



Universidad de Concepción



FACULTAD DE CIENCIAS
AMBIENTALES

**EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE LAS ALTERNATIVAS
DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA PARA LA GESTIÓN DE
RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE LA COMUNA DE
CONCEPCIÓN.**



Habilitación presentada para optar al título de

Ingeniera Ambiental

SOFÍA EMILIA RIVEROS MANCILLA

Profesor Guía: Dra. Yannay Casas Ledón.

Concepción, Chile.

2018.



“Evaluación de impacto ambiental de las alternativas de valorización energética para la gestión de los residuos sólidos municipales de la comuna de Concepción”

PROFESOR GUÍA: Dra. Yannay Casas Ledón
PROFESOR CO - GUÍA: Dra. Patricia González Sánchez
PROFESOR COMISIÓN: Dr. Oscar Parra Barrientos



CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima (En Escala de 5,7 a 7,0)

Concepción, agosto 2018



100 AÑOS
DE
DESARROLLO
LIBRE DEL
ESPIRITU

Agradecimientos.

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis padres: Lore y Willy. Agradecerles por tanto amor, alegría, humildad, preocupación, apañe y entusiasmo. Me entregaron las herramientas que permitieron lograr esto, ser la persona que hoy ven y ser profesional. A mis abuelos; Papo, Abueli y Mami Lucy, quienes me brindaron su ayuda en todo momento, siempre preocupados porque nunca nada me faltara, me enseñaron a luchar por lo que quería, a volver a levantarme, a ser independiente y darme la oportunidad de venir a estudiar a otra ciudad. A mi hermano, Vicho, que me permitió aprender y conocer un buen hombre, a tener un amor y una complicidad tan especial como es la de hermanos. A esperarnos, entendernos y apoyarnos, a compartir gustos, sueños y desafíos.

A toda mi familia, prim@s y tí@s, por siempre creer en mí, por alentarme ser mejor día a día, y a derribar prejuicios, demostrando que tanto mujeres como hombres podemos ser independientes, profesionales y felices, que solo está en nosotras querer volar.

A mis profesoras, Yannay y Patty, quienes creyeron siempre en mí, y me dieron la oportunidad de explorar el mundo de la investigación, de ser una profesional responsable, con ética, pero por sobre todo, nunca dejar de ser una buena persona. Gracias por la confianza, por su entrega, y sus consejos. Las recordaré siempre con mucho cariño y espero que esta no sea la última instancia en que trabajemos juntas.

A mis amigos y amigas, con quienes compartimos momentos increíbles, me apoyaron en los momentos difíciles, y disfrutamos de los viajes, risas y conversaciones. Me enseñaron a que las diferencias no necesariamente deben separar a las personas, y que las similitudes no siempre te mantienen unidos. Me enseñaron a entregar amor, a ser amiga, a ser mejor persona.

También a aquellas personas con las que hemos trabajado en conjunto para educar y ayudar a la comunidad, entregar nuestros conocimientos y nuestro apoyo, solo por amor al arte. Gracias por confiar en mí, por su compromiso y por su amor.

Gracias a todes, soy afortunada de las bellas personas que forman parte de mi vida. Les entrego mucho amor, felicidad y gratitud.

Abrazos, Sofi.

Contenido	
1	INTRODUCCIÓN..... 1
2	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN..... 3
3	OBJETIVOS..... 3
3.1	Objetivo general. 3
3.2	Objetivos específicos. 3
4	MARCO TEÓRICO..... 4
4.1	Problemática mundial de los residuos..... 4
4.2	Riesgos ambientales y de salud de las personas debido a la mala gestión de residuos. 7
4.3	Situación nacional de residuos sólidos municipales. 9
4.4	Jerarquización de gestión de RSM..... 12
4.5	Alternativas de valorización energética..... 18
4.6	Herramientas de sustentabilidad. 23
4.7	Análisis de ciclo de vida..... 24
5	METODOLOGÍA..... 30
5.1	Antecedentes. 31
5.1.1	Caso de estudio: comuna de Concepción..... 31
5.2	Análisis de potencial energético de RSM. 31
5.3	Escenario actual de la gestión de RSM en Concepción. 33
5.4	Descripción de alternativas propuestas de valorización energética para los RSM de la comuna de Concepción. 36
5.4.1	Alternativa 1: Recuperación energética de biogás en RS CEMARC..... 36
5.4.2	Alternativa 2: Incineración de RSM..... 38
5.4.3	Alternativa 3: Gasificación de RSM. 40
5.5	Evaluación de ciclo de vida (ACV). 42
5.5.1	Definición objetivos y alcances. 42
5.5.2	Análisis del inventario. 44
5.5.3	Evaluación de impactos ambientales..... 46
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... 47
6.1	Análisis de escenarios de valorización energética..... 47
6.2	Evaluación ambiental de los escenarios propuestos..... 50
6.2.1	Caso base..... 54
6.2.2	Escenario 1: Recuperación energética de biogás de RS CEMARC..... 55

6.2.3	Escenario 2: Incineración de RSM.....	57
6.2.4	Escenario 3: Gasificación de RSM.....	60
6.2.5	Análisis comparativo	62
7	CONCLUSIONES.....	65
8	BIBLIOGRAFÍA.....	67
9	ANEXOS.....	81
	ANEXO 1. Listado de países de la región Latinoamérica y El Caribe y OCDE.....	81
	ANEXO 2. Clasificación de flujos del inventario de ciclo de vida.....	82
	ANEXO 3. Ruta de transporte de RSM de Concepción al relleno sanitario CEMARC.....	83
	ANEXO 4. Ruta de transporte de reciclaje de vidrio y aluminio desde Concepción a Santiago.....	84
	ANEXO 5. Tabla límites máximos descargas de riles a redes de alcantarillado D.S. 609/1998, del Ministerio de Obras Públicas.....	84
	ANEXO 6. Inventario de ciclo de vida de Escenario 0 en base a UF = 1 tonelada de RSM.....	85
	ANEXO 7. Inventario de ciclo de vida de Escenario 1 en base a UF = 1 tonelada de RSM.....	86
	ANEXO 8. Inventario de ciclo de vida Escenario 2 en base a UF = 1 tonelada de RSM.....	87
	ANEXO 9. Inventario de ciclo de vida Escenario 3 en base a UF = 1 tonelada de RSM.....	88
	ANEXO 10. Resultados ponderación y puntuación única de ACV de cada escenario.....	89

Índice de Figuras

Figura 1.	Producción per cápita diaria de residuos del 2012 y proyecciones para el 2025.	5
Figura 2.	Producción per cápita de residuos diaria de la región Latinoamérica y El Caribe del 2012 y proyecciones para el 2025.....	5
Figura 3.	Generación total de residuos sólidos municipales por regiones, 2009-2011.....	9
Figura 4.	Composición de RSM a nivel nacional.....	10
Figura 5.	Jerarquización de residuos según Directiva Marco de Residuos de la UE y Ley REP de Chile.....	14
Figura 6.	Tecnologías de conversión energética de los RSM.....	18
Figura 7.	Esquema fases ACV.....	25
Figura 8.	Esquema metodología del estudio.....	30
Figura 9.	Esquema situación actual de gestión de RSM.....	33
Figura 10.	Ubicación área de estudio comuna Concepción y RS CEMARC.....	34

Figura 11. Esquema escenario de valorización energética de biogás.....	37
Figura 12. Esquema de escenario de incineración de RSM.	38
Figura 13. Esquema de escenario de gasificación de RSM.	41
Figura 14. Esquema de escenarios a evaluar en el estudio.....	43
Figura 15. Utilidades energéticas generadas por tecnología.	49
Figura 16. Evaluación comparativa del escenario base y los 3 escenarios de valorización energética.	50
Figura 17. Evaluación comparativa de daños para cada escenario de gestión de RSM...	53
Figura 18. Evaluación de los impactos ambientales del ciclo de vida del caso base de gestión de RSM.	54
Figura 19. Evaluación de ciclo de vida Escenario 1.	56
Figura 20. Evaluación de ciclo de vida Escenario 2.	58
Figura 21. Evaluación de ciclo de vida Escenario 3.	61
Figura 22. Comparación del impacto total por cada escenario evaluado.....	63

Índice de Tablas

Tabla 1. Alternativas de gestión de RSM en algunos países.	6
Tabla 2. Potencial energético de combustibles nacionales y de RSM.....	17
Tabla 3. Principales características de tecnologías de valorización térmica.	19
Tabla 4. Composición típica de biogás.....	22
Tabla 5. Revisión de métodos de evaluación según (Allesch & Brunner, 2014; Pires, Martinho, & Chang, 2011; Zurbrügg, Caniato, & Vaccari, 2014).	23
Tabla 6. Aplicaciones de ACV en la gestión de RSM.	26
Tabla 7. Composición de RSM de la comuna de Concepción.	31
Tabla 8. Características de potencial energético de RSM.	32
Tabla 9. Composición de UF del estudio.	42
Tabla 10. Fuentes de información según proceso.....	44
Tabla 11. Supuestos y consideraciones para el estudio.	45
Tabla 12. Potencial energético biogás de relleno sanitario.....	48
Tabla 13. Caracterización energética de RSM de Concepción.....	48

RESUMEN.

En Chile la generación de residuos sólidos municipales (RSM) es de aproximadamente 6 millones de toneladas al año, siendo las regiones Metropolitana y del Biobío las que presentan mayores índices de generación. Este índice depende fuertemente de cantidad de habitantes y de sus patrones de consumo (Instituto de Asuntos Públicos., 2016). La comuna de Concepción genera alrededor de 83.000 toneladas de RSM al año, con una contribución de 0,95 kilos diarios por persona (InnovAconcagua, 2015). Actualmente en la comuna, los RSM son recolectados en los hogares de los habitantes de Concepción, para ser trasladados y dispuestos en el relleno sanitario CEMARC, sin ningún tipo de aprovechamiento material o energético. No obstante, existe una constante preocupación por reducir la cantidad de residuos dispuestos en los rellenos sanitarios, principalmente porque la capacidad de estos se ve disminuida con el tiempo y este tipo de actividades resulta cada vez más insostenible con el tiempo. Es por ello que la Política actual de residuos sólidos se ha enfocado en considerarlos como recurso, que pueden ser reutilizados, reciclados o bien valorizados energéticamente para aquellos tipos de RSM con un potencial energético atractivo.

En este contexto el objetivo de esta investigación es evaluar y comparar ambientalmente la gestión actual de RSM para la comuna de Concepción, con respecto a alternativas de valorización energética, mediante la herramienta Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Los escenarios a evaluar son: a) recuperación energética del biogás de relleno sanitario, b) incineración de RSM y c) gasificación de RS. Es importante destacar que en estos dos últimos escenarios consideran reciclaje de 3% de vidrio y 2% de aluminio. Los escenarios incluyen todo el ciclo de vida de la gestión de RSM, considerando desde la etapa de recolección puerta a puerta de los RSM, su transporte a las instalaciones correspondientes (relleno sanitario, planta incineradora, planta gasificadora, plantas de reciclaje, según corresponda), los insumos y emisiones del procesamiento de los diferentes tipos de materiales

contenidos en los RSM y producidos por las tecnologías evaluadas, como el biogás, materiales reciclables, cenizas, emisiones atmosféricas, entre otros.

Para llevar a cabo el estudio, se seguirán las directrices entregadas por las normas ISO 14040 Y 14044:2006 estándares, y se modelarán los resultados en el software Simapro 7.3, utilizando la base de datos Ecoinvent v.2.2.. La metodología a implementar para analizar los impactos es Ecoindicador 99, quien entrega los resultados con un enfoque hacia el daño que causa a la salud humana y a los ecosistemas.

Los resultados encontrados concluyen que el escenario más favorable desde el punto de vista ambiental, es la gasificación de los RSM con reciclaje, asociado a los productos evitados en los escenarios; electricidad generada, aluminio y vidrio. Este escenario disminuye en un 91% los impactos ambientales de la gestión actual de RSM de la comuna de Concepción. Si bien es de las mejores tecnologías consideradas por poseer los mayores beneficios ambientales, la gasificación posee una menor eficiencia de recuperación energética (20%) con respecto a la incineración de RSM (22%) y recuperación energética de biogás (42%), por lo que esta característica es importante mejorarla para así maximizar la energía recuperada y generada, que finalmente es inyectada a la matriz energética chilena. La ventaja del escenario de gasificación es que posee utilidades que en este estudio no son consideradas, como el calor distrital y la recuperación de cenizas para relleno de carreteras. Este escenario generaría externalidades desde el punto de vista económico, de salud pública y social, principalmente porque la generación de electricidad y calor desplazaría el consumo de leña para la calefacción domiciliaria, lo que se traduce en mejor calidad de aire, disminución de las enfermedades respiratorias que afectan mayoritariamente a niños y adultos mayores, como también la venta de este recurso por parte de los gestores de RSM.

Por último, las etapas más críticas dentro del ciclo de vida indistintamente de las alternativas de valorización energética se asocian principalmente a la recolección y transporte de los RSM y las cenizas dispuestas en un relleno de seguridad de los

procesos de incineración y gasificación. Es por ello, que, para mejorar el perfil ambiental de los procesos de valorización energética, es necesario diseñar rutas de recolección de los RSM, en vista de reducir los km recorridos y, por otro lado, evaluar la valorización de cenizas generadas en los procesos de incineración y gasificación, para eliminar su disposición final en rellenos de seguridad.



1 INTRODUCCIÓN.

Los residuos, si bien se han generado a lo largo de la vida en la Tierra, estos comenzaron a ser un problema principalmente por el aumento de la población y la generación de residuos asociados a sus actividades, produciendo focos infecciosos, emisiones de gases tóxicos y malos olores.

Asimismo, el desarrollo tecnológico y el consumismo han ido transformando las características y la cantidad de estos residuos, junto con los impactos que producen al ambiente. Mediante los diferentes procesos productivos que han sido implementados para el desarrollo de nuevos bienes y servicios, los residuos varían considerablemente dependiendo del proceso, y de las necesidades de la sociedad, siendo el plástico y los materiales de envase los principales actores de esta evolución (Tchobanoglous, Theisen, & Vigil, 1994).

Actualmente, el principal método de disposición de RSM a nivel mundial es a través de vertederos y rellenos sanitarios (54%), debido al bajo costo y facilidad para mantener este proceso. Por otro lado, el reciclaje, recuperación energética y compostaje, son utilizados mundialmente en un 17%, 16% y 9%, respectivamente (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012). Si bien el relleno sanitario es la tecnología más popular, las tecnologías de aprovechamiento energético se han incorporado en el mercado de la energía térmica y eléctrica, tal como sucede en los países desarrollados como Noruega, Japón y Suecia, como también en países en desarrollo como sucede en Chile.

En Chile, más del 80% de los RSM son dispuestos en rellenos sanitarios desaprovechando su potencial de valorización ya sea a través del reuso y reciclaje de materiales como energéticamente. En este contexto, los proyectos de recuperación energética están siendo cada día más atractivos para los inversionistas y organismos públicos, ya que los RSM son una fuente de energía renovable y forman parte del cumplimiento de acuerdos internacionales para la protección del medio ambiente y la salud de la población.

En la comuna de Concepción, se generan aproximadamente 90.000 toneladas de RSM al año y son todos dispuestos en un relleno sanitario, sin embargo, existen residuos que poseen un potencial energético atractivo para ser valorizados energéticamente con vistas a la generación de calor y electricidad. Existen diferentes tecnologías que son ampliamente utilizadas a nivel mundial para la conversión de los RSM en energía, tales como: incineración, gasificación y aprovechamiento de biogás de relleno sanitario. En el contexto de Chile, dichas tecnologías están despertando gran interés, tal así es que actualmente se encuentran en evaluación ambiental, en el SEA (Servicio de Evaluación Ambiental) proyectos relacionados con gasificación de RSM, como lo es *WTE Araucanía*, y la planta de *Bioenergía Los Pinos*, en las regiones de la Araucanía y del Biobío, respectivamente. No obstante, para la selección de las tecnologías de valorización energética es fundamental conocer las ventajas ambientales de los proyectos siendo la Evaluación de Ciclo de Vida (ACV) una herramienta metodológica ampliamente utilizada para identificar las etapas más críticas dentro del ciclo de vida de los sistemas de gestión de RSM, así como, determinar las categorías de impactos más relevantes; aspectos fundamentales para la toma de decisiones.

Es por ello, que el presente estudio se focaliza en evaluar los impactos ambientales de diferentes alternativas de valorización energética como alternativas de gestión de los residuos sólidos municipales generados en la comuna de Concepción.

2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.

¿Cuál sería la alternativa de valorización energética más favorable del punto de vista ambiental para la gestión de RSM de la comuna de Concepción?.

3 OBJETIVOS.

3.1 Objetivo general.

Evaluar los impactos ambientales de las alternativas de valorización energética para la gestión de los RSM de la comuna de Concepción en todo su ciclo de vida.

3.2 Objetivos específicos.

1. Analizar alternativas de valorización energética para la gestión de RSM de la comuna de Concepción.
2. Describir las alternativas de valorización energética propuestas para la gestión de RSM.
3. Resolver el inventario del ciclo de vida (ICV) del consumo de recursos (materiales y energéticos) y emisiones (aire, agua y suelo) de cada escenario propuesto en función del alcance y unidad funcional del estudio.
4. Comparar los impactos ambientales de las alternativas de valorización energética en todo su ciclo de vida.

4 MARCO TEÓRICO.

4.1 Problemática mundial de los residuos.

Los residuos sólidos son definidos como una mezcla heterogénea de materiales sólidos y semisólidos, resultantes de las actividades del hombre y que tiene la intención u obligación de ser eliminado de acuerdo a la normativa vigente (Ministerio del Medio Ambiente, 2016; Tchobanoglous et al., 1994). A la vez, estos pueden diferenciarse de acuerdo a su origen, características físicas y/o riesgo. Entre las clasificaciones de acuerdo al origen y características de los desechos encontramos los residuos sólidos municipales (RSM) provenientes de viviendas urbanas y rurales, además de actividades comerciales e industriales que puedan ser asimilados a residuos domiciliarios (GESCAM, Fuente, Boisier, & Gallardo, 2000).

En el año 2012, se generaron a nivel mundial cerca de 3,5 millones de toneladas diarias de residuos sólidos urbanos por una población de aproximadamente 3 mil millones de personas, siendo la producción per cápita promedio de 1,2 kg/día (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012).

Cien años atrás, la generación de residuos sólidos municipales no sobrepasaba las 300 mil toneladas diarias a nivel mundial. Este incremento está estrechamente relacionado con el aumento de la población, el desarrollo tecnológico, patrones de consumos, además de la carencia de normativas exigentes para la gestión de residuos sólidos (Hoorweg, Bhada-tata, & Kennedy, 2013; Tan et al., 2015).

Como se puede ver en la Figura 1, los países que presentan mayores generaciones per cápita diaria de residuos para el 2012 y sus proyecciones para el 2025 son los países miembros de la Organización para Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), seguido de Latinoamérica y El Caribe (Anexo 1). Si bien Chile actualmente es miembro de la OCDE, este es considerado dentro de la región de Latinoamérica y El Caribe, donde su participación con respecto a los otros países de esta región se ve reflejada en la Figura 2.

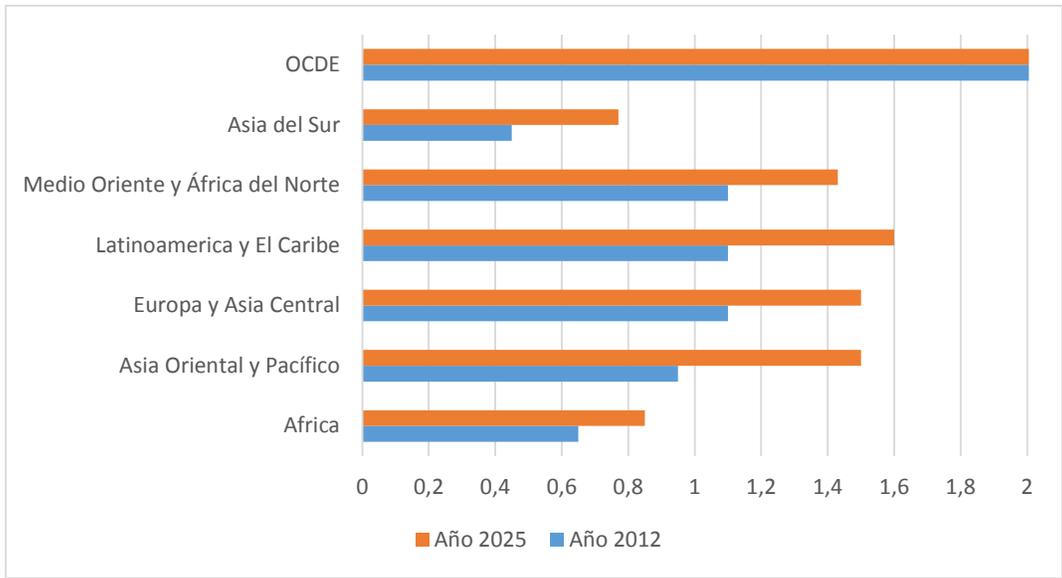


Figura 1. Producción per cápita diaria de residuos del 2012 y proyecciones para el 2025.

Fuente: (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012).

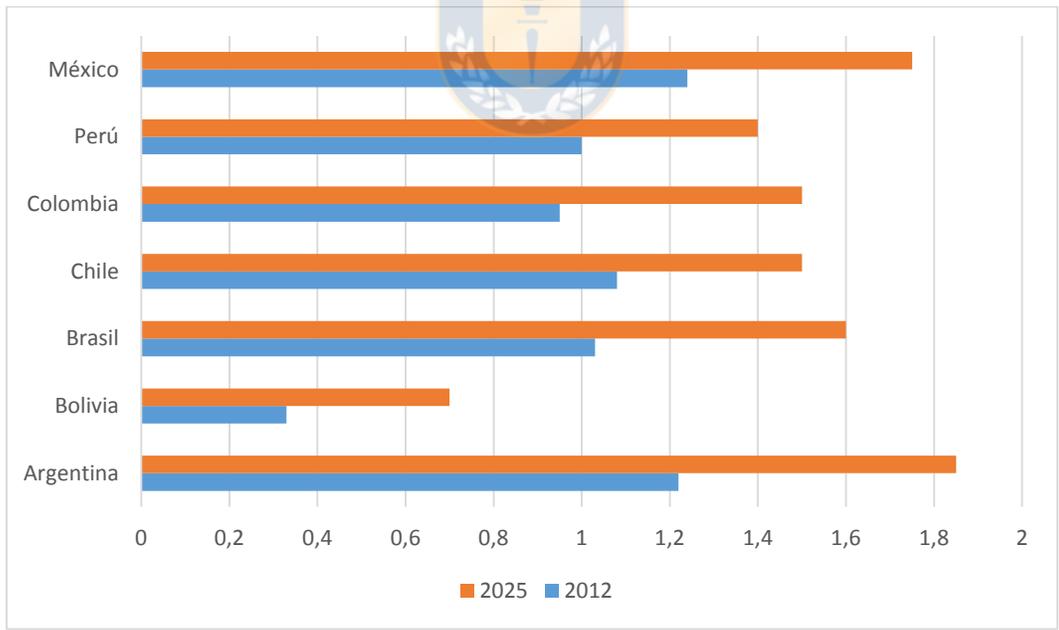


Figura 2. Producción per cápita de residuos diaria de la región Latinoamérica y El Caribe del 2012 y proyecciones para el 2025.

Fuente: (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012).

En cuanto a la figura anterior, los países que generan residuos per cápita por sobre el promedio de Latinoamérica y El Caribe son México, Argentina y Chile. En países como Bolivia, Perú, Colombia y Brasil, su producción per cápita es bajo el promedio de la región, sin embargo, sus proyecciones apuntan a un incremento considerable, alcanzando países como Argentina y México.

Las medidas que más se utilizan a nivel mundial para el reducir, tratar y/o eliminar los RSM, son la disposición final en rellenos sanitarios, seguido del reciclaje, incineración y, por último, el compostaje, como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Alternativas de gestión de RSM en algunos países.

País	PPC (kg/hab/día)	Relleno sanitario (%)	Incineración (%)	Compostaje/DA ^a (%)	Reciclaje (%)
Alemania	1,64	1	37	17	45
Australia	2,1	70	0	0	30
Canadá	1,07	72	4	7	18
Chile	1,05	90	0	0	10
Corea	0,99	17	24	1	58
Dinamarca	2,34	5	54	15	26
EU27	1,37	37	23	15	25
España	1,29	58	9	18	15
Estados Unidos	2,00	54	12	8	26
Italia	1,33	33	23	16	28
Japón	0,96	1	76	0	19
México	1,04	95	0	0	5
Reino Unido	1,42	49	12	14	25
Suecia	1,61	5	50	10	35
Suiza	1,88	0	50	16	35

^a: Digestión anaeróbica.

Fuente: (Erses Yay, 2015; Hoornweg & Bhada-Tata, 2012; Malinauskaite et al., 2017; Tan et al., 2015).

Notoriamente, en países desarrollados, como Alemania, Dinamarca, Suecia, Suiza y Japón, los RSM son incinerados para aprovechar su energía térmica y eléctrica, como también para reducir el vertido de los residuos. (Karlsson, Brunzell, & Venkatesh, 2018; Malinauskaite et al., 2017) señala que Suecia y Finlandia recuperaron el máximo potencial energético de los RSM, obteniendo entre 90%-100% como calor, para suplir las necesidades térmicas de la comunidad . Por otra parte, Japón tiene la mayor cantidad de plantas de incineración de RSM a nivel mundial, donde el 10% de estas son utilizadas para producción de electricidad y el resto solo para reducir su volumen de residuos (Tan et al., 2015).

Sin embargo, en el resto del mundo el vertido de los RSM aún sigue siendo la técnica predominante, principalmente por la falta de normativas, costos operacionales y falta de acceso a nuevas tecnologías. Al mismo tiempo, los problemas ambientales que trae este método genera efectos sobre el medio ambiente y la salud de las personas (Tchobanoglous et al., 1994).

4.2 Riesgos ambientales y de salud de las personas debido a la mala gestión de residuos.

Una gestión de residuos puede llevarse de manera correcta siempre y cuando los flujos sean caracterizados, se tenga conocimiento cuantitativo y cualitativo de estos y se cuente con un manejo seguro, ya que así se pueden implementar medidas integrales y realistas para tratar adecuadamente los residuos. Sin embargo, si los residuos no son manejados de manera apropiada los problemas que se pueden producir son graves y pueden afectar directa o indirectamente a la salud de las personas y al medio ambiente (World Health Organization, 2016).

Los principales riesgos y problemas que afectan a la salud de las personas pueden acentuarse mayoritariamente por tres situaciones; transmisión de enfermedades bacteriales y parasitarias, riesgos de lesiones e infecciones por elementos corto

punzantes y por la quema de residuos, debido a la liberación de gases (Sáez, Urdaneta, & Joheni, 2014).

Un claro ejemplo de lo anterior, es el accidente en enero de 2016 en el Relleno Sanitario Santa Marta de la Región Metropolitana (RM) en Chile, donde un incendio se produjo por la combustión de los gases provenientes de la descomposición de los residuos, afectando directamente a la salud de las personas por las emisiones atmosféricas (Guichou, 2016).

En el plano ambiental, los impactos que se producen o podrían generarse son principalmente a la calidad del agua, aire y suelo. La calidad de agua puede verse afectada por la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, debido a la filtración y escurrimiento de los lixiviados generados a partir de la percolación del agua de lluvia y de los procesos bioquímicos de los residuos sólidos dispuestos (Droppelmann & Oettinger, 2009). Por otro parte, dado que se generan emisiones de gases tóxicos y peligrosos (dióxido de carbono, metano y óxido de nitrógeno, principalmente) en rellenos sanitarios, y otros procesos de tratamiento de residuos como la combustión o degradación de materia orgánica, la calidad de aire se ve afectada directamente y otros componentes del ambiente como la capa de ozono (Di Maria & Micale, 2015; Themelis, Diaz B., Estevez, & Velasco, 2013; Zaror Zaror, 2005). Finalmente, el uso de suelo no es un problema menor, especialmente en países y/o localidades con territorios pequeños, ya que, junto con la generación de residuos, se incrementa también la demanda del uso de suelo para la construcción de rellenos sanitarios, además de afectar directamente a aquellos que vivan cerca del sector, debido al impacto paisajístico que se produce y los anteriormente mencionados (Santamarta, Rodríguez-martín, Arraiza, & López, 2014).

4.3 Situación nacional de residuos sólidos municipales.

En Chile, para el año 2009, los RSM generados, fue de 6,5 millones de toneladas, siendo la principal región generadora de estos la RM, con aproximadamente 2,8 millones de toneladas de residuos, seguido por la Región del Biobío con aproximadamente 610.000 toneladas (Figura 3).

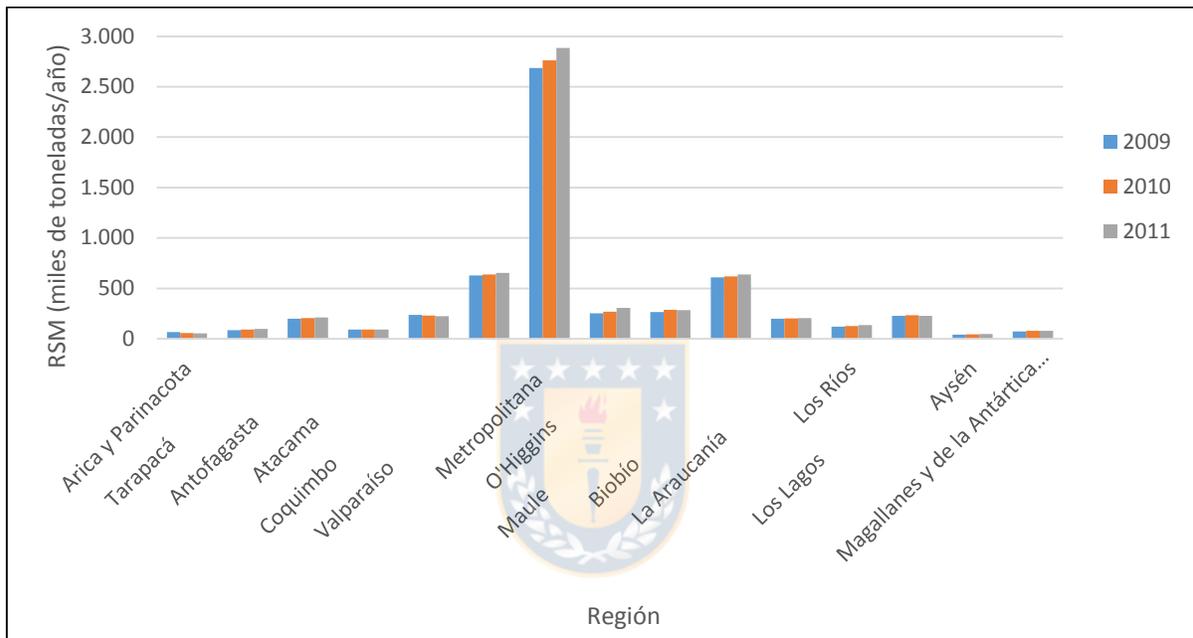


Figura 3. Generación total de residuos sólidos municipales por regiones, 2009-2011.

Fuente: (INE, 2012).

Actualmente más del 80% de los RSM son dispuestos en rellenos sanitarios, siendo el segundo país miembro de la OCDE que destina mayor cantidad de RSM a estas instalaciones (INE, 2012; OCDE & CEPAL, 2016). Como se puede ver en la figura anterior, los RSM han ido aumentando año a año en todas las regiones del país, lo que también aumenta los riesgos e impactos ambientales asociados a la disposición en rellenos sanitarios. El costo actual de gestión de RSM en Concepción es de \$42.000 por tonelada de RSM, donde el 73% corresponde a la recolección y

transporte, mientras que el 27% restante, asociado a la disposición final en el relleno sanitario (InnovAconcagua, 2015).

Por otra parte, los RSM generados corresponden mayoritariamente a materia orgánica (48%), plásticos (11%), papeles, cartones (10%) y otros (18%) (Figura 4). La clasificación de otros, se otorga a los RSM voluminosos, peligrosos, cueros, entre otros. La composición de los residuos puede ir variando, principalmente por las características del lugar, estaciones del año, nivel socioeconómico y hábitos de consumo. El conocimiento de este parámetro, permite escoger las tecnologías de tratamiento idóneas para cada flujo de residuos.

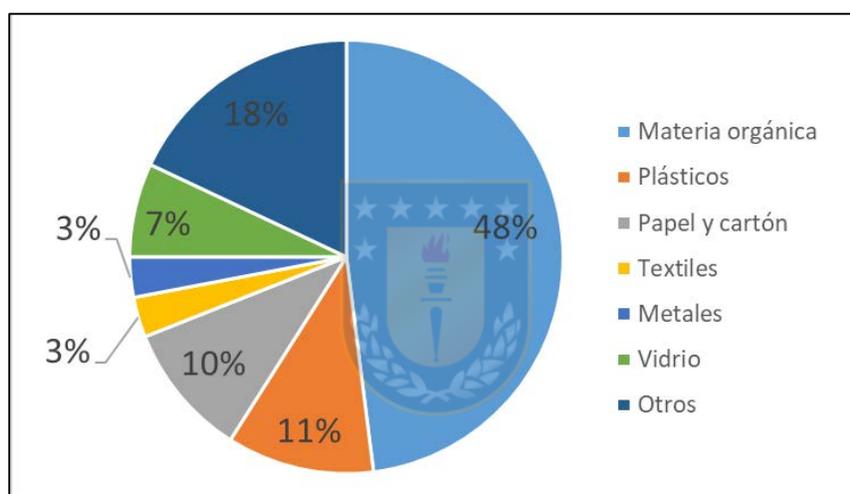


Figura 4. Composición de RSM a nivel nacional.

Fuente: (Ministerio de Medio Ambiente, 2011).

Con relación a la región del Biobío, en el 2014 comienza a operar el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), el cual tiene por objetivo disminuir la cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios y evitar los riesgos que traen consigo, mediante una integración de normativas nacionales e internacionales, considerando y evaluando los residuos y tratamientos lo largo de su ciclo de vida. Este plan consta de 3 etapas sucesivas, donde se fomenta la prevención de residuos destinados a relleno sanitario a través del compostaje y el reciclaje. En el caso de la comuna de Concepción, ésta ya cuenta con algunas instalaciones de recuperación

principalmente de papeles y cartones, plásticos, vidrios y metales, los cuales son recolectados a través de puntos limpios y recicladores de base, sin embargo, su porcentaje de recuperación no supera el 1%, siendo casi el 100% de los RSM dispuestos en el relleno sanitario CEMARC (Centro de Manejo de Residuos Concepción), quien atiende a otras nueve comunas de la región: Tomé, Chiguayante, Penco, San Pedro de la Paz, Coronel, Santa Juana, Hualqui, Lota y Arauco (EULA-Chile, 2013).

No obstante, la preocupación por el aumento de RSM y sus actuales modelos de gestión, ha sido abarcada a nivel mundial donde organizaciones como la OCDE, la Organización de Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Unión Europea (UE) y distintos actores de la sociedad han desarrollado tratados a nivel local y global, además de crear e implementar políticas públicas para evitar y minimizar los problemas a la salud humana y al medio ambiente derivados de las altas tasas de generación de residuos así como de una ineficiente sistema de manejo.

En cuanto a la ONU, está ha establecido 17 objetivos para desarrollo sostenible (ODS), que abordan los problemas más urgentes de la sociedad mundial: superación de la pobreza, salud, educación, acceso al agua potable, al saneamiento y la energía, producción y consumo responsable, entre otros. El problema de los residuos se abarca principalmente en 4 de los 17 objetivos; producción y consumo responsable, la accesibilidad a energías renovables, ciudades y comunidades sostenibles y acción por el clima. El primero de estos objetivos, hace énfasis en que el desarrollo sustentable va de la mano con reducir los impactos ambientales generados por la producción y el consumo de bienes y servicios (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2018). Para esto, se proponen metas al 2030 para reducir y reciclar los residuos que se generan por parte de los productores y consumidores, desde una perspectiva de todo el ciclo de vida de estos. Al mismo tiempo, el objetivo de acceso a la energía no contaminante, establece que se debe invertir en energías limpias, las que se generan a partir de energías renovables

(eólica, solar, hidroelectricidad y biomasa). Lo anterior, ya que las energías a partir de los combustibles fósiles provocan un impacto indiscutible sobre el cambio climático por acción de los gases contaminantes emitidos. El tercer objetivo que tiene relación con la gestión de los RSM es el de ciudades y comunidades sostenibles, ya que el rápido crecimiento urbano en las ciudades generaría una mayor cantidad de RSM, por lo que la gestión adecuada de estos y la planificación territorial están estrechamente relacionados para vivir en una ciudad segura y sustentable. Por último, el cuarto objetivo en cuestión es de acción por el clima, dado que los RSM son una fuente potencial de gases de efecto invernadero, el principal contribuyente al calentamiento global (Enterprises pour l'Environnement, 2010; European Commission, n.d.).

En resumen, estos objetivos apuntan a que las naciones adopten medidas en pos de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que impactan al cambio climático, reducir la brecha de desigualdad social y fomentar el desarrollo sustentable de las naciones.

Por otro lado, la OCDE realizó en 2016 una evaluación de desempeño ambiental para nuestro país, donde recomiendan enfatizar en mejorar la calidad de aire, gestión de desechos y la matriz energética, mediante la integración de una economía circular, que permita recuperar los RSM que actualmente son destinados al relleno sanitario, aprovechando los materiales o la energía contenida en ellos, a través de la implementación de leyes chilenas y de acuerdo con la jerarquización de RSM, que serán descritas a continuación.

4.4 Jerarquización de gestión de RSM.

Una de las medidas más conocidas y utilizadas a nivel mundial para la gestión de los RSM, es la jerarquización relacionada a la gestión de residuos establecida por la Directiva Marco de Residuos de la UE. Esta asociación política – económica se

encarga de acoger, organizar y trabajar en distintos ejes temáticos (Medio Ambiente, Economía, Cultura, Ciencia y Tecnología, entre otros) para los 28 países miembros, entre ellos: Alemania, Países Bajos, Reino Unido, España y Dinamarca (Ministerio de Asuntos exteriores y Cooperación, 2012).

Si bien Chile no es parte de esta asociación, el país ha adoptado y seguido dicho procedimiento, integrándose en las normativas ambientales relacionadas a residuos sólidos domiciliarios del país, destacándose la Política de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) y la Ley N° 20.920, del Ministerio del Medio Ambiente (MMA), que establece el Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida al Productor y Fomento al Reciclaje (Ley REP). (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

La PGIRS, elaborada en el año 2005 por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), establece la necesidad de implementar un manejo adecuado para los residuos sólidos, mediante planes de acción y estrategias de desarrollo social y económico a nivel, local, regional y nacional. El objetivo fundamental que busca esta política es minimizar los riesgos sanitarios y ambientales, así como, contribuir al desarrollo sustentable del país (CONAMA, 2005).

Asimismo, la Ley REP, publicada en el año 2016 por el MMA, complementa y considera los objetivos planteados en la Política descrita anteriormente. En este caso, se pretende disminuir la generación de residuos y fomentar el reciclaje y reutilización, obligando a los fabricantes de productos prioritarios (aceites lubricantes, aparatos eléctricos y electrónicos, diarios periódicos y revistas, neumáticos, pilas y baterías, entre otros) hacerse responsables de ellos al final de su vida útil, integrando la economía circular.

El marco jurídico de esta legislación implementada en el año 2016, prioriza los tratamientos de residuos de acuerdo a una jerarquía de 5 niveles (Figura 5).



Figura 5. Jerarquización de residuos según Directiva Marco de Residuos de la UE y Ley REP de Chile.

Fuente: (Ministerio del Medio Ambiente, 2016).

Este marco le brinda una mayor prioridad a la prevención de residuos, seguida de la preparación para la reutilización, el reciclaje, otras formas de valorización (como la energética y biológica), y finalmente la eliminación, considerada como última opción (Bueno, Latasa, & Lozano, 2015; Knauf, 2015).

A continuación, se describen los cinco niveles jerárquicos de la gestión de residuos junto con las principales alternativas de tratamientos identificadas:

- Prevención: Referida a las medidas para evitar y reducir la cantidad de residuos, promoviendo la reutilización y extensión de vida útil de los productos.

La prevención puede llevarse a cabo en los hogares, en instalaciones comerciales e industriales, haciendo énfasis y prefiriendo aquellos productos que utilicen una menor cantidad de material. Asimismo, como los productos no pasan por un tratamiento, la prevención es considerada como la alternativa más favorable ya que reduce la cantidad de residuos generados y dispuestos en los rellenos sanitarios, los costos asociados a la manipulación

de estos y los impactos ambientales asociados al transporte, tratamiento y disposición final (Gharfalkar, Court, Campbell, Ali, & Hillier, 2015; Tchobanoglous et al., 1994).

- Preparación para reutilización: Acciones como revisión, limpieza y preparación de los productos o componentes de ellos, para darles una segunda vida con el mismo fin que fueron adquiridos previamente u otro distinto, sin llevarse a cabo ningún procesamiento (Instituto de Asuntos Públicos., 2016).

Este tipo de acciones se realizan, al igual que la prevención, en las viviendas e instalaciones comerciales, donde los objetos más comunes que son recuperados para la reutilización son el vidrio, textiles, botellas de plástico y hasta neumáticos.

- Reciclaje: Proceso de recuperación (directa o indirecta) de los componentes de los RSM mediante un tratamiento, exceptuando la valorización energética, logrando un ahorro energético y de recursos renovables, disminuyendo la cantidad de residuos a eliminar, además de proteger el medio ambiente (Instituto de Asuntos Públicos., 2016; Rondón Toro, Szantó Narea, Pacheco, Contreras, & Gálvez, 2016).

Existen distintos métodos de reciclaje en un sistema de gestión de RSM, ya sea mediante la implementación de plantas de recuperación para aquellos residuos que no han sido previamente separados en el origen o por recogida selectiva desde el origen mediante la coordinación y cooperación de la ciudadanía, con el fin de disminuir el flujo de residuos que lleguen a las plantas de recuperación y a disposición final.

- Valorización energética: Existen distintos métodos de valorización de los residuos, principalmente térmicos, biológicos y de biogás de relleno sanitario, de donde se puede obtener electricidad, calor o combustible, junto con enmendador de suelo en tecnologías de conversión biológica.

- Disposición final: actualmente la principal forma de eliminación de RSM es mediante la disposición final en rellenos sanitarios. Es una instalación de eliminación de residuos sólidos en un sitio especializado, donde se disponen, compactan y cubren los residuos diariamente, además de contar con un sistema de recolección y tratamiento de lixiviados y del biogás, con el objetivo de reducir los gases contaminantes y sustancias tóxicas que afectan la calidad de aire y los cursos de agua superficiales y napas subterráneas (López A. & Núñez L., 2016; Rondón Toro et al., 2016). Pese a esto, es la más utilizada a nivel mundial, principalmente por el bajo costo de instalación y operación, junto con la escasa tecnología en los países pequeños y medianamente desarrollados.

Si bien dichas alternativas entregan una base para la jerarquización en los sistemas de gestión de RSM, estas varían de acuerdo a las realidades del área de estudio y las características de los residuos. Por esto, cualquier variación de esta jerarquía debe ser validada por métodos científicos, considerando todo el ciclo de vida de los residuos y procesos que se llevan a cabo, es decir desde la generación hasta la disposición final (Knauf, 2015).

A pesar de que la prevención, reutilización y reciclaje son los niveles más recomendados de gestión de RSM, estos dependen fuertemente del compromiso y los hábitos de las personas y la sociedad, lo que crea incertidumbre frente a la inevitable generación actual de RSM. Por esto, la preocupación por la limitación de espacios disponibles para la disposición final de RSM, la presión sobre los recursos naturales para la generación de energía y elaboración de nuevos productos, han incrementado las investigaciones y utilización de los residuos como fuente de energía renovable y como una alternativa de gestión de RSM que permite obtener multiproductos, como electricidad, calor y enmendador de suelo (Fernández-gonzález, Grindlay, Serrano-bernardo, Rodríguez-rojas, & Zamorano, 2017; Gharfalkar et al., 2015; Hoornweg & Bhada-Tata, 2012; Lousselet et al., 2017; Menikpura, Sang-Arun, & Bengtsson, 2016; Ryu & Shin, 2013; Santamarta et al., 2014).

Asimismo, sea la gestión de RSM que se implemente en un territorio, esta debe apuntar a la reducción y prevención de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ahorro energético, conservación de recursos, desarrollo de tecnologías limpias y económicamente viable.

En este contexto, los RSU son una alternativa atractiva para ser valorizados energéticamente, y un elemento fundamental para decidir sobre la mejor alternativa de gestión de RSM, es su contenido energético ya que nos permitirá saber la cantidad de energía que se puede obtener a partir de estos. De acuerdo a la Tabla 2, podemos comparar el potencial energético de los RSM frente a otros combustibles nacionales.

Tabla 2. Potencial energético de combustibles nacionales y de RSM.

Tipo de combustible	Poder calorífico (MJ/ton)	Potencial energético (kWh/ton)
Biogás	13610	4652
Residuos sólidos domiciliarios	11002	3056
Leña	14641	4067
Diésel	45612	12670
Gas licuado	50627	14063

Fuente: (CONAMA, 2009).

De acuerdo a esto, los RSM poseen un potencial energético similar a la leña, la cual en Concepción es una de las principales fuentes energéticas a nivel residencial (Comisión Nacional de Energía, 2015). A su vez, el biogás también es un combustible atractivo, que se genera de manera natural en los rellenos sanitarios y poseen un potencial energético mayor al de los RSM. Sin embargo, la generación de este gas combustible depende fuertemente de la edad del relleno sanitario y del tiempo que

permanezcan descomponiéndose los residuos biodegradables, ya que el máximo volumen de biogás generado en los rellenos sanitarios es en aproximadamente 20 años (Blanco, Santalla, Córdoba, & Levy, 2017; Panesso, Cadena, Mora, & Ordoñez, 2011; Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012; Valladares C, Villegas S, & Sánchez A, 2013) . En pocas palabras, la valorización energética de los RSM permitiría obtener beneficios desde el punto de vista de los productos obtenidos, principalmente energía, de mitigación del cambio climático y como solución a la limitación de suelos disponibles para la disposición final de los RSM.

4.5 Alternativas de valorización energética.

Las tecnologías de valorización energética suelen convertir los residuos orgánicos en combustibles, ya sea líquidos, sólidos o gaseosos, usando distintas alternativas de conversión, dependiendo de la fuente de donde se quiere obtener el combustible y de los productos esperados, como las que se esquematizan en la figura 6 y se describen a continuación.

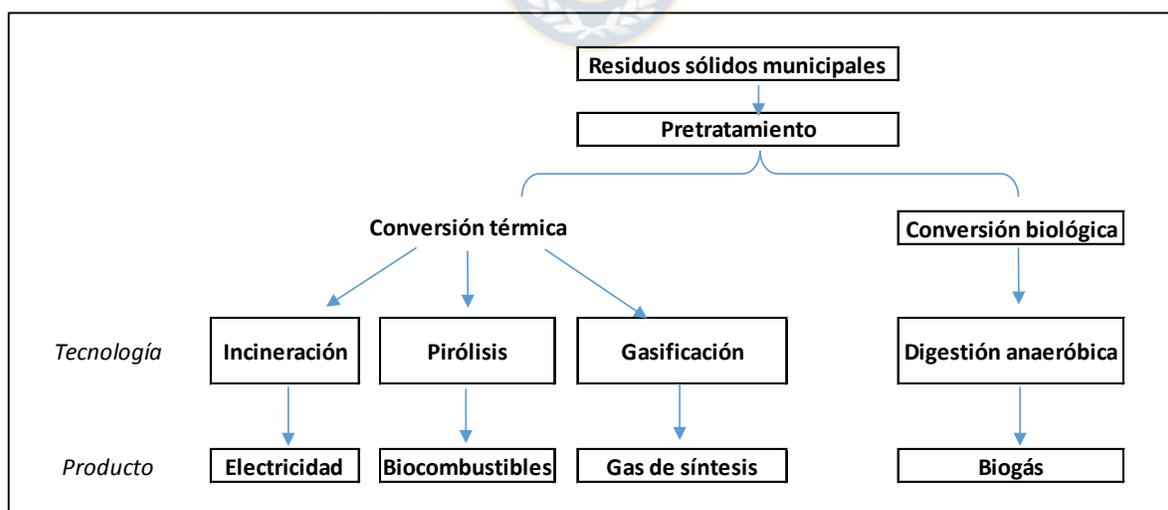


Figura 6. Tecnologías de conversión energética de los RSM.

Fuente: Elaboración propia.

❖ Valorización térmica: Consiste en la conversión a altas temperaturas de los RSM en productos gaseosos, líquidos y sólidos mediante reacciones químicas para obtener calor, electricidad (pasando gas o vapor a través de turbina o motor de combustión interna) y/o combustible (Dong et al., 2018; Kumar & Samadder, 2017; Paneque et al., 2011). Las principales tecnologías de conversión térmica para RSM utilizadas e investigadas a nivel global, son la incineración, gasificación y pirólisis (Leckner, 2015; Lombardi, Carnevale, & Corti, 2015). Estas tecnologías son ampliamente utilizadas especialmente en los países desarrollados como Japón, Estados Unidos y países miembros de la Unión Europea, principalmente por la demanda de uso de suelo que implican los rellenos sanitarios, permitiendo con esto reducir la masa y volumen de los RSM en un 70% y 90%, respectivamente (Lombardi & Carnevale, 2018). Las principales diferencias entre estos procesos son las condiciones operacionales como la presencia de oxígeno, temperatura de funcionamiento, eficiencia de conversión energética, costos monetarios además del producto obtenido, como se puede ver en la Tabla 3.

Para la gasificación y pirólisis de los RSM es ideal que su tamaño de partículas y composición sea homogéneo (idealmente sin residuos inertes y peligrosos), como también un bajo contenido de humedad, lo que permite maximizar el poder calorífico de los residuos (Arena, 2012; Kumar & Samadder, 2017).

Si bien estos procesos son una gran oportunidad para evitar la disposición de RSM en rellenos sanitarios y aprovechar su contenido calorífico, no se han implementado a grandes escalas (a excepción de la incineración) debido a sus altos costos operacionales, ilustrados en la tabla a continuación, y la heterogeneidad de los RSM.

Tabla 3. Principales características de tecnologías de valorización térmica.

Parámetros	Incineración	Gasificación	Pirólisis
------------	--------------	--------------	-----------

Principio	Combustión completa de RSM	Oxidación parcial de RSM	Descomposición térmica de los residuos en ausencia de oxígeno
Tipo de reacción	Exotérmica	Exotérmica	Endotérmica
Condiciones operacionales			
Entorno de reacción	Oxidante (presencia suficiente de oxígeno)	Reducción (suministro controlado de oxígeno, menor que el estequiométrico)	Ausencia total de cualquier oxidante
Gas reactante	Aire	Aire, oxígeno puro, oxígeno enriquecido con aire, vapor.	Nada
Temperatura	850 – 1200°C.	550 – 900°C (aire reactante) y 1000 – 1600 °C.	400 – 800 °C
Presión	Atmosférica	Atmosférica	Ligera sobrepresión
Salida de procesos			
Gas producido	CO ₂ , H ₂ O, N ₂ , O ₂	CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂	CO, H ₂ , CH ₄ e hidrocarburos
Eficiencia eléctrica neta	20 – 25 %	20 – 25%	28 – 30 %
Contaminantes gaseosos	SO ₂ , CO ₂ , NO _x , HCl, dioxinas (PCDD/F), partículas	H ₂ S, HCl, COS, NH ₃ , HCN, alquitrán, partículas	H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, alquitrán, partículas
Cenizas	Recuperación de metales ferrosos, no ferrosos y materiales inertes. Los residuos del control de contaminación de aire se eliminan como desechos industriales	Las cenizas se generan como escoria vítrea que puede ser utilizada en relleno para construcción de carreteras y en algunos casos como enmendador de suelo	Tratadas y eliminadas como desechos industriales, sin embargo, algunas instalaciones tienen tecnologías que permiten obtener cenizas valorizables como enmendador de suelo

Costos operacionales (USD\$/tonelada RSM)	40 – 70	45 – 85	50 – 80
---	---------	---------	---------

Fuente: Adaptado de (Arena, 2012; Ayodele, Ogunjuyigbe, & Alao, 2017; Chen, Yin, Wang, & He, 2014; Glaser, Wiedner, Seelig, Schmidt, & Gerber, 2014; Kumar & Samadder, 2017; Lombardi et al., 2015; Moratorio, Rocco, & Castelli, 2012).

De acuerdo a las tecnologías tabuladas, la incineración es la tecnología más utilizada a nivel mundial (Hornweg & Bhada-Tata, 2012; Lausselet et al., 2017), principalmente por sus costos operacionales más bajos, sin embargo, es la tecnología que genera mayores contaminantes, y de los que se puede obtener solo energía eléctrica. Por otro lado, la gasificación y pirólisis, si bien poseen mayores costos operacionales, estas tecnologías generan más de un producto y menos contaminantes que la incineración. A excepción de la producción de electricidad, se puede generar calor, enmendador de suelo y biocombustibles, para los procesos de biorefinerías (Dong et al., 2018; Glaser et al., 2014; Shi, Mahinpey, Aqsha, & Silbermann, 2016).

- ❖ Valorización biológica: tecnologías basadas en la descomposición microbiana del contenido orgánico de los desechos, con alto contenido de humedad y materia orgánica biodegradable.
 - Digestión anaerobia: Proceso biológico natural encargado de degradar los residuos orgánicos en ausencia de oxígeno, dando como resultado biogás (compuesto principalmente por CH₄ y CO₂) para recuperación de energía (eficiencia eléctrica de 35%) y abono orgánico para ser utilizado como fertilizante y mejorador de suelo (AgroWaste, 2013; Komakech, Sundberg, Jönsson, & Vinnerås, 2015). La efectividad y eficiencia del proceso, se ve reflejado en el control de ciertos factores que inciden directamente sobre este, entre los cuales encontramos el ph, temperatura, características físico-químicas y humedad del

sustrato, tiempo de retención, tasa de carga orgánica, tipo de reactores, entre otros (Barrera A. & Bordagorry A., 2015).

- ❖ Valorización de biogás de relleno sanitario: Este tipo de tecnología permite la recuperación energética contenida en el biogás proveniente del proceso anaeróbico de los residuos biodegradables depositados en un relleno sanitario. El biogás es una mezcla de gases, compuesto principalmente por metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otros elementos traza (Tabla 4). Este gas, considerado como fuente de energía renovable, posee propiedades combustibles principalmente por el potencial energético del metano. En un relleno sanitario típico, el biogás se genera a una tasa promedio de 100 - 150 m³ por tonelada de RSM y entre un 40 – 60% es capturado en el relleno sanitario, mientras que el restante es liberado a la atmósfera (Douglas, Szarka, & Bezama, 2010; Gesma, 2017; Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012). El gas es conducido a turbinas de gas/vapor o motores de combustión interna, donde finalmente se genera la electricidad, con una eficiencia de conversión eléctrica de 30 – 50% (Blanco et al., 2017).

Tabla 4. Composición típica de biogás.

Contenido	Composición	Unidad
CH ₄	50 – 70	%
CO ₂	35 – 50	%
Nitrógeno (N ₂)	2 – 5	%
Hidrógeno (H ₂)	0 – 1	%
Oxígeno (O ₂)	0 – 2	%
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	0 – 3	%
Eficiencia conversión eléctrica	30 – 50	%
Contenido energético	6.0 – 6.5	KWh/m ³

Fuente: (Blanco et al., 2017; Carrasco A & Díaz A, 2015; López A. & Núñez L., 2016; Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Global Environment Facility, 2011).

4.6 Herramientas de sustentabilidad.

Por lo que se refiere a la elección de la mejor alternativa de gestión de RSM, es necesario una herramienta que permita evaluar y analizar a través de información confiable, representativa y validada científicamente, para tomar una decisión realista a las condiciones locales (Gunamantha & Sarto, 2012). Las principales herramientas para evaluar la sustentabilidad considerando diferentes aspectos tales como técnicos, económicos, ambientales se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Revisión de métodos de evaluación según (Allesch & Brunner, 2014; Pires, Martinho, & Chang, 2011; Zurbrügg, Caniato, & Vaccari, 2014).

Método	Descripción
Evaluación comparativa	Comparación continua de productos, servicios, métodos o procesos para identificar posibles mejoras.
Análisis de coste-beneficio (ACB)	Basado en el aumento (utilidad) o reducción (costo) del bienestar humano, donde los beneficios son evaluados en unidades monetarias.
Análisis de eficiencia ecológica (Eco-EFF)	Cuantificación de sostenibilidad de productos y procesos, considerando los impactos ambientales y económicos relativos a una empresa o nivel económico nacional.
Evaluación de impacto ambiental (EIA)	Evaluación de los efectos significativos sobre el medio ambiente y la salud de las personas que pueda causar un proyecto, por su naturaleza, localización, entre otros.
Análisis del ciclo de vida (ACV)	Elaboración de perfil ambiental de proceso, producto y/o actividad a lo largo del ciclo de vida, en base a la identificación de los aspectos e impactos potenciales ambientales.
Coste del ciclo de vida (CCV)	Método de análisis económico a través de la contabilización de costos del ciclo de vida de un proceso, actividad y/o producto.

Decisiones multi-criterio	Herramienta de toma de decisiones basada en la comparación y clasificación de diferentes alternativas, como también en la evaluación de sus consecuencias.
Evaluación ambiental estratégica (EAE)	Método de integración de aspectos ambientales en la formulación de planes y programas, mediante una evaluación ambiental con el objetivo de proteger el medio ambiente identificando los efectos significativos adversos que pueda tener sobre este.

De la totalidad de estudios revisados, el 40% utilizó la metodología de ACV para evaluar diferentes escenarios de gestión de RSM, considerando variaciones en la composición de los flujos, área de estudio y tecnología de tratamiento aplicado a los distintos residuos. Otros autores reafirman que el ACV de la gestión de RSM dependen fuertemente de las especificaciones recientemente mencionadas, siendo los resultados específicos para cada caso de estudio.

En conclusión, el ACV permite integrar estos aspectos e identificar los beneficios y problemas críticos de manera objetiva, transparente y representativa, para entregar información robusta y comprensible para los tomadores de decisiones (Laurent et al., 2014; Liamsanguan & Gheewala, 2008).

Finalmente, es importante destacar que para elegir las mejores alternativas de gestión de RSM, se debe evaluar desde un punto de vista sustentable e integral, tomando en cuenta los aspectos económicos, sociales y políticos del territorio.

4.7 Análisis de ciclo de vida.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta metodológica ampliamente utilizada y aceptada a nivel mundial para la evaluación de los aspectos ambientales e impactos potenciales causados por diferentes actividades, procesos y/o productos, mediante la identificación y cuantificación del uso de recursos y las

emisiones asociadas al ciclo de vida del sistema evaluado (Bolaños, Bello, & Urzola, 2011; Fullana & Puig, 1997).

Los propósitos de esta metodología son variados y complementarios, siendo sus principales objetivos los siguientes:

- Evaluar las cargas ambientales asociadas al producto, proceso o actividad.
- Identificar posibles mejoras en el sistema y reducir los impactos ambientales con cuestiones energéticas, consumo de materias primas y emisiones.
- Proporcionar información útil para orientar en la toma de decisiones.

El marco normativo y de referencia para implementar esta metodología se rige por las normas internacionales ISO 14040 Y la ISO 14044 (UNE-EN, 2006a, 2006b). Estas normas establecen una serie de directrices y requisitos para llevar a cabo un ACV adecuado y que pueda ser fácilmente interpretado y reproducible.

Esta metodología involucra cuatro etapas fundamentales tales como: definición de objetivos y alcances, análisis del Inventario, Evaluación de impactos e Interpretación de los resultados (Figura 7). A continuación, se describe brevemente en que consiste cada etapa.

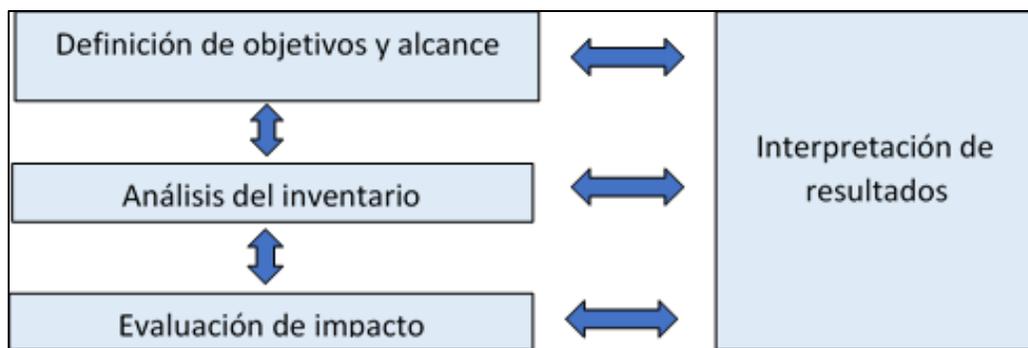


Figura 7. Esquema fases ACV.

Fuente: (Fullana & Puig, 1997).

- ❖ **Definición de objetivo y alcance:** En esta primera etapa se establecen las razones del estudio y la información que se desea obtener. Se definen los

límites del sistema, la unidad funcional y aquellos supuestos y/o limitaciones considerados en el estudio.

- ❖ **Análisis del inventario:** Identificación y cuantificación de todas las entradas y salidas del sistema, referidas a la unidad funcional establecida.
- ❖ **Evaluación de impactos:** Clasificación de los impactos potenciales en categorías de impacto, se caracterizan mediante la conversión a unidades comunes para obtener un perfil ambiental, que puede ser normalizado y ponderado, entregando puntuaciones a cada categoría de impacto.
- ❖ **Interpretación de resultados:** Etapa final donde se evalúan y analizan los resultados, entrega de observaciones y recomendaciones. Se realiza además un análisis de sensibilidad e incertidumbre de los resultados.

Esta herramienta ha sido implementada en diversas áreas de investigación científica, como para la elaboración de productos químicos (Brito & Martins, 2017; Cespi et al., 2015), materiales de construcción como el concreto (Braga, Silvestre, & de Brito, 2017), combustibles (Daylan & Ciliz, 2016; Dias, 2014; Sobrino, Monroy, & Perez, 2011), plantaciones forestales (Cambero & Sowlati, 2014; Dias & Arroja, 2012), alimentos (Bartzas & Komnitsas, 2017; De Marco & Iannone, 2017) y hasta servicios de hotelería (Puig et al., 2017)

Por otra parte, la evaluación de la gestión de RSM mediante esta metodología, ha sido ampliamente aceptada y desarrollada en diferentes casos de estudios dependiendo de las características de los escenarios propuestos como de los métodos de evaluación de impactos escogidos y sus categorías de impacto o daño, según corresponda. A continuación, en la Tabla 6 se muestra las principales consideraciones en diversos estudios realizados.

Tabla 6. Aplicaciones de ACV en la gestión de RSM.

Fuente	Objetivo tecnología	Método evaluación de impactos	Conclusiones

(Bezama et al., 2013)	<p>Evaluación comparativa de tres alternativas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Relleno sanitario con quema de biogás captado. - Relleno sanitario con recuperación energética de biogás. - Digestión anaeróbica para fracción orgánica y relleno sanitario para el restante. 	<p>Midpoint y endpoint:</p> <ul style="list-style-type: none"> - CML 2000 (mid point). - Ecoindicador 99 (end point). 	<p>La alternativa de recuperación energética de biogás en relleno sanitario es la mejor solución para el caso de Coyhaique, ya que se produce electricidad para ser inyectada a la matriz energética. Si bien la digestión anaeróbica genera más electricidad, la construcción de digestor impacta negativamente.</p>
(Bueno et al., 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Incineración. - Reciclaje. 	<p>Midpoint: CML-IA.</p>	<p>Evaluación comparativa de distintas tasas de reciclaje. Cuando el reciclaje es de 25%, es mejor alternativa la incineración de los RSM. Cuando el reciclaje incrementa a un 75%, es elegida la mejor vía de gestión de RSM, principalmente por las cargas evitadas de la recuperación de material.</p>
(Erses Yay, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Reciclaje - Compostaje - Incineración - Relleno sanitario 	<p>Midpoint: CML-IA.</p>	<p>Un sistema integrado que incluya la recuperación de materiales, compostaje, incineración y relleno sanitario es el mejor escenario para gestionar los RSM de este territorio.</p>
(Arafat, Jijakli, & Ahsan, 2015)	<p>Aprovechamiento energético a partir de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Relleno sanitario - Gasificación - Incineración - Compostaje 	<p>Midpoint: CML 2001 Endpoint: Ecoindicador 99</p>	<p>La recuperación energética es beneficiada por el reciclaje papel, madera y plásticos; digestión anaeróbica es ideal para alimentos y desechos de jardín; incineración para textiles.</p>

	- Digestión anaeróbica		En general, las mejores tecnologías en términos ambientales es la gasificación y digestión anaeróbica.
(Ogundipe & Jimoh, 2015)	<ul style="list-style-type: none"> - Reciclaje - Incineración - Relleno sanitario - Compostaje - Vertedero abierto 	Endpoint: Impact 2002+.	El escenario que considera el 50% de RSM compostados, 33% a relleno sanitario, y el restante reciclado es la mejor alternativa al tomar en cuenta las categorías de calentamiento global, carcinógenos, ecotoxicidad, acidificación y eutrofización.
(Popita et al., 2017)	<ul style="list-style-type: none"> - Relleno sanitario - Compostaje - Reciclaje - Incineración. 	Midpoint: CML – IA 2001.	El escenario que considera las 4 tecnologías evaluadas (compostaje, relleno sanitario, reciclaje e incineración) resulta ser el que más beneficios ambientales trae, principalmente por la recuperación energética y la disminución de residuos destinados al relleno sanitario.

Los estudios tabulados anteriormente, hacen énfasis en la importancia y sensibilidad que muestran los resultados frente a cambios como el flujo de residuos y su composición (Arafat et al., 2015; Bueno et al., 2015), diferentes tecnologías de tratamiento (Erses Yay, 2015; Ogundipe & Jimoh, 2015; Popita et al., 2017), además de las realidades energéticas de cada país (Bezama et al., 2013; Jeswani & Azapagic, 2016; Ogundipe & Jimoh, 2015).

En la mayoría de los casos, las principales categorías de impacto afectadas son principalmente agotamiento de recursos abióticos por el consumo de combustibles fósiles en el transporte de materiales y residuos, calentamiento global y agotamiento

de capa de ozono por las emisiones de gases de efecto invernadero, generados por el consumo energético en matrices energéticas basadas en combustibles fósiles, y emisiones provenientes de la descomposición de materia orgánica en el vertido de residuos.

Si bien no existe un consenso de la tecnología que se comporte mejor ambientalmente, los principales escenarios que mayores beneficios presentaron fueron los asociados al reciclaje y compostaje (Arafat et al., 2015; Bueno et al., 2015; Erses Yay, 2015; Popita et al., 2017), principalmente por evitar la producción de nuevos productos y aquellas tecnologías con aprovechamiento energético, como la digestión anaeróbica y gasificación.

Por el contrario, los escenarios más desfavorables fueron los que consideraban rellenos sanitarios, principalmente por las emisiones de gases tóxicos y de efecto invernadero, además de los consumos energéticos y combustibles asociados a este sistema (Douglas et al., 2010; Ogundipe & Jimoh, 2015; Popita et al., 2017).

A nivel mundial, las tecnologías de conversión de residuos a energía (WTE, por sus siglas en inglés) han sido destacadas y adoptadas por ser una solución al problema de la creciente generación de residuos y sus impactos asociados, su potencialidad como fuente de energía renovable y la integración de economía circular (Fernández-gonzález et al., 2017; Lausselet et al., 2017). De acuerdo a (Tan et al., 2015), los países desarrollados son quienes más utilizan estas tecnologías, como Japón que incinera el 80% de sus residuos, de los cuales el 10% es aprovechado energéticamente. En la UE, el 24% de los residuos son aprovechados energéticamente, donde Suecia es destacado por utilizar el 50% de sus residuos para este fin.

5 METODOLOGÍA.

A continuación, como se muestra en la Figura 8, se esquematizan los pasos de la metodología utilizada en el estudio para responder a los objetivos previamente planteados y evaluar ambientalmente los impactos de distintas alternativas de valorización energética para la gestión de RSM de la comuna de Concepción.

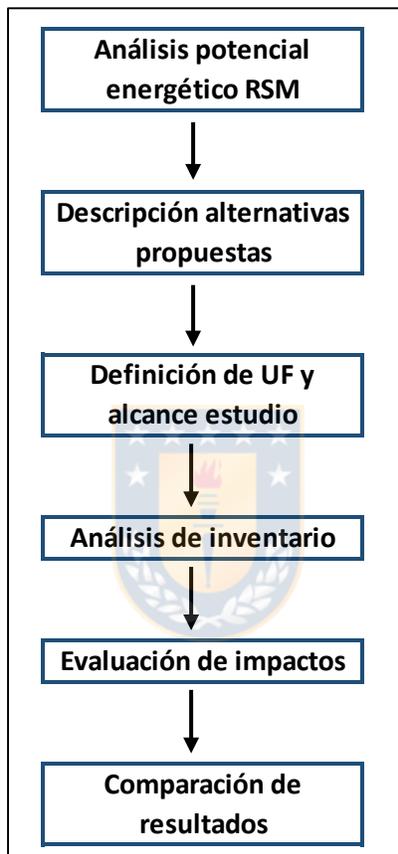


Figura 8. Esquema metodología del estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Para esto, se analiza previamente las características físicas y químicas de los RSM, luego, establecer las alternativas que permitan aprovechar al máximo la recuperación energética de estos RSM, y finalmente ser evaluadas a través de la metodología de ACV.

5.1 Antecedentes.

5.1.1 Caso de estudio: comuna de Concepción.

La comuna de Concepción, ubicada en la VIII Región del Biobío, posee un área de 221,6 km² y una población de 214.926 habitantes, donde el 98,1% se encuentra en el área urbana del territorio y el 1,9% en el sector rural (INE, 2012).

Durante el año 2015, se generaron 83.000 toneladas anuales de RSM, representando una producción per cápita de 1,05 kg/día, manteniéndose por sobre la media regional (1 kg/habitante/día) (EULA-Chile, 2013). Los residuos sólidos generados están compuestos principalmente por compuestos orgánicos (54%), papeles, cartones (13%) y plásticos (12%) según se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Composición de RSM de la comuna de Concepción.

Composición	Fracción, %
Materia orgánica	54
Papeles y cartones	13
Plásticos y textiles	12
Vidrios	3
Metales	2
Mezcla de residuos	16

Fuente: (InnovAconcagua, 2015).

5.2 Análisis de potencial energético de RSM.

Para caracterizar el potencial energético de los RSM, es necesario conocer ciertos aspectos de estos como es el contenido de humedad, composición, poder calorífico inferior (PCI) y su potencial energético. En cuanto al PCI y contenido de humedad de los componentes del flujo de RSM, los datos fueron recolectados de literatura, tabulados en la Tabla 8 (Concha S, Arteaga P, & González S, 2015; Tchobanoglous et al., 1994).

Tabla 8. Características de potencial energético de RSM.

Parámetro	Unidad	Materia orgánica	Papel y cartón	Plásticos y textiles
Composición	%	54	13	12
Humedad	%	30	20	9
Cenizas	%	10	13	4
PCI	MJ/ton	17.000	16.000	30.000
Biogás				
Composición metano	%	55		
Eficiencia captura	%	60		
PCI	MJ/ton	16747		

Fuente: Elaboración propia a partir de (Concha S, Arteaga P, & González S, 2015; Tchobanoglous et al., 1994).

Por otro lado, el potencial energético se calculó de acuerdo a la siguiente fórmula (Blanco et al., 2017; López A. & Núñez L., 2016; Valladares C et al., 2013), útil para determinar la generación de energía eléctrica del biogás y de los RSM.

$$Potencial\ energético\ \left(\frac{MJ}{tonelada\ RSM}\right) = \sum PCI\ (MJ/ton) * Composición\ (\%)$$

Donde; PCI: poder calorífico inferior

Composición: porcentaje en peso del material

5.3 Escenario actual de la gestión de RSM en Concepción.

En la comuna los RSM se recolectan a diario en el origen de su generación (hogares, vega monumental, mantención de áreas verdes) y son trasladados a través de camiones recolectores al relleno sanitario CEMARC para su disposición final según se muestra en la Figura 9. El transporte asociado a la recolección y traslado de los RSM al RS CEMARC realiza un recorrido total de 50 km por tonelada de RSM, en camiones de carga pesada, que cumple con la normativa EURO IV (InnovAconcagua, 2015).

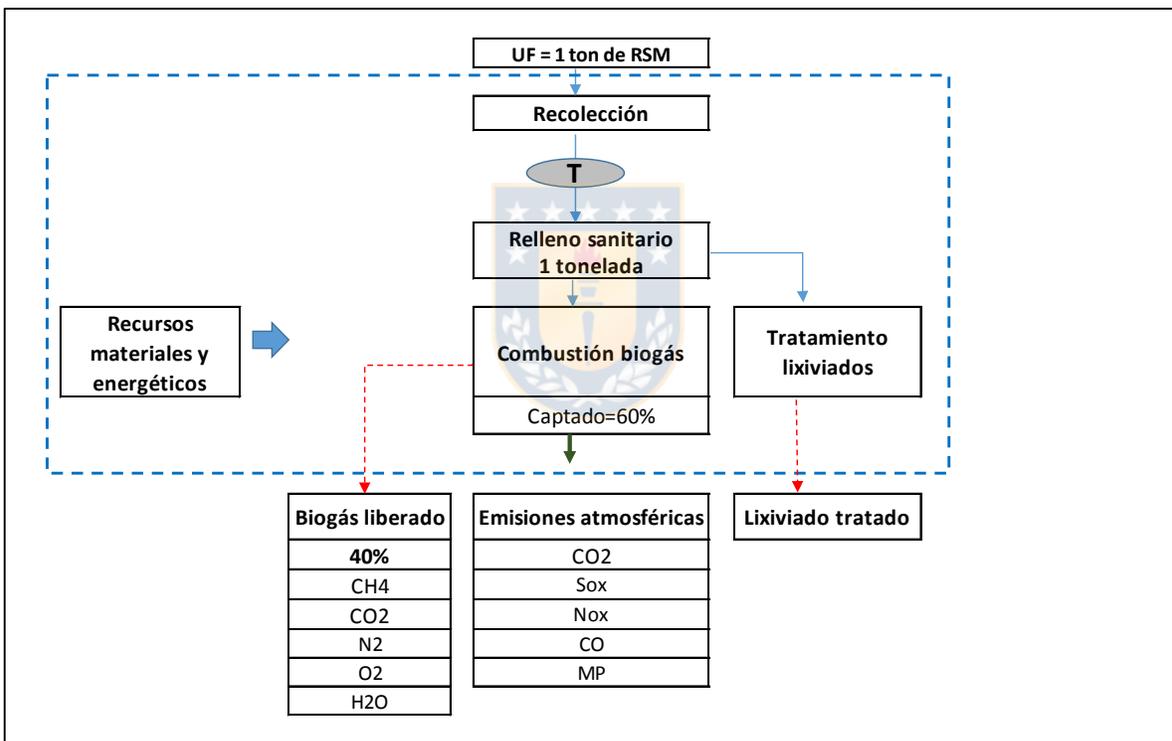


Figura 9. Esquema situación actual de gestión de RSM.

Fuente: Elaboración propia.

El relleno sanitario CEMARC, ubicado a 13 km de Concepción, en la comuna de Penco (coordenadas 36°45'53.83" S y 72°57'42.27" O) (Figura 10), posee una superficie de 22 ha, donde se incluye un camino perimetral, el área de disposición

de RSM, planta de tratamiento de lixiviados y antorcha de combustión de biogás. Este RS, está diseñado para recibir 100.000 toneladas de RSM al año, con una capacidad máxima de 1.600.000 toneladas y una vida útil proyectada hasta el año 2021.

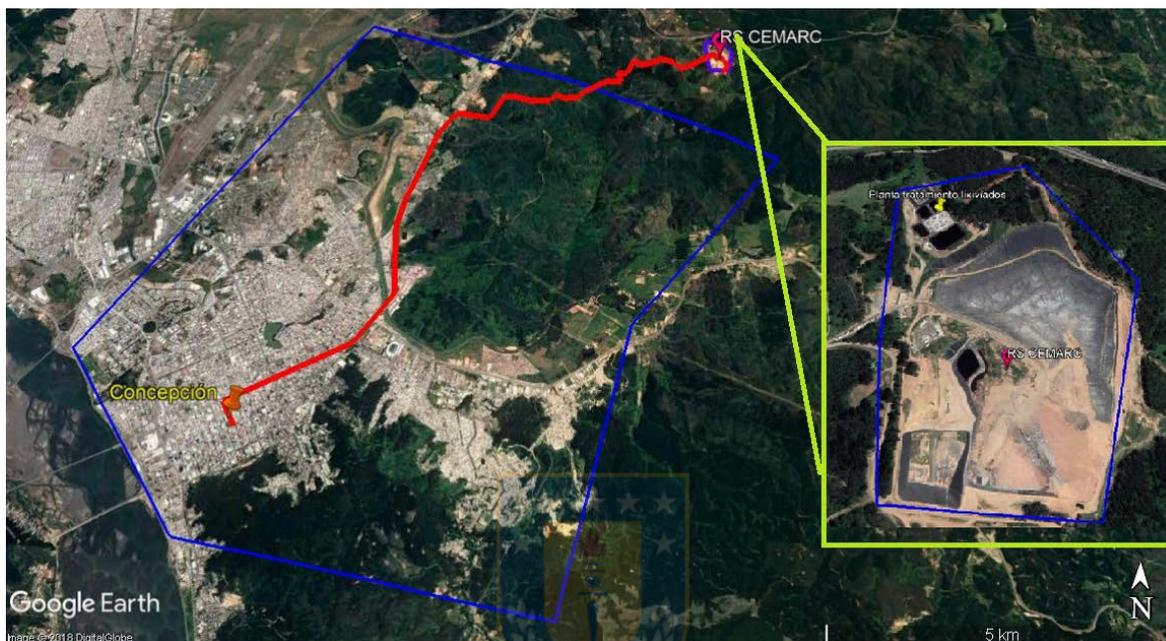


Figura 10. Ubicación área de estudio comuna Concepción y RS CEMARC.

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

El RS CEMARC posee la captación y tratamiento de lixiviados y de biogás (Figura 9), detallados ambos procesos a continuación.

- En la planta de tratamiento de lixiviados se gestionan los 0,1 m³ de líquidos percolados que se generan por tonelada de RSM (ACINSSUB Ltda, 2008). Estos se captan en el fondo del relleno sanitario a través de tuberías y son dirigidos gravitacionalmente a la planta de tratamiento, donde se llevan a cabo una serie de procesos descritos a continuación; inicialmente los lixiviados llegan a una piscina de tratamiento biológico anaeróbico con un tiempo de residencia de 25-30 días para disminuir en un 10-20% la carga orgánica, luego pasa a una segunda piscina donde se aplica un tratamiento biológico

aeróbico de aireación superficial por 30 días para remover el 90% de la carga orgánica. En esta etapa se extraen lodos sedimentados que son dispuestos en el relleno sanitario. Al lixiviado que sigue en tratamiento, se adiciona ácido fosfórico para suplir el déficit de este nutriente, y ser destinado al tratamiento físico químico. Para comenzar se realiza un tratamiento de precipitación químico, donde se adiciona sulfato de aluminio para formar flóculos y separar por decantación. De esta separación, el flujo decantado pasa a un estanque de espesado para destinar los lodos a disposición final en el relleno sanitario. Por otro lado, el efluente del proceso de decantación pasa al tratamiento químico de oxidación mediante la aplicación de peróxido de hidrógeno para disminuir la carga orgánica. Finalmente, este efluente tratado es enviado a una laguna de disposición final, cumpliendo con los parámetros de DBO₅ (demanda biológica de oxígeno), SST (sólidos suspendidos totales), fósforo y nitrógeno de la Tabla 4 del D.S. 609/98 del Ministerio de Obras Públicas (MOP), que establece la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado (Ver Anexo 5).

El biogás en el relleno sanitario CEMARC, es generado a una tasa de 173 m³ de biogás por tonelada de RSM tratada (Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012). Dicho biogás está compuesto por metano (54%), dióxido de carbono (40%), nitrógeno (4%), oxígeno (1%) y vapor de agua (1%). Su tratamiento considera la captura y combustión completa del metano contenido en el biogás, a través de antorchas de combustión. Su captura se lleva a cabo mediante pozos de venteo vertical, con una eficiencia de captura del 60% y el 40% restante se libera a la atmósfera (GAMMA INGENIEROS, 2011). Las emisiones atmosféricas generadas son principalmente monóxido de carbono (CO), ácido sulfhídrico (H₂S) y óxidos de nitrógeno (NO_x) (CONAMA, 2009).

El actual sistema de gestión de RSM para la comuna de Concepción, no considera ningún tipo de recuperación de los RSM, ya sea de materiales o energético,

desperdiciando todo el contenido energético almacenado en ellos. Sin embargo, los proyectos de recuperación energética a partir de RSM, son cada vez más atractivos económicamente en el país y en la región, como es el caso del proyecto de recuperación energética del biogás del RS CEMARC (Gesma, 2017) y de la gasificación de RSM (WTE Araucanía SpA, 2017).

Frente a lo anterior, más la revisión bibliográfica, de estudios técnicos existentes, de experiencias internacionales y de acuerdo a las normativas y compromisos del país, surgen tres propuestas de gestión de RSM. La primera de ellas es aprovechar el biogás liberado por el relleno sanitario para ser valorización energéticamente. En el caso de la segunda alternativa, esta evalúa el proceso de incineración de RSM. Si bien esta alternativa no se encuentra propuesta para el país, es la tecnología de recuperación energética de los RSM, más utilizada a nivel mundial (Cewep, 2015). Por último, se propone una tercera alternativa, correspondiente a la gasificación de los RSM, basado en el proyecto WTE Araucanía.

5.4 Descripción de alternativas propuestas de valorización energética para los RSM de la comuna de Concepción.

Dado que los RSM de Concepción poseen un potencial energético, y que existen alternativas factibles técnicamente, como es el caso del aprovechamiento energético del biogás en el RS CEMARC (Gesma, 2017), la gasificación de los RSM en Temuco (WTE Araucanía SpA, 2017), y por último, la incineración, que si bien actualmente no existen proyectos en el país, a nivel mundial es ampliamente utilizado, es que se proponen estas 3 alternativas de aprovechamiento energético a partir de los RSM, para evaluar su factibilidad desde el punto de vista ambiental.

5.4.1 Alternativa 1: Recuperación energética de biogás en RS CEMARC.

Esta alternativa se propone en el marco del proyecto en evaluación ambiental del aprovechamiento energético del biogás para el RS CEMARC, “Planta Bio Energía

Los Pinos” (Gesma, 2017). Este escenario según se muestra en la Figura 11, al igual que la situación actual de gestión de RSM, considera las mismas especificaciones para las etapas de recolección y transporte de los RSM, la operación del relleno sanitario, la planta de tratamiento de lixiviados y eficiencia de captura de biogás (60%). Sin embargo, se modifica el tratamiento del biogás captado, obteniendo electricidad a partir de este.

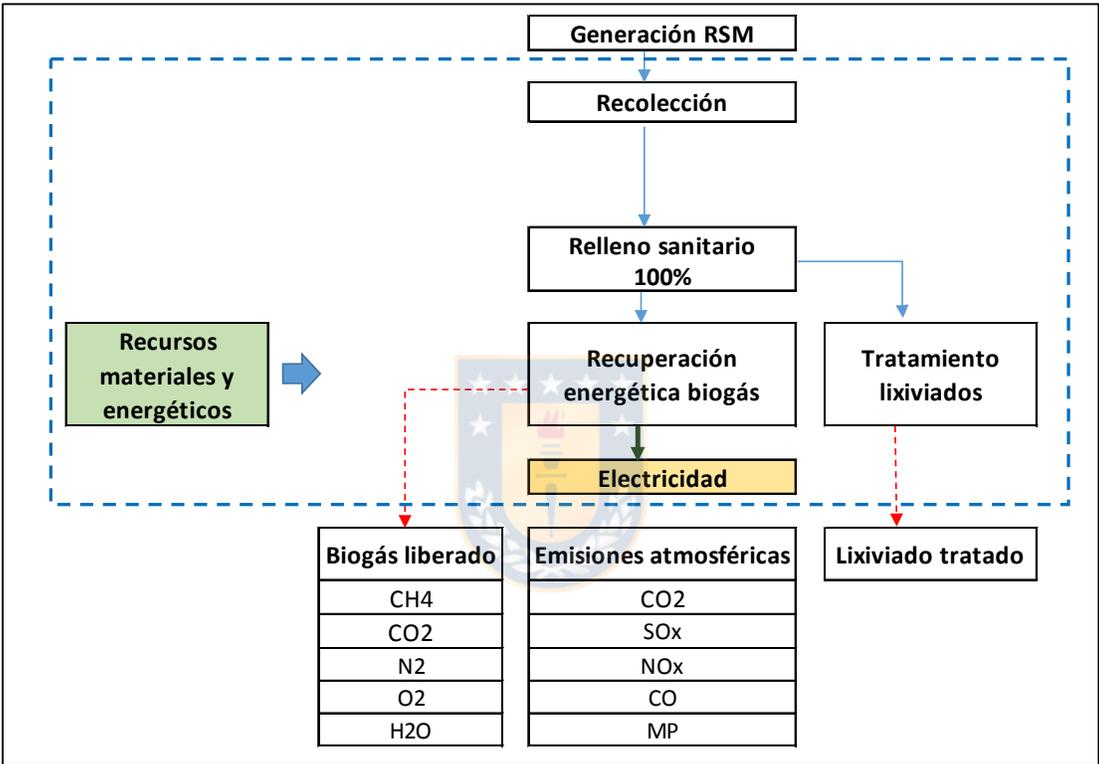


Figura 11. Esquema escenario de valorización energética de biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Para lo anterior, el biogás es integrado a un sistema de 2 fases; primero se realiza el acondicionamiento de este gas con la adición de carbón activo para remover el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y un sistema de secado para reducir el exceso de humedad. Luego, es conducido a la planta de generación eléctrica, donde el biogás (120 mbar), reacciona con el ingreso de aire (25°C, 1000mbar), a un motor de combustión interna con una eficiencia eléctrica de 42% y un generador de 1,4 MW

(Gesma, 2017). Además, se emiten contaminantes atmosféricos al aire producto de la combustión del biogás, destacando las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado (CONAMA, 2009).

5.4.2 Alternativa 2: Incineración de RSM.

De acuerdo a revisión bibliográfica, una de las tecnologías más utilizadas de conversión energética a partir de RSM es la incineración, es por esto que se consideró como una de las propuestas para la comuna, debido al potencial calorífico de los RSM. Esta alternativa, como se esquematiza en la Figura 12, destina los RSM a la planta de tratamiento mecánico biológico (TMB), para obtener flujos de material con valorización energética, reciclable y de rechazo.

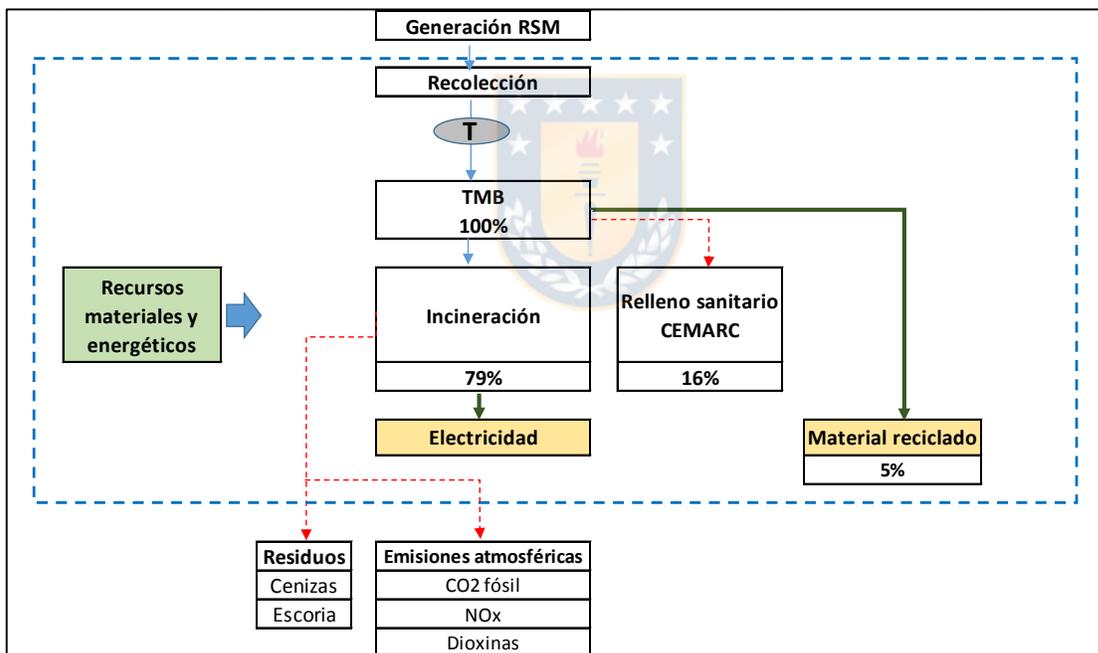


Figura 12. Esquema de escenario de incineración de RSM.

Fuente: Elaboración propia.

La planta TMB permite separar los RSM en distintos flujos, según las características de granulometría, composición, tamaño y peso. Además, esta planta TMB permite

reducir el contenido de humedad de los RSM y homogeneizarlos con respecto a su tamaño mediante las distintas etapas de la planta.

Asimismo, la planta TMB comienza con la clasificación, donde se retiran los residuos voluminosos que no puedan ser triturados y son destinados al relleno sanitario CEMARC. Luego, se lleva a cabo la trituración de los RSM, a través de un triturador de tipo rodillos dentados y una criba, entregando los materiales con un tamaño de 300 mm. Esta etapa permite disminuir el volumen del flujo de residuos, retirar los elementos férricos a través de electroimanes, y preparar los flujos de materiales para el proceso de higienización, que son trasladados a través de cintas transportadoras a las cámaras de higienización. En esta etapa, el material pasa por un tratamiento térmico a través de un sistema de esterilización, en recipientes de acero inoxidable que funcionan a altas presiones, a 150°C y con vapor saturado, para llevar a cabo la estabilización térmica, eliminando la actividad biológica y malos olores (WTE Araucania SpA, 2017). Este proceso cuenta con los siguientes componentes: cintas transportadoras para ingresar y retirar los materiales del equipo de higienización y finalmente, la cámara de higienización, donde se lleva a cabo el principal proceso. De esta etapa sale un flujo de materia estabilizada que ingresa a un tromel rotativo para separar los vidrios y metales contenidos en este flujo. Luego es secado durante 72 horas en un área de acopio, reduciendo la humedad en un 10%, quedando el flujo preparado para ser ingresado a la etapa de valorización energética, con contenido de materia orgánica, plásticos, textiles, papeles y cartones, a una composición de 54%, 10%, 2% y 13%, respectivamente.

El flujo de valorización energética es tratado en una incineradora de parrilla de lecho fijo, a una temperatura de 850°C y con un exceso de aire al 100% del requerido estequiométrico. Esta tecnología posee una eficiencia de conversión eléctrica de 22%, donde el 15% de este es utilizado dentro del proceso de incineración y de la planta TMB, y el 85% restante es inyectado a la matriz energética chilena (Murcia Castro, Rodríguez Velásquez, & Molina Gomez, 2017; SimaPro, 2017).

Por otro lado, el flujo de rechazo (16%), que considera los residuos voluminosos, peligrosos y sin valorización energética o de reciclado, son enviados al RS CEMARC. En el caso de los vidrios y metales separados (5%), estos son enviados a plantas de reciclaje en Santiago y modelado su proceso de acuerdo a la base de datos de Ecoinvent. En el caso del flujo de valorización energética, el transporte de la planta TMB a su siguiente destino, no es considerado ya que las instalaciones están ubicadas en el mismo terreno. A diferencia del reciclaje, las instalaciones para este proceso están a 500 km de la planta TMB, considerando este transporte como una nueva etapa, a través de un camión de carga con capacidad de 3.5 – 7.5 ton y normativa EURO 4.

5.4.3 Alternativa 3: Gasificación de RSM.

Al igual que la alternativa anterior, las consideraciones de las etapas de recolección y transporte, planta TMB, tratamiento material de rechazo y de reciclaje son las mismas. La diferencia radica en la tecnología de conversión termoquímica, donde se reemplaza la incineración por la gasificación. Esta tecnología es considerada ya que actualmente se está evaluando en el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) del país, la instalación de la Planta WTE Araucanía, en la región de la Araucanía.

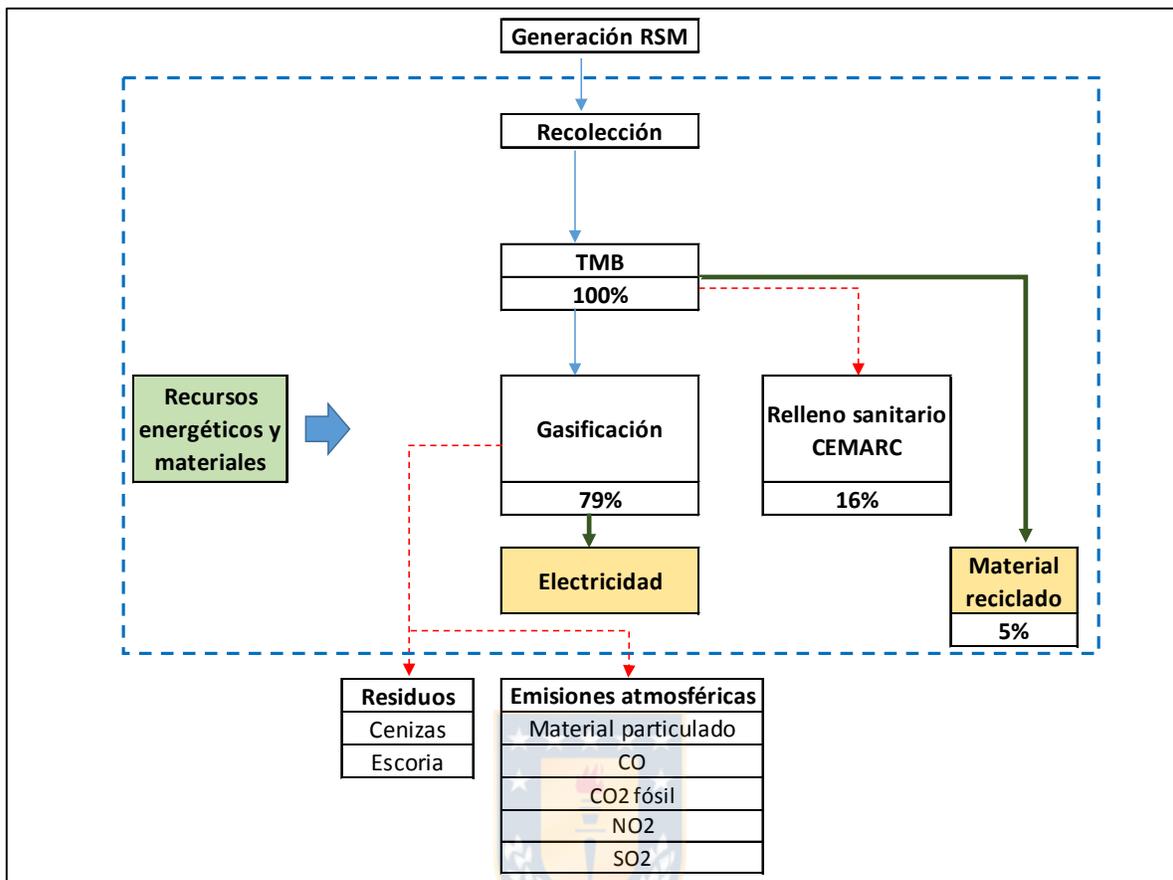


Figura 13. Esquema de escenario de gasificación de RSM.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 13, luego de la planta de TMB, la fracción valorizable energéticamente ingresa al proceso de gasificación a partir de la tecnología de lecho fluidizado a una temperatura de 950°C, con aire como agente gasificante (21% O₂ y 79% N₂) y a una presión de 1 atm, para producir vapor mediante un aerocondensador y una turbina de generación eléctrica (con una eficiencia de conversión eléctrica de 20%), produciendo energía eléctrica para abastecer el proceso en sí (20%) e inyectar los excedentes al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) (80%). Se generan emisiones líquidas (agua tratada), sólidos (cenizas) y emisiones al aire (material particulado, óxidos de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, CO, CO₂) (Tan et al., 2015; WTE Araucanía SpA, 2017).

5.5 Evaluación de ciclo de vida (ACV).

Para realizar la evaluación ambiental, es necesario definir los alcances del estudio y unidad funcional (UF) que se analizará según las directrices y fases de la metodología de ACV (UNE-EN, 2006a, 2006b).

5.5.1 Definición objetivos y alcances.

Este estudio se enmarca en la evaluación ambiental de diferentes alternativas de gestión de los RSM de la comuna de Concepción considerando todo su ciclo de vida; considerando desde que el residuo es generado hasta que es valorizado, o bien gestionado en un relleno sanitario (McDougall, White, Franke, & Hindle, 2001).

Unidad funcional (UF)

En primer lugar, se definió la unidad funcional; el cual constituye un valor referencial para realizar los inventarios de recursos y emisiones generados, así como, para el análisis comparativo entre las alternativas propuestas. En este estudio, la unidad funcional se definió como 1 tonelada de RSM. La composición de los RSM se especifica en la tabla 9.

Tabla 9. Composición de UF del estudio.

Composición UF	Origen	Fracción, %	ton de RSM
Materia orgánica	- Residuos sólidos domiciliarios (RSD) - Podas y mantención de áreas verdes (RP) - Vega monumental (VM)	54	0,54
Papel y cartón	- RSD - VM	13	0,13
Vidrio	- RSD	3	0,03
Plásticos	- RSD	12	0,12
Metales	- RSD	2	0,02

Otros	- RSD	16	0,16
-------	-------	----	------

Límites del sistema

El estudio considera los límites del sistema desde cuna hasta la tumba, considerando desde la recolección de los RSM, transporte hasta los procesos de valorización y/o disposición según se señalan en la Figura 14.

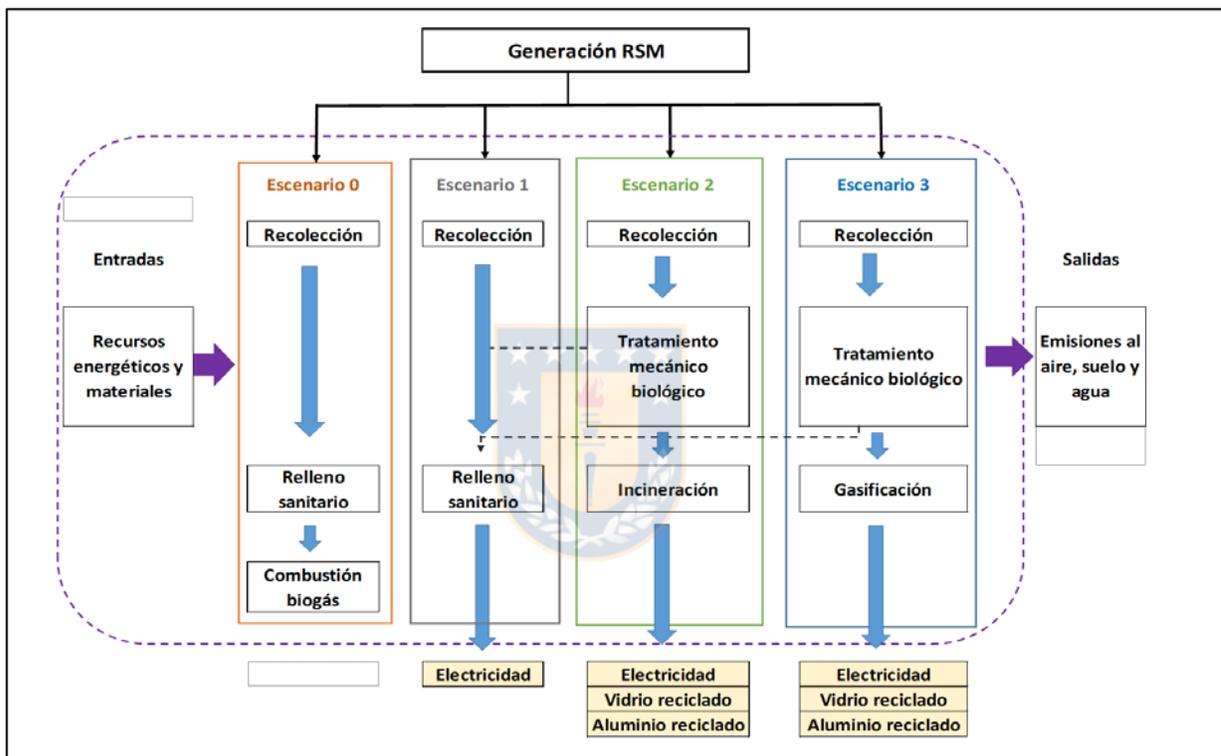


Figura 14. Esquema de escenarios a evaluar en el estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Regla de distribución de cargas

Los procesos que son evaluados dentro del estudio, generan uno o más productos (multi productos), como es el caso de las tecnologías de conversión energética. Sin embargo, cuando se requiere conocer los impactos ambientales asociados a las entradas y salidas de cada proceso, es necesario distribuir aquellos impactos para

cada uno de estos productos, mediante relaciones físicas por criterios másico, económicos o energéticos (UNE-EN-ISO 14044, 2006). Para evitar esta distribución de impactos mediante la distribución de cargas, es la extensión de límites del sistema, considerando aquellos productos como productos evitados, incluyéndolos dentro del sistema, como ilustra la figura 14 y el procedimiento que se utilizó en este estudio.

Además, los productos evitados, como es el caso de la electricidad, vidrio y aluminio reciclado, entregan beneficios por prevenir los impactos ambientales del consumo equivalente de electricidad en la matriz energética chilena y de materia prima virgen para la elaboración de materiales de vidrio y aluminio, respectivamente.

5.5.2 Análisis del inventario.

Ahora, ya definida la UF, se obtiene los datos de los inventarios de cada una de las alternativas, a través de fuentes de información tanto primarias como secundarias, dependiendo de la disponibilidad y representatividad de los datos, como también de los supuestos planteados para el estudio.

La recopilación de información es principalmente primaria, basados en evaluaciones de impacto ambiental de proyectos locales, de no estar disponible, se consideran fuentes de información secundaria, que poseen características similares a la zona de estudio, o bien se puedan adaptar. Por último, se utiliza la base de datos Ecoinvent para complementar la información faltante. La Tabla 10 entrega las principales fuentes de información para cada proceso evaluado en este estudio y los ANEXOS 6,7, 8 y 9 contienen las tablas con los inventarios resultantes de cada escenario propuesto.

Tabla 10. Fuentes de información según proceso.

Proceso	Concepto	Clasificación de los procesos	Fuente información
Transporte	- Consumo combustible - km recorridos	Primer plano	(InnovAconcagua, 2015)
	- Factores emisiones	Antecedentes	Ecoinvent

Relleno sanitario	- Insumos energéticos y materiales	Primer plano	(SERVIMAR Ltda, 2005)
	- Emisiones atmosféricas - Lixiviados	Primer plano	(SERVIMAR Ltda, 2005) (ACINSSUB Ltda, 2008)
Tratamiento lixiviados	-Insumos químicos	Primer plano	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Planta TMB	- Insumos y emisiones	Antecedentes	(Murcia Castro et al., 2017)
Incineración	- Consumo energético - Emisiones atmosféricas, residuos sólidos y líquidos	Antecedentes	Ecoinvent (Murcia Castro et al., 2017)
Gasificación	- Consumos materiales y energéticos - Emisiones atmosféricas, residuos sólidos y líquidos	Antecedentes	(WTE Araucanía SpA, 2017)

❖ *Supuestos:* En la Tabla 11 se entregan todos los supuestos y consideraciones que se tuvieron en cuenta y son relevantes para la elaboración de este estudio.

Tabla 11. Supuestos y consideraciones para el estudio.

Supuesto	Descripción
1	El año base de estudio es 2016.
2	Fases de construcción y cierre excluidas en estudio para todos los escenarios.
3	Todas las instalaciones existentes y alternativas consideradas son evaluadas en la misma localización (36°45'54.86"S; 72°57'48.39"O), a excepción del reciclaje de aluminio y vidrio que se encuentra a 500 km de esta.
4	Regla de corte para excluir flujos de procesos, menos de 5%.
5	Recolección y transporte RSM: kilometraje recorrido por UF se estimó en base a consumo de combustible entregado por (InnovAconcagua, 2015) y el software Google Earth (ANEXO 3).
6	Transporte: Inventario de emisiones según Ecoinvent v. 2.2, ya que incluye emisiones por partidas en frío, caliente y detenciones propias de la recolección de RSM. Se

	asumió camiones de 21 ton, clasificación EURO IV y viajes a carga completa para la recogida de los RSM, en el caso del transporte de los materiales reciclables, camión de 3,5 -7,5 ton, clasificación EURO IV, carga completa.
--	---

5.5.3 Evaluación de impactos ambientales.

La evaluación de los impactos ambientales para este estudio se llevó a cabo con el método Ecoindicador 99 con perspectiva jerárquica (H) y un factor de ponderación promedio (A), el cual está enfocado en el daño ambiental (endpoint). Lo anterior, justifica los impactos por hechos científicos y los relaciona con el daño a la salud humana o al ecosistema, entregando los resultados en un valor único (Puntos) (PRé Consultants, 2010). Esto permite una comparación e interpretación más comprensible de los resultados obtenidos (Casas Ledón, 2015a, 2015b).

Las categorías de impacto consideradas para la evaluación del ciclo de vida de los escenarios son las siguientes:

- Agotamiento de combustibles fósiles,
- Agotamiento de minerales
- Uso de suelo
- Acidificación/eutrofización,
- Ecotoxicidad,
- Calentamiento global,
- Agotamiento de la capa de ozono,
- Sustancias cancerígenas
- Sustancias orgánicas respirables
- Sustancias inorgánicas respirables

- Radiación ionizante.

A su vez, estas categorías de impacto se agrupan en tres categorías de daño:

1. Daño a la salud humana: Evalúa los años sometidos a una discapacidad.
2. Daño a la calidad del ecosistema: Pérdida de especies en un área determinada durante un tiempo determinado.
3. Daño a los recursos: Evalúa el exceso de energía necesaria para extraer minerales y combustibles fósiles.

La modelación de los escenarios y el cálculo de los impactos ambientales, se realizó mediante el software Simapro v.7.3.3, con la base de datos primaria y complementada con Ecoinvent v.2.2.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.



6.1 Análisis de escenarios de valorización energética.

De acuerdo a las características de los RSM de Concepción, el escenario de recuperación energética de biogás, posee un potencial energético de 521 kWh/tonelada de RSM, mientras que en el escenario de incineración de RSM y gasificación de RSM, es de 4128 kWh /tonelada de RSM como se muestra en la Tabla 12 y 13, respectivamente. Estos valores dependen del poder calorífico de los combustibles; del metano contenido en el biogás (53000 MJ/tonelada de metano) en el caso del primer escenario, y del carbono de la materia orgánica, papeles, cartones y plásticos, para los escenarios de incineración y gasificación (14860 MJ/tonelada de RSM). Si bien el metano tiene mayor poder calorífico que los RSM por tonelada de combustible, analizado desde el punto de vista de la cantidad de RSM gestionados, la incineración y gasificación de los RSM presentan mayores potenciales energéticos por tonelada de RSM.

Tabla 12. Potencial energético biogás de relleno sanitario.

Parámetro	Unidad	Cantidad
Generación biogás	Ton/ton RSM	0,116
Eficiencia captura	%	60
Contenido metano	%	55
PCI	MJ/ton metano	48895
Potencial energético	KWh/m ³ metano	9,1

Fuente: (Barrera A. & Bordagorry A., 2015; Blanco et al., 2017).

Tabla 13. Caracterización energética de RSM de Concepción.

Parámetro	Unidad	Materia orgánica	Papel y cartón	Plásticos y textiles
Composición	%	54	13	12
Humedad	%	30	20	9
Cenizas	%	10	13	4
PCI	MJ/ton	17000	16000	30000
Potencial energético	kWh/ton	2550	578	1000

Fuente: Adaptado de (Concha S et al., 2015).

Con respecto a la eficiencia energética de los escenarios, como se ilustra en la Figura 15, el escenario 1 es el que posee mayor eficiencia energética, asociado a la generación eléctrica del biogás, circulado en un motor de combustión interna, con altas eficiencias de conversión eléctrica y térmica (42% para ambos casos) (Gesma, 2017). Por otro lado, los escenarios de incineración y gasificación, generan mayor cantidad de electricidad, pese a tener menores eficiencias de conversión energética (22% y 20%, respectivamente). Esto se debe a que ambas tecnologías obtienen la energía liberada directamente de los RSM al momento de la reacción química (Moratorio et al., 2012). Así, la incineración obtiene la energía directa de la combustión de los RSM, mientras que la gasificación obtiene la energía contenida en el gas de síntesis que se genera al procesar los RSM (Arena, 2012; Fortunato, Brunetti, Camporeale, Torresi, & Fornarelli, 2017; Leckner, 2015).

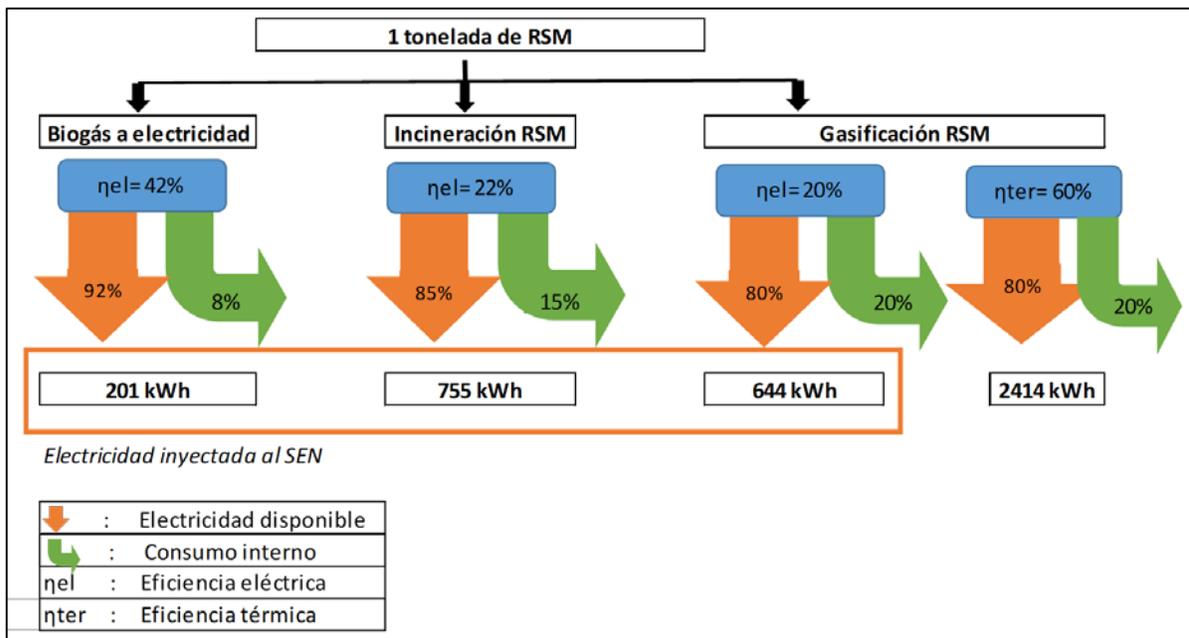


Figura 15. Utilidades energéticas generadas por tecnología.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo que el escenario que más excedentes energéticos inyecta al SEN, es el de incineración de los RSM, con 755 kWh, un 15% menos que el proceso de gasificación y un 74% más que la recuperación energética del biogás. Si bien el escenario de incineración genera mayor electricidad que los otros dos escenarios, la gasificación presenta mayores utilidades, ya que produce calor a una eficiencia promedio de conversión de 60%, idóneo para sistemas de calefacción urbana y sustitución de leña, agua caliente y/o vapor para los requerimientos internos del proceso (Ayodele et al., 2017; Karlsson et al., 2018). Sin embargo, este calor es desperdiciado por la falta de infraestructura que permitiría aprovechar este recurso en la comuna de Concepción.

Finalmente, el pretratamiento de los RSM y del biogás es necesario para reducir el contenido de humedad, de cenizas, optimizar la segregación de los RSM, que permita maximizar su poder calorífico.

6.2 Evaluación ambiental de los escenarios propuestos.

La evaluación de las alternativas se realizó en dos fases: evaluación comparativa, y la siguiente, evaluación por cada escenario de valorización, esto para determinar el mejor escenario de aprovechamiento energético de los RSM de Concepción.

De acuerdo a la modelación de los escenarios en el software Simapro v.7.3.3 y el método de evaluación de impacto Ecoindicador 99 con perspectiva cultural jerárquica (H) y con factores de ponderación promedio (A). Las categorías de impacto están expresadas en puntos Pt/tonelada de RSM, obtenida a partir de las etapas de normalización, agrupación y ponderación. Los resultados obtenidos del perfil ambiental de cada escenario por categoría de impacto, como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Evaluación comparativa del escenario base y los 3 escenarios de valorización energética.

Según lo ilustrado en la Figura 16, existen barras positivas y negativas en los resultados de evaluación comparativas del escenario base y los 3 escenarios de valorización energética. Esto quiere decir que las barras con valores positivos son

los impactos ambientales que genera cada escenario según la categoría de impacto, donde a mayor puntuación, mayor será el impacto ambiental causado. Por otro lado, las barras negativas que se pueden ver en la figura representan los beneficios ambientales de cada escenario, por los impactos evitados de la generación de energía inyectada al SEN, para los tres escenarios de valorización energética, y del vidrio y aluminio reciclado para el caso de los escenarios de incineración y gasificación. Por lo tanto, a menor puntuación, mayores serán los beneficios ambientales, tal como se demuestra en las categorías de respirables orgánicos y agotamiento de combustibles fósiles, asociado principalmente al desplazamiento de los impactos causados por la generación de energía eléctrica de la matriz energética chilena y el reciclaje de materiales. Es importante destacar que la matriz chilena está compuesta por 53% de combustibles fósiles, principalmente carbón, gas natural y petróleo diésel (Comisión Nacional de Energía, 2017).

Analizando las categorías de impacto, independiente de los escenarios evaluados, las más significativas son sustancias carcinógenas, sustancias respirables inorgánicas, cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles.

La situación actual de gestión de RSM impacta en 3 categorías de impacto, sustancias respirables inorgánicas, cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles. Este escenario posee solo impactos positivos, ya que no contribuye con ningún producto evitado. Lo mismo sucede con el escenario 1, que a pesar de que genera electricidad y se evitan impactos por ello, el beneficio ambiental del escenario es un 33% con respecto al impacto ambiental, por lo que el beneficio no logra ser mayor al impacto. Los mayores impactos producidos por la situación actual de gestión de RSM y la valorización energética del biogás de relleno sanitario se evidencian en las categorías de impacto de cambio climático (5,13 Pt/ton RSM para el caso base y 4,14 Pt/ton RSM para la alternativa 1) y el agotamiento de combustibles fósiles (4,89 Pt/ton RSM para el caso base y 1,66 Pt/ton RSM para la alternativa 1), representando en el caso del cambio climático un aporte del 55% y

45% por cada escenario, y, por otro lado, en el agotamiento de combustibles fósiles, un 75% y 25%, respectivamente.

Los impactos al cambio climático se deben a las emisiones atmosféricas de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y otros gases, provenientes de la descomposición de los RSM en el relleno sanitario y la combustión de combustibles fósiles para la generación eléctrica en nuestro país y el funcionamiento de maquinarias y vehículos motorizados (Blanco et al., 2017; Enterprises pour l'Environnement, 2010; Karanjekar et al., 2015; Panesso et al., 2011). En el caso de los escenarios de incineración y gasificación, evidencian beneficios ambientales por evitar en un 6% y 26%, respectivamente, el impacto total producido por los escenarios anteriores, a causa del desplazamiento de los impactos producidos por la matriz energética chilena.

Por otro lado, el agotamiento de combustibles fósiles se debe principalmente a la extracción y procesamiento de petróleo crudo para la elaboración de combustible diésel utilizado en los distintos procesos de generación energética, ya sea eléctrica o mecánica (Comisión Nacional de Energía, 2018; European Commission, n.d.). Los escenarios de incineración y gasificación de RSM, evitan un 137% y 125% del impacto total producido en esta categoría, es decir, tienen mayores beneficios ambientales que impactos generados en su ciclo de vida.

En el caso de la categoría de impacto de sustancias cancerígenas, el escenario de incineración contribuye negativamente en un 75% del impacto total, mientras que el escenario de gasificación en un 50% menos que este. Esto debido a la liberación de contaminantes tóxicos y cancerígenos, como las dioxinas y furanos, arsénico, cadmio y cromo, contenidos en los gases atmosféricos y cenizas provenientes de la quema de RSM y combustión de diésel (Agencias, 2013; García-pérez et al., 2013; Organización Mundial de la Salud, 2016; Valerio, 2012).

A su vez, las categorías de impactos anteriormente mencionadas se agrupan en las tres categorías de daño: salud humana, calidad del ecosistema y agotamiento de recursos, como se muestra en la figura 17.

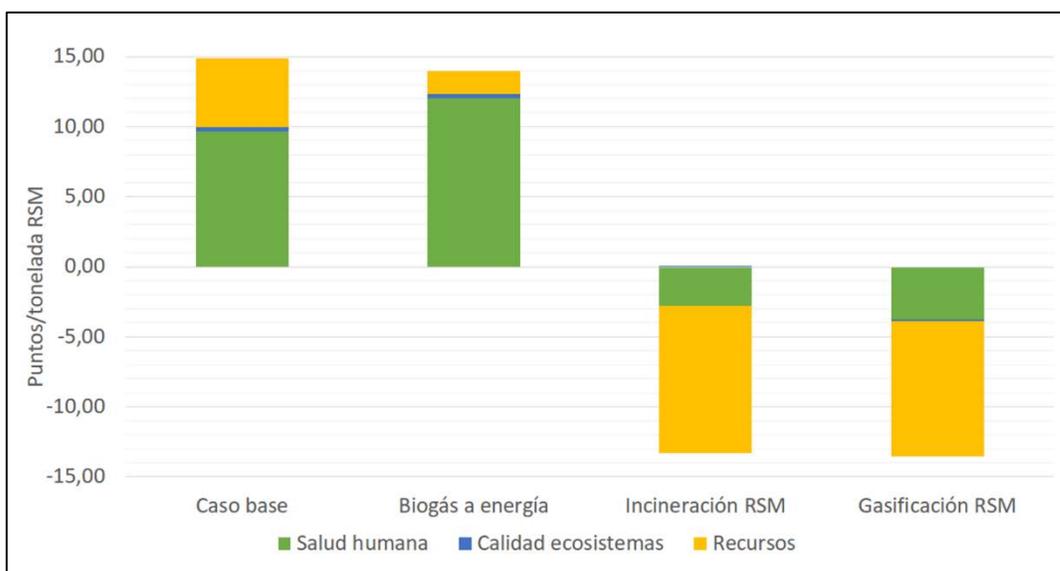


Figura 17. Evaluación comparativa de daños para cada escenario de gestión de RSM.

Como se puede apreciar en la figura 17, las categorías de daño que mayores impactos muestran para todos los escenarios evaluados son la salud humana y el uso de recursos. Esto se debe básicamente a que la salud humana está fuertemente influenciada con las categorías de impacto de sustancias cancerígenas, sustancias respirables inorgánicas y cambio climático. Asimismo, el uso de recursos está relacionada con las categorías de impacto de agotamiento de combustibles fósiles.

La figura 17 ilustra claramente que los escenarios de relleno sanitario sin y con recuperación energética del biogás, fueron los que causaron mayores impactos en la salud humana, con una contribución de 44% y 55%, respectivamente, mientras que los escenarios de incineración y gasificación de RSM, presentaron beneficios ambientales en la categoría de daño de uso de recursos. Los impactos evitados de esta categoría son de 52% para el escenario de incineración de RSM, mientras que el escenario de gasificación contribuye a la disminución de un 48% del impacto total evitado. Esto es consecuente con otros estudios, debido a los créditos de la generación eléctrica y de recuperación de materiales de estos escenarios (Ayodele et al., 2017; Jeswani & Azapagic, 2016).

6.2.1 Caso base.

En la figura 18 se pueden ver los impactos causados por los procesos utilizados actualmente para gestionar 1 tonelada de RSM en la comuna de Concepción.

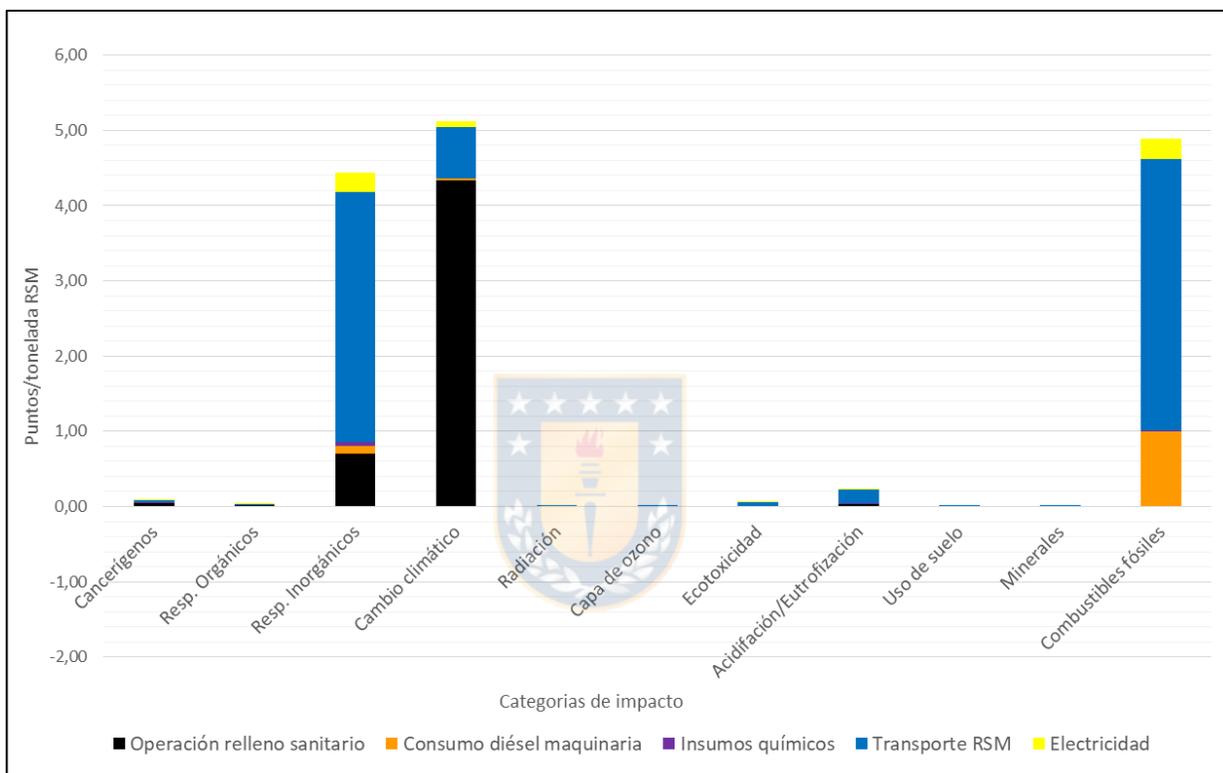


Figura 18. Evaluación de los impactos ambientales del ciclo de vida del caso base de gestión de RSM.

La etapa transporte, la cual incluye recolección desde de la comuna y hasta la disposición final presenta las mayores contribuciones en las categorías de impactos de sustancias respirables inorgánicas y agotamiento de combustibles fósiles, representando una contribución del total de cada categoría de 75% y 74%, respectivamente. Este comportamiento se debe a las emisiones atmosféricas propias del transporte, principalmente material particulado (MP), óxidos nitrosos

(NO_x) y dióxidos de azufre (SO₂), asociado a la combustión del diésel consumido por el camión recolector de RSM. El kilometraje recorrido es de 53 km por tonelada de RSM, lo que considera la recolección puerta a puerta de los RSM y su transporte al relleno sanitario CEMARC. El 75% de este kilometraje recorrido está asociado a las rutas de recolección de los RSM dentro de la comuna de Concepción. Con respecto a la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, su impacto está asociado al consumo de diésel, y al proceso extractivo de este. Por lo tanto, para este escenario, el transporte de RSM es considerada una etapa crítica en el ciclo de vida de la gestión de RSM.

Por otro lado, la etapa de operación del RS CEMARC, impacta en la categoría de cambio climático en un 85%, principalmente por las emisiones fugitivas de metano (CH₄) y dióxido de carbono fósil (CO₂) generadas por la degradación natural de los residuos orgánicos. El metano es uno de los mayores precursores del cambio climático y de los contaminantes más potentes de los gases de efecto invernadero (Enterprises pour l'Environnement, 2010; SimaPro, 2017), por lo que el tratamiento de este gas es imprescindible para reducir los impactos ambientales de los rellenos sanitarios.

6.2.2 Escenario 1: Recuperación energética de biogás de RS CEMARC.

A diferencia del caso base, esta alternativa tiene como beneficio que durante la gestión de los RSM se aprovecha el potencial energético del biogás proveniente de la descomposición de dichos residuos para fines energéticos. En este caso se genera 201 kWh de electricidad el cual es inyectado a la matriz eléctrica nacional, evitando a su vez los impactos ambientales generados por la matriz eléctrica actual. Este comportamiento se ve reflejado en beneficios ambientales específicamente en las categorías de sustancias inorgánicas respirables y agotamiento de combustibles fósiles, como se muestra en la Figura 19. Esta generación de electricidad permite

evitar un 24% y un 64%, respectivamente, de los impactos producidos en el escenario para las categorías mencionadas. Sin embargo, los beneficios ambientales no son suficientes para mitigar todo el impacto ambiental de cada categoría, ya que aun así los impactos ambientales en la categoría de sustancias inorgánicas respirables son mayores que el caso base. Este aumento del 74% del impacto con respecto al escenario actual, se debe a las emisiones de material particulado fino (MP2,5) y grueso (MP10), además de las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO₂), asociado al aprovechamiento energético del biogás en el motor de combustión interna.

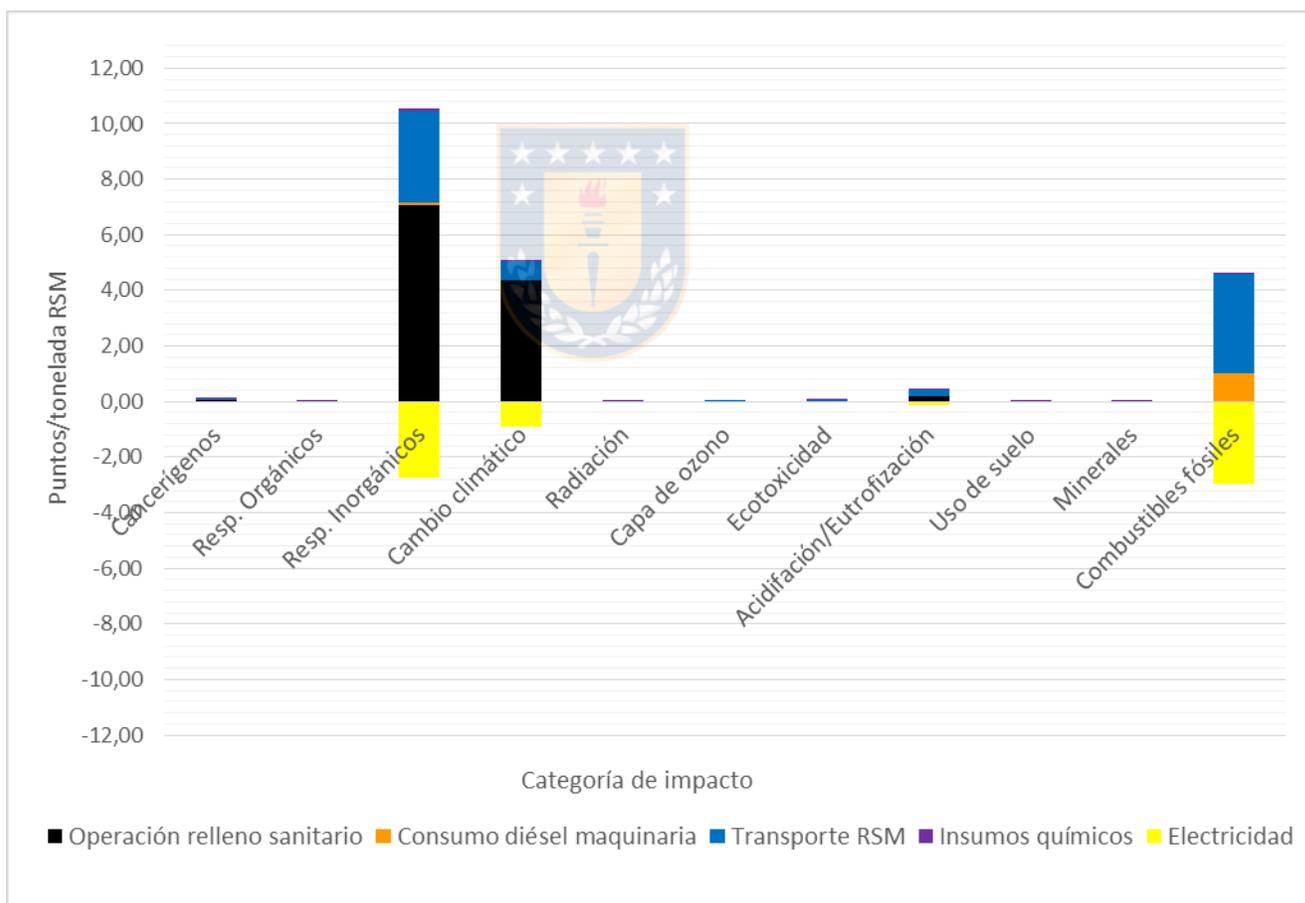


Figura 19. Evaluación de ciclo de vida Escenario 1.

En el caso de la categoría Agotamiento de combustibles fósiles, se evitan los impactos por la extracción de recursos como el carbón, petróleo y gas natural, que son parte de la matriz energética chilena (21% carbón, 19% gas natural y 13% petróleo diésel). En comparación con el escenario base, este tipo de impacto se reduce en un 67% al generar electricidad con el biogás. Del mismo modo que en la categoría de sustancias respirables inorgánicas, el impacto ambiental es mayor que el beneficio producido por la electricidad inyectada al SEN.

Por otra parte, en el caso de la etapa de transporte y de consumo diésel en el RS CEMARC, no muestran variaciones con respecto al escenario anterior (caso base), dado que las rutas de recolección y transporte de los RSM es la misma y el consumo diésel del RS CEMARC, no puede ser sustituido por la generación eléctrica ya que este se utiliza en las maquinarias de compactación y disposición de RSM.

6.2.3 Escenario 2: Incineración de RSM.

Este escenario, a diferencia de los anteriores, incluye la incineración de la materia orgánica, plásticos, textiles, papeles y cartones contenida en los RSM, mientras que el vidrio y aluminio son reciclados a 500 km de distancia de la comuna. La energía eléctrica generada por este escenario es de 755 kWh/tonelada de RSM y el reciclaje es del 5% del total de los RSM. Los impactos evitados producto del reciclaje de aluminio y vidrio, como de la generación de electricidad, se aprecian claramente en la Figura 20, en las categorías de sustancias cancerígenas, sustancias respirables inorgánicas, cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles.

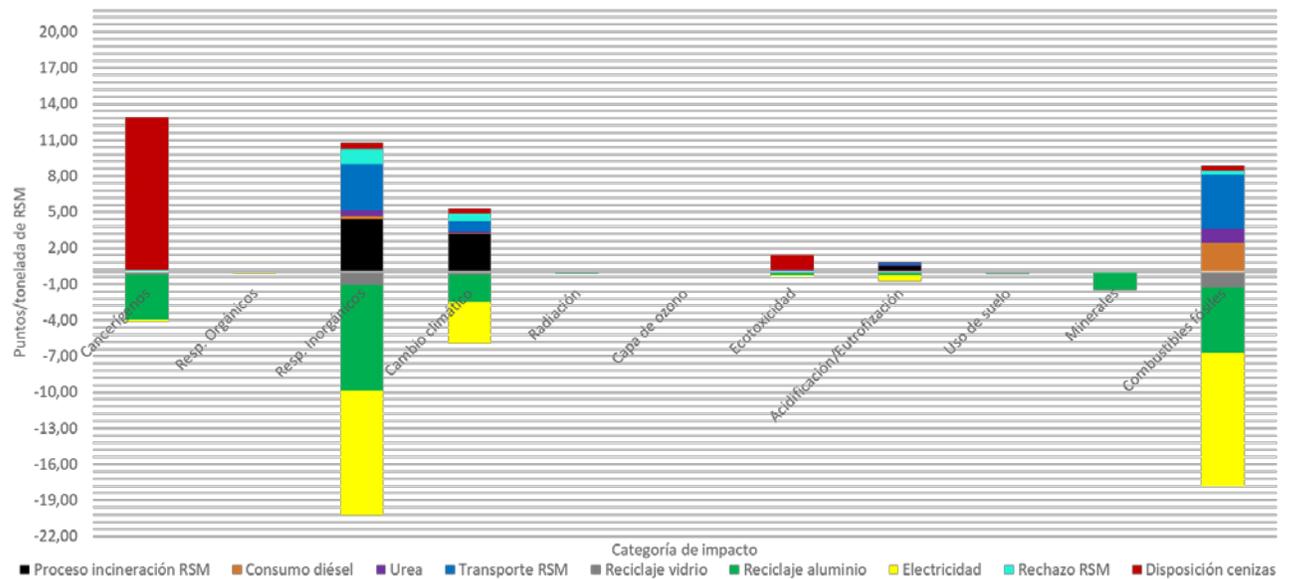


Figura 20. Evaluación de ciclo de vida Escenario 2.

Con respecto a los impactos evitados, se obtiene que la generación de electricidad presenta los mayores beneficios en las categorías de cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles. En cuanto al cambio climático, la generación de electricidad desplazaría el 64% del impacto ambiental generado por este escenario, por las emisiones evitadas de CO₂ asociado a los combustibles fósiles ya discutido con anterioridad. El reciclaje del aluminio, por su parte, evitaría el 42% de los impactos, porque no se generarían emisiones de clorofluorocarbonos (CFC), este último liberado por el proceso de elaboración de aluminio primario.

Asimismo, en el agotamiento de combustibles fósiles, el mayor beneficio ambiental está asociado con la generación de electricidad, disminuyendo el impacto del escenario en un 126%, y de un 61% por el reciclaje de aluminio, por el desplazamiento de combustibles fósiles como el petróleo crudo, gas natural y carbón. En el caso del reciclaje de vidrio, sus beneficios no son relevantes, donde su mayor contribución es en la categoría de agotamiento de combustibles fósiles, desplazando sólo el 14% del impacto generado.

Por último, el reciclaje de aluminio también presenta beneficios ambientales en la categoría de cancerígenos, por las emisiones evitadas de arsénico al agua, generadas durante el proceso de elaboración de aluminio primario.

En cuanto al proceso de incineración, los mayores impactos son generados por las emisiones de sustancias respirables inorgánicas y cambio climático. En el primer caso, el proceso contribuye en un 41% por las emisiones de NO_x generadas al combustionar los RSM. En lo que respecta al cambio climático, esta etapa es responsable del 60% de este impacto, también por las emisiones de CO₂ liberadas al combustionar los RSM.

El proceso de incineración de RSM, además de generar emisiones atmosféricas, también produce residuos sólidos, como es el caso de las cenizas de fondo. Estas cenizas, al provenir de la combustión de RSM, requiere ser dispuesta en un relleno de seguridad, ya que contiene metales pesados nocivos para el medio ambiente y la salud de las personas (Omebjerg et al., n.d.). Este tratamiento implica la contaminación de aguas por el arsénico y cadmio siendo los principales precursores (99%) de la categoría de impacto de sustancias cancerígenas.

Por último, con respecto al transporte de los RSM, esta etapa considera además de la recolección de RSM en la comuna, el transporte de aluminio y vidrio a las instalaciones de reciclaje, recorriendo los camiones en total 103 km por tonelada de RSM. Los impactos en las categorías de sustancias respirables inorgánicas y agotamiento de combustibles fósiles son de un 35% y 51%, respectivamente. Además, en comparación con la etapa de transporte de RSM del escenario anterior, su incremento es de un 16% para las categorías de sustancias respirables inorgánicas y de 25% para el agotamiento de combustibles fósiles.

Para este escenario, la etapa de disposición de cenizas, relleno sanitario y el transporte constituyen etapas críticas en todo el ciclo de vida de la gestión de 1 tonelada de RSM.

6.2.4 Escenario 3: Gasificación de RSM.

El escenario de gasificación de RSM, incluye, además, al igual que el escenario anterior, el reciclaje de vidrio y aluminio contenido en los RSM. Estos son transportados a 500 km de distancia. El kilometraje recorrido total de este escenario es de 103 km por tonelada de RSM tratada. Este escenario inyecta 644 kWh de energía eléctrica al SEN.

De acuerdo a lo observado en la Figura 21, la alternativa de gasificación de RSM impacta en las categorías de sustancias cancerígenas, sustancias respirables inorgánicas, cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles.

Los procesos que más contribuyen a las categorías de impacto es la disposición de cenizas en relleno de seguridad, el proceso de gasificación y el transporte de RSM al RS CEMARC. Por otra parte, se evitan impactos ambientales por el reciclaje de aluminio e inyección de electricidad al SIC, con un comportamiento similar al escenario anterior, ya que las tasas de reciclaje se mantienen. Sin embargo, la cantidad de energía eléctrica generada es un 15% menor.

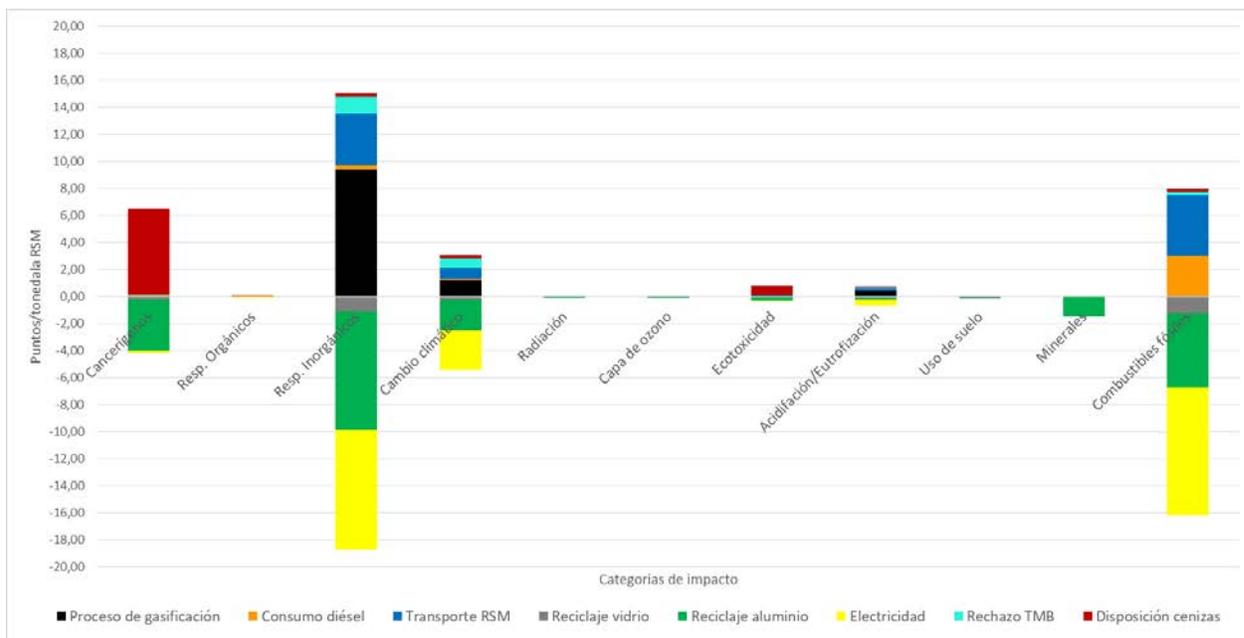


Figura 21. Evaluación de ciclo de vida Escenario 3.

En el caso del transporte de RSM, esta etapa se comporta de manera similar que el escenario de incineración de RSM, donde se genera un incremento del impacto de 16% para la categoría de sustancias respirables inorgánicas y de 25% para el agotamiento de combustibles fósiles, con respecto a la situación actual de gestión de RSM. En este escenario, el transporte de RSM, contribuye en un 26%, mientras que, para el caso del agotamiento de combustibles fósiles, su contribución es de 56%, asociado al consumo de combustible diésel de los camiones recolectores y de transporte de RSM.

Luego, el escenario de gasificación de RSM, impacta con respecto a las sustancias respirables inorgánicas, por las emisiones de MP10, MP2,5 y NO_x del proceso de generación de electricidad en la turbina de vapor de las instalaciones.

En el caso de las cenizas, se evidencia una disminución del 50% con respecto al escenario de incineración, esto porque las cenizas generadas por la gasificación (70 kg/ton RSM) son menores a las de incineración (140 kg/ton RSM). Para ambas tecnologías, las cenizas generadas son capaces de ser valorizadas como materia

prima para la construcción de carreteras o a partir de la recuperación de materiales ferrosos, dependiendo de la calidad obtenida y de la eficiencia de separación previo a la gasificación de los RSM (Allegrini et al., 2014; Allegrini, Vadenbo, Boldrin, & Astrup, 2015).

Finalmente, los impactos evitados de la generación de electricidad y reciclaje de aluminio principalmente, permiten obtener beneficios ambientales en las categorías de sustancias respirables inorgánicas, cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles, desplazando el 124%, 178% y 200% del total del impacto por categoría de impacto, respectivamente.

6.2.5 Análisis comparativo

Por último, para determinar el impacto total producido por cada uno de los escenarios evaluados, es necesario llevar los resultados a una nueva unidad de medida, que en esta metodología se denomina puntuación única. Esta permite agrupar los resultados ponderados de todas categorías de impacto en una misma unidad de medida, en este caso Puntos/tonelada de RSM con el fin de comparar los escenarios y determinar el mejor escenario de valorización energética para los RSM de Concepción. Como se puede ver en la figura 22, los escenarios que gestionan los RSM en el relleno sanitario CEMARC, independiente de la generación de electricidad, sus impactos ambientales son de 14,87 puntos/tonelada de RSM para el caso base y de 13,97 puntos/tonelada de RSM, para el escenario de recuperación energética de biogás. Si bien se recupera energía en el segundo caso, este no logra grandes diferencias en el impacto ambiental de cada escenario, disminuyendo el impacto total en tan solo un 6% con respecto a la situación actual de gestión de RSM.

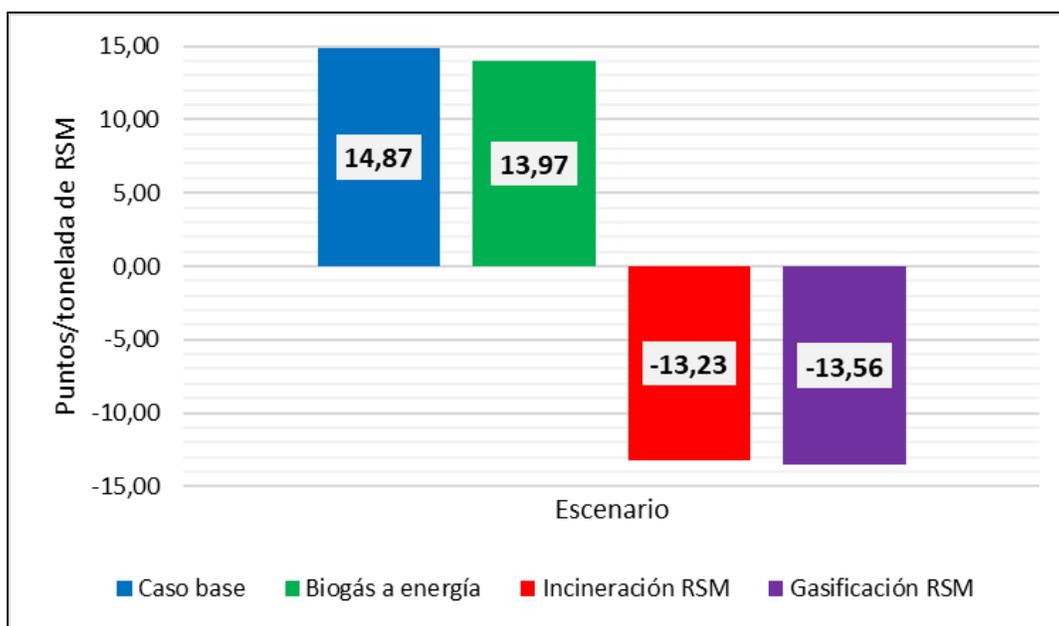


Figura 22. Comparación del impacto total por cada escenario evaluado.

Por otro lado, con respecto al escenario de incineración de RSM y reciclaje de vidrio y aluminio, este presenta claramente los beneficios ambientales producto de los impactos evitados por la generación de electricidad y reciclaje. El impacto total de este escenario es de -13,23 puntos/tonelada de RSM, un 90% de impacto evitado con respecto al caso base. Lo mismo sucede con la gasificación de RSM y reciclaje de vidrio y aluminio, con -13,56 puntos/tonelada de RSM, sus beneficios ambientales son tan solo un 3% más que el escenario de incineración y 91% más que el caso base. Los mayores beneficios ambientales de ambos escenarios están asociados a la categoría de daño de uso de recursos. Sin embargo, en el caso del escenario de incineración los beneficios ambientales de esta categoría de daño son mayores que el escenario de gasificación, mientras que en el caso de la gasificación el mayor beneficio ambiental está asociado a la salud humana. Esto es consecuente con los resultados discutidos previamente, principalmente por el doble de emisiones emitidas de CO₂ y de cenizas de la incineración de RSM en comparación con la gasificación de RSM. Por otro lado, el beneficio ambiental del uso de recursos es por la energía eléctrica producida en ambos escenarios, donde la eficiencia

energética del escenario de incineración es mayor al de gasificación (22% y 20%, respectivamente). En resumen, el escenario de incineración de RSM y gasificación de RSM, notoriamente son más beneficiosos desde el punto de vista ambiental en comparación con los otros escenarios, principalmente por los impactos evitados de generación eléctrica y reciclaje, discutidos con anterioridad. Asimismo, estos escenarios permiten reducir la cantidad de RSM dispuestos en rellenos sanitarios, y por consecuencia, disminuye la presión sobre el uso de suelo para este fin.

Es necesario decidir sobre cuál sería el escenario más favorable para la gestión de los RSM en la comuna de Concepción. Si bien el perfil ambiental de ambos escenarios es similar, el de gasificación de RSM presenta mayores utilidades desde el punto de vista energético, ya que permite generar una gran cantidad de calor (con una eficiencia de generación de 60%), que pudiera ser aprovechado para entregar calor distrital a comunidades aledañas. Este recurso se podría utilizar para abastecer a los habitantes de calefacción distrital que estén emplazados en los alrededores de la planta. Esto permitiría obtener beneficios sociales y económicos, ya que se está recuperando energía de un recurso que se está desperdiciando, permitiendo comercializar la energía térmica y eléctrica genera. Asimismo, se estarían evitando las emisiones atmosféricas de la combustión de leña, utilizada hoy en día como principal fuente de calefacción en la comuna y que está afectando a la salud de las personas por enfermedades respiratorias como también contribuyendo al cambio climático (Herrera, 2017). Estos beneficios pudieran disminuir las externalidades de salud pública y de costos por las enfermedades respiratorias que afectan principalmente a los niños y adultos mayores, y las muertes prematuras asociadas a enfermedades como neumonía, cáncer de pulmón y accidentes cerebrovasculares (Organización Mundial de la Salud, 2018) .

7 CONCLUSIONES.

En este trabajo se evaluaron los impactos ambientales del ciclo de vida de gestión actual de RSM de Concepción, en comparación con otros escenarios de valorización energética. Se han considerado tres escenarios, que consisten en la recuperación energética del biogás producido en el relleno sanitario, la incineración de RSM, y, por último, la gasificación de estos.

El sistema actual de gestión de RSM de la comuna de Concepción, presenta carencias desde el punto de vista del aprovechamiento energético y de materiales, debido a que el 100% de los RSM generados se destinan al relleno sanitario. De acuerdo al potencial energético de los RSM, estos contienen el 75% de energía contenida en la leña y un 24% con respecto al diésel, por lo que su aprovechamiento energético lograría beneficios significativos desde el punto de vista ambiental, evitando las emisiones provenientes de la generación de calor por la combustión de leña y por lo mismo, beneficiar a la salud de las personas disminuyendo las emisiones de MP2,5.

Dado que los RSM poseen un alto potencial energético, es factible utilizar tecnologías de conversión energética para la generación de electricidad y/o calor. Entre las tecnologías más utilizadas para la recuperación energética en la gestión de RSM a nivel global, son la incineración, gasificación y aprovechamiento energético del biogás. Asimismo, en el territorio nacional, existen proyectos que actualmente están en evaluación ambiental y que apuntan a la recuperación energética como es el caso de la gasificación de RSM y la valorización energética del biogás.

Desde el punto de vista ambiental, el escenario más favorable de gestión de RSM para la comuna de Concepción es la gasificación de RSM con reciclaje de vidrio y aluminio. Esta alternativa es considerada la mejor opción principalmente por los impactos evitados por la inyección de electricidad a la matriz energética, por la

recuperación de materiales como es el caso de aluminio y vidrio, como también por el potencial aprovechamiento de calor que se genera con esta tecnología. Entre los impactos que afectan su perfil ambiental y que debieran ser tomados en cuenta para reducir aún más sus impactos y maximizar el beneficio ambiental, es el consumo de combustible y emisiones derivadas de la recolección y transporte de RSM, como también el manejo de las cenizas generadas y que son dispuestas en un relleno de seguridad. Por lo tanto, la recuperación de las cenizas permitiría generar beneficios ambientales aún mayores, ya que, dependiendo de la segregación y calidad de estas, pueden ser utilizadas como relleno en la construcción de carreteras o bien como enmendador de suelo y se evitarían las emisiones al agua de metales pesados.

Es importante destacar, que la etapa más crítica dentro del ciclo de vida de la gestión de los RSM, indistintamente de los escenarios evaluados, fue la recolección y transporte de los RSM, representando contribuciones mayores al 45% en todos los casos. Esto pudiera deberse por las estimaciones de km recorrido en base al consumo de combustible, además del uso de la base de datos de Ecoinvent, lo que pudiera generar variaciones en los impactos ambientales.

Por lo anterior, es importante buscar alternativas para reducir estos impactos, mediante un rediseño de las rutas de recolección a través de herramientas como los sistemas de información geográfica, y la instalación de plantas de reciclaje dentro de la región o comuna, para evitar las grandes distancias para el transporte de los materiales recuperables que se tendrían que recorrer hoy en día.

Por último, es fundamental realizar una planificación integrada de la gestión de los RSM, dada la relevancia y participación que poseen los aspectos sociales, económicos, territoriales, ambientales y educativos de la comunidad y las partes interesadas. Esto permitiría tomar decisiones del punto de vista multidisciplinario, permitiendo que todo el ciclo de vida de los RSM se gestione correctamente, beneficiando a la comunidad, al Estado chileno y al medio ambiente.

8 BIBLIOGRAFÍA.

ACINSSUB Ltda. (2008). *Modificación del pretil frontal y planta de tratamiento de riles del relleno sanitario del centro de manejo de residuos Concepción*, CEMARC S.A.

Agencias. (2013, October 17). La contaminación ambiental, clasificada como cancerígena. *El Mundo*. Madrid. Retrieved from <http://www.elmundo.es/elmundosalud/2013/10/17/noticias/1382007886.html>

AgroWaste. (2013). *Digestión Anaerobia*. España.

Allegrini, E., Maresca, A., Olsson, M. E., Holtze, M. S., Boldrin, A., & Astrup, T. F. (2014). Quantification of the resource recovery potential of municipal solid waste incineration bottom ashes. *Waste Management*, 34(9), 1627–1636. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.003>

Allegrini, E., Vadenbo, C., Boldrin, A., & Astrup, T. F. (2015). Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash. *Journal of Environmental Management*, 151, 132–143. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.032>

Allesch, A., & Brunner, P. H. (2014). Assessment methods for solid waste management : A literature review. *Waste Management & Research*, 32(6), 461–473. <http://doi.org/10.1177/0734242X14535653>

Arafat, H. A., Jijakli, K., & Ahsan, A. (2015). Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment. *Journal of Cleaner Production*, 105, 233–240. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.071>

Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, 32(4), 625–639. <http://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>

Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., & Alao, M. A. (2017). Life cycle assessment

of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria. *Applied Energy*, 201, 200–218.

<http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.097>

Barrera A., J. E., & Bordagorry A., R. (2015). *Generación de electricidad a partir de digestión anaeróbica de residuos domiciliarios para implementar en condominios de la región Metropolitana con Ley N°20.571*. Universidad Diego Portales.

Bartzas, G., & Komnitsas, K. (2017). Life cycle analysis of pistachio production in Greece. *Science of the Total Environment*, 595, 13–24.

<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.251>

Bezama, A., Douglas, C., Mendez, J., Szarka, N., Muñoz, E., Navia, R., ... Ulloa, C. (2013). Life cycle comparison of waste-to-energy alternatives for municipal waste treatment in Chilean Patagonia. *Waste Management & Research*, 10, 67–74.

Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico*.

Bolaños, E. Q., Bello, J. M., & Urzola, M. E. (2011). Evaluación de alternativas para el manejo de residuos sólidos ordinarios en la ciudad de Cartagena de Indias mediante la metodología del análisis del ciclo de vida. *Hacia La Sustentabilidad: Los Residuos Sólidos Como Fuente de Energía y Materia Prima*, 187–192.

Braga, A. M., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 162, 529–543.

<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.057>

Brito, M., & Martins, F. (2017). Life cycle assessment of butanol production. *Fuel*,

208, 476–482. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.050>

Bueno, G., Latasa, I., & Lozano, P. J. (2015). Comparative LCA of two approaches with different emphasis on energy or material recovery for a municipal solid waste management system in Gipuzkoa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 449–459. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.021>

Cambero, C., & Sowlati, T. (2014). Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives - A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 62–73. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.041>

Carrasco A, J., & Díaz A, F. (2015). *Evaluación técnica y económica de una planta de biogás para autoabastecimiento energético: Una estrategia para diferentes contextos*. Universidad de Chile.

Casas Ledón, Y. (2015a). *Análisis de ciclo de vida. Evaluación de impactos*.

Casas Ledón, Y. (2015b). *Análisis de ciclo de vida. Interpretación*.

Cespi, D., Beach, E., Swarr, T., Passarini, F., Vassura, I., Dunn, P. eter, & Anastas, P. (2015). Life cycle inventory improvement in the pharmaceutical sector: assessment of the sustainability combining PMI and LCA tools. *Green Chemistry*, 17(6), 3390–3400.

Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste : A review. *Waste Management*, 34(12), 2466–2486. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>

Comisión Nacional de Energía. (2015). *Medición del consumo nacional de leña y combustibles sólidos derivados de la madera*. Santiago de CHILE. Retrieved from http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/MEDICIÓN DEL CONSUMO NACIONAL DE LEÑA Y OTROS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DERIVADOS DE LA MADERA.pdf

- Comisión Nacional de Energía. (2017). Energía Región.
- Comisión Nacional de Energía. (2018). Capacidad instalada Generación Sistema Eléctrico Nacional (SNE).
- CONAMA. Política de gestión integral de residuos sólidos (2005).
- CONAMA. (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes.*
- Concha S, S., Arteaga P, L., & González S, P. (2015). *Factibilidad técnica de gasificar los residuos sólidos urbanos (RSU) provenientes del relleno sanitario Fundo las Cruces, Comuna de Chillán Viejo.* Universidad de Concepción.
- Daylan, B., & Ciliz, N. (2016). Life cycle assessment and environmental life cycle costing analysis of lignocellulosic bioethanol as an alternative transportation fuel. *RENEWABLE ENERGY*, 89, 578–587. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.059>
- De Marco, I., & Iannone, R. (2017). Production, packaging and preservation of semi-finished apricots: A comparative Life Cycle Assessment study. *Journal of Food Engineering*, 206, 106–117. <http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.009>
- Di Maria, F., & Micale, C. (2015). Life cycle analysis of incineration compared to anaerobic digestion followed by composting for managing organic waste: the influence of system components for an Italian district. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(3), 377–388. <http://doi.org/10.1007/s11367-014-0833-z>
- Dias, A. C. (2014). Life cycle assessment of fuel chip production from eucalypt forest residues. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 705–717. <http://doi.org/10.1007/s11367-013-0671-4>

- Dias, A. C., & Arroja, L. (2012). Environmental impacts of eucalypt and maritime pine wood production in Portugal. *Journal of Cleaner Production*, 37, 368–376. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.056>
- Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-hortala, E., & Ni, M. (2018). Science of the Total Environment Life cycle assessment of pyrolysis , gasi fi cation and incineration waste-to-energy technologies : Theoretical analysis and case study of commercial plants. *Science of the Total Environment*, 626, 744–753. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.151>
- Douglas, C., Szarka, N., & Bezama, A. (2010). *Evaluación de alternativas de revalorización energética para la gestión de los Residuos Sólidos Domiciliarios de la ciudad de Coyhaique , en base a un análisis de ciclo de vida*. Universidad de Concepción.
- Droppelmann, C. V., & Oettinger, M. (2009). Tratamiento en lodo activado del lixiviado de un relleno sanitario. *Informacion Tecnologica*, 20(1), 11–19. <http://doi.org/10.1612/inf.tecnol.3916it.07>
- Enterprises pour l'Environnement. (2010). *Protocolo para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en actividades de gestión de residuos*.
- Erses Yay, A. S. (2015). Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: A case study of Sakarya. *Journal of Cleaner Production*, 94, 284–293. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>
- EULA-Chile, C. de C. A. (2013). *“CONSTRUCCIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS Y ASIMILABLES DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO”, PERIODO 2014 – 2033*. Concepción, Chile.
- European Commission. (n.d.). Cambio climático. Retrieved from https://ec.europa.eu/clima/change/causes_es
- Fernández-gonzález, J. M., Grindlay, A. L., Serrano-bernardo, F., Rodríguez-rojas,

M. I., & Zamorano, M. (2017). Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities, 67, 360–374.

<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.003>

Fortunato, B., Brunetti, G., Camporeale, S. M., Torresi, M., & Fornarelli, F. (2017). Thermodynamic model of a downdraft gasifier. *Energy Conversion and Management*, 140, 281–294. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.061>

Fullana, P., & Puig, R. (1997). *Análisis del ciclo de vida*. Barcelona, España.

García-pérez, J., Fernández-navarro, P., Castelló, A., López-cima, M. F., Ramis, R., Boldo, E., & López-Abente, G. (2013). La mortalidad por cáncer en ciudades situadas en las proximidades de incineradoras e instalaciones para la recuperación o eliminación de residuos peligrosos. *Environmental International*, 51, 31–44.

GESCAM, Fuente, H. D. de la, Boisier, H., & Gallardo, R. (2000). *Los residuos solidos urbanos y su impacto en el medio ambiente*.

Gesma. (2017). *Declaración de impacto ambiental Planta Bio energía Los Pinos*. Concepción.

Gharfalkar, M., Court, R., Campbell, C., Ali, Z., & Hillier, G. (2015). Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC. *Waste Management*, 39, 305–313. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.007>

Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H.-P., & Gerber, H. (2014). Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2). Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/267514925_Biochar_organic_fertilizers_from_natural_resources_as_substitute_for_mineral_fertilizers

Guichou, G. S. (2016). INCENDIO EN RELLENO SANITARIO: SANTA MARTA RECONOCIÓ ACCIÓN “FUERA DE LA LEY.” *Diario La Nacion*. Santiago de

CHILE.

Gunamantha, M., & Sarto. (2012). Life cycle assessment of municipal solid waste treatment to energy options: Case study of KARTAMANTUL region, Yogyakarta. *RENEWABLE ENERGY*, 41, 277–284.
<http://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.008>

Herrera, C. (2017). La dura realidad contaminante de la calefacción a leña en el Gran Concepción. *Diario Concepción*.

Hoorweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a waste: A global review of solid waste management* (Vol. 15). Washington, DC USA.

Hoorweg, D., Bhada-tata, P., & Kennedy, C. (2013). Waste production must peak this century. *Nature*, 502(7473), 615–617. <http://doi.org/10.1038/502615a>

INE. (2012). *Resultados XVIII Censo de Población Créditos*. Instituto Nacional de Estadísticas Chile.

InnovAconcagua, C. (2015). *EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LA COMUNA DE CONCEPCIÓN (PGIR)*. Concepción.

Instituto de Asuntos Públicos. (2016). *Informe País: Estado Del Medio Ambiente En Chile*. Universidad de Chile.

Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2016). Assessing the environmental sustainability of energy recovery from municipal solid waste in the UK. *Waste Management*, 50, 346–363. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.010>

Karanjekar, R. V, Bhatt, A., Altouqui, S., Jangikhatoonabad, N., Durai, V., Sattler, M. L., ... Chen, V. (2015). Estimating methane emissions from landfills based on rainfall , ambient temperature , and waste composition : The CLEEN model. *Waste Management*, 46, 389–398.
<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.030>

- Karlsson, J., Brunzell, L., & Venkatesh, G. (2018). Material-flow analysis, energy analysis, and partial environmental-LCA of a district-heating combined heat and power plant in Sweden. *Energy*, *144*, 31–40.
<http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.159>
- Knauf, M. (2015). Waste hierarchy revisited - an evaluation of waste wood recycling in the context of EU energy policy and the European market. *Forest Policy and Economics*, *54*, 58–60.
- Komakech, A. J., Sundberg, C., Jönsson, H., & Vinnerås, B. (2015). Life cycle assessment of biodegradable waste treatment systems for sub-Saharan African cities. *Resources, Conservation and Recycling*, *99*, 100–110.
<http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.006>
- Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management*, *69*, 407–422. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046>
- Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., ... Christensen, T. H. (2014). Review of LCA studies of solid waste management systems – Part I : Lessons learned and perspectives. *Waste Management*, *34*(3), 573–588. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.045>
- Lausselet, C., Cherubini, F., David, G., Serrano, A., Becidan, M., Hu, X., ... Hammer, A. (2017). Resources , Conservation & Recycling Norwegian Waste-to-Energy : Climate change , circular economy and carbon capture and storage. *Resources, Conservation & Recycling*, *126*(July), 50–61.
<http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.025>
- Leckner, B. (2015). Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units. *Waste Management*, *37*, 13–25.
<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.019>
- Liamsanguan, C., & Gheewala, S. (2008). LCA: A decision support tool for

- environmental assessment of MSW management systems. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT*, 87(1), 132–138.
- Lombardi, L., & Carnevale, E. A. (2018). Evaluation of the environmental sustainability of different waste-to-energy plant configurations. *Waste Management*, 73, 232–246. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.006>
- Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. *Waste Management*, 37, 26–44. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>
- López A., D., & Núñez L., L. (2016). *Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios*. Universidad de Chile.
- Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczynska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., ... Spencer, N. (2017). Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*, 141, 2013–2044. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128>
- McDougall, F., White, P., Franke, M., & Hindle, P. (2001). *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory*. (B. Science, Ed.) (Second edi).
- Menikpura, S. N. M., Sang-Arun, J., & Bengtsson, M. (2016). Assessment of environmental and economic performance of Waste-to-Energy facilities in Thai cities. *RENEWABLE ENERGY*, 86, 576–584.
- Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Global Environment Facility. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de CHILE.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2011). *Informe del Estado del Medio Ambiente*. Santiago de CHILE.

- Ministerio de Obras Públicas. DS 609/1998. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado. (1998). Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Ministerio del Medio Ambiente. Ley N°20.920. Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje (2016). Santiago de Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Moratorio, D., Rocco, I., & Castelli, M. (2012). Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía. *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, 10, 115–125.
- Murcia Castro, A. C., Rodriguez Velásquez, C. A., & Molina Gomez, N. I. (2017). *Evaluación de tecnologías para la disposición final de residuos sólidos urbanos mediante el análisis de ciclo de vida. Caso de estudio: Bogotá*. Universidad Santo Tomás, sede Bogotá.
- OCDE, & CEPAL. (2016). *Evaluaciones del desempeño ambiental Chile 2016*. Santiago de CHILE.
- Ogundipe, F. O., & Jimoh, O. D. (2015). Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management in Minna , Niger State , Nigeria, 9(4), 1305–1314.
- Omebjerg, H., Franck, J., Lamers, F., Angotti, F., Morin, R., & Brunner, M. (n.d.). *Management of bottom ash from WTE Plants*. Retrieved from https://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/Bottom_ash_from_WTE_2006_01.pdf
- Organización Mundial de la Salud. (2016). Las dioxinas y sus efectos en la salud humana. Retrieved December 8, 2017, from <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dioxins-and-their-effects-on-human-health>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Contaminación del aire de interiores y salud.

- Paneque, M., Román-Figueroa, C., Vásquez-Panizza, R., Arriaza, J. M., Morales, D., & Zulantay, M. (2011). *Bioenergía en Chile*. Santiago de CHILE: FAO.
- Panesso, A., Cadena, J., Mora, J., & Ordoñez, M. del C. (2011). Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica. *Scientia et Technica*, (47), 23–28.
<http://doi.org/ISSN 0122-1701>
- Pires, A., Martinho, G., & Chang, N. (2011). Solid waste management in European countries : A review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management*, 92(4), 1033–1050. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.024>
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. (2012). *Estudio de impacto ambiental Centro de Manejo y disposición Final de Residuos Sólidos Chiloé*. Castro.
- Popita, G., Baciú, C., Rédey, Á., Frunzeti, N., Ionescu, A., Yuzhakova, T., & Popovici, A. (2017). Life Cycle Assessment (Lca) of Municipal Solid Waste Management Systems in Cluj County , Romania. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(1), 47–57.
- PRé Consultants. (2010). *Simapro Database Manual. Methods library*.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2018). Objetivos de desarrollo sustentable. Retrieved June 11, 2018, from <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Puig, R., Kiliç, E., Navarro, A., Albertí, J., Chacón, L., & Fullana-i-Palmer, P. (2017). Inventory analysis and carbon footprint of coastland-hotel services: A Spanish case study. *Science of the Total Environment*, 595, 244–254.
<http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.245>
- Rondón Toro, E., Szantó Narea, M., Pacheco, J. F., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*.

Santiago.

Ryu, C., & Shin, D. (2013). Combined Heat and Power from Municipal Solid Waste: Current Status and Issues in South Korea. *Energies*, 6(1), 45–57.

<http://doi.org/10.3390/en6010045>

Sáez, A., Urdaneta, G., & Joheni, A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Onmia*, 20(3), 121–135.

Santamarta, J. C., Rodríguez-martín, J., Arraiza, M. P., & López, J. V. (2014). Waste Problem and Management in Insular and Isolated Systems . Case Study in the Canary Islands (Spain). *IERI Procedia*, 9, 162–167.

<http://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.09.057>

SERVIMAR Ltda. (2005). *Estudio de impacto ambiental Centro de manejo de residuos de Concepción (CEMARC)*. Concepción.

Shi, H., Mahinpey, N., Aqsha, A., & Silbermann, R. (2016). Characterization, thermochemical conversion studies, and heating value modeling of municipal solid waste. *Waste Management*, 48, 34–47.

<http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.036>

SimaPro. (2017). *Metodología Ecoindicador 99*.

Sobrino, F., Monroy, C., & Perez, J. (2011). Biofuels and fossil fuels: Life Cycle Analysis (LCA) optimisation through productive resources maximisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*2, 15(6), 2621–2628.

Tan, S. T., Ho, W. S., Hashim, H., Lee, C. T., Taib, M. R., & Ho, C. S. (2015). Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. *Energy Conversion and Management*, 102, 111–120.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. A. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. (M. Hill, Ed.).

- Themelis, N. J., Diaz B., M. E., Estevez, P., & Velasco, M. G. (2013). *Guidebook for the application of waste to energy technologies in Latin America and the Caribbean*. Earth Engineering Center, Columbia University.
- UNE-EN-ISO 14044. *Gestión ambiental - Análisis de ciclo de vida - Requisitos y directrices*, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 30 (2006).
- UNE-EN. ISO 14040:2006. *Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia*. (2006).
- UNE-EN. ISO 14044:2006. *Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices* (2006).
- Valerio, M. (2012, June 12). El humo del diésel, declarado causante de cáncer en humanos. *El Mundo*. Madrid. Retrieved from <http://www.elmundo.es/elmundosalud/2012/06/12/oncologia/1339517758.html>
- Valladares C, E., Villegas S, M., & Sánchez A, R. (2013). *Potencial Energético del Biogás generado por los residuos sólidos domiciliarios (RSD) en la Provincia de Concepción*. Universidad del Bío-bío.
- Vega, M., Zaror, C., & Peña, C. (2011). Life Cycle Inventory of Electricity Generation in Chile. *Cilca 2011*, (MARCH 2011). Retrieved from <http://centroacv.com.mx/archivos/Proceedings.pdf>
- World Health Organization. (2016). *Waste and human health: Evidence and needs*.
- WTE Araucanía SpA. (2017). *Planta WTE Araucanía*.
- WTE Araucanía SpA. (2017). *Estudio de impacto ambiental Planta WTE Araucanía*. Concepción.
- Zaror Zaror, C. (2005). *Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Zurbrügg, C., Caniato, M., & Vaccari, M. (2014). How Assessment Methods Can

Support Solid Waste Management in Developing Countries — A Critical Review. *Sustainability*, 6, 545–570. <http://doi.org/10.3390/su6020545>



9 ANEXOS.

ANEXO 1. Listado de países de la región Latinoamérica y El Caribe y OCDE.

Latinoamérica y El Caribe	OCDE
Antigua y Barbuda	Alemania
Argentina	Andorra
Bahamas	Australia
Barbados	Austria
Belice	Bélgica
Bolivia	Canadá
Brasil	Corea del sur
Chile	Dinamarca
Colombia	Eslovaquia
Costa Rica	España
Cuba	Estados Unidos
Dominica	Finlandia
Ecuador	Francia
El Salvador	Grecia
Granada	Hungría
Guatemala	Islandia
Guyana	Irlanda
Haití	Italia
Honduras	Japón
Jamaica	Luxemburgo
México	Mónaco
Nicaragua	Noruega
Panamá	Nueva Zelanda
Paraguay	Países bajos
Perú	Portugal
República Dominicana	Reino Unido
San Cristóbal y Nieves	República Checa
Santa Lucía	Suecia

San Vicente y las Granadinas	Suiza
Surinam	
Trinidad y Tobago	
Uruguay	
Venezuela	

Fuente: (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012).

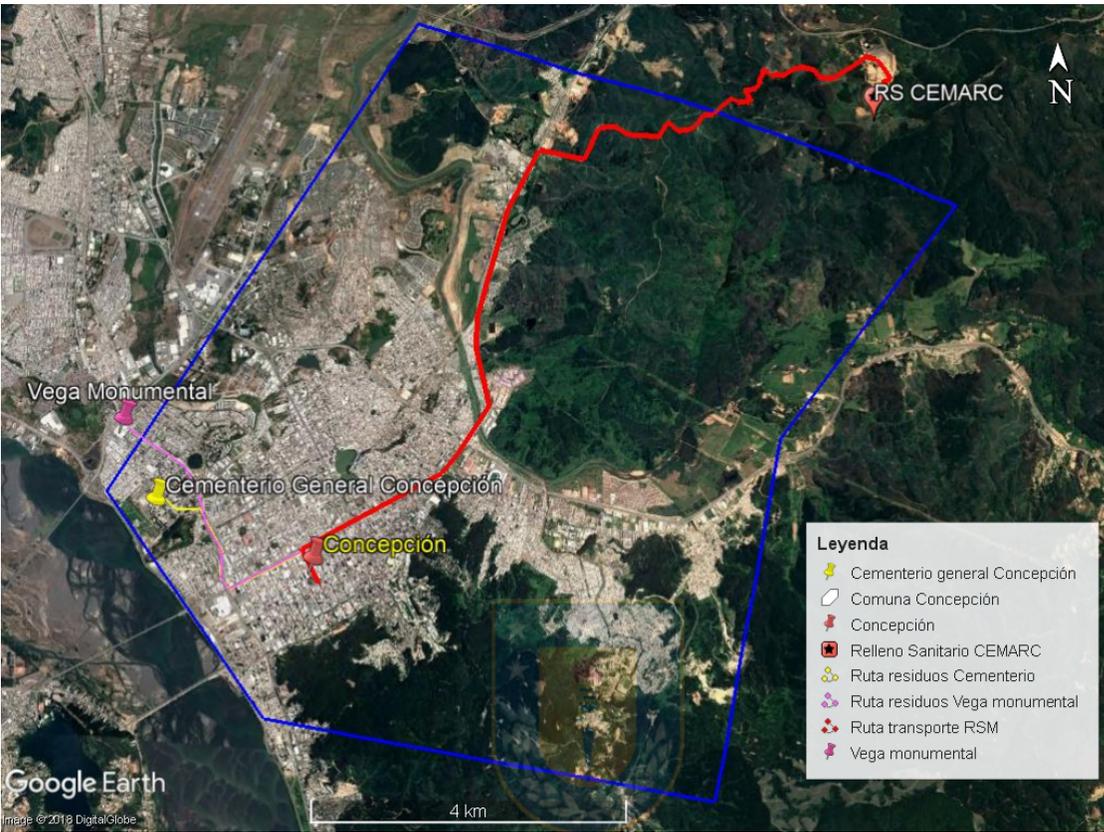
ANEXO 2. Clasificación de flujos del inventario de ciclo de vida.

Entradas	
Desde la naturaleza <i>Recursos (energía, materias primas y/o auxiliares)</i>	Desde la tecnosfera <i>Materiales/Combustibles/Electricidad/Calor</i>
Salidas	
A la naturaleza <i>Emisiones al aire, agua y/o suelo</i>	A la tecnosfera <i>Productos/Co-productos/Productos evitados/Combustibles/Emisiones para tratamiento</i>

Fuente: Fullana & Puig, 1997.

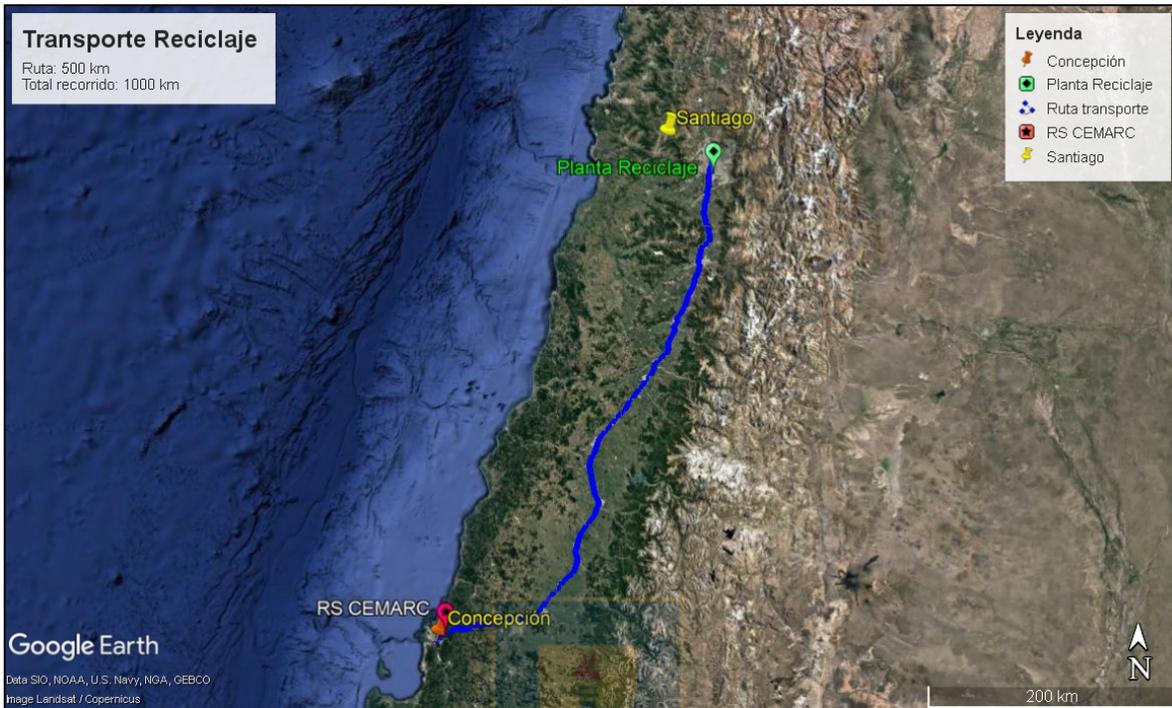


ANEXO 3. Ruta de transporte de RSM de Concepción al relleno sanitario CEMARC.



Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

ANEXO 4. Ruta de transporte de reciclaje de vidrio y aluminio desde Concepción a Santiago.



Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

ANEXO 5. Tabla límites máximos descargas de riles a redes de alcantarillado D.S. 609/1998, del Ministerio de Obras Públicas.

Elemento	Unidad	Límite máximo permitido
DBO5	mg/L	300
Fósforo	mg/L	15
Nitrógeno	mg/L	80
Sólidos suspendidos totales	mg/L	300

Fuente: (Ministerio de Obras Públicas, 1998)

ANEXO 6. Inventario de ciclo de vida de Escenario 0 en base a UF = 1 tonelada de RSM.

Material	Cantidad	Unidad	Fuente
Entradas			
Desde la naturaleza			
Consumo agua	0,0365	m3	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Desde la tecnosfera			
Consumo energético	18,51	kWh	(Douglas et al., 2010)
Consumo diésel	0,0053	ton	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Transporte RSM	56,3	tkm	(InnovAconcagua, 2015)
<i>Insumos químicos lixiviados</i>			
Ácido fosfórico	2,2E-09	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Sulfato aluminio	0,0012	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Peróxido hidrógeno	0,00003	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
<i>Fuga biogás</i>			
CH4	0,025	ton	(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012)
CO2	0,019	ton	(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012)
N2	0,0018	ton	(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012)
O2	0,0005	ton	(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012)
H2O	0,0005	ton	(Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2012)
<i>Combustión biogás</i>			
MP	6,25E-06	ton	(CONAMA, 2009)
MP10	6,25E-06	ton	(CONAMA, 2009)
MP2,5	6,25E-06	ton	(CONAMA, 2009)
CO2	0,0989	ton	(CONAMA, 2009)
CO	6,95E-05	ton	(CONAMA, 2009)

NOX	8,31E-05	ton	(CONAMA, 2009)
VOC	4,41E-06	ton	(CONAMA, 2009)
SOX	1,03E-05	ton	(CONAMA, 2009)

ANEXO 7. Inventario de ciclo de vida de Escenario 1 en base a UF = 1 tonelada de RSM.

Material	Cantidad	Unidad	Fuente
Entradas			
<i>Desde la naturaleza</i>			
Consumo agua	0,0365	m3	(SERVIMAR Ltda, 2005)
<i>Desde la tecnosfera</i>			
Consumo diésel	0,0053	ton	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Transporte RSM	56,3	tkm	(InnovAconcagua, 2015)
<i>Insumos químicos lixiviados</i>			
Ácido fosfórico	2,2E-09	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Sulfato aluminio	0,0012	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Peróxido hidrógeno	0,00003	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Salidas			
<i>Hacia la tecnosfera</i>			
<i>Productos evitados</i>			
Electricidad chilena SIC	200,69	kWh	(Gesma, 2017)
<i>Hacia la naturaleza</i>			
<i>Emisiones al aire</i>			
Dióxido de carbono biogénico	0,0185	ton	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Metano, biogénico	0,025	ton	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Nitrógeno	0,0019	ton	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Oxígeno	0,0005	ton	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Agua	0,0005	ton	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Monóxido de carbono	0,001	ton	(Gesma, 2017)
Hidrocarburos	0,00000002	ton	(Gesma, 2017)

Óxidos de nitrógeno	0,00000014	ton	(Gesma, 2017)
Óxidos de azufre	0,000000002	ton	(Gesma, 2017)
Material particulado fino	0,0001	ton	(Gesma, 2017)
Material particulado respirable	0,0001	ton	(Gesma, 2017)
Dióxido de azufre	0,00003	ton	(Gesma, 2017)
Dióxido de nitrógeno	0,00051	ton	(Gesma, 2017)
<i>Emisiones al agua</i>			
Demanda biológica de oxígeno (DBO5)	0,0001	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Cloruro	0,0002	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Nitrógeno total	0,00003	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Fósforo total	0,000003	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)
Sólidos suspendidos	0,000001	ton	(ACINSSUB Ltda, 2008)

ANEXO 8. Inventario de ciclo de vida Escenario 2 en base a UF = 1 tonelada de RSM.

Material	Cantidad	Unidad	Fuente
Entradas			
Desde la naturaleza			
Agua	3,157	m3	(Murcia Castro et al., 2017)
Aire	7,03	ton	(Murcia Castro et al., 2017)
Desde la tecnosfera			
Combustible diésel	0,013	ton	(InnovAconcagua, 2015; Murcia Castro et al., 2017)
Transporte RSM	56,3	tkm	(InnovAconcagua, 2015)
Transporte reciclaje	50	tkm	
Urea	0,0058	ton	(Murcia Castro et al., 2017)
Salidas			
Hacia la tecnosfera			
Productos evitados			
Contenedor vidrio	0,03	ton	Ecoinvent
Aluminio	0,02	ton	Ecoinvent

Electricidad chilena SIC	755,225	kWh	(Vega, Zaror, & Peña, 2011)
Emissiones al aire			
Dióxido de carbono fósil	0,332	ton	(Murcia Castro et al., 2017)
Cloruro	0,0002	ton	(Murcia Castro et al., 2017)
Amoniaco	0,0002	ton	(Murcia Castro et al., 2017)
Óxidos de nitrógeno	0,0009	ton	(Murcia Castro et al., 2017)
Dióxido de azufre	0,0001	ton	(Murcia Castro et al., 2017)
Dioxinas	0,0005	ton	(Murcia Castro et al., 2017)
Residuos para tratamiento			
Disposición rechazo TMB	0,16	ton	(SERVIMAR Ltda, 2005)
Disposición cenizas	0,14	ton	Ecoinvent

ANEXO 9. Inventario de ciclo de vida Escenario 3 en base a UF = 1 tonelada de RSM.

Material	Cantidad	Unidad	Fuente
Entradas			
<i>Desde la naturaleza</i>			
Agua	0,36	m3	(WTE Araucanía SpA, 2017)
Aire	0,34	ton	(Concha S et al., 2015)
<i>Desde la tecnosfera</i>			
Combustible diésel	0,0046	ton	(WTE Araucanía SpA, 2017)
Transporte RSM	56,3	tkm	(InnovAconcagua, 2015)
Transporte reciclaje	50	tkm	
Salidas			
Productos evitados			
Contenedor vidrio	0,03	ton	Ecoinvent
Aluminio	0,02	ton	Ecoinvent
Electricidad chilena SIC	643,8	kWh	(WTE Araucanía SpA, 2017)
Emissiones al aire			
Materia particulado fino	0,0001	ton	(WTE Araucanía SpA, 2017)
Monóxido de carbono	0,0002	ton	(WTE Araucanía SpA, 2017)

Óxidos de nitrógeno	0,001	ton	(WTE Araucanía SpA, 2017)
Dióxido de azufre	0,0002	ton	(WTE Araucanía SpA, 2017)
Material particulado respirable	0,0001	ton	(WTE Araucanía SpA, 2017)
Dióxido de carbono fósil	0,13	ton	(Concha S et al., 2015)
Residuos para tratamiento			
Disposición rechazo TMB	0,16	ton	
Disposición cenizas	0,07	ton	(Concha S et al., 2015; Fortunato et al., 2017)

ANEXO 10. Resultados ponderación y puntuación única de ACV de cada escenario.

Categorías	Unidad	Caso base	Ruperación energética de biogás	Incineración de RSM	Gasificación de RSM
Tabla comparativa por categoría de impacto					
Cancerígenos	Puntos/tonelada de RSM	0,09	0,06	7,22	2,20
Respirables orgánicos	Puntos/tonelada de RSM	0,03	0,03	0,01	0,01
Respirables inorgánicos	Puntos/tonelada de RSM	4,44	7,77	-9,45	-3,61
Cambio climático	Puntos/tonelada de RSM	5,13	4,14	-0,59	-2,38
Radiación	Puntos/tonelada de RSM	0,00	0,00	-0,02	-0,02
Capa de ozono	Puntos/tonelada de RSM	0,00	0,00	0,00	0,00
Ecotoxicidad	Puntos/tonelada de RSM	0,06	0,04	0,02	-0,04
Acidificación/eutrofización	Puntos/tonelada de RSM	0,24	0,27	0,11	0,03
Uso suelo	Puntos/tonelada de RSM	0,00	0,00	-0,09	-0,10
Minerales	Puntos/tonelada de RSM	0,01	0,01	-1,47	-1,47
Combustibles fósiles	Puntos/tonelada de RSM	4,89	1,66	-8,99	-8,20
Ponderación Categoría de daño					

Salud humana	Puntos/tonelada de RSM	9,68	12,00	-2,82	-3,79
Calidad ecosistemas	Puntos/tonelada de RSM	0,30	0,31	0,04	-0,10
Recursos	Puntos/tonelada de RSM	4,89	1,67	-10,45	-9,67
<i>Categoría de daño puntuación unica</i>					
Salud humana	Puntos/tonelada de RSM	9,68	12,00	-2,82	-3,79
Calidad Ecosistemas	Puntos/tonelada de RSM	0,30	0,31	0,04	-0,10
Recursos	Puntos/tonelada de RSM	4,89	1,67	-10,45	-9,67
Total	Puntos/tonelada de RSM	14,87	13,97	-13,23	-13,56

