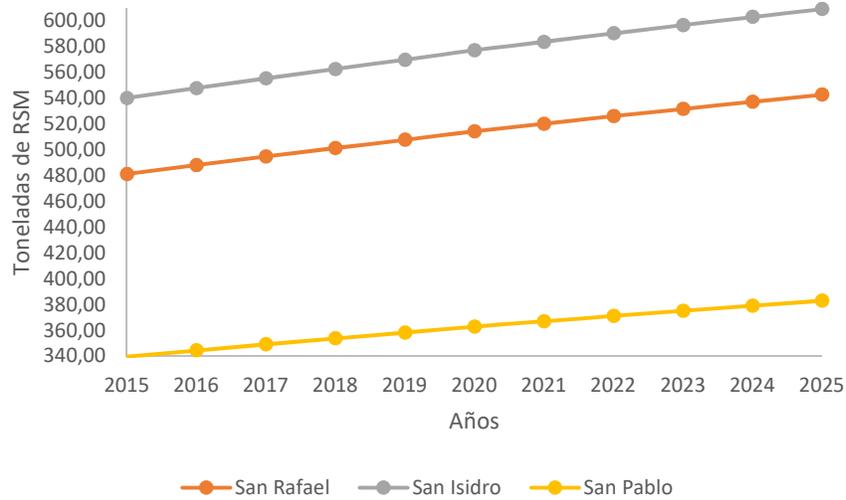


Figura 6.8. Proyección de generación de vidrio en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

El plástico es uno de los componentes mayoritarios dentro de la zona de estudio, para el caso de Heredia se puede observar un aumento de por lo menos 300 toneladas, dándose así un incremento de 30 toneladas cada año. Para los demás sectores su crecimiento en generación de residuos sólidos generaría un aumento de por lo menos 200 toneladas por año cada una de plástico.

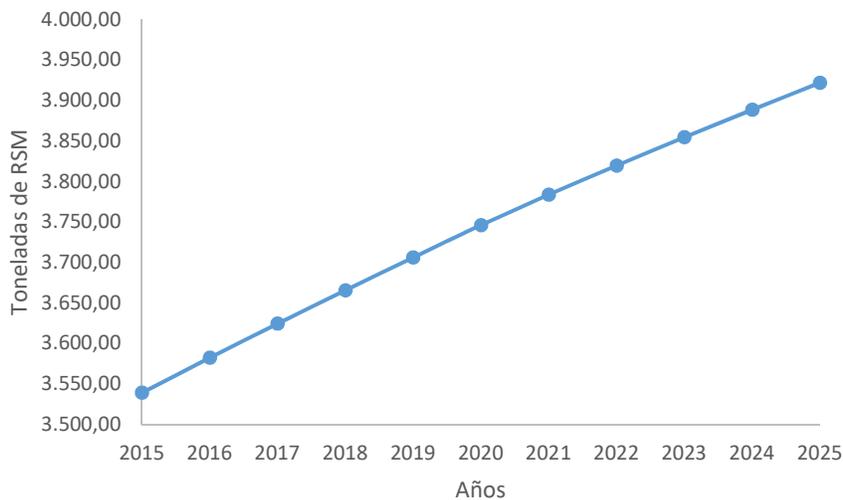


Figura 6.9. Proyección de producción de plástico para el cantón de Heredia desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

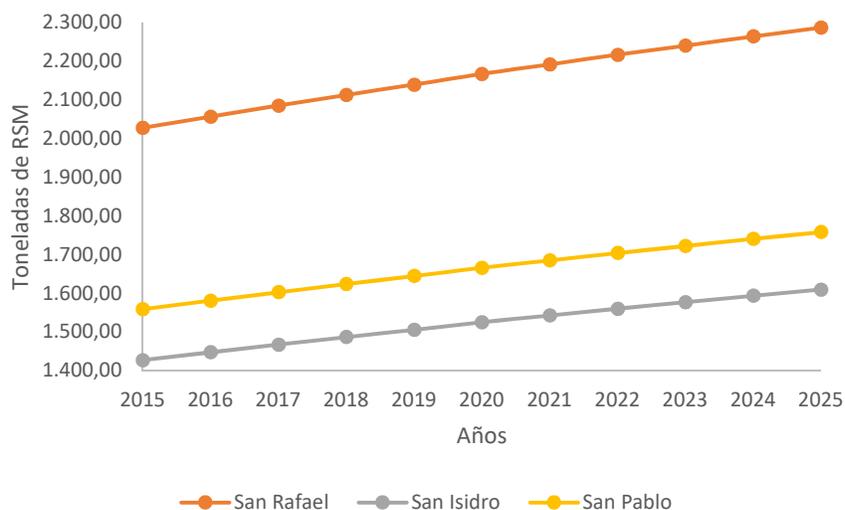


Figura 6.10. Proyección de producción de plástico en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

En el caso de materiales no ferrosos, que incluyen materiales como aluminio y latón. El cantón de Heredia no contempla este material dentro de sus estudios de composición, solo existen datos generales para los otros cantones, estos muestran un aumento de 30 toneladas en el período de 10 años, generando así 3 toneladas más a las contempladas cada año.

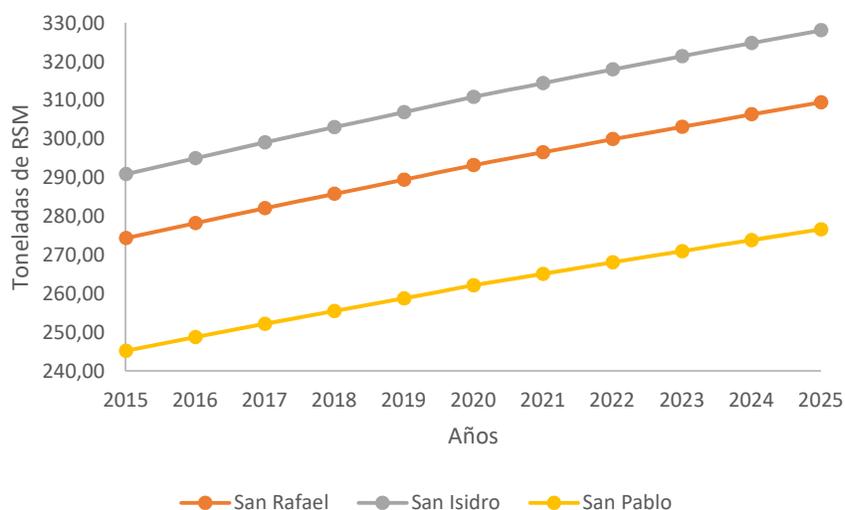


Figura 6.11. Proyección de generación de materiales no metálicos en los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo desde el año 2015 al 2025. Elaboración propia

Análisis de la producción histórica de RSM, proyecciones y análisis de crecimiento demográfico

Como se estableció en el Capítulo I, el país está en un aumento poblacional elevado desde los años 90 y esto genera un efecto en la generación de residuos sólidos como se puede notar en el Capítulo II. En esta sección se va a poder apreciar el crecimiento demográfico proyectado por el INEC y la repercusión en la generación de residuos sólidos municipales.

Como se puede apreciar en la Figura 6.12, el cantón de Heredia en comparación con los demás cantones de estudio es el que tiene mayor población y el que según proyecciones del INEC va ser el cantón que afronte un mayor crecimiento poblacional de aproximadamente de 21.000 personas dentro de un período de tiempo de 15 años.

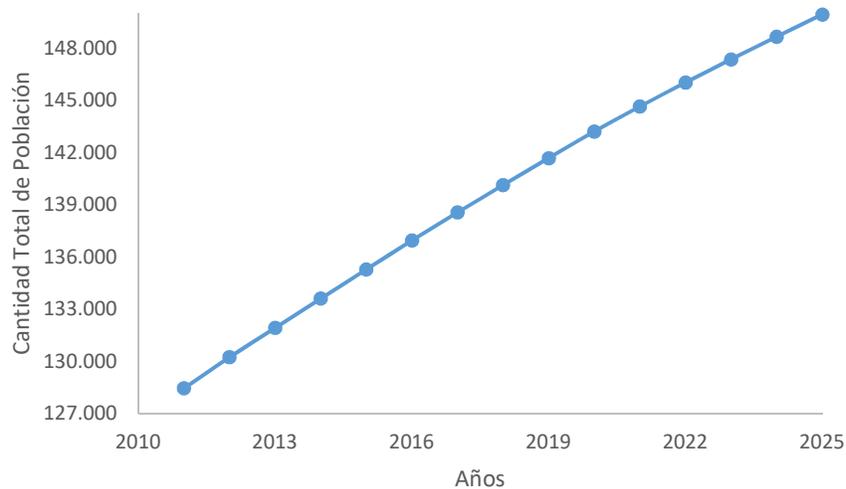


Figura 6.12. Proyección de población para el cantón de Heredia del año 2010 hasta el 2015 según proyecciones del INEC. Elaboración propia con bases de datos de (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011)

Para los restantes cantones se puede apreciar en la Figura 6.13 el aumento poblacional estimado. Los cantones de San Isidro y San Pablo presentan el menor crecimiento esperado, con base en la Figura siguiente se puede estimar un crecimiento de apenas 3 000 habitantes para población. En caso contrario para el cantón de San Rafael según las proyecciones realizadas se espera un aumento de por lo menos 9 000 habitantes.

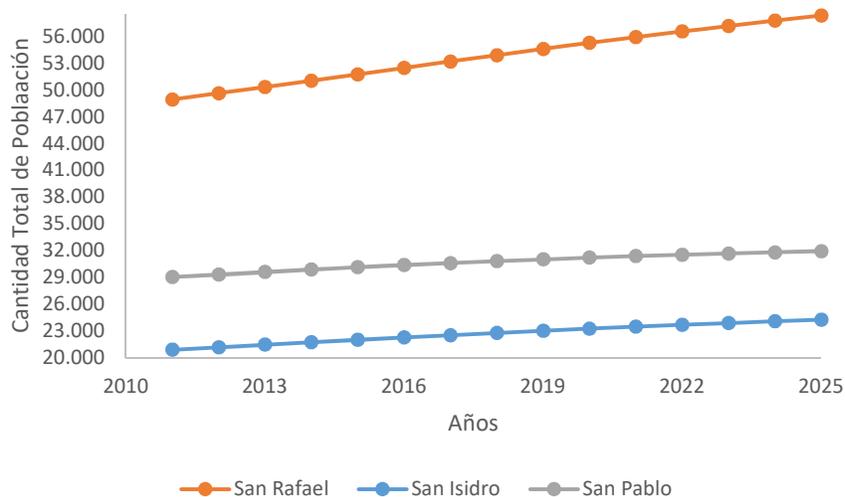


Figura 6.13. Proyección de población para los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo del año 2010 hasta el 2015 según proyecciones del INEC. Elaboración propia con bases de datos de (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011).

Tomando una generación constante a lo largo de los años de kg/habitante*día para la zona de estudio se pueden realizar estimaciones de cantidad de RSM para los cantones que integran este estudio. Como se puede observar en la Figura 30 para el cantón de Heredia se puede observar un aumento de por lo menos 4 000 toneladas de residuos sólidos municipales en el lapso de evaluación de 10 años.

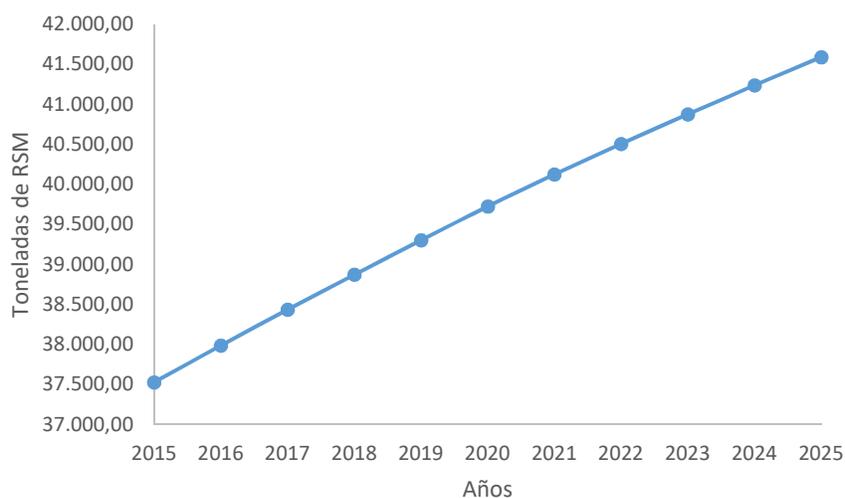


Figura 6.14. Proyección de generación de RSM del cantón de Heredia del año 2015 hasta el 2025 con un índice constante de generación de residuos por habitante. Elaboración propia con bases de datos de (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011).

En el caso del cantón de San Rafael se observa del gráfico anterior que el aumento poblacional a lo largo de 15 años no fue tan alto comparado con el cantón de Heredia, por lo que la generación de residuos municipales se estima superior a 1 800 toneladas en las proyecciones de 10 años. Para el caso de San Isidro y San Pablo se puede ver que el aumento para cada cantón no es mayor de 1.600 toneladas. Por lo que para el periodo que existen proyecciones de población de bases de datos de INEC se estima un aumento de los datos suministrados en el Capítulo II de 9 000 toneladas para toda la zona que quiere abarcar el proyecto. Cabe destacar que del tonelaje anterior el 50 % corresponde a residuos orgánicos, por lo que si existe un crecimiento lineal se espera que por año los residuos orgánicos aumenten en 450 toneladas. Dicho aumento debe ser considerado para posteriores ensayos de pre factibilidad en el proyecto.

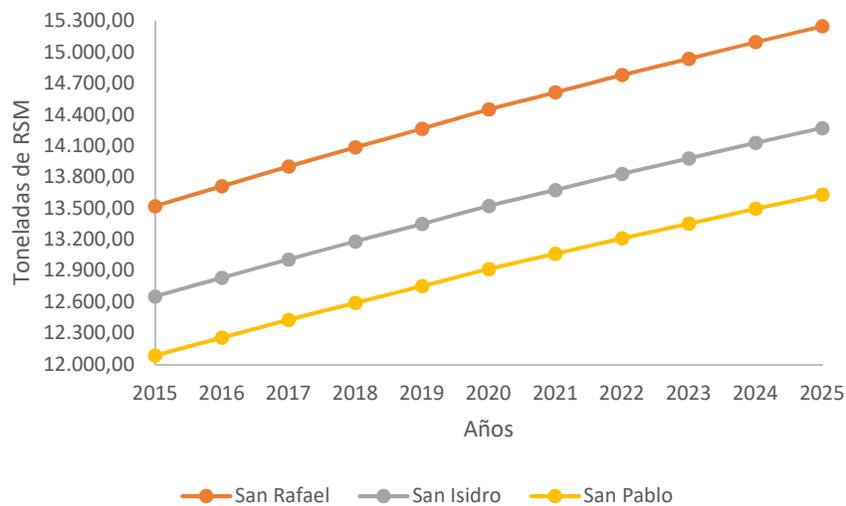


Figura 6.15. Proyección de generación de RSM para los cantones de San Rafael, San Isidro y San Pablo del año 2015 hasta el 2025 con un índice constante de generación de residuos por habitante. Elaboración propia con bases de datos de (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2011).

Identificación y demanda de usuarios y beneficiarios e información sobre consumo

Existe varios lugares en el país donde se lleva a cabo la recolección de materiales valorizables, la mayoría de estos lugares pertenecen al sector informal, aunque existen grandes empresas que procesan o exportan algunos tipos de materiales, por ejemplo, Coca Cola Femsa (plástico y tetrabrick), Kimberly Clark (papel), Vicesa (vidrio), Florida Bebidas (plástico, aluminio, tetrabrick), Empaques Santa Ana (cartón). A continuación, se verá una lista de gestores autorizados o empresas que recolectan cartón y papel, metales, vidrio, plástico y aluminio, que son los posibles materiales a recuperar dentro del proceso de separación mecánica. Muchos centros tienen la disponibilidad de

recibir varios tipos de residuos valorizables, por lo que algunos lugares seleccionados son colocados para un producto específico, pero con la posibilidad de recibir otros. No todos estos centros mezclados fijan una cantidad de residuo por mes por lo que se desconoce cuánto puede recibir por cada tipo de producto.

En el caso del vidrio existen más de 400 centros de acopio que lo reciben, pero no todos tienen la capacidad de procesarlo en el Cuadro 6.1 se muestra el centro que tienen una capacidad máxima a 100 toneladas métricas y su contacto.

Cuadro 6.1. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar el vidrio en Costa Rica en el año 2016. (Ministerio de Salud, 2016)

Razón Social del Gestor	Provincia	Descripción de Residuo	Cantidad de residuo por mes (t/mensual)	Tipo de gestión
Vidriera Centroamericana S.A.	Cartago	Vidrios	900	Recolección, acopio y valorización

En el caso del papel y cartón existen varios centros fuertes que pueden tratar dicha cantidad en el Cuadro 6.2 se muestran los más grandes del país. El que destaca es el Centro de Empaques Santa Ana que tiene la capacidad de recibir 2600 toneladas métricas y tienen su propia planta de valorización.

Cuadro 6.2. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar el papel y el cartón en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).

Razón Social del Gestor	Provincia	Descripción de Residuo	Cantidad de residuo por mes (t/mensual)	Tipo de gestión
Recicladora Calma S.A.	San José	Papel Cartón	130	Recolección Transporte Acopio Valorización
Coca Cola Femsa	Alajuela	Tierra, Papel, Cartón, Materiales de Embalaje	350	Recolección, Transporte. Acopio Valorización Desensamblaje Exportación.
Empaques Ana S.A.	Santa Ana	Papel y cartón	2 600	Servicios de recolección, transporte, acopio y valorización

En el caso de los metales se muestra en el Cuadro 6.3 centros que tiene disponibilidad de procesar por lo menos 100 toneladas métricas en el país, existen otros con capacidad menores que pueden ser considerados y se encuentra en la lista adicional del anexo.

Cuadro 6.3. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar los metales en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).

Razón Social del Gestor	Provincia	Descripción de Residuo	Cantidad de residuo por mes (t/mensual)	Tipo de gestión
Acopiadora Amaro S.A.	San José	Metales	170	Recolección,
		Baterías	350	Transporte.A copio
		Baterias	10	Tratamiento Valorización Exportación
Recicladora del Occidente	Alajuela	Residuos metálicos	150	acopio y valorización

Para el caso del plástico y de materiales no metálicos como el aluminio los centros que los procesan se muestran en el Cuadro 6.4. Dentro de estos Florida Bebidas es el mayor receptor y procesador de este material, pero cabe recalcar que Coca Cola Femsa también recibe plástico y tetrabrik, por lo que también es posible que se una fuente en el mercado.

Cuadro 6.4. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar plásticos y aluminio en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).

Razón Social del Gestor	Provincia	Descripción de Residuo	Cantidad de residuo por mes (t/mensual)	Tipo de gestión
Distribuidora La Florida S.A.	Heredia	Envases de aluminio Polilaminados de hojalata y PET.HDPE	353	Recolección Transporte Acopio y Exportación
Corporación Internacional Los Ticoscrap S.A.	Cartago	Chatarra y residuos de aluminio	1 000 (960 chatarra y 40 residuos de aluminio)	Exportación
Recolectora y Empacadora Capri S.A.	San José	Papel, plástico, vidrio, cartón, aluminio, tetra pak	400	Recolección, transporte, acopio, valorización, desensamblaje y tratamiento
Mundo Rep S.A.	Heredia	Plásticos post-comercial y post-industrial	180	Recolección , transporte, acopio y valorización

Para el caso del digestato de RSM no existe un mercado como tal, ya que en el país no existe ninguna planta que procese estos residuos. Si se quisiera estudiar un mercado similar a este se podría asociar al mercado de abonos o bio fertilizantes. En el cuadro de gestores autorizados no existe información directa de este mercado, pero si existen empresas autorizadas a tratar lodos de aguas residuales que son tratados en muchos casos como lodos activados bajo tecnologías anaerobias. Aunque en esta lista se incluyen agrocentros y lugares que producen abono. La última empresa Abonos Vivo S.A. es la más adecuada, ya que esta elabora los abonos orgánicos y tiene una recepción mensual de mas de 1600 toneladas métricas, por lo que tienen capacidad para asimilar el abono que se produzca en la planta.

Cuadro 6.5. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar residuos orgánicos en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).

Razón Social del Gestor	Provincia	Descripción de Residuo	Cantidad de residuo por mes (t/mensual)	Tipo de gestión
Agrofertilizantes Nerkin S.A.	Alajuela	Lodos provenientes de planta de tratamiento de aguas residuales	30	Servicio acopio, tratamiento y disposición final
Agrecicla	Alajuela	Residuos orgánicos provenientes de industria agroecuaría y maderera	100	Recolección, transporte, acopio, valorización, tratamiento y disposición final
Agro Centro Tropical S.A.	Cartago	Residuos Agroindustriales	100 residuos agroindustriales	Servicios de Transporte, valorización y tratamiento
BioFutura Market S.A.	Alajuela	Residuos de grasa animal y lodos tratados de sistemas de tratamiento de aguas residuales Residuos de alimentos, madera y hojas secas trituradas	500	Recolección, transporte, acopio y valorización
Abonos Vivos S.A.	Cartago	Residuos orgánicos agrícolas industriales	1 666	Valorización (fabricación de abono orgánico)

Estimaciones de consumo o empleabilidad para definir la tendencia de la demanda futura

El sector que más aprovecha los bienes valorizables producto del reciclaje o recolección separada de las municipalidades sigue siendo hasta cierto punto un sector muy informal. La lista de gestores autorizados no maneja datos generales precisos por año de material que recibe para trasladar, tratar y valorizar. Solo se lleva un registro aceptable en caso de industrias grandes tales como Empaques Santa Ana o Florida Bebidas, pero aún en estos casos no se abarca todos los productos que se consideran reciclables. Analizado esto, no se pueden realizar estimaciones de consumo o tendencia de las demandas precisas de cada sector por las razones expuestas anteriormente. Para el único producto que si se puede investigar la dinámica de la oferta y la demanda en el país es el caso de los abonos, para el cual existe cierta información confiable del mercado. Como se puede observar en las Figuras 6.19 y 6.20 se destinaron \$183 000 000 en la adquisición total de 466 000 toneladas de abono. Como se observa comparativamente de los datos de exportaciones contra importaciones de abonos agrícolas en Costa Rica (Central America Data, 2016) el valor de las importaciones es superior a las importaciones que se realizan, lo que puede indicar que el mercado costarricense no da abasto con la posible demanda del producto y que implementar la venta de un bio abono podría llegar a disminuir los costos totales y toneladas de abono que se importan.

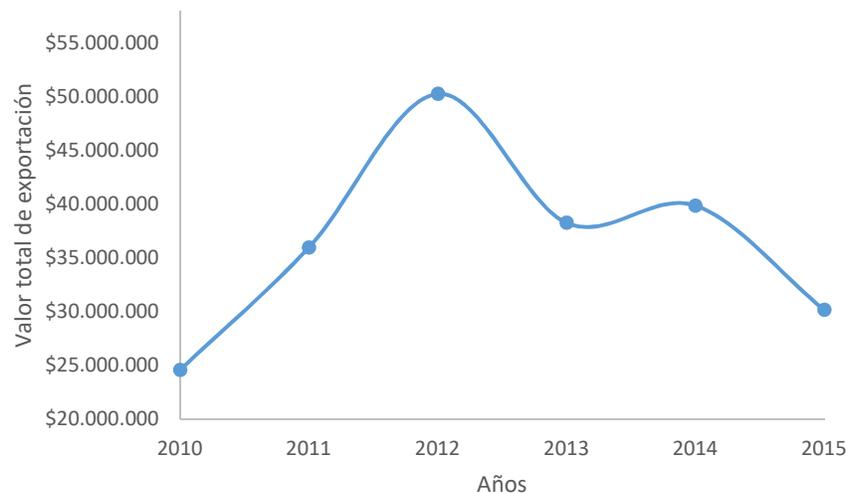


Figura 6.16. Valor total de exportación de abonos desde el año 2010 al 2015. Elaboración propia con base de datos de (Central America Data, 2016)

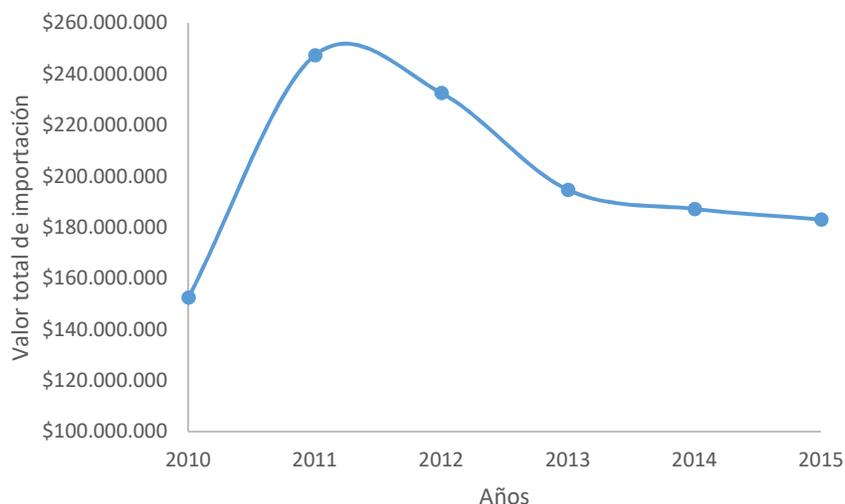


Figura 6.17. Valor total de importación de abonos desde el año 2010 al 2015. Elaboración propia con base de datos de (*Central America Data, 2016*)

Disposición de desechos del proceso de tratamiento mecánico biológico de los RSM

Dentro de los productos considerados como desechos se pueden llegar a considerar los materiales biológicos como pañales, toallas sanitarias, papel higiénico. Debe considerarse también materiales electrónicos, productos químicos peligrosos, radiactivos o corrosivos.

Como último los lixiviados o líquidos remanentes del proceso de digestión deben ser tratados para lograr disponerlos en fuentes móviles o alcantarillado, por lo que se deben realizar estudios de composición para este líquido que involucre parámetros como el DQO, DBO, sólidos totales, pH, grasas, sustancias susceptibles al azul de metileno y otros aspectos que se consideren esenciales. Con base en estos resultados se debe diseñar un sistema de tratamiento de aguas adecuado para cumplir con los parámetros legales de vertido.

Para el caso de los materiales de aseo estos deben disponerse en un relleno sanitario, puesto que no existen tratamiento en Costa Rica. En el caso de los materiales peligrosos y electrónicos el Ministerio de Salud cuenta una lista de gestores específicos para estos desechos que transportan y los tratan, en el Cuadro 6.6 se pueden observar los más relevantes de estos distribuidos en gestores de baterías, llantas, residuos electrónicos, residuos peligrosos y fluorescentes.

En la página del Ministerio de Salud se encuentra una lista más grande que incluye más gestores, para disponer estos desechos muchos gestores tienen precios fijos por cada kilogramo que tenga que tratar. El costo de disposición de materiales como las llantas no tienen ningún costo y tampoco tienen una capacidad mínima la mayoría de lugares que las reciben.

El caso del costo de tratamiento para fluorescentes, este es el caso de la empresa Geep Costa Rica, esta posee un costo de \$2 por cada kilogramo de este material. Existen otros precios de mercado que rondan los \$3 y \$4 para empresas como Eco Verde y Fundación Pococí Limpio respectivamente. La empresa Soluciones Integrales en Reciclaje S.A. reciben el material por un precio de \$1 por cada kilogramo (Ministerio de Salud, 2016).

Para el caso de material electrónico existen lugares que no cobran por recibir material como IM Soluciones Ambientales, la Municipalidad de Montes de Oca, Tiendas Icon, Paseo de las Flores. En Geep Costa Rica se ofrece un pago por kilo no especificado para materiales electrónicos (Ministerio de Salud, 2016).

En el caso de las baterías y similares existen centros autorizados que cobran desde \$2 a \$4 por kilo recogido tal es el caso de Recresco Costa Rica. Otros lugares como HOPE Proyectos Ambientales S.A. no tienen ningún costo disponer de este material (Ministerio de Salud, 2016).

En el caso de la disposición de materiales de residuos peligrosos existen 4 centros autorizados por el Ministerio de Salud para disponer este material, algunos de estos lugares ya se han mencionado o se encuentran dentro de los anexos.

La empresa Ecoway Services Ambientales, CYMAPA S.A. y Fortech S.A. no tienen una cantidad mínima de material para tratar y el costo por recibirlo depende del muestreo y la cantidad. El caso de Servicios Ambientales Geocycle recibe para tratar como mínimo 100 kg y todo se tiene que definir con contacto directo con la empresa y el tipo de producto que se quiera manejar.

Cuadro 6.6. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar residuos electrónicos, llantas y otros materiales en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).

Razón Social	Provincia	Residuo	Cantidad (t/mensual)	Tipo de Gestión
Geep CR	Cartago	Electrónicos	165	Recolección
		Electrodomésticos	25	Transporte Acopio
		Baterías	5	Valorización
				Desensamblaje
		Fluorescentes	2	Exportación y Tratamiento

Continuación Cuadro 6.6. Gestor autorizado por el Ministerio de Salud para tratar residuos electrónicos, llantas y otros materiales en Costa Rica en el año 2016 (Ministerio de Salud, 2016).

Razón Social	Provincia	Residuo	Cantidad (t/mensual)	Tipo de Gestión
Trec tratamiento de residuos electrónicos de canarias SL.	Alajuela	Electrónicos y electrodomésticos	3	Recolección
		Fluorescentes Baterías	6	Transporte, valorización, desensamblaje, exportación
Gestión de residuos industriales Ecoway S.A.	Alajuela	Corrosivos, tóxicos, trapos y sólidos contaminados aceites y solventes	20	Recolección, transporte, acopio, tratamiento y desensamblaje
		Electrónicos, electrodomésticos, baterías y fluorescentes	25	

Capítulo VII: Evaluación preliminar de impacto ambiental mediante una matriz.

El presente capítulo sirve de pre ambulo para estudios de impacto ambiental más profundos en etapas de pre factibilidad. Sirve como base de la misma forma para el planteamiento y relleno del formulario D1, el cual es importante para el arranque de todo proyecto. Se va a desarrollar una matriz de importancia de impactos ambientales, la cual va a ayudar a identificar cuáles son los impactos que ofrecen mayor vulnerabilidad al entorno. Se va a poder cuantificar cuan dañinos pueden ser de acuerdo con la metodología siguiente. Esta metodología es utilizada por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), y se trata de una matriz donde cada casilla da una idea del efecto que cada una de las actividades humanas causa sobre cada factor ambiental, utilizando los siguientes símbolos básicos de valoración cualitativa:

Signo (+,-): el signo corresponde al carácter del impacto en cuanto a si es favorable o nocivo para los aspectos ambientales considerados en las actividades del proyecto. Intensidad (IN): tiene que ver con el grado de ruina de la actividad sobre los factores ambientales, con valores de 1 a 16, siendo 1, la afectación mínima y 16, una destrucción total del factor en el área donde se da el efecto (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997).

Extensión (EX): tiene que ver con el área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno del proyecto, es decir, si la actividad tiene un efecto puntual, se le asigna un valor de 1, si el efecto es extenso se le asigna un valor de 4 y si por el contrario el impacto será sobre el total del área, se le asigna un valor de 8 (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997).

Momento (MO): corresponde al plazo de manifestación del impacto, es decir, el tiempo que transcurre entre la aparición de la acción y el comienzo del efecto, así pues, cuando el tiempo es nulo, se le asigna un valor de 4, mientras que si el período transcurrido va de 1 a 3 años se le asigna un valor de 2 y si el efecto tarda más de 3 años en manifestarse el valor asignado corresponde a 1 (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997).

Persistencia (PE): tiene que ver con el tiempo que permanece el efecto, así, pues, si la permanencia del efecto es menor de 1 año, se le asigna un valor de 1, si dura entre 1 y 3 años se considera temporal y le corresponde un valor de 2, se considera pertinaz si el efecto tarda de 4 a 10 años y se le asigna un valor de 4, para efectos que tengan una duración de más de 10 años se le asigna un valor de 8.

Reversibilidad (RV): se refiere a la eventual recuperación del factor ambiental afectado como consecuencia de la acción cometida, esto por medios naturales, si la reconstrucción tarda menos de 1

año se le asigna un valor de 1, si es a mediano plazo, es decir de 1 a 5 años se le asigna un valor de 2, si el efecto es irreversible se le asigna un valor de 4 (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997).

Recuperabilidad (MC): tiene que ver con la posibilidad de reconstrucción parcial o total del factor ambiental afectado por medio de la intervención humana mediante medidas correctivas, si el efecto es totalmente recuperable y en un lapso menor a un año, se le asigna un valor de 1 y un valor de 2 si es a mediano plazo, es decir, de 1 a 5 años. Si la recuperación es parcial y el efecto es mitigable, la recuperabilidad toma un valor de 4, en cambio, si el efecto es irrecuperable tanto por la vía natural como por acciones humanas se le asigna un valor de 8 (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997).

Sinergia (SI): tiene que ver con el reforzamiento del efecto de dos o más acciones simultáneamente, es decir, varias actividades causan simultáneamente una manifestación mayor sobre un factor ambiental que si que si actuaran de manera independiente, así se le asigna un valor de 1 cuando una actividad no es sinérgica con otras acciones que operan sobre el mismo factor, si ocurre un sinergismo moderado se asigna un valor de 2 y si es hondamente sinérgico toma un valor de 4 (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997).

Acumulación (AC): se refiere al aumento paulatino de la manifestación del efecto, cuando permanece de forma perene o reiterada la acción de que lo concibe, cuando la acción no produce efectos acumulativos, se le asigna un valor de 1, y si es acumulativo se le asigna un valor de 4. Efecto (EF): tiene que ver con la forma de manifestación del efecto sobre un factor, el efecto puede ser directo o primario, es decir, que la actividad repercute directamente sobre un factor ambiental, en este caso se le asigna un valor de 4, si el efecto es indirecto o secundario se le asigna un valor de 1 (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997).

Periodicidad (PR): tiene que ver con que tan regular es la manifestación del efecto, ya sea que tenga un efecto continuo, se le asigna un valor de 4, o si más bien tiene un efecto periódico se le asigna un valor de 2 y a los efectos de aparición irregular, se le asigna un valor de 1 (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997)..

La importancia del impacto es representada por un número que se deduce mediante un modelo de la siguiente manera:

$$I = \pm [3 IN + 2 EX + MO + PE + PV + SI + AC + EF + PR + MC] \quad (7.1)$$

De acuerdo con el puntaje obtenido en la importancia, los impactos con valores inferiores a 25 son irrelevantes, o sea, compatibles. Los impactos moderados presentan una importancia entre 25 y 50. Serán severos cuando la importancia se encuentre entre 50 y 75 y críticos cuando el valor sea superior a 75 (Secretaría Técnica Nacional Ambiental, 1997).

Cuadro 7.1. Matriz de importancia de impactos ambientales.

		MATRIZ DE IMPORTANCIA DE IMPACTOS AMBIENTALES											
		+/-	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	Importancia del Impacto
Atmósfera	Emisión Gases durante construcción.	-1	2	1	4	2	2	1	4	1	4	4	-29
	Generación Olores en Operación.	-1	8	1	4	1	1	1	4	1	1	1	-33
	Generación de Ruido en Proceso.	-1	2	2	4	4	1	1	1	4	4	1	-30
	Contaminación de gases en operación.	-1	2	1	2	2	4	2	4	1	2	4	-28
Suelo	Cambios en morfología AP en construcción y operación.	-1	1	1	4	4	4	1	1	1	1	1	-22
	Erosión por escorrentía superficial en construcción.	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-13
	Contaminación por manejo de sólidos en fase constructiva.	-1	4	1	4	2	4	2	1	4	1	1	-30
	Contaminación por derrame de hidrocarburos.	-1	1	1	4	1	2	2	4	1	1	1	-21
	Cambio en el suelo por fase operativa.	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-13
Aguas Superficiales	Aprovechamiento aguas en construcción.	-1	1	1	4	2	1	1	1	1	1	1	-17
	Contaminación por manejo de sólidos en fase constructiva.	-1	2	1	4	2	2	1	1	4	1	1	-23
	Contaminación aguas residuales en constructiva.	-1	2	2	4	2	2	2	1	1	1	1	-24
	Contaminación por hidrocarburos de máquinas en construcción y operación.	-1	2	2	4	2	2	2	1	4	1	2	-28
	Cambios en drenaje y escorrentía superficial en operación y construcción.	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-13
	Aprovechamiento aguas en operación.	-1	2	1	1	2	1	1	1	4	4	4	-25
Aguas subterráneas	Efecto de la capacidad de recarga de infiltración de la zona durante construcción y operación.	-1	2	4	2	4	4	2	4	4	2	4	-42
	Potencial contaminación por hidrocarburos provenientes de la maquinaria y equipo durante etapas de construcción y operación.	-1	4	8	4	4	4	4	4	4	4	4	-64
	Potencial contaminación por infiltración de aguas residuales en el proceso constructivo y operativo	-1	4	4	2	4	2	4	4	4	4	4	-48

Continuación Cuadro 7.1. Matriz de Importancia de Impactos Ambientales.

		MATRIZ DE IMPORTANCIA DE IMPACTOS AMBIENTALES											Importancia del Impacto
		+/-	IN	EX	MO	PE	RV	SI	AC	EF	PR	MC	
Social	Potencialización de la vulnerabilidad de las personas y obras durante operación y construcción	-1	2	4	2	2	4	2	4	4	2	4	-40
Medio biológico	Afectación de ecosistemas por contaminación de aguas superficiales en la etapa de construcción	-1	8	4	4	4	4	2	4	1	2	8	-57
	Afectación de la fauna por tránsito de vehículos en la etapa de operación	-1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-26
	Afectación de la flora por tránsito de vehículos en la etapa de operación	-1	2	2	4	4	4	2	4	4	2	4	-38
	Afectación de especies anfibios, aves y otras, por visita a las lagunas utilizado como sistema de tratamiento	-1	2	1	2	2	4	4	4	1	4	4	-32
Socio-económico	Aumento en el tránsito de vehículos pesados durante la etapa de construcción	-1	4	8	4	4	2	2	4	4	2	4	-58
	Generación de empleo. Etapa constructiva	1	8	8	4	2	2	2	1	1	2	2	56
	Permanencia de muchos vehículos en la zona durante la etapa operativa	-1	2	2	2	2	4	2	4	4	4	4	-36
	Olores desagradables. Etapa operativa	-1	4	1	1	4	4	4	4	1	4	4	-37
	Aumento de la vulnerabilidad de sufrir daños a la salud y accidentes laborales	-1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	-16
	Generación de empleo. Etapa operativa	1	4	8	2	4	2	2	1	4	4	2	53
	Aumento de tránsito de camiones por la zona	-1	8	8	4	4	4	4	4	4	4	4	-72
	Mayores ingresos a la Municipalidad de la zona por concepto de impuestos	1	8	8	4	4	2	1	4	1	4	2	62
	Activación y diversificación de la economía de la zona	1	4	4	2	4	4	2	4	1	4	2	43

Todo el proceso de evaluación anterior está basado en la metodología de SETENA, para evaluar parámetros distintos por medio de matrices de importancia de impactos ambientales. Para el proceso de evaluación ambiental es fundamental identificar aspectos en los factores que pueden afectar los medios naturales, se requiere la evaluación individual de cada factor para poder entender qué posibles medidas de mitigación se deben tomar y a cuáles, se les debe de dar prioridad.

Como primer punto, la atmósfera es una de las posibles víctimas de la operación continua del proyecto, pues se requiere de la operación de un motor de cogeneración y se debe de quemar biogás en caso de que no pueda ser utilizado para generar electricidad. En ambas fases de construcción y operación se nota el gran impacto que puede generar por la emisión de gases, no hay que dejar de lado que la separación mecánica y el motor CHP pueden llegar a generar una gran cantidad de ruido, se debe de analizar el ruido posible a generar debido a que el límite en zona industrial está restringido.

Luego, un segundo punto es el caso del factor de contaminación de suelo por manejo de sólidos en fase constructiva es uno de los aspectos más críticos, pues se requieren plantear planes de manejos de residuos adecuados. Además, la contaminación por derrame de hidrocarburos es un gran riesgo que se puede presentar durante el período de construcción, ya que esto podría generar una desmejora sensible en la calidad del agua superficial o de servicio público y por supuesto en el suelo directamente. Las demás acciones no impactan significativamente pues los posibles lotes son pastosos sin árboles cercanos.

En relación con el agua superficial la contaminación por aguas residuales en la fase constructiva representa el riesgo más alto, ya que la calidad de la misma puede disminuir y se podría multar al proyecto si esto sucede. De la misma forma la contaminación por hidrocarburos de máquinas en las fases de construcción representa graves peligros si no se toman planes de acción en casos de fugas. Y por último el uso del agua comercial es un factor para tomar en cuenta, esto debido a que en las fases pre operativas y de operación, se requieren grandes cantidades para mantener el proceso en parámetros adecuados. Es una cantidad considerable lo que se va a ocupar y va ser de uso continuo, pues la digestión de la fracción orgánica de los residuos municipales requiere cierto grado de humedad.

Para el factor agua subterránea se puede observar que la importancia de impacto más alta la tiene el potencial de contaminación por hidrocarburos que provienen de la maquinaria correspondiente, lo que indica que es un impacto severo para el proyecto; además de esto es un impacto negativo lo que indica que hay un daño ambiental. Para el factor medio biológico se obtiene que la importancia de impacto más alta corresponde a la afectación del ecosistema debido a la contaminación de las aguas superficiales en la etapa de construcción. Además de esto el impacto también se califica como severo

debido a que el tiempo de recuperación de esta afectación puede ser superior a los 5 años, esto dependiendo de las medidas de mitigación que se logren implementar. Para el factor socio económico se obtiene como resultado que la importancia de impacto más alta corresponde al aumento de tránsito de camiones en la zona lo que lo califica como severo, ya que esta zona corresponde a una zona urbana con conflictiva de tránsito pesado, pero no hay muchas propiedades construidas en los alrededores y los caminos son de lastre por lo que el constante tránsito de camiones tiene un impacto negativo sobre la zona del proyecto. También se obtiene que la importancia de impacto más baja corresponde al aumento de la vulnerabilidad de sufrir daños a la salud y accidentes laborales ya que la planta debe poseer una planeación correcta de salud ocupacional y seguridad ambiental. Además de esto deben contar con un plan de seguridad en caso de desastres para asegurar el bienestar de los empleados y así evitar todo tipo de accidentes. Este impacto es negativo ya que los accidentes ocurridos son perjudiciales para el planeamiento de la dinámica laboral y los riesgos para la salud.

Cuadro 7.2. Mitigaciones de los impactos significativos a partir de una puntuación mayor a 25.

Componente	Impactos determinados	Mitigación
Aire	Emisión Gases durante construcción	Exigir a contratistas uso de maquinaria en buen estado Regular la velocidad de las vagonetas y cuando circulen fuera del área de trabajo lleve las góndolas cubiertas por toldos.
	Generación de Ruido en Proceso	Regular velocidad de vagonetas, Definir horarios de trabajo que no alteren la tranquilidad pública y Brindar a los trabajadores el equipo de protección correspondiente.
	Contaminación de gases en operación	Regular la velocidad de las vagonetas y cuando circulen fuera del área de trabajo lleve las góndolas cubiertas por toldos.
Suelo	Contaminación por derrame de hidrocarburos	Realizar plan de contención de hidrocarburos para contener fugas
	Contaminación aguas residuales en constructiva	Tener tanques sanitarios para almacenar desechos y en caso de fugas formular un plan de contención
Agua	Contaminación por hidrocarburos de máquinas en construcción y operación	Regular emisiones mediante la implantación de sistemas de tratamiento de gases

Continuación Cuadro 7.2. Mitigaciones de los impactos significativos a partir de una puntuación mayor a 25

Componente	Impactos determinados	Mitigación
Agua Subterránea	Efecto de la capacidad de recarga de infiltración de la zona durante construcción y operación	Implantar soporte de suelo para evitar infiltración en el suelo
	Potencial contaminación por hidrocarburos provenientes de la maquinaria y equipo durante etapas de construcción y operación	Exigir a contratistas uso de maquinaria en buen estado Regular la velocidad de las vagonetas y cuando circulen fuera del área de trabajo lleven las góndolas cubiertas por toldos.
	Potencial contaminación por infiltración de aguas residuales en el proceso constructivo y operativo	Planes de contención de protección sobre el suelo, con protección de acuíferos cercanos
Medio Biológico	Afectación de ecosistemas por contaminación de aguas superficiales en la etapa de construcción	Cumplir los límites de velocidad establecidos por las regulaciones vigentes.
	Afectación de la fauna por tránsito de vehículos en la etapa de operación	Señalizar la calle para reducir velocidad de vehículos y evitar daño de la fauna
	Afectación de la flora por tránsito de vehículos en la etapa de operación	Cumplir con las normativas de traslado de especies en peligro de extinción
	Afectación de especies anfibios, aves y otras, por visita a las lagunas utilizado como sistema de tratamiento	Sistemas de protección para evitar el acceso de la fauna
Socio-Económico	Aumento en el tránsito de vehículos pesados durante la etapa de construcción	Señalización de rutas alternas en caso de presa
	Aumento de la vulnerabilidad de sufrir daños a la salud y accidentes laborales	Asegurar que todos los empleados y visitantes en la obra utilicen el equipo de protección acorde al riesgo de la actividad que se desarrolló.
	Aumento de tránsito de camiones por la zona	Coordinar la reparación de las rutas que se deterioren producto de la ejecución de las obras

Capítulo VIII: Programación y organización del proyecto.

La lista de actividades está basada en las etapas de realización de un proyecto, incluyendo etapas como pre inversión, ejecución y cierre. Se trata de hacer lo más general posible, ya que dentro de la etapa de perfil de proyecto no se tiene certeza de varios aspectos (estudio financiero, tecnología a seleccionar). Las fechas estimadas de realización del proyecto están orientadas en el inicio del proyecto de graduación en la Empresa de Servicios Públicos de Heredia el día 20 de mayo del 2016 y las demás son estimaciones de fechas, dado que se siga trabajando una vez que se finalice la práctica profesional en la Empresa de Servicios Públicos de Heredia.

Cuadro 8.1. Programación en el tiempo del proyecto de tratamiento de RSU de los cantones urbanos de Heredia.

Tarea	Inicio	Fin	Duración (meses)	Responsable
Perfil de proyecto	20/5/2016	20/8/2016	3	Practicante
Equipos, Diagramas, Sitio, Balances	21/8/2016	21/10/2016	2	Practicante
EIA, Formulario D1	22/10/2016	22/12/2016	2	Consultor
Declaración Jurada, Plan de Gestión Ambiental	22/10/2016	22/12/2016	3	Consultor
EsIA, EDA, Revisión SETENA	22/10/2016	22/12/2016	2	Consultor/SETENA
Evaluación Financiera (TIR, VAN)	23/12/2016	23/1/2017	1	Consultor/ESPH
Análisis de Riesgo	23/12/2016	23/1/2017	1	Consultor/ESPH
Estudio Legal	24/1/2017	24/2/2017	1	Consultor/ESPH
Modelos Económicos	24/1/2017	24/2/2017	1	Consultor/ESPH
Estudios de mercados locales	24/1/2017	24/2/2017	1	Consultor/ESPH
Estudio de exportaciones e importaciones	24/1/2017	24/2/2017	1	Consultor/ESPH
Memorias de cálculo, isométricos de equipos	25/2/2017	25/6/2017	4	Consultor/ESPH
Escogencia de materiales y simulación	25/2/2017	25/6/2017	4	Consultor/ESPH
Permisos ante Ministerio de Salud	27/7/2017	27/9/2017	2	Equipo Proyecto
Viabilidad del proyecto	28/9/2017	28/10/2017	1	Promotor
Variables de riesgo, probabilidad de éxito	28/9/2017	28/10/2017	1	Promotor
Ingeniería de detalle	29/10/2017	29/12/2017	2	Promotor

Con respecto a las etapas posteriores como la construcción, pruebas operativas, puesta en marcha, operación y mantenimiento y cierre, estas actividades van a ser llevadas a cabo por los contratistas y el equipo de proyecto de la empresa en un plazo de 24 años. Las tareas de evaluación del proceso, lecciones aprendidas y oportunidades de mejora van a ser realizadas solo por el equipo de proyecto en un lapso de 3 meses.

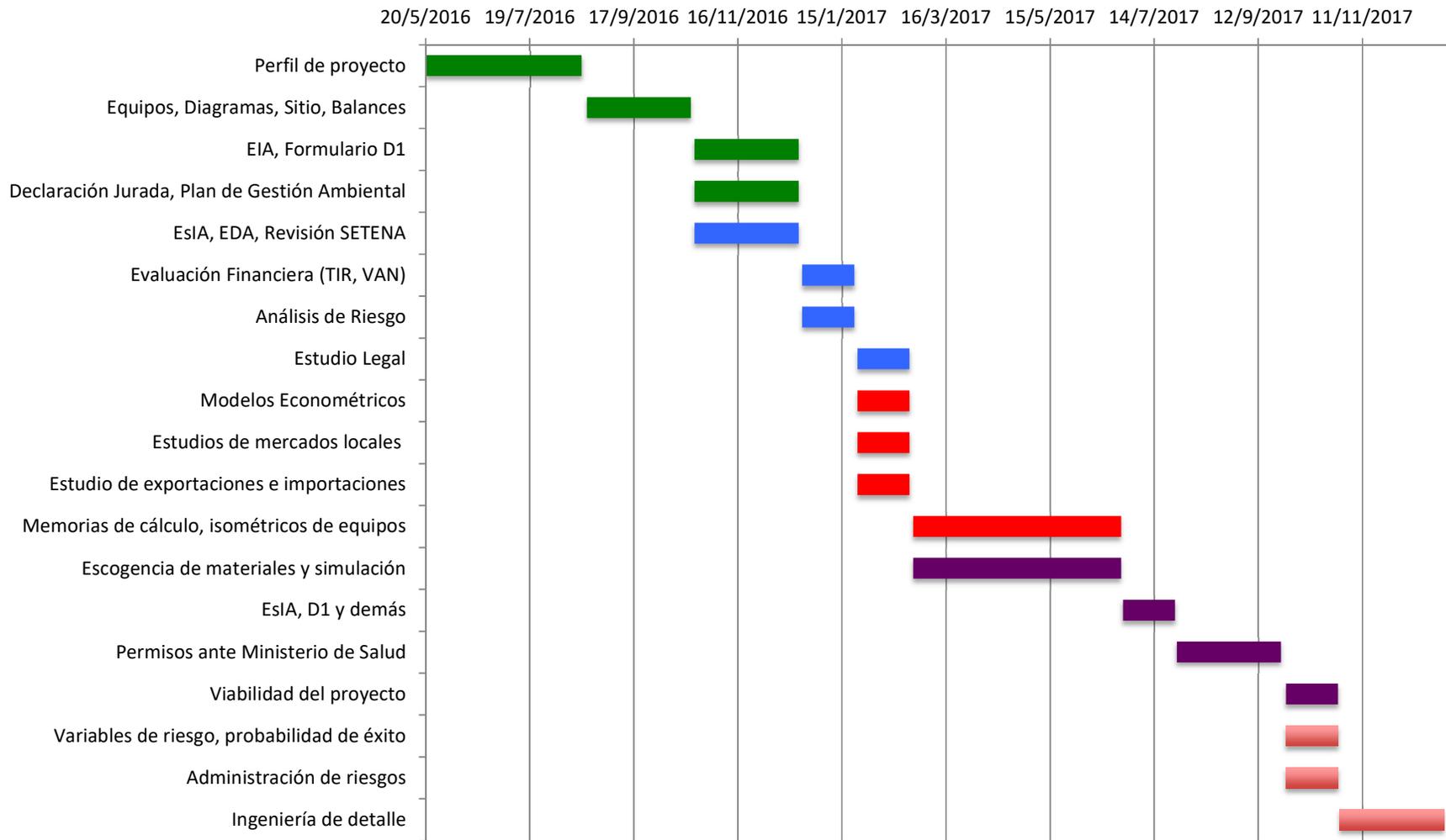


Figura 8.1. Gantt con tiempos estimados de ejecución, simultaneidad y dependencia de actividades del proyecto de tratamiento de residuos sólidos de los cantones de Heredia, San Rafael, San Pablo y San Isidro. Elaboración propia

Los responsables para cada actividad están dados en el cuadro anterior. Cabe señalar que la fase pre operativa del proyecto está dirigida por la ESPH en conjunto con la empresa licitante. Según el cuadro previo donde se menciona a ingenieros se hace referencia a los ingenieros que provienen de la empresa encargada de la construcción, dado que en el país nunca se ha construido ni implementado tecnología de este tipo. Cuando se hace mención al practicante se refiere al ingeniero por graduar reclutado por la ESPH. Con respecto a los responsables consultores estos son empresas contratadas por la ESPH para realizar labores específicas para realizar labores como evaluaciones financieras, ambientales, legales, entre otras. Lo que se refiere al equipo de proyecto son aquellas personas asociadas de la ESPH en específico la DAID que tienen a cargo la gerencia del proyecto. Lo que se refiere al promotor/contratista sería la empresa licitante que se le adjudique la dirección y puesta en marcha del plan de manejo de los RSU.

Capítulo IX: Estimación preliminar de inversión de capital inicial y costos de operación de forma anual del proyecto.

Han existido grandes dificultades para estimar el costo de funcionamiento de un digestor para la conversión de los RSU en energía, varios estudios han intentado hacerlo. Estos han proporcionado una base de partida para la evaluación de la factibilidad económica de un proyecto de RSU en Costa Rica. Se han realizado análisis exhaustivos de los datos de costos de 16 diferentes instalaciones de plantas de digestión anaerobia en Europa para RSU y se ajustaron los datos para la coherencia (Raport, 2008). Dentro de los costos de capital se considerarán incluidos todos los gastos previos al desarrollo y de la construcción. Los costos de operación incluyen la mano de obra, mantenimiento, materiales, pruebas, los seguros, los gastos generales y los costes de formación, pero no los gastos de transporte de los residuos a instalaciones de almacenamiento o ingreso alguno por estos conceptos. Con cálculos previos de la capacidad de la planta, realizados en este informe, esta estaría diseñada para procesar 32 Mega Toneladas al año por lo que según estimaciones de la Figura 9.1 y la ecuación de ajuste se requeriría una inversión aproximada para la sección del procesamiento biológico de:

$$I = 1,7171 * 32 \text{ Mega toneladas}^{0,5581} = \$ 11 880 000$$

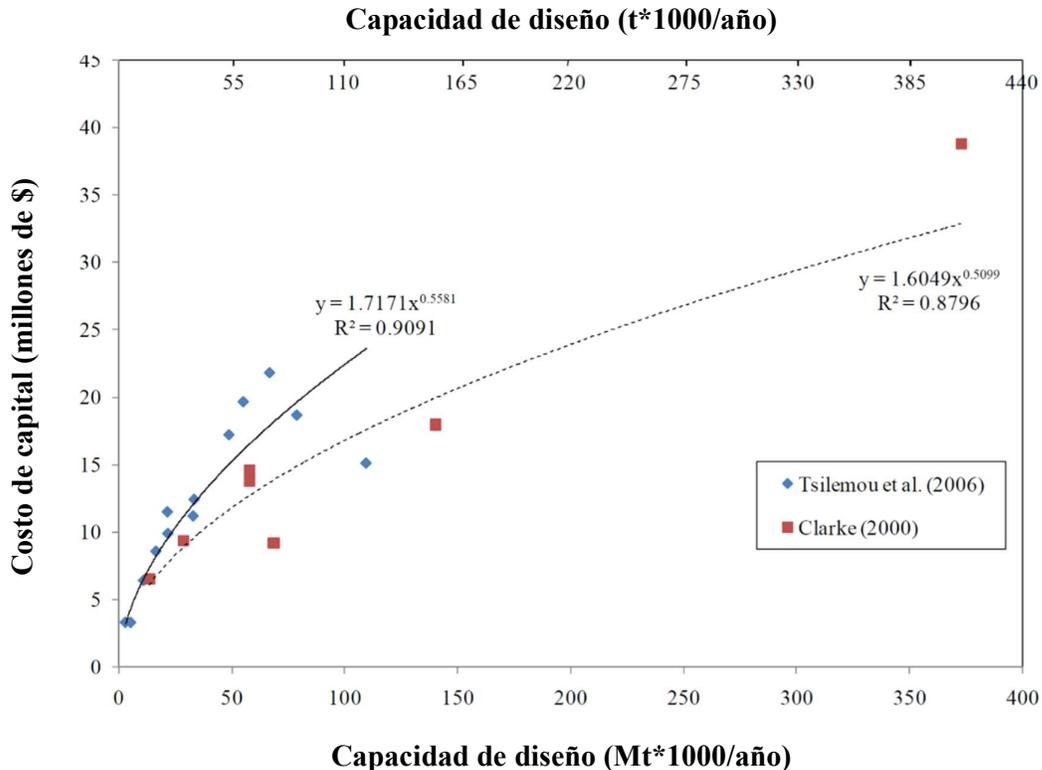


Figura 9.1. Costos de inversión inicial asociados a plantas de tratamiento de RSU para el año 2006 (Raport, 2008).

Como se observa en la Figura 9.2 y la ecuación de ajuste, existen también datos proyectados para los costos operativos que pueden afrontar este tipo de plantas. Con la capacidad establecida se puede proyectar un costo cercano a \$ 37 por cada tonelada que se procese de acuerdo a Tsilemou.

$$O = 315,62 * 32 \text{ Mega toneladas}^{-0,617} = \$ 37$$

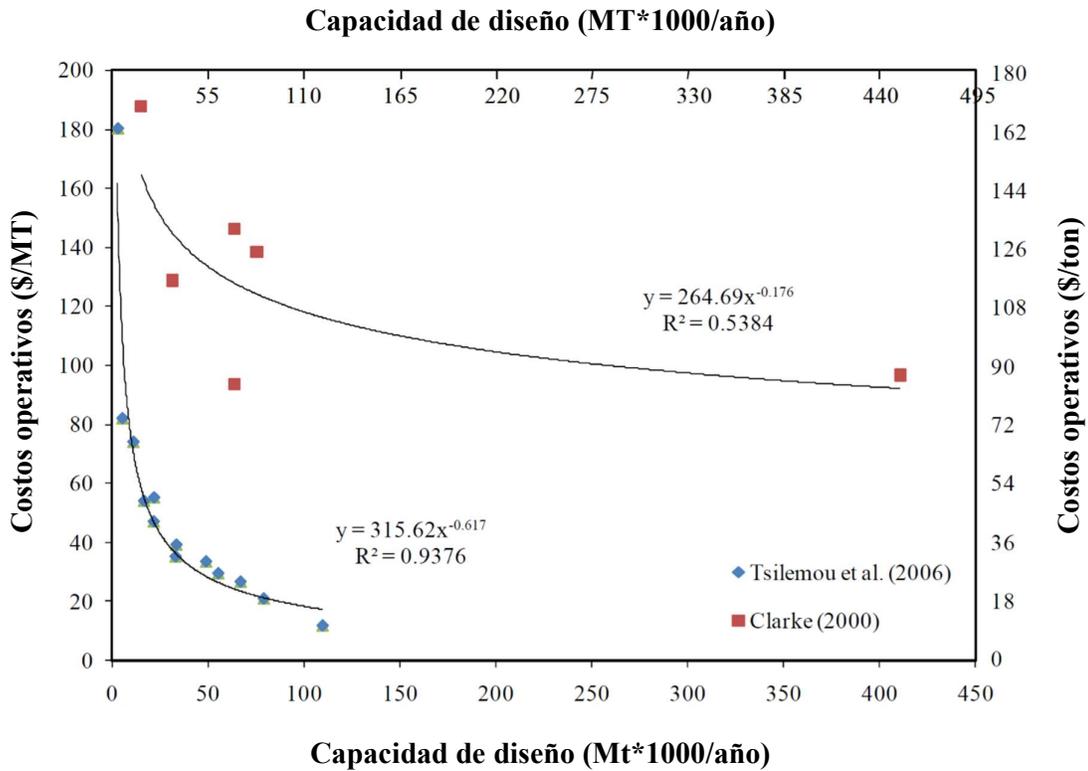


Figura 9.2. Costos de operación asociados a plantas de tratamiento de RSU para el año 2006 (Raport, 2008).

En cuanto al costo de producción de la energía eléctrica a partir del biogás producido en el proceso de biodigestión. Como se sabe de este capítulo que tratar cada tonelada tiene un costo de \$37 y por balances de masa se tiene 89,82 toneladas por día para tratar la fracción orgánica.

$$\text{Costo producción biogás} = 89,82 \frac{\text{t}}{\text{d}} * \frac{\$ 37}{1 \text{ t}} = \frac{\$ 3 323,34}{\text{d}}$$

Como se producen 296.404,7 m³ de biogás con el flujo másico determinado en el tiempo de 22 días y 13.472,94 m³ por cada día y se tiene que por cada metro cubico de biogás se puede obtener una energía asociada de 6 kWh, por lo tanto, el costo por cada kW sería:

$$C = 13 472,94 \text{ m}^3 * \frac{6 \text{ kWh}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ h}} = 3.368,24 \text{ kW}$$

Esto sería el equivalente a:

$$E_e = \frac{\$ 3.323,34}{3.368,24 \text{ kW}} = 0,987 \frac{\$}{\text{kW}}$$

En Colombia se han realizado algunos estudios de pre factibilidad de plantas de este tipo, sin embargo, la capacidad de estas es muy reducida en comparación con lo que se pretende implantar en Costa Rica. Específicamente la planta en dicho país tiene una capacidad de procesar 7 000 toneladas al año con un costo de inversión inicial de \$ 1 585 150 y un costo operativo de \$ 32 por cada tonelada. Se tenían ganancias de \$ 14 por cada tonelada que se procesaba (Duque & Álvarez, 2014). Según los datos presentados anteriormente, por medio de estimación lineal y la capacidad de la planta esperada para el país, se espera una inversión de por lo menos US\$ 8 000 000, inversión que difiere en US\$ 3 000 000 de lo proyectado según las figuras anteriores de plantas europeas.

Dentro de las opciones tecnologías que se mencionaron en el apartado metodológico, se encuentra la tecnología DRANCO, los costos de inversión asociados a esta tecnología se muestran en el Cuadro 9.1. Por estimaciones lineales el costo de inversión asociado sería de \$ 18.368.000 y con un costo operativo por tonelada de \$ 26,43.

Cuadro 9.1. Costos de inversión y operación para una planta DRANCO (Juniper for Renewables East, 2007).

Parámetro	Capacidad (toneladas al año)			
	5 000	10 000	25 000	50 000
Costo de inversión	\$ 10 080 000	\$ 13 440 000	\$ 16 800 000	\$ 22 400 000
Costos de operación	\$ 44,8 por tonelada	\$ 33,6 por tonelada	\$ 28 por tonelada	\$ 22,4 por tonelada
Área	3 000 m ²	4 000 m ²	7 000 m ²	10 000 m ²

Para el caso de la planta separadora de material recuperable, existen varias diferencias de costos que se pueden afrontar. Estas dependen principalmente de la capacidad de procesamiento, de la localización en la que se encuentre y el tipo de planta que se desee instalar. Claramente los costos de inversión varían por el país en el que se instale. Parte de esta sección está en recopilar algunos costos de inversión y operación para este tipo de plantas a lo largo del mundo, generalmente donde se tiene más experiencia y acceso a esta información sería Europa, Estados Unidos y Asia.

En el Cuadro 9.2 para el costo de inversión se incluye el costo por equipos, por trabajos civiles y costos indirectos, se excluye el costo por el terreno. Estos costos de operación incluyen los salarios de operadores, administradores y seguridad, facturas de electricidad y agua, mantenimiento de

equipo, suministros. Como regla general el costo de operación y mantenimiento es de un 5 % al 10 % de la inversión inicial de la planta recuperadora.

Cuadro 9.2. Costos de inversión y operación para plantas recuperadoras de materiales (Asian Development Bank, 2013).

Capacidad de Procesamiento (toneladas por día)	Tipo	Inversión	Operación y Mantenimiento
< 2	Manual	\$ 27 346	\$ 2 420
10-15	Semi-Automática	\$ 600 160	\$ 60 500
40-50	Automática	\$ 1 657 700	\$ 169 400
80-100	Automática	\$ 2 947 560	\$ 290 400

El flujo de entrada para el proceso es superior a 100 toneladas por día, exactamente 182 toneladas. Lo que nos hace ver que el monto de inversión para la planta separadora sería superior a los \$ 3 000 000 y los costos de operación superior a \$ 300 000.

Existen datos proyectados para plantas operativas en México, para una planta de 200 toneladas al día se tiene estimado un precio de inversión de \$ 3 000 000 y según otros datos los costos de operación y mantenimiento son de \$ 15 por cada tonelada, que para este proyecto se tendría costos de \$ 2 730 (Universidad Tecnológica de Jalisco, 2009).

Existen otros gráficos que pueden ayudar a dar un acercamiento de costos para las plantas recuperadoras de material, con ayuda de la Figura 9.3 se hicieron proyecciones de inversión y costos operativos.

$$I = 7\,344,36 * 182 \frac{t}{d} + 2\,129\,536 = \$ 3\,466\,209$$

$$O = 1\,519,9 * 182 \frac{t}{d} + 864\,572 = \$ 1\,141\,193,8$$

Para el caso de la planta se tiene una estimación de inversión inicial de \$ 3 466 209 y los costos de operación al año son de \$ 1 141 193,8, dando así un costo por tonelada al año de \$ 6 270,3. Según estas aproximaciones se esperaría que el costo de inversión sea entre \$ 3 000 000 y \$ 3 500 000 y los costos operativos anuales entre \$2 730 y \$6 270.

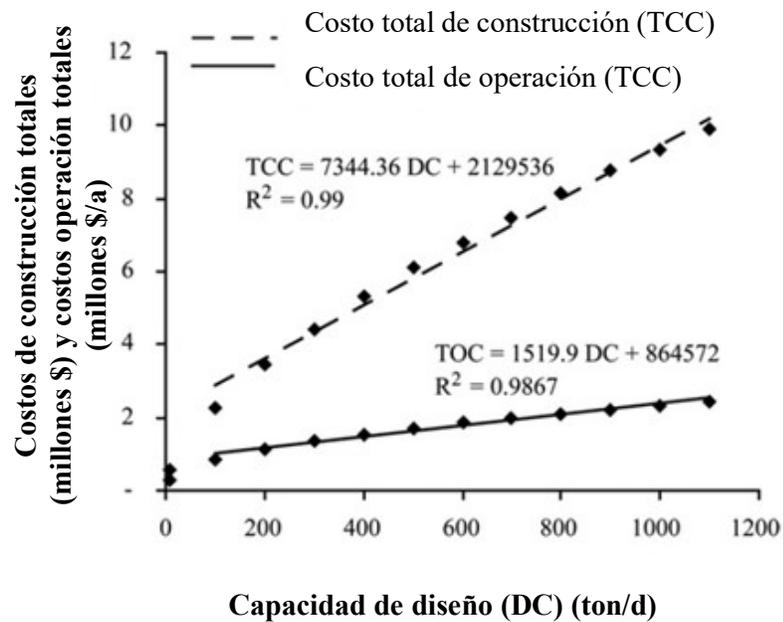


Figura 9.3. Costos de operación e inversión asociados a plantas recuperadoras de material (Chang & Pires, 2015).

Como es un perfil de proyecto, hacer un análisis de la rentabilidad del proyecto es inadecuado. Ya que se requieren estudios financieros más sólidos, que evalúen la tasa interna de retorno y verificar si los costos de inversión logran recuperarse en la vida útil estimada para el proyecto. De la misma forma verificar que los costos operativos anuales no excedan las ganancias generadas por la venta de material valorizable y la posible venta de electricidad.

De manera general se puede decir con ayuda de las Figuras 9.1. y 9.2. y con la capacidad instalada de procesar 89,82 t/d de fracción orgánica, como este valor de procesamiento se encuentra dentro de la zona final de datos de plantas ingresados para hacer la proyección. Por lo que para datos superiores a 100 t/d, el modelo ajustado no podría generar información con un alto grado de confianza.

Con base en el Cuadro 9.1 que son precios para tecnologías específicas el rango de inversión es similar al estimado con la regresión, y los costos operativos por tonelada de fracción orgánica ingresada difieren por menos de 10 \$ (\$ 37 vs \$ 28). Por lo que, para una fase de perfil de proyecto, las diferencias se pueden considerar poco significativas.

Para el caso de la planta recuperadora de material reciclable, la capacidad de esta se encuentra dentro de los primeros datos de la regresión de la Figura 9.3. Y viendo el Cuadro 9.2 (que tiene datos de plantas operativas), en la última fila el costo de inversión es similar al generado con la regresión. El único valor que difiere apreciablemente son los costos operativos, pero esto se debe al grado de automatización que pueda tener la planta.

Capítulo X: Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones de este perfil de proyecto son las siguientes:

1. El total de beneficiarios asciende aproximadamente a 200 mil habitantes frente al total de la población de la provincia de Heredia de 450 mil habitantes
2. Realizar el tratamiento de RSU para todos los cantones urbanos de Heredia y el cantón central de Alajuela no es factible debido a que se tiene un volumen de más de 11 000 m³ en reactores y los volúmenes comerciales son inferiores a 3 000 m³.
3. La tecnología de Dranco y Kompogas son las más recomendadas para implementar el tratamiento de la fracción orgánica de RSU, debido a que la humedad de la materia prima de la zona está entre 60 % a 80 %.
4. Con la capacidad de procesar 182 toneladas de RSU y 90 toneladas por día de fracción orgánica y para un tiempo de residencia de 22 días, se puede producir 60 m³/h de biogás.
5. Se puede obtener 1 010,47 kW de electricidad y 1 852,53 KW de fuente de calor. Sumando en total una capacidad de 2,86 MW.
6. El costo aproximado de producción de energía eléctrica a partir de biogás es de \$ 0,987 por cada kW generado.
7. El aumento de desechos orgánicos en los distintos cantones debido al aumento poblacional estimado asciende en promedio a 2000 toneladas en un lapso de evaluación de 10 años.
8. Los gestores con mayor captación de material valorizable (papel, metal, plástico, vidrio) y lodos serían Vicesa, Recolectora y Empacadora Capri, Empaques Santa Ana y Abonos Vivos SA con una capacidad de 900 t/mensuales, 400 t/mensuales, 2600 t/ mensuales, 1666 t/mensuales respectivamente.
9. Muchos de los riesgos de impacto ambiental asociados a la etapa de operación vienen dados por la posibilidad de afectación de las aguas subterráneas por filtración de lixiviados de los residuos sólidos.
10. Se estima, a nivel de este estudio, que el monto de inversión total es en promedio \$ 14 000 000 incluyendo la parte de separación mecánica y tratamiento biológico para tratar aproximadamente 80 toneladas por día de residuos municipales. Los costos operativos son en promedio \$ 30 por cada tonelada que se procese.

Se recomienda de la misma forma:

1. Las tecnologías de Dranco y Kompostas son las tecnologías de digestión anaerobia más recomendadas debido a las caracterizaciones de residuos realizados en la Gran Área Metropolitana.
2. Se recomienda la localización del proyecto dentro de una zona industrial, debido al plan regulador de las municipalidades de la Gran Área Metropolitana y por la capacidad de tránsito que puedan tener las rutas de acceso a la planta.
3. Se recomienda realizar un estudio de composición de residuos municipales para las zonas del proyecto, que incluyan los porcentajes de humedad.
4. Se recomienda el tratamiento por procesamiento biológico de los lixiviados generados por el almacenamiento de los residuos sólidos municipales.
5. Se recomienda realizar un estudio financiero sobre un horizonte de evaluación de 10 años para evaluar la validez de inversión.
6. Es de suma importancia la mejora de recolección (aumento de días de recolección) y separación de los residuos municipales por parte de las empresas contratadas.
7. Se recomienda implementar programas de recolección separada para disminuir los costos de inversión y operación en la planta de separación mecánica.
8. Se recomienda una distribución de materiales valorizables y lodos a los gestores de como máximo 1 vez por semana, debido a que el volumen de almacenamiento puede llegar a ser muy grande.
9. Para las etapas de prefactibilidad y factibilidad es imperante que las municipalidades tengan una mejor cuantificación de todos los RSU, ya que algunas no contaban inclusive con planes de gestión integral de residuos.
10. La empresa licitante debe tomar en cuenta el crecimiento demográfico para las áreas seleccionadas.
11. Se recomienda para el estudio financiero, estudiar el valor promedio de los materiales valorizables, para usarlos como ingresos netos del proyecto.

Capítulo XI: Bibliografía

- Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P., & Zepeda, F. (1997). *Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe*. Washington, USA: Banco Interamericano para el Desarrollo.
- Afinidad Eléctrica. (2007). *Energías Alternativas: Afinidad Eléctrica*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de <http://www.afinidadelectrica.com.ar/articulo.php?IdArticulo=128>
- Aguilar, A. (2013). *Estudio de generación y composición de los residuos ordinarios de tipo domiciliar y comercial del distrito central de San Rafael, Heredia*. Heredia, Costa Rica: Municipalidad de San Rafael.
- Ambero IP. (2007). *Plan de Residuos Sólidos de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Ministerio de Salud.
- Área de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2005). *Informe de la Evaluación Regional de los Servicios de Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe*. Washington, USA: Organización Panamericana de la Salud.
- Asian Development Bank. (2013). *Material Recovery Facility Tool Kit*. Filipinas: Asian Development Bank.
- Bosque, D. (Mayo de 24 de 2016). Setena da luz verde para relleno sanitario en Alajuela. *La Nación*.
- Campos, B. (2011). Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*.
- Campusano, R., & González, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review. *Waste Managment*, 3-12.
- Campuzano, R., & González, S. (2016). Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production. *Elsevier*, 3-12.
- Castells, E. (2012). *Clasificación y gestión de residuos: Reciclaje de residuos industriales*. México: Ediciones Díaz de Santos.
- Castro, I. (2009). *El manejo de los residuos sólidos municipales de San Salvador: diagnóstico y propuesta*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cecchi, F., Pavan, P., Musacco, A., Mata, J., & Vallini, G. (1993). Digesting The Organic Fraction Of Municipal Solid Waste: Moving From Mesophilic (37°C) To Thermophilic (55°C) Conditions. *Elsevier*, 403-414.
- Central America Data. (23 de Agosto de 2016). *Central America Data* . Obtenido de www.centralamericadata.com/es/article//home/Cifra_de_la_importacin_de_abonos_en_Centromrica

- Chandrappa, R. (2012). *Solid Waste Management: Principles and Practice*. Estados Unidos: Springer.
- Chang, N.-B., & Pires, A. (2015). *Sustainable Solid Waste Management: A systems engineering approach*. Estados Unidos: Wiley.
- Chaves, K. (2011). *Campaña de Reciclaje AmbientaDOS*. Heredia, Costa Rica: Próxima: Comunicación y Relaciones Públicas.
- Contraloría General de la República de Costa Rica. (2106). *Auditoria operativa acerca de la gestión de las municipalidades para garantizar la prestación eficaz y eficiente del servicio de recolección de residuos ordinarios*. San José, Costa Rica: Publicaciones de la Contraloría General de la República de Costa Rica.
- Dahlquist, E. (2103). *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy Combustion, Gasification, Pyrolysis, Torrefaction and Fermentation*. Estados Unidos: CRC Press.
- David, A. (2013). *Enviroment Canada*. Recuperado el 21 de Julio de 2016, de www.compost.org/English/PDF/Technical_Document_MSW_Organics_Processing_2013.pdf
- Delgado, R. (2014). *La biomasa como recurso energético: EN Energías y cambio climático*. España: Ediciones Universidad de Salamanca.
- Department for enviroment food and rural affairs. (2007). *Advanced Biological Treatment of Municipal Solid Waste*. Reindo Unido: Enviros Consulting.
- Desideri, U., Manfrida, G., & Sciubba, E. (2012). *Internacional Conference of efficiency, cost, optimization and simulation of energy conversion systems and proceesses*. Italia: Firenze University Press.
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Estados Unidos: Editorial Wiley.
- Dirección de Comunicación e Identidad Corporativa - ICE. (2105). *Costa Rica: Matriz eléctrica. Un modelo sostenible en el mundo*. San José, Costa Rica: Grupo ICE.
- Dubanowitz, A. (2000). *Design of a material recovery facility for processing the recyclable materials of New York city's municipal solid waste*. Nueva York: Columbia University.
- Duque, D., & Álvarez, S. (2014). *Análisis de prefactibilidad de la construcción de una planta generadora de energía a partir de desechos orgánicos del oriente antioqueño*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Elizondo, K., Martén, E., & Astorga, Y. (2011). *Determinación de la generación y la composición de residuos sólidos ordinarios en el cantón de Goicochea*. San José: Federación Metropolitana de Municipalidades.
- Elizondo, K., Martén, E., & Astorga, Y. (2011). *Determinación de la generación y la composición de residuos sólidos ordinarios en el cantón de Goicoechea*. San José, Costa Rica: Federación Metropolitana de Municipalidades.

- Esteves, B., & Budzinski, S. (Setiembre de 2012). *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*.
Obtenido de <http://www.inti.gob.ar/e-renova/erBI/er39.php>
- Fornaguera, I. (28 de Marzo de 2015). Generación eléctrica con biomasa carece de impulso para la venta. *La Nación Costa Rica*.
- Frost, P., Lukehurst, C., & Al Seadi, T. (2010). *Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser*. Reino Unido: IEA Bioenergy.
- Grupo Vical. (s.f.). *Grupo Vical*. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de www.grupovical.com/reciclaje
- Henry, G., & Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental*. México: Prentice Hall.
- Hernández, C. (2015). “*Taller Internacional de Biogás*” *Aportes al Conocimiento y Desarrollo de Soluciones*. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad.
- Instituto Nacional de Censo y Estadística de Costa Rica. (2011). *Proyecciones Distritales 2011-2025. Población Total por grupos de edades, según provincia y cantón*. Recuperado el 7 de Julio de 2016, de www.inec.go.cr/población/estimaciones-y-proyecciones-de-población
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2011). *X Censo Nacional de Población y VI de Vivienda: Resultados Generales*. San José, Costa Rica: Gerencia de Logística y Recursos Institucionales.
- Juniper for Renewables East. (2007). *Anaerobic Digestion Technology for Biomass Projects*. Reino Unido: Juniper.
- Lorenzo, Y., & Obaya, C. (2005). La digestión Anaerobia. Aspectos Teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 35-48.
- Marín, R. (07 de Julio de 2014). UCR promueve uso de biodigestores. *Universidad de Costa Rica*.
- Martí Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. Bolivia: Proyecto Endev-Bolivia.
- Martí, J. (2013). *Desarrollo, difusión e implementación de tecnologías en el área rural: Biodigestores en Bolivia*. La Paz, Bolivia: EnDev Bolivia.
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2015). *VII Plan Nacional de Energía de Costa Rica 2015-2030*. San José, Costa Rica: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Ministerio de Salud. (2011). *Política Nacional Para la Gestión Integral de Residuos 2010-2021*. San José, Costa Rica: Ministerio de Salud.
- Ministerio de Salud. (13 de Junio de 2014). *Inventario de Georeferenciación y Caracterización Físico Química de Lixiviados, Suelos, Gases en sitios de disposición final de residuos*. Recuperado el 9 de Junio de 2016, de <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/material-publicado/descargas/investigaciones/inventario-de-georeferenciacion-y-de-caracterizacion-fisico-quimico-de-lixiviados-suelos-y-gases-en-sitios-de-disposicion-final-de-residuos/?limit=20&limitstart=0>
- Ministerio de Salud. (10 de Agosto de 2016). *Listado de Gestores de Residuos Aprobados*. Obtenido de www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/información/gestores-de-residuos-ms

- Municipalidad de Heredia. (2013). *Diagnóstico de la Gestión Integral de Residuos Sólidos del Cantón Central de Heredia*. Heredia, Costa Rica: Municipalidad de Heredia.
- Nijaguna, B. (2007). *Biogas Technology*. India: New Age International Publishers .
- Orta, T., Monge, I., & Toscano, L. (2009). *Estudio de evaluación de tecnologías alternativas o complementarias para el tratamiento o disposición final de los residuos sólidos urbanos*. México, Distrito Federal: Instituto de Ingeniería Universidad Autónoma de México.
- Ovares, I. (Junio de 5 de 2013). El Manejo de los Residuos en Costa Rica. *La Nación* .
- Ovares, I. (2014). *Guía Nacional de Manejo de Residuos*. San José, Costa Rica: Grupo Nación.
- Palmisano, A., & Barlaz, M. (1996). *Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste*. Estados Unidos: CRC Press.
- Petramás. (2016). *Petramás: Central Térmica de Biomasa Huaycoloro de Petramás*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de <http://www.petramas.com/proyecto-de-generacion-de-energia-electrica-a-partir-del-biogas/>
- Piedra, Á. (2001). *Estudio de biodigestores de bolsa completa*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Pitchell, J. (2005). *Waste Managment Practice*. Estados Unidos : CRC Press.
- Programa Competitividad y Medio Ambiente. (2008). *Plan de Residuos Sólidos Costa Rica*. San José, Costa Rica: Ministerio de Salud.
- Ramírez, L. (2004). *Generación eléctrica por medio de biogás*. San José, Costa Rica.
- Raport, J. (2008). *Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*. California, Estados Unidos: California Integrated Waste Management Board.
- Rodriguez, S. (Junio de 2014). *Federación Ecologista*. Recuperado el 9 de Junio de 2016, de <http://www.feconcr.org/doc/incineracion/panoramaincineracion.pdf> 2014
- Rojas, M., & Ventura, V. (2015). *Centroamérica; Estadísticas de producción del subsector eléctrico*. México, DF.: Naciones Unidas.
- Sánchez, L. (2016). *Cantidad de residuos generado en la Municipalidad de Flores*. Heredia, Costa Rica: Unidad Técnica Ambiental de la Municipalidad de Flores.
- Secretaría Técnica Nacional Ambiental. (1997). *Guía para la elaboración de Programas de Gestión Ambiental Institucional (PGAI) en el sector público de Costa Rica*. Obtenido de Dirección Sectorial de Energía:
<http://www.dse.go.cr/es/02ServiciosInfo/Legislacion/PDF/Ambiente/SETENA/R-588-97-SETENAd28-8-1997Manual%20Inst.pdf>
- Segnini, G. (2013). *La Nación*. Recuperado el 10 de Junio de 2016, de <http://uid.nacion.com/reciclaje/>
- Shah, F. A., Mahmood, Q., & Pervez, A. &. (2014). Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis. *ScientificWorldJournal*. Obtenido de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3950365/>

- Shah, Y. T. (2015). *Energy and Fuel Systems Integration*. Estados Unidos: CRC Press.
- Silva, M., & Naik, T. (2006). *Review of composting and anaerobic digestion of municipal solid waste and a methodological proposal for a mid-size city*. Estados Unidos: UWM Center for By-Products Utilization, University of Wisconsin-Milwaukee.
- Sistema Nacional de Información Ambiental de Chile. (Diciembre de 2001). *Sistema Nacional de Información Ambiental de Chile*. Recuperado el 16 de Junio de 2016, de http://www.sinia.cl/1292/articles-31698_recurso_5.pdf
- Sliusar, N., & Armisheva, G. (2013). *Energy Resources recovery on municipal solid waste disposal*. Rusia: Departamento de Protección del Ambiente de la Universidad Politécnica de Perm.
- Soto Córdoba, S. (2007). *Gestión de los Residuos Sólidos en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Informe del Estado de la Nación XIII.
- Soto, M. (18 de Mayo de 2016). Plan compromete a ticos a reciclar 600 toneladas diarias. *La Nación*.
- Soto, S. (2012). *Implementación de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. San José, Costa Rica: Estado de la Nación Costa Rica.
- Soto, S. (2013). *A 2 años de la Ley Gestión Integral de Residuos*. San José, Costa Rica: Estado de la Nación Costa Rica.
- Tello, P., Martínez, E., Daza, D., Soulier, M., & Terraza, H. (2010). *Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe*. Columbia, Estados Unidos: Organización Panamericana de la Salud.
- Universidad Tecnológica de Jalisco. (2009). *Universidad Tecnológica de Jalisco*. Recuperado el 30 de Setiembre de 2016, de www.utj.edu-mx/exu/documentos_antiguos/conf04.pdf
- Varnero, M. (2011). *Manual del Biogás*. Italia.
- Vásquez, N., & Viquez, C. (2005). *El Reciclaje como Alternativa para el manejo de los Desechos Sólidos*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Villalobos, W. (22 de Abril de 2015). Reglamento de gasificación de residuos en Costa Rica en etapa final. *Las Voz de Guanacaste*.
- Vogeli, Y., Gallardo, A., & Zurbrugg, C. (2014). *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries*. Dubendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- Winter, J., Hahn, H., & Endar, S. (2009). *Anaerobic Digestion of Organic Solid Waste for Energy Production*. Alemania: Universidad Fridericiana.
- Ziemiński, K., & Frac, M. (2012). Methane fermentation process as anaerobic digestion of biomass: Transformations, stages and microorganisms. *African Journal of Biotechnology*, 4127-4139.

Capítulo XII: Nomenclatura

a	unidad de tiempo	año
d	unidad de tiempo	día
e	energía	kW
f	flujo volumétrico diario	m ³ /d
g	tasa generación de biogás	m ³ /kg
h	habitantes	miles de personas
m	flujo másico diario	t/d
r	Generación de residuos por habitante	kg/habitante
t	unidad de masa (miles de kilogramos)	tonelada
C	capacidad eléctrica	kW
Ch	capacidad del chiller	m ³ /h
E	producción de energía	kWh
BG	producción de biogás	m ³
E	costo de producción de energía	\$/kW
F	capacidad del filtro prensa	t/d
G	generación de residuos	toneladas/anuales
I	costos de inversión	\$
L	flujo de línea de proceso	m ³ /h
M	producción de metano	m ³
Mot	capacidad del motor de cogeneración	m ³ /h
O	costos operativos	\$
P	promedio	adimensional
R	capacidad de retenedor de gases	m ³
S	capacidad de separador	m ³ /h
V	volumen	m ³
F	flujo volumétrico anual	m ³ /año
ρ	densidad de residuos sólidos	kg/m ³

Subíndice

elect	asociado a eléctrico
e	referente a un separador estrella
c	asociado a fuente de calor
des	referente a desechos o residuos sólidos municipales
mag	magnético
o	material orgánico
p	con respecto a corriente de papel
porc	se refiere a porcentaje
r	referente a residuos sólidos municipales
t	tanque de preparación de material orgánico
A	referente al cantón de Alajuela
D	referente a los digestores
H	referente al cantón de Heredia

APÉNDICE

A. Muestra de Cálculo

C.1 Cálculo de volumen de digestor

Para calcular el volumen de un digestor

$$V = \frac{G * d}{365 d * \rho} \quad (C.1)$$

Para calcular el volumen de un posible digestor para el cantón de Alajuela

$$V = \frac{40.231.48 \frac{t}{a} * 30 d}{365 d * 750 \frac{kg}{m^3}} = 4.408,94 m^3$$

Dicho valor se encuentra en el Cuadro 3.14 Fila 2.

C.2 Cálculo de generación de residuos

$$G_A = \frac{h * r}{1000} * 365 = 79 715 \frac{t}{a} \quad (C.2)$$

Para el caso de la generación de residuos de Alajuela

$$G_A = 293 601 \text{ habitantes} * 0,74 \frac{kg}{\text{habitantes}} * \frac{1 t}{1000 kg} * \frac{365 d}{1 a} = 79 715 \frac{t}{a}$$

Estos datos se encuentran en el Cuadro 3.13 en la Fila 2 y Columna 2

C.3 Cálculo de flujo volumétrico

Para calcular el volumen anual se usa

$$F = \frac{G}{\frac{1000 kg}{1 t} * \rho_r} \quad (C.3)$$

Para el cantón de Heredia este se calcula:

$$F = \frac{39.124,01 \frac{t}{a}}{\frac{1000 kg}{1 tonelada} * 164,3 \frac{kg}{m^3}} = 238.125,44 \frac{m^3}{a}$$

Dicho resultado se encuentra en el Cuadro 5.3 Fila 2 Columna 2

C.4 Cálculo de flujo de material valorizable

En el caso del flujo del papel

$$f_p = \frac{G_p * \rho_p * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}}}{365 \text{ d} * 24 \text{ h}} \quad (\text{C.4})$$

Para la producción de papel en toda la zona de interés se calcula:

$$f_p = \frac{8.498,14 \frac{\text{t}}{\text{a}} * 80 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}}}{365 \text{ d} * 24 \text{ h}} = 291,03 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$$

Este dato se encuentra en el Cuadro 5.5 Fila 3 Columna 5

C.5 Producción de biogás

$$BG = t_o * g * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} * d = 296 404,7 \text{ m}^3 \quad (\text{C.5})$$

Este se calcula con los datos de fracción orgánica que ingresa a la planta de digestión

$$BG = 89,82 \frac{\text{t}}{\text{d}} * 0,15 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} * 22 \text{ d} = 296.404,7 \text{ m}^3$$

Este dato se encuentra en el Cuadro 5.6 Columna 2 Fila 2