

Proyecto IKI-PNUMA

Avanzando y midiendo consumo y producción sostenible
para una economía baja en carbono en economías de
ingresos medios y nuevos países industrializados en Perú

Actividad 9: Rellenos Sanitarios

Red Peruana Ciclo de Vida
Departamento de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica del Perú

Kurt Ziegler
Ian Vázquez Rowe
Ramzy Kahhat
María Margallo

Lima, 23 de enero de 2019

Tabla de contenido

1.	Introducción	8
1.1.	Estado del Arte:	8
1.1.1.	Emisiones de GEI biogénicas ligadas a la descomposición anaeróbica.....	10
1.1.2.	ACV como herramienta cuantitativa	11
1.2.	Contexto Peruano en el Sector Residuos Sólidos	14
1.3.	Marco Normativo y Legislativo del Sector Residuos Sólidos en el Perú	15
2.	Materiales y Metodología.....	17
2.1.	ACV y la Normativa ISO	17
2.2.	Aplicación del ACV a Rellenos Sanitarios.....	17
2.3.	Caso de Estudio: Relleno Sanitario Portillo Grande	18
2.4.	Caso de Estudio: Lugar de disposición final de residuos sólidos Jaquira	23
2.5.	Caso de Estudio: Relleno Sanitario Nauta	26
3.	Aplicación del ACV a los casos de estudio.....	28
3.1.	Objetivo y Alcance.....	29
3.1.1.	Función y Unidad Funcional	30
3.1.2.	Límites del Sistema.....	31
3.1.3.	Recolección de Datos	32
3.1.4.	Suposiciones y Limitaciones	36
3.2.	Inventario de Ciclo de Vida.....	39
3.2.1.	Inventario de Ciclo de Vida: Caso de estudio Portillo Grande.....	39
3.2.2.	Inventario de Ciclo de Vida: Caso de estudio Jaquira	48
3.2.3.	Inventario de Ciclo de Vida: Caso de estudio Nauta	53
3.3.	Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida	59
3.3.1.	Impacto ambiental: Método IPCC 2013.....	61
3.3.2.	Impacto ambiental: Método ReCiPe 2008	90
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	104
4.1.	Conclusiones	105
6.	Referencias.....	111

Índice de Figuras:

Figura 1.....	14
Figura 2.....	17
Figura 3.1.....	20
Figura 3.2.....	21
Figura 3.3.....	21
Figura 3.4.....	22
Figura 3.5.....	22
Figura 3.6.....	23
Figura 4.1.....	24
Figura 4.2.....	25
Figura 4.3.....	25
Figura 5.1.....	26
Figura 5.2.....	27
Figura 5.3.....	27
Figura 5.4.....	28
Figura 5.5.....	28
Figura 6.....	32
Figura 7.....	33
Figura 8.....	34
Figura 9.....	35
Figura 10.....	69
Figura 11.....	70
Figura 12.....	79
Figura 13.....	80
Figura 14.....	88
Figura 15.....	90
Figura 16.....	91
Figura 17.....	93
Figura 18.....	94
Figura 19.....	96
Figura 20.....	97
Figura 21.....	99

Figura 22.....	101
Figura 23.....	102
Figura 24.....	104

Índice de Tablas:

Tabla N°01.....	7
Tabla N°02.....	19
Tabla N°03.....	40
Tabla N°04.....	41
Tabla N°05.....	42
Tabla N°06.....	43
Tabla N°07.....	44
Tabla N°08.....	45
Tabla N°09.....	46
Tabla N°10.....	47
Tabla N°11.....	49
Tabla N°12.....	50
Tabla N°13.....	51
Tabla N°14.....	54
Tabla N°15.....	56
Tabla N°16.....	57
Tabla N°17.....	61
Tabla N°18.....	62
Tabla N°19.....	63
Tabla N°20.....	64
Tabla N°21.....	65
Tabla N°22.....	66
Tabla N°23.....	66
Tabla N°24.....	67
Tabla N°25.....	68
Tabla N°26.....	71
Tabla N°27.....	72
Tabla N°28.....	74
Tabla N°29.....	75
Tabla N°30.....	76
Tabla N°31.....	76
Tabla N°32.....	77
Tabla N°33.....	78

Tabla N°34.....	81
Tabla N°35.....	82
Tabla N°36.....	83
Tabla N°37.....	84
Tabla N°38.....	85
Tabla N°39.....	85
Tabla N°40.....	86
Tabla N°41.....	87
Tabla N°42.....	91
Tabla N°43.....	93
Tabla N°44.....	94
Tabla N°45.....	95
Tabla N°46.....	97
Tabla N°47.....	99
Tabla N°48.....	100
Tabla N°49.....	102
Tabla N°50.....	103
Tabla N°51.....	109

PREFACIO:

El Perú hoy en día forma parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el fin de implementar/fortalecer sus políticas ambientales, a partir de tratados internacionales como el firmado en París en la Conferencia de las Partes (COP) 21. En este tratado, el Perú se compromete a partir de la propuesta de mitigación de las antes llamadas *intended Nationally Determined Contributions* (iNDC), a día de hoy denominadas *Nationally Determined Contributions* (NDC), a reducir en un 30% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) proyectadas para el año 2030 (MINAM, 2015). Por ende, se encuentra actualmente elaborando programas y propuestas de proyectos para poder cumplir con los objetivos propuestos en la COP 21. Dentro de los proyectos de mitigación a ejecutar se encuentra el proyecto del IKI, financiado por ONU Medio Ambiente, que comprende dentro de sus actividades la elaboración y validación de inventarios de ciclo de vida de procesos unitarios para rellenos sanitarios (RRSS) en el Perú.

Se enfocó en el sector de RRSS porque estos constituyen uno de los tres sectores prioritarios fijados en el proyecto para la elaboración de inventarios de ciclo de vida, metodología que será expuesta posteriormente. Esta actividad tiene como objetivo la elaboración y validación de inventarios de ciclo de vida de procesos unitarios para RRSS en el Perú. La información que se obtenga aportará a la formación de bases de datos con información nacional para todas las etapas de ciclo de vida de un relleno sanitario (RS): extracción de materias primas, construcción, operación, mantenimiento y fin de vida. Esta base de datos contribuirá al Perú al momento de realizar futuras concesiones a nivel nacional, dado que brindará información de calidad acerca de los procesos y el impacto generado en el desarrollo de este tipo de proyectos. De esta forma, se logrará una reducción del impacto ambiental producido por el sector residuos sólidos (SRRSS). La **Tabla N°01** muestra las opciones de mitigación consideradas por el Ministerio del Ambiente (MINAM) para la reducción de emisiones de GEI en el SRRSS (MINAM, 2015).

Tabla N°01: Iniciativas de la Contribución Nacional Determinada en el Sector de Rellenos Sanitarios (**SRRSS**). Fuente: Adaptación de La Contribución Nacional del Perú – iNDC. Los valores presentados están sujetos a revisión continua por el Ministerio del Ambiente (MINAM).

Nombre de Iniciativa	Mitigación en t CO ₂ -equivalente
Construcción de Rellenos Sanitarios con captura y quema centralizada de metano (NAMA ¹)	1.506.000
Construcción de Rellenos Sanitarios con tecnología semiaeróbica	442.000
Segregación de materia orgánica y producción de compost	217.000
Segregación y valorización de residuos inorgánicos	21.000
Construcción de Rellenos Sanitarios con captura y quema descentralizada de metano	1.347.000

¹ NAMAs: Medidas de Mitigación Propuestas, por sus siglas en inglés.

² PTARs: Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

1. Introducción

1.1. Estado del Arte:

La generación de residuos y su manejo es un problema con el cual todas las civilizaciones han tenido que lidiar, ya que básicamente toda actividad humana genera algún residuo. Sin embargo, es solo desde la existencia del informe Brundtland, en 1987, cuando se acuñó la primera definición de desarrollo sostenible. Es entonces cuando la percepción humana sobre el manejo de los materiales cambia en torno a la sostenibilidad, buscando así la maximización del aprovechamiento de los recursos. El sector residuos sólidos (SRRSS) no es ajeno a ello, ya que los medios de disposición han evolucionado de un desechado sin cuidado, a sistemas de tratamiento integrado avanzados en los países más desarrollados. Actualmente, el objetivo es lograr la consolidación de una economía circular. Por ello la Unión Europea con su paquete de Economía Circular, y el gobierno chino con su Ley de Promoción de la Economía Circular (European Commission, 2015; Lieder & Rashid, 2016; Geissdoerfer et al., 2017) han logrado iniciar la implementación y mejora de esta línea de pensamiento en economías desarrolladas. La Economía Circular se enfoca en el impulso al reciclado, y a la reducción del relleno de residuos en RRSS, de manera que se pueda aprovechar al máximo los recursos ya explotados, con la finalidad de alargar su tiempo de vida (Ghisellini et al., 2016; Geissdoerfer et al., 2017).

Por el contrario, la situación en países en desarrollo y economías emergentes es sustancialmente diferente: mientras que los países más desarrollados buscan sistemas de manejo de los residuos más integrados y sostenibles (Laurent et al., 2014a), las economías emergentes siguen luchando para ir de la disposición en botaderos abiertos al tratamiento en RRSS (Johannessen & Boyer, 1999; Henry et al., 2006; Guerrero et al., 2013 Marshall & Farahbakhsh, 2013). En el 2013, Guerrero y otros expertos identificaron los retos que más de 30 ciudades estaban enfrentando en 22 países en vías de desarrollo a lo largo de 4 continentes, y concluyeron que las municipalidades, en conjunto con los demás actores involucrados como los gobiernos centrales y entidades educacionales, debían tomar acciones para poder mejorar la precaria situación. Si bien el relleno sanitario de los residuos tiene un impacto total elevado cuando se consideran residuos mixtos respecto a otras alternativas como el reciclaje y la incineración (Laurent et al., 2014a), en países en desarrollo sigue siendo la columna vertebral del manejo de residuos sólidos municipales (RSM) debido a su bajo costo y menores impactos ambientales respecto a los botaderos abiertos

(Johannessen & Boyer, 1999; Manfredi & Christensen, 2009; Manfredi et al., 2009, Guerrero et al., 2013).

En cuanto al caso particular del Perú, durante el año 2012 se generaron un total de 6.9 millones de toneladas de RSM. De estas, el 47% fue dispuesto en botaderos a cielo abierto y solo el 21% fue destinado a un RS autorizado. En cuanto a las fracciones remanentes, 17% fue reciclado, 12% fue quemado a cielo abierto, 3% fue vertido en algún medio acuoso (mar, lago o río) y un 1% tuvo un destino desconocido (MINAM, 2013). Dado que la situación nacional de manejo de RSM en Perú es un problema bien conocido por el gobierno, a lo largo de la última década se ha tenido la intención y el compromiso de mejorar la situación. En el año 2010 el gobierno suscribió el Anexo B del Acuerdo de Copenhague, en el cual se comprometía a tomar acciones en el SRRSS con el fin de reducir las emisiones producidas por el manejo inadecuado de los residuos (UNFCCC, 2010). Si bien las medidas propuestas en el acuerdo fueron poco ambiciosas y específicas, el gobierno luego suscribió en 2015 el Acuerdo de París (UNFCCC, 2015), ratificándolo en el año 2016 con propuestas más ambiciosas, como se puede ver en la Contribución Nacional Determinada (NDC por sus siglas en inglés), las cuales pretenden una reducción de hasta 3.9 millones de toneladas (Mt) de CO₂-equivalente solo en el SRRSS, lo que equivale al 30% de las emisiones del sector en condiciones *Business as Usual* según proyecciones para el 2030.

Respecto a las emisiones generadas por la construcción y uso de RRSS, se encuentran en la literatura investigaciones realizadas en Asia, América del Norte y Europa. Asimismo, la mayoría de estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) e inventarios para RRSS que se encuentran son de Europa septentrional. Los estudios analizan principalmente el desempeño de los RRSS en condiciones actuales y con mejoras, como quema del biogas y recuperación energética en Europa (Manfredi & Christensen, 2009; Niskanen et al., 2009; Manfredi et al., 2010a, 2010b; Bjelic et al., 2015), Asia (Wanichpongpan & Gheewala, 2007; Khoo et al., 2012; Yang et al., 2014) y Norteamérica (Camobreco et al., 1999; Mènard et al., 2004). En menor medida, otros estudios comparan el desempeño de los RRSS con otras tecnologías, como la incineración, el tratamiento biológico y el reciclaje, únicamente en Europa (Cherubini et al., 2009; Manfredi et al., 2011; Belboom et al., 2013) y Norteamérica (Kong et al., 2012). En lo que respecta al contexto peruano, en la actualidad, de los 28 RRSS existentes solo 8 realizan la combustión del gas (MINAM, 2017) y únicamente 1 de ellos tiene sistemas de recuperación energética en base al biogás (Petramás, s.f.).

1.1.1. Emisiones de GEI biogénicas ligadas a la descomposición anaeróbica

El estudio del comportamiento de los residuos en los RRSS y su impacto ambiental ha sido amplio y extensivo a lo largo de los años. Si bien existen diversas perspectivas para el estudio de los RRSS, el presente reporte estará enfocado principalmente en el punto de vista del ACV. La gestión inadecuada de los residuos sólidos es una fuente de emisión de GEI importante, ya que el proceso de descomposición de los desechos orgánicos genera diversos GEI, principalmente CO₂, CH₄ y N₂O (Kirkeby et al., 2007). Estos gases, al no ser manejados de manera correcta, son emitidos directamente al ambiente, contribuyendo al calentamiento del planeta. Estudios previos estiman que el carbono (C) constituye entre 75 y 105 kg por tonelada de RSM (Manfredi et al., 2009), y este es emitido en forma de biogás al ocurrir la descomposición anaeróbica de los mismos (Manfredi et al., 2009). Adicionalmente, el CH₄ y el N₂O, los dos gases de efecto invernadero más importantes después del CO₂, tienen un factor de caracterización de 28 y 265 (Potencial de Calentamiento Global), respectivamente, según el Panel Intergubernamental por el Cambio Climático – IPCC (IPCC, 2013), lo que implica un elevado aporte al calentamiento global; 28 y 265 veces, respectivamente, más altos que el aporte del CO₂.

Se estima que el biogás contiene entre 50 y 60% de CH₄ (Naskeo Environment, s.f.). Al ocurrir la combustión del metano, este reacciona con el oxígeno y se produce CO₂, agua (H₂O) y calor. A este proceso se le denomina pirólisis oxidativa, y ayuda a reducir considerablemente el aporte al cambio climático, ya que como se mencionó anteriormente, el CH₄ tiene un potencial de calentamiento global 28 veces más grande que el CO₂ (Quesada et al., 2007).

Asimismo, diversos autores consideran que es imperativo tener en cuenta que, debido a que la descomposición de los residuos se da mediante una tasa de decaimiento de primer orden (USEPA, 1998, 2005; IPCC, 2006), características geográficas y climáticas como la temperatura, la humedad y las lluvias, afectan el decaimiento de los residuos, en especial en zonas tropicales y de altas temperaturas, en las que las tasas de generación de metano son mayores (Visvanathan et al., 1999; Machado, 2009). Por lo tanto, los estudios que tengan diferentes condiciones geoclimáticas no deben ser comparados entre sí, por lo que es fundamental

diferenciar el tratamiento de residuos en zonas áridas, montañosas y tropicales, entre otras.

1.1.2. ACV como herramienta cuantitativa

Conforme a lo establecido en la Ley N° 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), no podrá iniciarse la ejecución de proyectos ni actividades de servicios y comercio y ninguna autoridad nacional, sectorial, regional o local podrá aprobarlas, autorizarlas, permitir las, concederlas o habilitarlas si no cuentan previamente con la certificación ambiental contenida en la Resolución expedida por la respectiva autoridad competente. La misma que está referida a la aprobación del instrumento de gestión ambiental o estudio ambiental.

En consecuencia, todo proyecto requiere de la elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para poder ser aprobado, ya sea detallado o no, dependiendo de su magnitud (MTC, 2017). Este documento técnico y administrativo se utiliza ya que proporciona una evaluación detallada de los impactos ambientales que ocasionará el proyecto en su entorno en caso de ser ejecutado. Todo ello con el fin de que la administración competente pueda aceptarlo, rechazarlo o modificarlo. Este se constituirá como una herramienta para la toma de decisiones enfocada a prevenir, mitigar y/o compensar los impactos significativos negativos y potenciar aquellos positivos que se identifiquen (Calidad Ambiental Cía. Ltda., 2013). La EIA sirve para la mitigación de impactos ambientales en la elaboración de proyectos de construcción hasta cierto punto, dado que su carácter cualitativo para la determinación de la viabilidad de un proyecto es limitado, tal como reconocen los autores Sánchez y Hacking, porque los detalles se centran en la aprobación del proyecto más no en los detalles técnicos de la cuantificación del impacto (Sánchez & Hacking, 2002). Esto hace necesaria la búsqueda de una herramienta cuantitativa, para así poder tener una información integral de los impactos ambientales generados y/o creados a partir de este tipo de proyectos.

Una herramienta que cumple con la característica de ser cuantitativa para aportar a la EIA en el control de proyectos es el ACV, el cual es una herramienta relativamente reciente cuya utilización ha comenzado a ser difundida a partir de la década de 1990 (Carlson, 2011). Esta herramienta sirve como una metodología ambiental que toma en cuenta todas las etapas de la producción de un determinado producto o servicio de principio a fin, desde la exploración y suministros de materiales y combustibles, a la producción y operación del producto o servicio investigado, hasta

su disposición/reciclaje (Pehnt, 2006). Esta herramienta está estandarizada y normada por la *International Organization for Standardization* (ISO) 14040. Esta normativa presenta 4 fases del ciclo de vida que generalmente están interrelacionadas. Estas fases son: definición del objetivo y alcance, etapa en la que se define el sistema a estudiar y la meta que se quiere lograr, inventario del ciclo de vida, en donde se definen y analizan todas las entradas y salidas del sistema a estudiar, la evaluación del impacto del ciclo de vida, en donde se evalúan con distintos métodos los inventarios de modo que se determine su impacto ambiental, y la interpretación de los resultados obtenidos en el ciclo de vida. Asimismo, todos estos procesos son iterativos y se retroalimentan mutuamente para lograr resultados más cercanos a la realidad. Por otro lado, el ACV permite elaborar estrategias medioambientales en todo tipo de procesos utilizando una perspectiva de ciclo de vida, lo cual significa identificar los principales flujos de materia y energía que se generan a lo largo de toda la vida útil de producto o servicio (ISO, 2006a; 2006b).

Finalmente, el ACV nos permite evaluar los distintos aspectos ambientales denominados categorías de impacto, tales como la emisión de GEI, uso de combustibles fósiles (hidrocarburos), consumo de energía, uso y agotamiento de recursos, acidificación, eutrofización, entre otros indicadores que serán aclarados más adelante.

1.1.2.1. ACV en Rellenos Sanitarios

En cuanto al ACV de un RS, existen resultados en la literatura en los que la mayor cantidad del impacto se da en la etapa de operación del relleno, entendiendo esta etapa como la disposición final de los residuos y la generación de biogás debido a la descomposición anaeróbica. En este contexto, la principal causa del impacto es la emisión directa de biogás a la atmósfera debido a su alto contenido en metano (Kirkeby et al., 2007; Manfredi et al., 2010a). A su vez, la alta producción de metano se debe principalmente a la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, los cuales son la principal fracción de los RSM. Estos alcanzan el 32% del total en los países pertenecientes a la OCDE, mientras que en América Latina – Caribe llegan a un 54% del total según el Banco Mundial (2012). Sin embargo, es necesario resaltar que si bien los gases generados en un RS tienen un alto impacto ambiental, este puede ser reducido al tratar el gas, ya sea ejerciendo una quema simple in-situ mediante chimeneas, o al realizar una recuperación energética del biogás, el cual a su vez reemplace el uso de combustibles fósiles (Cherubini et al., 2009; Manfredi et al. 2010a, 2010b; Starostina et al., 2015).

Por otro lado, diversos estudios señalan que las etapas de construcción, mantenimiento y cierre, solo contribuyen en un entre 5% y 10% a los impactos ambientales de los RRSS (Ménard et al., 2004; Manfredi et al., 2010b). Incluso en RRSS con bajos contenidos de residuos orgánicos, dichas etapas tuvieron una contribución no mayor al 15% del total de impactos (Manfredi et al., 2010a), por lo que es evidente que debido al largo tiempo de vida de un RS – se considera que las emisiones por parte de la descomposición de los residuos se dan a lo largo de 100 años – y a las grandes cantidades de desechos dispuestas en ellos, la etapa de uso es la fase primordial en ACV de RRSS.

Asimismo, diversos estudios consideran que los gases son colectados y monitoreados entre 15 y 30 años después del cierre del RS, según las regulaciones regionales de cada relleno (Camobreco et al., 1999; Ménard 2004; Manfredi et al., 2010a). Posteriormente a este momento, el porcentaje remanente de gas por generar es inferior al 20% del total (Manfredi et al., 2010a).

1.1.2.2. ACV en Perú

En el Perú a día de hoy no existe ningún estudio de ACV enfocado a sistemas de manejo de residuos sólidos publicado, y tampoco existen muchos estudios publicados de ACV en infraestructura. Los únicos dos se encuentran enfocados en el desarrollo de proyectos viales: el primero se concentra en la cuantificación de las emisiones de GEI para una carretera no pavimentada en la selva del Manu en Cusco y el segunda en la cuantificación ambiental para varias categorías de impacto en un tramo desértico de la carretera asfaltada Panamericana Sur (Larrea-Gallegos et al., 2016; Verán, 2017). Asimismo, en el Perú la mayoría de investigaciones para el desarrollo de la metodología del ACV se han enfocado en los últimos 6 años en los sectores agroindustrial, pesquero y energético (Avadí et al., 2014; Quispe et al., 2016; Vázquez-Rowe et al., 2015a, 2015b, 2017). Esta nueva metodología en el contexto local está siendo principalmente explotada por el grupo de investigación Red Peruana de Ciclo de Vida (RPCV), que pertenece a la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) la cual viene contribuyendo con la aplicación de esta metodología de cuantificación de impacto ambiental en los sectores energéticos y agroindustrial desde el año 2005, brindando buenos resultados y contribuyendo a la sostenibilidad en la generación de productos y proyectos en el entorno local.

1.2. Contexto Peruano en el Sector Residuos Sólidos

En el Perú, según el Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016 – 2024, en el año 2014 se generaron 7.5 Mt de residuos sólidos municipales, de los cuales solo el 44% fue dispuesto adecuadamente en un relleno sanitario, siendo el resto dispuesto de manera inapropiada en el medio ambiente, a través de botaderos informales u otras estrategias poco recomendables (MINAM, 2016). En el año 2012, como se mencionó anteriormente, se generaron 6.9 Mt de RSM. De estas, el 47% terminó en botaderos abiertos y solo el 21% fue destinado a un RS. En cuanto a las fracciones remanentes, 17% fue reciclado, 12% fue quemado a cielo abierto, 3% fue vertido en algún medio acuoso (mar, lago o río) y un 1% tuvo un destino desconocido (MINAM, 2013). Asimismo, se estima que el país necesita alrededor de 190 lugares de disposición final de residuos sólidos, pero para el mismo año solo contaba con 21 emplazamientos de esta naturaleza (MINAM, 2016). En la Figura 6 se puede observar la ubicación de los 21 rellenos sanitarios existentes a lo largo del país para el año 2015.

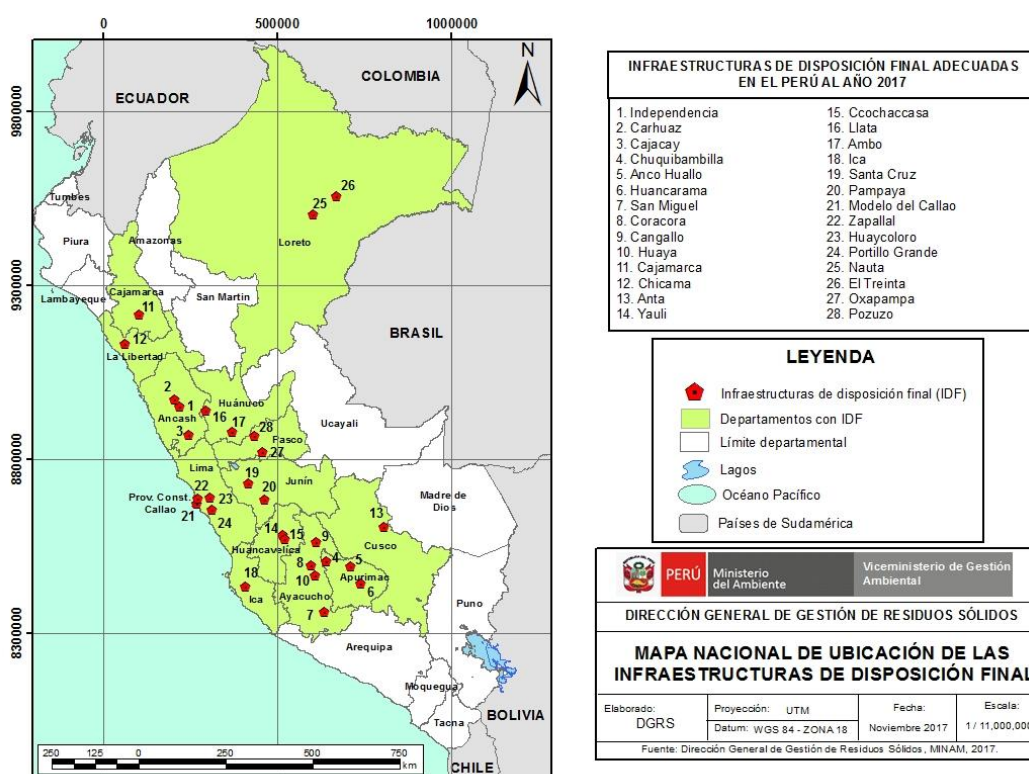


Figura 1. Ubicación de los rellenos sanitarios en el Perú. Fuente: Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos (MINAM, 2017)

Actualmente, el único relleno sanitario a nivel nacional con generación de energía es el relleno sanitario de Huaycoloro, ubicado en el extrarradio de la ciudad de Lima, el cual tiene una potencia instalada de 4.8 MW (Petramás, s.f.). Esto reduce considerablemente las emisiones de GEI del relleno sanitario e incluso puede llegar a evitarlas (Manfredi et al., 2009). En cuanto al resto de infraestructuras de disposición final, solo 8 cuentan con sistemas de quema de biogás, mientras que el resto de rellenos sanitarios emiten el gas directamente a la atmósfera (MINAM, 2013).

1.3. Marco Normativo y Legislativo del Sector Residuos Sólidos en el Perú

Dada la significancia de las emisiones en el sector, y teniendo en cuenta la situación actual y el déficit del mismo, se hará a continuación un recuento de las principales medidas, normas y políticas vigentes en cuanto al manejo de residuos sólidos:

El 23 de diciembre del año 2016, se promulgó la nueva **Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos**, mediante el Decreto Legislativo N°. 1278. Dicha Ley establece que los residuos deben manejarse de manera integral y sostenible, mediante la articulación, integración, compatibilización de las políticas, planes, programas, estrategias y acciones de los agentes intervinientes en la gestión y el manejo de los residuos sólidos, y empleando los lineamientos de política correspondientes. Finalmente, dicha ley expresa que la LGRRSS quedará derogada una vez se publique el Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (El Peruano, 2016).

Del mismo modo, en fecha 07 de octubre del año 2009, se aprobó la Ley N°. 29419, **Ley que Regula la Actividad de los Recicladores**, la misma que fue reglamentada el 03 de junio de 2010, a través del Decreto Supremo N°. 005-2010-MINAM. Ambos establecen el escenario normativo para la regulación de las actividades de los recicladores, dirigido al desarrollo social y laboral, estimulando la formalización y apoyando la mejora del manejo eficiente de los residuos sólidos. También definen al reciclaje como el proceso por el cual se reincorporan productos a procesos de transformación y manufactura, de modo que se reduzcan sus efectos contaminantes y generen beneficios, y al reciclador como todo aquel que recolecte selectivamente residuos sólidos no peligrosos para su reciclaje, segregación y comercialización (MINAM, 2013).

La **Resolución Ministerial No. 702-2008-MINSA** publicada el 12 de octubre de 2008, creó la Norma Técnica de Salud que regula el manejo selectivo de residuos sólidos por segregadores. Esta tiene como objetivo asegurar la gestión adecuada de

los residuos sólidos, como medida de prevención de peligros salubres, y protección y promoción de la calidad del medio ambiente y de la vida de las personas (MINAM, 2013). Además, se establecen medidas para la ejecución de actividades previas al reaprovechamiento que involucren manipulación, segregación, embalaje, recolección y transporte de residuos sólidos.

Asimismo, el 27 de junio de 2012 mediante el Decreto Supremo N° 001-2012-MINAM, se aprobó el **Reglamento Nacional para la Gestión y Manejo de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE)**. Dicho reglamento establece derechos y obligaciones para la adecuada gestión y manejo de los RAEE a través de las diversas fases de su administración: generación, recolección, transporte, acopio, tratamiento, reaprovechamiento y disposición final, implicando a los diferentes actores en la gestión responsable con el objetivo de mejorar las condiciones de vida, mitigar el impacto ambiental y en la salud de las personas (MINAM, 2012).

Adicionalmente, el 27 de julio de 2016 se aprobó el **Plan Nacional de Gestión de Residuos Sólidos 2016 - 2024** (PLANRES), el cual tiene como objetivo principal tanto la reducción de la producción de residuos sólidos a nivel nacional, como el control de los riesgos sanitarios y ambientales vinculados. Este plan por ende implica la ejecución de programas de educación ambiental y participación ciudadana, para así lograr el control y disminución per cápita (MINAM, 2016). Igualmente, el PLANRES busca incrementar la calidad y cobertura de los sistemas de recolección y valorización de los residuos sólidos generados.

El mencionado Plan contempla los principales ejes políticos y técnicos establecidos en la legislación peruana y sigue el camino establecido en el año 2000 con la LGRRSS. Este además añade estrategias y recomendaciones concertadas en diversos acuerdos mundiales relacionados al desarrollo sostenible, salud y fortalecimiento del comercio exterior en cuanto al manejo integral de residuos sólidos se refiere (MINAM, 2016).

Por último, el 18 de abril de 2018 se aprobó la Ley Marco sobre Cambio Climático, la cual establece los principios, enfoques y disposiciones generales para coordinar, gestionar y difundir las políticas públicas para lograr la adaptación y mitigación del Cambio Climático, de manera que se puedan cumplir los compromisos asumidos en el Acuerdo de París por el Estado ante la CMNUCC. Sin embargo, hasta el momento su reglamento no ha sido promulgado.

2. Materiales y Metodología

Respecto a la metodología que requiere el proyecto de investigación, se empleó el protocolo definido en las normas ISO 14040 y 14044, que detallan los pasos a seguir para el desarrollo de un ACV (ISO, 2006a, 2006b).

2.1. ACV y la Normativa ISO

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión ambiental que posibilita la descomposición de las distintas fases de la existencia de un producto, proceso o sistema, así mismo, ahondar con mayor profundidad en sus procesos de manufactura, uso y disposición. Esto permite, mediante diversas metodologías, determinar los probables impactos que puede tener cada etapa en el ambiente, y en consecuencia tomar decisiones menos lesivas para el mismo. Adicionalmente, el ACV está normado por la ISO en diversas normas. Estas establecen los procedimientos y consideraciones que se deben de tener en cuenta para realizar la investigación de manera adecuada.

En primer lugar, la norma ISO 14040: “Gestión Ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y marco de referencia” establece como se debe estructurar un estudio de esta naturaleza; estableciendo los principios en los que se basa un ACV y las fases que lo componen. Dichas fases son la definición del objetivo y el alcance del estudio, el análisis y estructuración del inventario, el análisis del impacto, y la fase de interpretación del estudio (Organización Internacional de la Normalización [ISO], 2006). Estas fases se pueden observar en la **Figura 2**.

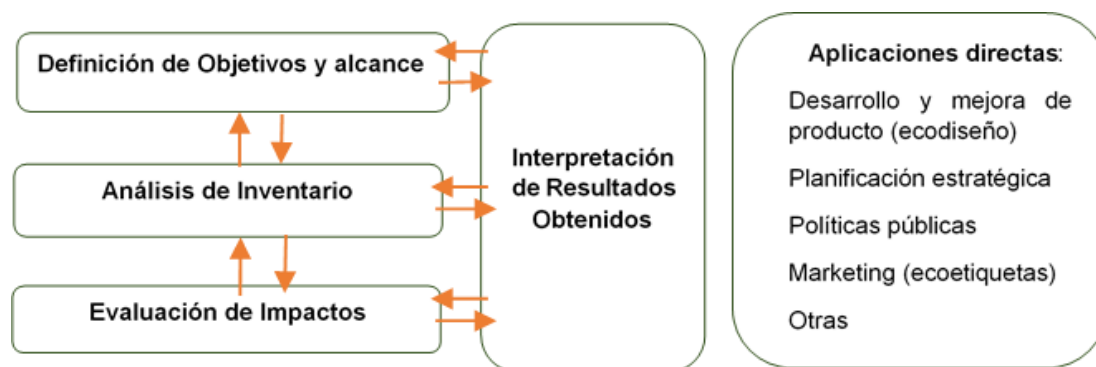


Figura 2: Fases de un Análisis de Ciclo de Vida.

Fuente: Adaptado de la Normativa ISO 14044, 2006b

2.2. Aplicación del ACV a Rellenos Sanitarios

La realización de este ACV orientado a RRSS, se aplica a la disposición de RSM en instalaciones construidas específicamente para dicho fin, en donde se toman

en consideración las siguientes etapas de estudio: construcción, mantenimiento, operación y el fin de vida. Para la elaboración de este estudio, se deben de considerar ciertos factores importantes como el tipo de RS, su ubicación geográfica – ya que como se mencionó previamente, las condiciones geoclimáticas afectan el desempeño del RS –, la capacidad de operación, el tipo de tratamiento, el proceso constructivo y las tecnologías empleadas en el proyecto, entre otros factores. Cada uno de estos factores hace que la realización de un estudio de ACV para este tipo de sistema sea de un nivel elevado y completo, puesto que contiene una gran cantidad de elementos. Debido a esto, se posee un gran volumen de materiales y procesos relacionados. Finalmente, es importante cuantificar tanto las cargas ambientales directas por el propio ciclo de vida del proyecto como los impactos indirectos.

En la actualidad existe un software de ACV especializado en sistemas de tratamiento de residuos, denominado EASETECH. Este software, desarrollado por la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU), permite modelar diversos tipos de tratamiento: ya sea desde sistemas simples y rudimentarios como los rellenos sanitarios, hasta incineración, biodegradación, reciclaje, o sistemas complejos en los cuales se emplean diversos métodos (Clavreul et al., 2014). EASETECH es la versión actualizada y mejorada del software EASEWASTE (Kirkeby et al., 2006), desarrollado de igual manera por la DTU, y el cual fue revisado, junto a otros softwares de ACV para sistemas de residuos sólidos, por Gentil y otros colegas en 2010, quienes lo catalogaron como uno de los softwares más completos en el rubro. Este software permite al usuario hacer un seguimiento detallado de todas las sustancias químicas presentes en los residuos a lo largo de todo el sistema de tratamiento. Con dicha función el software permite la identificación efectiva de los componentes de mayor impacto, y así se puedan optimizar los procesos.

2.3. Caso de Estudio: Relleno Sanitario Portillo Grande

El RS Portillo Grande se encuentra localizado en el distrito limeño de Lurín, al sur de la ciudad y percibe aproximadamente el 25% de los desechos de la metrópoli. Actualmente, dicho relleno recibe los RSM de 14 distritos de la ciudad, tanto aledaños a Lurín (Lima-Sur), como de Lima-Oeste y Lima-Este. Este inició sus operaciones en el año 1996, y en dicho año recibió 0.13 Mt de RSM, las cuales fueron dispuestas en su totalidad. Sin embargo, dicho RS ha aumentado su capacidad de recepción anual, a tal punto que en el año 2016 dispuso 0.72 Mt de RSM. En la **Tabla N°02** se muestran los contenidos rellenos anuales desde la apertura de la instalación.

Tabla N°02: Toneladas anuales de RSM dispuestas en el Relleno Sanitario Portillo Grande. Fuente: Innova Ambiental S.A.

Año	Toneladas dispuestas
1996	129,417
1997	407,922
1998	452,070
1999	474,989
2000	386,716
2001	301,041
2002	322,539
2003	482,770
2004	433,986
2005	432,567
2006	471,553
2007	477,019
2008	455,041
2009	497,852
2010	527,221
2011	556,874
2012	572,645
2013	718,455
2014	716,442
2015	808,677
2016	717,710

Si bien el RS es propiedad de la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML), actualmente está concesionado y es manejado por la empresa Innova Ambiental S.A., empresa que brinda a la ciudad de Lima servicios ambientales relacionados, así como también maneja otro de los 3 RRSS adicionales en el extrarradio de la ciudad, el RS El Zapallal.

El territorio comprendido por el RS Portillo Grande cuenta con una extensión de aproximadamente 80 hectáreas. En la **Figura 3.1** se muestra el área que comprende el terreno del RS. Es importante precisar que debido a que las cantidades dispuestas han variado a lo largo de los años y todavía se cuenta con una amplia extensión por realizar la disposición final de los residuos sólidos, no existen mayores proyecciones respecto al tiempo de vida restante del relleno; se estima que podría durar 10 años más. Además, por el momento tampoco se cuenta con ningún plan de cierre aprobado tanto por la institución administradora como por la MML. Asimismo, en este RS se disponen cerca de 2000 toneladas de RSM al día provenientes de las distintas municipalidades. Por otro lado, dentro de las inmediaciones del relleno está prohibido el acceso a recicladores informales, por lo que su presencia es nula. En cuanto a la caracterización y segregación de los residuos, esta es realizada en las comunas

anualmente, por lo que no existe ningún plan de caracterización o segregación dentro del relleno.

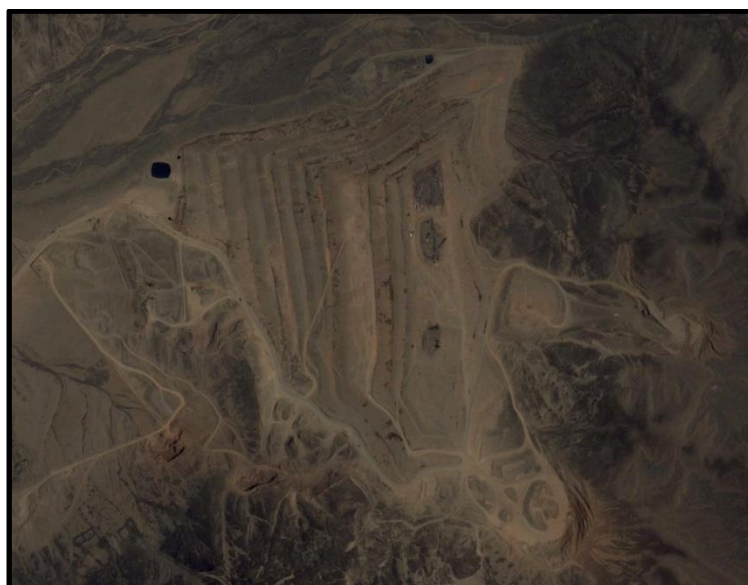


Figura 3.1: Vista satelital del Relleno Sanitario Portillo Grande y sus inmediaciones. Fuente: Image © 2017 DigitalGlobe.

Asimismo, es crucial resaltar que debido a la localización desértica del relleno, las características geoclimáticas áridas de este son sustancialmente diferentes a las de los 2 otros rellenos estudiados: la temperatura media anual es de 18.7 °C, con una precipitación media anual de 16 mm (Climate-Data, s.f.), por lo que, como se verá posteriormente, las tasas de descomposición de los residuos serán considerablemente bajas. A continuación, en las **Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6** se muestran a mayor detalle las instalaciones del RS Portillo Grande inspeccionadas por parte del grupo investigador durante una de las visitas.



Figura 3.2: Entrada al Relleno Sanitario Portillo Grande, balanza y oficinas.
Fuente: Archivo personal.



Figura 3.3: Pozo de lixiviados principal. Fuente: Archivo personal.



Figura 3.4: Vista lateral de una celda cerrada del relleno. Fuente: Archivo personal.



Figura 3.5: Vista superior del Relleno Sanitario desde la celda en operación. Fuente: Archivo personal.



Figura 3.6: Parte del grupo de investigadores en la celda actualmente abierta.

Fuente: Archivo personal.

2.4. Caso de Estudio: Lugar de disposición final de residuos sólidos Jaquira

El lugar de disposición final de residuos sólidos de la ciudad del Cusco, denominado Jaquira o Haquira, inició sus operaciones en el año 2001. Está situado a 7 km de la ciudad del Cusco y a una altitud de 3997 msnm. En un principio el complejo de disposición final se inició como botadero a cielo abierto, el cual generó diversos problemas ambientales a las comunidades de la zona, pero en el año 2015 la actual gestión de la Municipalidad Provincial del Cusco (MPC) abordó el problema clausurando el botadero con el objetivo de cumplir los más exigentes criterios legales y ambientales, mediante el uso de tecnologías sofisticadas y planes elaborados. Dicho botadero cerrado contiene cerca de 1.5 Mt de RSM. Adicionalmente, se acondicionó un nuevo terreno adyacente para la disposición final de los residuos sólidos, esta vez con todos los requerimientos ingenieriles necesarios de un RS moderno y para un adecuado manejo de residuos, es decir, con capas impermeabilizantes y de recubrimiento, estructuración de las celdas, canales de evacuación de lixiviados y sistemas especiales de escorrentía para las lluvias, de modo que no se mezclen con los lixiviados, y chimeneas de evacuación del biogás. La construcción se inició en el año 2015 y culminó en el año 2016. Se estima que este RS recibirá RSM por un tiempo total estimado de 8 años, y luego será clausurado. En la actualidad, este recibe alrededor de 380 toneladas de RSM diarias. Por otro lado, la entidad operadora del lugar de disposición final tiene planeada la implementación a corto plazo de sistemas de recuperación de energía y de tratamiento de lixiviados, para así mejorar el manejo de los residuos. Asimismo, la MPC manejará y monitoreará el lugar de disposición final

hasta 30 años después del cierre para la obtención adecuada del biogás, y para el correcto manejo del relleno.

Es importante destacar que debido a su localización, las características geoclimáticas de este lugar de disposición final son sustancialmente diferentes a las de los 2 otros rellenos estudiados: la temperatura media anual es de 11.2 °C, y percibe una precipitación media anual de 693 mm (Climate-Data, s.f.), por lo que, como se verá posteriormente, las tasas de descomposición de los residuos no serán tan altas. A continuación, en la **Figura 4.1**, se puede ver el territorio comprendido por el lugar de disposición final de Jaquira, el cual abarca un área de 9.5 hectáreas.



Figura 4.1: Vista satelital del lugar de disposición final de residuos sólidos Jaquira y sus inmediaciones. Fuente: Image © 2017 CNES / Airbus.

A continuación, en las **Figuras 4.2 y 4.3** se muestran las instalaciones del lugar de disposición final Jaquira inspeccionadas por parte del grupo investigador durante una de las visitas.



Figura 4.2: Entrada del lugar de disposición final Jaquira y sus oficinas. Fuente: Archivo personal.



Figura 4.3: Celdas cerradas del lugar de disposición final Jaquira. Fuente: Archivo personal.

2.5. Caso de Estudio: Relleno Sanitario Nauta

El RS Nauta está ubicado a 6 km de la ciudad de Nauta, en la Provincia de Loreto – Nauta, en la región amazónica de Loreto. Asimismo, se encuentra a una distancia de 5 km del río Marañón, y a 14 km de donde este se une con el río Ucayali para formar el río Amazonas. Este relleno entró en operación en el año 2012 como parte del proyecto Araucaria XXI Nauta, cofinanciado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) y el MINAM, es operado por la Municipalidad Provincial de Loreto – Nauta (MPLN), y se estima que tiene un tiempo de vida de 12 años de relleno, y 20 años de monitoreo adicionales. El proyecto cuenta con planes educativos para la población y de capacitación para las partes involucradas en él. Asimismo, en las instalaciones del RS, que cuentan con un área de aproximadamente 2 Ha, se realiza la caracterización y segregación de lo relleno, el reciclado de inorgánicos y el compostaje de residuos orgánicos. Actualmente, el relleno cuenta con 1 celda concluida y sellada y en la cual se ha reforestado con especies autóctonas de la zona, una celda en operación, en la cual se vienen disponiendo los residuos, y 1 celda por abrir. El emplazamiento inició operaciones recibiendo menos de 10 toneladas de RSM al día, y en la actualidad recibe cerca de 17 ton/día. Por otro lado, no está en los planes de la entidad operadora quemar el biogás colectado o recuperar energía en base a él debido a razones presupuestales. En la **Figura 5.1** se muestra una vista satelital de la zona donde se ubica el RS Nauta.



Figura 5.1: Vista satelital del Relleno Sanitario Nauta y su zona circundante. Fuente: Image © 2017 DigitalGlobe.

Adicionalmente, en las **Figuras 5.2, 5.3, 5.4, y 5.5** se pueden observar las instalaciones del RS Nauta inspeccionadas por parte del grupo investigador durante una de las visitas.



Figura 5.2: Celda cerrada y en proceso de reforestación del RS Nauta. Fuente: Archivo personal



Figura 5.3: Planta de compostaje del RS Nauta. Fuente: Archivo personal



Figura 5.4: Celda actualmente abierta del RS Nauta. Fuente: Archivo personal



Figura 5.5: Parte del grupo investigador junto a la celda abierta del RS. Fuente: Archivo personal

Es importante destacar las características geoclimáticas de la zona, ya que en la zona aledaña a la ciudad de Nauta se registran anualmente precipitaciones de 2448 mm y temperaturas medias anuales de 26.6°C (Climate-Data, s.f.), por lo que los ratios de descomposición de los residuos son considerablemente más elevados que en los casos previamente mencionados.

3. Aplicación del ACV a los casos de estudio

La aplicación del ACV a los RRSS se dividió en las 4 fases de desarrollo de la metodología ISO 14040 y 14044 previamente mencionadas. Se enfocó el estudio a la disposición final de los residuos en los RRSS, así como los procesos que experimentan luego de ser dispuestos en los RRSS, como la descomposición anaeróbica y la generación de los lixiviados. Asimismo, se cuantificó la cantidad

materiales y flujos energéticos utilizados en el desarrollo del ciclo de vida del proyecto para poder obtener impactos ambientales más certeros y cercanos a la realidad.

3.1. Objetivo y Alcance

El objetivo principal de la investigación es la elaboración y validación del inventario de ciclo de vida (ICV) de los procesos unitarios para un RS en Perú. Sin embargo, dado que en Perú se identificaron 3 principales regiones geoclimáticas principales, con características netamente distintas entre sí – la zona costera árida y desértica, la región andina fría y húmeda, y la zona tropical amazónica. Se decidió inventariar RRSS representativos para cada región, ya que, como se mencionó previamente, el desempeño de la descomposición anaeróbica en cada una es considerablemente variable. Se tomó en consideración todos los flujos de materiales y energía generados durante las etapas de desarrollo del proyecto: construcción, mantenimiento, operación y fin de vida del RS. La fase preliminar consistió en el planeamiento del enfoque y de los límites del estudio. El nivel de detalle y la profundidad en la recolección realizada en cada una de las etapas mencionadas anteriormente, dependió del tema y del uso que se pretendió dar al estudio (ISO, 2006b).

El destinatario de los resultados de este estudio se dividió en tres sectores. En primera instancia, los resultados de este informe son de importancia para el SRRSS orientado a la valorización y disposición de los residuos al nivel de las partes involucradas en ello. Por otro lado, los resultados de informe son relevantes a nivel de políticas públicas tanto a nivel nacional como internacional; en cuanto a las políticas públicas nacionales el estudio es significativo para los ministerios relacionados con el saneamiento y el manejo ambiental, como el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento (MVCS), y el MINAM. Para este último, los resultados obtenidos en este estudio son de relevancia puesto que aportan al cumplimiento de la cuantificación de GEI en un sector importante del país, aportando de forma directa a los objetivos propuestos en el Acuerdo de París, en el cual el Perú se ha comprometido a partir de la propuesta de las NDC a cumplir con reducir en un 30% las emisiones de GEIs respecto a las proyectadas para el 2030 (MINAM, 2015). Por último, este informe es de utilidad para la comunidad científica internacional de ACV debido a que es la primera vez que se aplica este tipo de estudios para RRSS en el Perú.

Para el desarrollo del proyecto se consideraron las siguientes características de los RRSS: preparación del terreno (remoción de la cobertura vegetal y deforestación en caso que hubiere), movimiento de tierras, construcción de las celdas e

instalaciones, disposición de los residuos (y su caracterización según localidad), sistemas de colección de lixiviados, sistemas de colección y tratamiento de gases, sistemas energéticos como grupos electrógenos, y la maquinaria utilizada en los emplazamientos (camiones, tractores, excavadoras entre otros). No se valoraron los elementos que se consideren fuera de los límites de la investigación como el transporte de los residuos hacia los RRSS, las obras aledañas, carreteras, campamentos de personal, transporte de personal en la etapa de construcción, entre otros. Además, aquellos materiales que por su peso, no son significativos con respecto al peso total de los materiales utilizados en el proyecto. Adicionalmente, no se consideraron los materiales de bajo valor contaminante.

3.1.1. Función y Unidad Funcional

Para poder definir la unidad funcional (UF), primero debe definirse la función del sistema. Todo sistema tiene una función principal en base a la cual giran todas sus actividades. En el caso de los sistemas de valorización de RSM, la función es el tratamiento y valorización de estos. Por ejemplo, si se hablase de una planta de incineración, la función sería la incineración de los RSM, y todas las actividades se gestarían en relación a esta. Por ende, en un RS, la función sería la disposición final de los RSM, y todas las actividades que se lleven a cabo en este funcionarían en torno a esta actividad.

La UF, como la define la ISO 14040 (2006a), es la “performance cuantificada de un sistema productivo para ser utilizado como unidad de referencia”, y es la unidad básica respecto a la que todos los impactos ambientales son asignados y referidos. La UF es un concepto metodológico importante a tener en mente, ya que permite que los resultados sean más fácilmente comprendidos y comparados respecto al flujo de referencia (Laurent et al., 2014b). En el mundo de ACV de los residuos sólidos es una práctica común el considerar los residuos como “*zero-burden*”, lo cual implica que no se tomen en cuenta los impactos *upstream* de los residuos. Esto se debe a que las evaluaciones están enfocadas en determinar los impactos ambientales de los distintos tipos de tratamiento de los residuos en lugar del impacto específico del ciclo de producción de cada fracción contenida, debido a que los productos ahora residuales fueron creados con un propósito, y ya han sido empleados para tal fin.

Debido a que la composición de los residuos varía ampliamente según las distintas regiones geoclimáticas, cada zona, representada en cada uno de los 3 RRSS, tuvo una distinta UF teniendo en cuenta los diferentes residuos manejados. En el caso del RS Portillo Grande, la UF fue “1 tonelada de RSM dispuesta en el RS

Portillo Grande” (teniendo en consideración que dicha tonelada fue generada en Lima). De manera similar, la UF del lugar de disposición final Jaquira fue de “1 tonelada de RSM dispuesta en el lugar de disposición final Jaquira” (considerando que la tonelada fue generada en la ciudad de Cusco). Por último, en el caso del RS Nauta, la UF fue de “1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta”, siendo dicha tonelada generada en Nauta. Además, en los 3 casos se considera que el impacto es medido y generado a lo largo de 100 años desde que se dispone el RSM en cada RS. Asimismo, es imperativo señalar que se fija la UF como una tonelada dispuesta y no tonelada recolectada o transportada, debido a que como en las diversas instalaciones se realizan procesos de valorización adicionales a la disposición final, como la segregación o el compostaje, el total de los residuos recolectados no llegan a ser dispuestos en el RS.

3.1.2. Límites del Sistema

Los datos y resultados obtenidos a lo largo de la investigación fueron contrastados con normas y datos presentados en la literatura por diversos autores. Con el objetivo de tener una buena calidad de datos y resultados, fue una prioridad reducir los límites del sistema a un nivel conveniente y con un alcance moderado, para poder realizar la investigación de una forma específica. Los límites del sistema se dividieron en la ecósfera y la tecnósfera.

Ecósfera: Ecosistema planetario, formado por la atmósfera, la geósfera, la hidrosfera y la biosfera. Se consideran para la ecósfera aquellas entradas provenientes de la propia naturaleza y las salidas que van directo hacia la atmósfera, las aguas oceánicas, las aguas terrestres o el suelo.

Tecnósfera: Es el componente de la tierra formado por todos los productos generados por el ser humano, siendo en esta investigación, las entradas (combustibles y energía utilizada) y las salidas (propio producto o proyecto que consumió las materias primas) que ya tuvieron un proceso previo por parte de actividades antrópicas.

En la investigación realizada, los límites abarcaron la obtención de materiales, el proceso constructivo de cada RS, el transporte y abastecimiento de materiales, el consumo energético a lo largo de 3 etapas principales analizadas – la construcción, la operación y el cierre del RS –. Además, dependiendo de cada relleno se detectaron procesos menores adicionales en cada etapa, como la deforestación, el compostaje y la reforestación, entre otros. Asimismo, se tomó en consideración como salida la liberación de los contaminantes emitidos en el proceso del ciclo de vida de las

instalaciones. Por otro lado, no se incluyeron las fases de transporte de los RSM hacia los RRSS. Los límites del sistema y los procesos abarcados pueden verse en mayor detalle en la **Figura 6**.

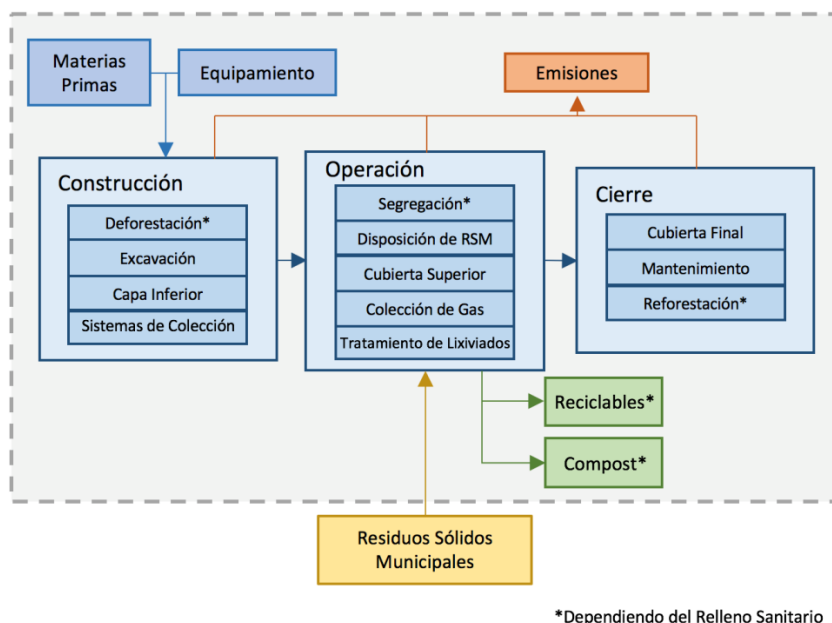


Figura 6: Límites de los sistemas a analizar. Fuente: Adaptación personal

3.1.3. Recolección de Datos

Como se mencionó anteriormente, el proyecto se ha enfocado en inventariar RRSS en las 3 zonas geográficas mencionadas anteriormente. En cada una de dichas zonas se ha identificado un relleno sanitario representativo de cada realidad específica, y que además ha accedido a formar parte del proyecto y proporcionar la información necesaria. En el caso de la realidad de los rellenos en el desierto costero peruano, estos estarían representados por el RS Portillo Grande, ubicado en el distrito de Lurín, en Lima Metropolitana; la sierra andina estaría representada por el lugar de disposición final de Jaquira, perteneciente a la Municipalidad Provincial de la Ciudad de Cusco, y por último la situación de la selva amazónica se vería plasmada por el RS de la ciudad de Nauta.

3.1.3.1. Fuentes de Información Primaria

Para la correcta construcción de un ICV, es imperativo obtener información de fuentes primarias y visitar los rellenos sanitarios para adquirir nociones reales de lo que se quiere inventariar. Por ello, se ha obtenido acceso a los distintos rellenos

sanitarios que se encuentran actualmente en funcionamiento. A continuación, se detalla la información adquirida según cada caso.

3.1.3.1.1. Fuente de Información Primaria: Caso de estudio Portillo Grande

Se visitó el relleno sanitario de la Municipalidad Metropolitana de Lima, Portillo Grande, el cual es manejado en la actualidad por la empresa dedicada a la gestión de residuos Innova Ambiental. La empresa llenó el cuestionario entregado (presentado en el Anexo 1) y proporcionó planos, esquemas, volúmenes dispuestos desde el inicio de operación del relleno y maquinaria empleada para dicho fin, entre otros datos técnicos pertinentes. Esta información fue proporcionada por el Jefe Técnico de la empresa, Fernando Vargas, quien además quedó a disposición del equipo investigador para absolver cualquier duda que se pudiera presentar a lo largo del proyecto. Debido a que en dicho relleno no se realiza una caracterización de los residuos – se reciben residuos de diversas municipalidades de Lima – se obtuvo acceso a los diversos estudios de caracterización de los distritos aportantes al relleno de modo que se pueda tener un perfil adecuado de los residuos ingresantes al relleno, con la finalidad de tener una aproximación del tipo de residuos que ingresan a dicha infraestructura.

La información contenida en los planos fue base para la cuantificación de los materiales que lo constituyen, entre ellos principalmente la arcilla y materiales rocosos. Adicionalmente, se cuantificó la cantidad de maquinaria utilizada, el consumo de combustible en cada operación, los volúmenes de tierras removidos, y la construcción de vías dentro de las instalaciones. En la **Figura 7** se puede ver la celda abierta en el momento que se realizó la visita al RS.



Figura 7: Celda en operación del RS Portillo Grande. Fuente: Archivo personal

3.1.3.1.2. Fuente de Información Primaria: Caso de estudio Jaquira

Se contactó al Gerente de Medio Ambiente de la Municipalidad Provincial del Cusco, Percy Taco Palma, quien proporcionó todas las facilidades para poder realizar la visita al lugar de disposición final de Jaquira. La visita se realizó el viernes 9 de setiembre del 2017, y en ella se pudo inspeccionar tanto las instalaciones de segregación de la Municipalidad, como el de disposición final de Jaquira. Asimismo, se tuvo acceso a las especificaciones técnicas de la obra y a su alcance. Además, tanto Taco Palma como el Ingeniero residente del RS colaboraron activamente en el llenado del cuestionario proporcionado (ver Anexo 1). Se obtuvieron datos geoclimáticos (altitud, temperaturas, precipitaciones), la caracterización de los residuos, y los procesos que siguen a estos antes de ser dispuestos finalmente en el RS.

Si bien en la actualidad existen datos que no han sido proporcionados – el equipo investigador solo pudo revisar los planos y especificaciones técnicas de la infraestructura del emplazamiento, mas no fueron obtenidos para su procesamiento –, los contactos con la Municipalidad Provincial de Cusco y su Gerencia de Medio Ambiente se mantienen y estos serán proporcionados próximamente. En la **Figura 8** se puede observar la celda en operación en el momento que se realizó la visita.



Figura 8: Vista lateral de la celda en operación de Jaquira. Fuente: Archivo personal.

3.1.3.1.3. Fuente de Información Primaria: Caso de estudio Nauta

El relleno sanitario del distrito de Nauta, ubicado en la región amazónica de Loreto, fue visitado y estudiado. Las autoridades respectivas pudieron llenar el cuestionario entregado de manera satisfactoria, y quedaron a disposición de los investigadores para brindar datos adicionales en caso de ser necesarios. Además, en dicha visita se pudo tener acceso a información primaria de alta calidad y detalle de todas las etapas de planificación y operación del relleno: desde planos del relleno, datos técnicos y estudios de caracterización de los residuos hasta presupuestos y detalles de actividades secundarias de la instalación, como el compostaje. Asimismo, se pudo obtener la información geoclimática necesaria para el inventariado, como temperaturas y precipitaciones mensuales, y altitud, entre otros. En la **Figura 9** se puede observar la celda abierta en el momento que se realizó la visita.



Figura 9: Cargador frontal realizando labores de relleno en el RS Nauta.

Fuente: Archivo Personal

3.1.3.2. Información Secundaria

Como en toda creación de inventarios de ciclo de vida, no solo es necesaria la adquisición de información primaria, sino también de fuentes secundarias las cuales proporcionan información no disponible y de menor relevancia. En el caso particular del actual proyecto, se contó con diversas fuentes de información secundaria, las cuales serán descritas a continuación.

Para el flujo de materiales y residuos se utilizó el software EASETECH. Este incluye una amplia base de datos con diversos materiales residuales a los cuales se les ha realizado análisis químicos para determinar su composición. Estos materiales van desde botellas de plástico y vidrio, papeles, textiles, caucho y otros elementos procesados, hasta componentes orgánicos como comida basada en animales y plantas, maleza y vegetación de diversos tipos.

En el caso de los vehículos, maquinaria auxiliar y combustibles empleados se consideró la base de datos de Ecoinvent (Ecoinvent, s.f.), la cual ha sido catalogada como una de las bases de datos más completas en el rubro de materiales, maquinaria, infraestructura y producción (Stafford, Dias, Arroja, Labrincha y Hotza, 2016; Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán y Marrero, 2016). Para el uso de electricidad se consideró la matriz de producción eléctrica del Perú (SEIN), modelada y estudiada anteriormente por Vázquez-Rowe et al. (2015).

Por otro lado, debido a que la descomposición de los residuos sólidos siguen un modelo de degradación de primer orden (USEPA, 1998, 2005; IPCC, 2006), los residuos poseen un factor de decaimiento intrínseco (k) el cual puede variar según las condiciones climáticas en el cual se localicen. Dichos factores han sido medidos y definidos en estudios anteriores por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2011) y por el IPCC (2006) para diversas condiciones climáticas, dentro de las cuales están las estudiadas en este proyecto. Debido a la dificultad para medir y modelar dichos factores, serán empleados los mencionados anteriormente.

En caso de ser necesaria información secundaria adicional a la mencionada en el presente informe, esta será obtenida de artículos científicos publicados en revistas científicas revisadas por pares, reportes de agencias e instituciones gubernamentales e internacionales, como el Ministerio de Ambiente del Perú (MINAM), la USEPA, la Agencia Europea Ambiental (EEA) o el IPCC, o investigaciones realizadas previamente por los ejecutores de la presente investigación.

3.1.4. Suposiciones y Limitaciones

Debido a que por diversos motivos no siempre se pueden conocer todos los datos concernientes a los emplazamientos estudiados, se tuvieron que hacer diversas suposiciones para alcanzar un modelado adecuado. Si bien hay muchas suposiciones que son comunes para los 3 casos de estudio, existen algunas que se han dado de manera independiente para cada escenario. Asimismo, siempre existen restricciones

las que limitan ciertos aspectos del estudio. A continuación, se detallarán las suposiciones y limitaciones concernientes a cada caso de estudio.

3.1.4.1. Caso de estudio: Portillo Grande

Los supuestos fundamentales en el caso del RS Portillo Grande estuvieron vinculados a la composición de los residuos. Debido a que este emplazamiento recibe RSM de diversas comunas y entidades, realizando trabajos de segregación previos, y en el RS no se realiza ningún trabajo de segregación y caracterización, se tuvo que tomar como base la caracterización de cada municipio. Sin embargo, la entidad administradora si cuenta con la información de todas las instituciones que han aportado al RS, por lo que se pudo calcular la caracterización estimada del material relleno. Esto no solo fue una suposición, sino también una limitación, ya que la falta de información no permitió conocer al 100% lo que realmente es dispuesto en el RS.

Otro supuesto importante es el de los factores de descomposición de los residuos. En la actualidad la mayoría de estudios para determinar esta constante – la constante k mencionada anteriormente (ver acápite 3.1.3.2.) – han sido realizados en localidades del hemisferio norte en las que las condiciones geoclimáticas son meramente distintas. Es por ello que, debido a la complejidad del cálculo de este factor, el IPCC (2006) ha estimado valores para distintas condiciones geoclimáticas en base a diversos estudios realizados en todo el mundo. Sin embargo, estos factores están expresados en rangos variables y pueden estar sujetos a malinterpretaciones. El IPCC establece que para su correcta determinación y uso se los debe elegir en base a criterios ambientales como la temperatura media anual, el potencial de evapotranspiración de la zona y la precipitación media anual. Al haberse obtenido estos datos se pudo determinar que el RS Portillo Grande cumplía las condiciones de una zona “boreal y temperada, seca”. Por lo tanto, también se considera que la complejidad de la medición de los factores “ k ” para la descomposición de los residuos es una limitación que puede ser superada si se hiciesen investigaciones más profundas al respecto.

Adicionalmente, en cuanto a los vehículos, maquinaria pesada y otras obras de infraestructura adicionales se les consideró como elementos genéricos provenientes de la base de datos de Ecoinvent v3.3 (Ecoinvent, s.f.), ya que estudios previos señalan que los impactos por bienes capitales son menores al 10% y no es relevante inventariarlos en gran detalle, ya que sus impactos pueden llegar a ser insignificantes en comparación con los del tratamiento en sí de los residuos (Brogaard et al., 2013).

3.1.4.2. Caso de estudio: Jaquira

En el caso de Jaquira, si bien los representantes de la Municipalidad Provincial del Cusco llenaron el cuestionario con la mayoría de la información necesaria, y proporcionaron datos de importancia como especificaciones infraestructurales, porcentajes reciclados por parte de la comuna, y la composición de los residuos rellenos.

Por otro lado, de igual manera que con el RS Portillo Grande, en el lugar de disposición final Jaquira no se contó con los factores k específicos para la zona andina por falta de estudios previos, por lo que se tuvieron que emplear los valores otorgados por el IPCC (2006). En este caso, al contrastar los datos de temperatura media anual, potencial de evapotranspiración y precipitación media anual, se halló que la zona tenía características de lo que se denomina una zona “boreal y temperada, húmeda”. Por ende, al igual que con el RS Portillo Grande, se considera que la complejidad de la medición de los factores “ k ” para la descomposición de los residuos es una limitación que podría ser superada si se hiciesen investigaciones más profundas en el ámbito.

Similarmente a lo ocurrido en el RS costero, al conocerse el tipo de maquinaria empleada y los combustibles utilizados, fueron empleados los elementos existentes respectivos en la base de datos de Ecoinvent v3.3 (Ecoinvent, s.f.). Suposiciones y limitaciones adicionales podrían surgir en caso la información a entregar por parte de la Municipalidad Provincial del Cusco no sea adecuada y/o suficiente para el correcto desarrollo del presente estudio.

3.1.4.3. Caso de estudio: Nauta

La situación en el RS Nauta es similar a los casos anteriores en cuanto a los factores de descomposición de los residuos: debido a que no se cuenta con valores específicos realmente medidos en localidades de la selva amazónica, se emplearon aquellos proporcionados por el IPCC (2006). En esta oportunidad, al conocer las condiciones climáticas de Nauta se concluyó que la zona entraba a ser clasificada como “tropical, húmeda y mojada”. Sin embargo el IPCC especifica que los datos para regiones como esta poseen una incertidumbre mayor ya que no han sido directamente medidos, sino han sido derivadas de investigaciones sobre regiones templadas. Este factor es definitivamente una limitación importante para la construcción de inventarios de ciclo de vida relacionados a la descomposición de los residuos en zonas tropicales de gran importancia, como la Amazonía.

Asunciones adicionales incluyen el uso de elementos de maquinaria e infraestructura existentes en la base de datos de Ecoinvent v3.3 (Ecoinvent, s.f.),

como lo son los cargadores frontales, camiones de carga y otros componentes relacionados al consumo de cemento en la infraestructura existente en el relleno.

3.2. Inventario de Ciclo de Vida

La construcción del ICV consistió en la recolección de datos y cálculos para cuantificar las aportaciones y salidas de cada uno de los elementos (ISO, 2006a).

3.2.1. Inventario de Ciclo de Vida: Caso de estudio Portillo Grande

La información fue obtenida a partir de los planos, entrevistas estructuradas con el representante del área técnica de la empresa y técnicos encargados de la operación del RS. Además, se complementó la información a partir de información procedente de la base de datos Ecoinvent v3.3 (ver acápite **3.1.3.2.**).

3.2.1.1. Composición de los residuos

En el caso del RS Portillo Grande, si bien no se realiza ningún tipo de segregación o caracterización de los residuos rellenos, la entidad encargada de la operación del RS proporcionó un listado de la cantidad de RSM provenientes de distintas comunas. Asimismo, mediante la plataforma del Sistema de Gestión de Residuos Sólidos (SIGERSOL) del MINAM, en la cual todas las municipalidades del país reportan tanto la caracterización como el tipo de tratamiento que reciben los residuos, se pudo acceder a la composición de los residuos. Por ende, se pudo realizar un promedio ponderado de la composición de los residuos de todos los municipios aportantes al relleno, obteniendo así la caracterización estimada de los RSM rellenos. Dicha caracterización se muestra en la **Tabla N°03**.

Tabla N°03: Composición estimada de los residuos sólidos municipales rellenos en el RS Portillo Grande. Fuente: Adaptación de SIGERSOL (MINAM, 2015):

Fracciones	Porcentaje (%)
Materia orgánica	52.25
Madera, follaje	1.68
Papel	5.68
Cartón	3.61
Vidrio	3.79
PET	2.76
Plástico Duro	2.50
Bolsas	3.52
Tecnopor y similares	0.88
Metales	2.46
Telas, textiles	1.88
Caucho, cuero y jebe	0.75
Pilas	0.11
Restos de medicinas, focos	2.78
Residuos sanitarios	8.42
Papel periódico	3.87
Material Inerte	2.36
Ceniza, porcelana y otros	0.65
Tetrapak	0.06

3.2.1.2. Infraestructura y bienes capitales

En cuanto a la infraestructura del relleno, este cuenta con una balanza para el pesaje de los camiones entrantes con una capacidad máxima de 80 toneladas, y existen pequeñas oficinas prefabricadas. Respecto a las vías de circulación, son vías no pavimentadas (afirmadas), y tienen una longitud total de 5 km. Entre las instalaciones, además, se cuenta con 4 pozos de lixiviados con una capacidad total de 5640 m³. El relleno está conformado por 12 plataformas trapezoidales-piramidales de material relleno, en las que, debido a su naturaleza piramidal, la cantidad de celdas varía. Actualmente existen 61 celdas cerradas y 1 celda en operación. Además, se tiene proyectado que haya 18 plataformas en total, en las que cabrán alrededor de 20 celdas adicionales. Las celdas son de 5 m de alto, 75 m de ancho y 400 m de largo. Adicionalmente, el talud de cada plataforma es de 30°. Respecto a la cobertura de las celdas, esta es realizada con material arcilloso proveniente de una cantera dentro de

las inmediaciones del terreno, a aproximadamente 800 metros de la celda actualmente abierta. Además, la cobertura realizada tiene un espesor de 20 cm.

La cuantificación y adaptación por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Portillo Grande) de toda la información previamente mencionada se puede ver a continuación en la **Tabla N°04**.

Tabla N°04: Cuantificación parcial de los materiales empleados en la construcción y mantenimiento del RS adaptados a la UF.

Material	Unidad	Cantidad por Tonelada Rellenada
Concreto	m3	9.67E-09
Acero	kg	1.57E-06
Movimiento de tierras	m3	6.05E-05
Diésel	l	8.31E-04

3.2.1.3. Descomposición de los residuos

Como se mencionó en capítulos anteriores, la descomposición de los residuos se da mediante una tasa de decaimiento de primer orden (USEPA, 1998, 2005; IPCC, 2006) (ver capítulos **1.1.1.** y **3.1.3.2.**). Una reacción de primer orden depende linealmente de un solo reactivo. En este caso, la descomposición del total de compuestos se da mediante la suma agregada del proceso de descomposición de cada fracción existente en los deshechos rellenos. La ecuación por la que se rige este proceso es la siguiente:

$$[A] = [A]_0 e^{-kt},$$

Donde $[A]$ es la concentración del reactivo en el tiempo “ t ”, $[A]_0$ es la composición del reactivo en el tiempo 0 (momento en el que se inicia la descomposición), y “ k ” es la constante de decaimiento de primer orden de los residuos. Como se mencionó con anterioridad (ver capítulo **3.1.4.1.**), la determinación de estos factores involucra el desarrollo investigaciones de gran profundidad que no han podido desarrollarse al momento para las locaciones estudiadas, por lo que se utilizan los empleados por el IPCC (2006). El IPCC otorga los valores en un rango, con valores inferiores, medios y superiores. A continuación, en la **Tabla N°05** se muestran los factores de descomposición de los residuos para la composición dispuesta determinada para el RS Portillo Grande.

Tabla N°05: Factores de descomposición de los residuos por fracción rellena en el RS Portillo Grande. Fuente: Adaptación de la Guía del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (2006).

Fracción	k _{inferior}	k _{medio}	k _{superior}
Materia orgánica	0.05	0.06	0.08
Madera, follaje	0.01	0.02	0.03
Papel	0.03	0.04	0.05
Cartón	0.03	0.04	0.05
Vidrio ³	-	-	-
PET ³	-	-	-
Plástico duro ³	-	-	-
Bolsas ³	-	-	-
Tecnopor y similares ³	-	-	-
Metales ³	-	-	-
Telas, textiles	0.01	0.02	0.03
Caucho, cuero y jebe ³	-	-	-
Pilas	0.01	0.02	0.03
Restos de medicinas, focos	0.03	0.04	0.05
Residuos sanitarios	0.03	0.04	0.05
Papel periódico	0.03	0.04	0.05
Material Inerte	0.01	0.02	0.03
Ceniza, porcelana y otros ³	-	-	-
Tetrapak	0.03	0.04	0.05

³ Dado que estas fracciones no contienen carbono biodegradable en su composición química, se considera que no se degradan generando biogás (Olesen et al., 2014).

3.2.1.4. Generación y tratamiento de biogás

La generación del biogás se da en base a la descomposición de los residuos explicada en el capítulo anterior (ver acápite **3.2.1.3.**). Cuando los residuos son descompuestos anaeróbicamente se genera fundamentalmente CH₄ y CO₂ debido a las condiciones anaeróbicas existentes en el RS, tal como se explicó anteriormente (ver acápite **1.1.1.**). Adicionalmente, en el biogás son emitidas diversas sustancias en menores composiciones, las cuales han sido investigadas y medidas por diferentes autores. A continuación, en la **Tabla N°06** se muestran las sustancias, su concentración y los autores que investigaron dichos fenómenos.

Tabla N°06: Sustancias adicionales presentes en el biogás. Fuente: Adaptación del Manual de modelado de rellenos sanitarios de EASETECH (Olesen et al., 2014).

Sustancia	Concentración (g/Nm ³ biogás)	Referencia
Arsénico (As)	3.0E-5	Niskanen et al. (2009)
Cadmio (Cd)	2.0E-6	Niskanen et al. (2009)
Mercurio (Hg)	1.0E-6	US EPA (2008)
Níquel (Ni)	8.0E-4	Niskanen et al. (2009)
Plomo (Pb)	2.0E-8	Feldmann y Hirner (1995)
Antimonio (Sb)	4.8E-5	Feldmann y Hirner (1995)
Estaño (Sn)	2.2E-5	Feldmann y Hirner (1995)
Monóxido de carbono	2.8E-2	US EPA (2008)
Sulfuro de hidrógeno	4.0E-2	US EPA (2008)
Compuestos orgánicos volátiles (VOC)	3.0E-1	Olesen et al. (2014)
Cloruro de vinilo	4.0E-3	US EPA (2008)
Dicloroetileno (DCE)	4.5E-2	US EPA (2008)
Tricloroetileno (TPE)	4.0E-3	US EPA (2008)
Percloroetileno (PCE)	1.0E-2	US EPA (2008)
Benceno	8.0E-3	US EPA (2008)
Clorobenceno	2.0E-3	US EPA (2008)
Diclorobenceno	6.0E-3	US EPA (2008)
Triclorobenceno	4.0E-5	US EPA (2008)
Etilbenceno	2.0E-2	US EPA (2008)
Propilbenceno	2.0E-3	US EPA (2008)
Cloruro de etilo	1.0E-2	US EPA (2008)
Clorometano	3.0E-4	US EPA (2008)
Diclorometano	2.0E-2	US EPA (2008)
Cloroformo	3.0E-4	US EPA (2008)
Tetracloruro de carbono	5.0E-5	US EPA (2008)
Xyleno	4.0E-2	US EPA (2008)
Tolueno	1.1E-1	US EPA (2008)
Fenol	1.4E-3	US EPA (2008)
Naftaleno	6.0E-4	US EPA (2008)
Clorofluorocarbono (CFC) 11	1.0E-3	US EPA (2008)
CFC 12	5.0E-3	US EPA (2008)
CFC 113	5.0E-4	US EPA (2008)
Hidroclorofluorocarbono (HCFC) 21	1.0E-2	US EPA (2008)
HCFC 22	3.0E-3	US EPA (2008)

Luego que los gases son generados, previamente a ser emitidos, son tratados por combustión directa en chimeneas en las que son recolectados. En este proceso de combustión diversos gases como el CH₄ son descompuestos en CO₂ y H₂O. A continuación, en la **Tabla N°07** se muestra la eficiencia con la que estas sustancias se oxidan al ser quemados según la literatura estudiada.

Tabla N°07: Eficiencia de oxidación de las sustancias presentes en el biogás debido a la combustión. Fuente: Adaptación del Manual de modelado de rellenos sanitarios de EASETECH (Olesen et al., 2014).

Sustancia	Eficiencia de oxidación		Referencia
	Emisión directa (%)	Combustión (%)	
Metano	0	99	EREF ⁴ (1998)
VOC	0	97.7	US EPA (2008)
Mercurio	0	0	US EPA (2008)
Benceno	0	99.7	EREF ⁴ (1998)
Tolueno	0	99.7	EREF ⁴ (1998)
Xyleno	0	99.7	EREF ⁴ (1998)
Cloruro de vinilo	0	98	EREF ⁴ (1998)
TCE	0	98	EREF ⁴ (1998)
PCE	0	98	EREF ⁴ (1998)
Diclorometano	0	98	EREF ⁴ (1998)
Cloroformo	0	98	EREF ⁴ (1998)
Tetracloruro de carbono	0	98	EREF ⁴ (1998)
Dicloroetano	0	98	EREF ⁴ (1998)

⁴ Environmental Research and Education Foundation (EREF)

Adicionalmente, existen otras sustancias que son emitidas directamente a la atmósfera debido a que no son completamente combustiónados. Estas se muestran en la **Tabla N°08**.

Tabla N°08: Concentración de sustancias emitidas directamente a la atmósfera según el tipo de tratamiento. Fuente: Adaptación del Manual de modelado de rellenos sanitarios de EASETECH (Olesen et al., 2014).

Sustancia	Emisión directa (g/Nm ³ CH ₄)	Combustión (g/Nm ³ CH ₄)	Referencia
Monóxido de carbono	-	0.74	US EPA (2008)
Óxidos de nitrógeno	-	0.62	US EPA (2008)
Dióxido de azufre	-	0.17	US EPA (2008)
VOC	0.23	0.02	DEFRA ⁵ (2004)
Material particulado	-	0.24	US EPA (2008)
Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH)	-	0.001	Olesen et al. (2014)
Dioxinas	-	6.7E-9	US EPA (2008)
Bifenilo policlorado (PCB)	-	0.001	Olesen et al. (2014)
Metano	682	3.64	DEFRA ⁵ (2004)
Arsénico	-	-	DEFRA ⁵ (2004)
Cadmio	-	-	DEFRA ⁵ (2004)
Mercurio	-	-	DEFRA ⁵ (2004)
Níquel	-	-	DEFRA ⁵ (2004)
Cloruro de hidrógeno	0.002	0.16	DEFRA ⁵ (2004)
Fluoruro de hidrógeno	4.0E-4	0.04	DEFRA ⁵ (2004)
PCE	0.03	7.3E-5	DEFRA ⁵ (2004)

⁵ Department for Environmental, Food and Rural Affairs of England.

Por último, existe un porcentaje del biogás producido que no llega a ser quemado en las chimeneas, pero que es oxidado de igual modo en la superficie del relleno. En la **Tabla N°09** se muestran las eficiencias de oxidación superficial de los gases.

Tabla N°09: Eficiencia de oxidación superficial de componentes del biogás en un RS.
Fuente: Adaptación del Manual de modelado de rellenos sanitarios de EASETECH (Olesen et al., 2014).

Substancia	Ratio de oxidación (%)	Referencia
Sulfuro de hidrógeno	20	Manfredi y Christensen (2009)
VOC	60	Manfredi y Christensen (2009)
Cloruro de vinilo	74	Scheutz y Kjeldsen (2005)
DCE	65	Olesen et al. (2014)
TCE	57	Scheutz y Kjeldsen (2005)
PCE	10	Olesen et al. (2014)
Benceno	26	Manfredi y Christensen (2009)
Propilbenceno	20	Scheutz y Kjeldsen (2005)
Diclorometano	75	Scheutz y Kjeldsen (2005)
Cloroformo	61	Scheutz y Kjeldsen (2005)
Tetracloruro de carbono	88	Scheutz y Kjeldsen (2005)
Tolueno	44	Scheutz y Kjeldsen (2005)
CFC 11	90	Scheutz y Kjeldsen (2005)
CFC 12	30	Scheutz y Kjeldsen (2005)
CFC 113	0	Olesen et al. (2014)
HCFC 21	60	Scheutz y Kjeldsen (2005)
HCFC 22	40	Scheutz y Kjeldsen (2005)

3.2.1.5. Generación y tratamiento de lixiviados

La generación de los lixiviados se da por la percolación de los líquidos y la humedad contenida en los RSM. Estos líquidos arrastran consigo parte del contenido de los sólidos dispuestos, por lo que su composición química depende también de la de los RSM. Asimismo, la generación de los lixiviados también es afectada por la velocidad con la que se descomponen los residuos y la intensidad de las precipitaciones de la zona (Lema et al., 1988).

El RS está diseñado para que los lixiviados percolen a través de sus capas superiores y lleguen así a las inferiores, donde se encuentran los sistemas de colección. Sin embargo, estas capas inferiores deben estar debidamente impermeabilizadas para que los lixiviados no se filtren a la napa freática y la contaminen. En el RS Portillo Grande existen canales impermeabilizados de arcilla los cuales transportan los lixiviados a pozas provisionales. En ellas, se acumulan los lixiviados hasta determinados niveles y luego son bombeados, con la ayuda de

motobombas, a pozos impermeabilizados tanto con capas inferiores de arcilla como con geomembranas.

Luego de que se hayan bombeado los lixiviados a los pozos, estos son recolectados con la ayuda de camiones cisterna y transportados a la cima de la celda cerrada previamente. Una vez en ella, los lixiviados son reinyectados al relleno. Al llevar a cabo esta recirculación de lixiviados se acelera la descomposición de los residuos ya rellenos.

A pesar de que se tiene identificado el flujo de los lixiviados, en este estudio no se pudo obtener su composición química, por lo que esta ha sido modelada en base a las fracciones dispuestas en el RS y a la bibliografía. Según diversos autores, la composición de los lixiviados de un RS varía con el tiempo, por lo que se la modeló en diferentes etapas. La **Tabla N°10** muestra los valores empleados por Olesen y Damgaard (2014) en el software EASETECH, los cuales están basados en estudios realizados por Ehrig (1988), Christensen et al. (2001), Kjeldsen y Christoffersen (2001), Öman y Junestedt (2008), Reinhart (1998), Robinson y Knox (2003), EREF (1997), Renou (2008), Krug y Ham (1997), Gibbons et al. (1999), Sabel and Clark (1984).

Tabla N°10: Composición química de los lixiviados por etapa en EASETECH y concentraciones en mg/l (Olesen et al., 2014).

Substancia	Año 1	Años 2 a 3	Años 4 a 10	Años 11 a 100
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	16000	10000	1000	40
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	20000	15000	5000	400
Total de sólidos en suspensión (TSS)	60	60	60	60
NH ₃	3500	2900	1600	110
PO ₄	1	1	1	1
SO ₄	500	440	250	80
Arsenico (As)	0.03	0.03	0.03	0.03
Bario (Ba)	0.50	0.43	0.3	0.16
Calcio (Ca)	1200	1000	550	60
Cadmio (Cd)	0.013	0.012	9E-3	6E-3
Cloro (Cl)	2120	1800	1000	360
Cromo (Cr)	0.07	0.065	0.055	0.04

Substancia	Año 1	Años 2 a 3	Años 4 a 10	Años 11 a 100
Cobre (Cu)	0.07	0.07	0.07	0.07
Hierro (Fe)	780	660	320	15
Plomo (Pb)	0.05	0.045	0.035	0.02
Mercurio (Hg)	4E-4	3E-4	2E-4	1E-4
Magnesio (Mg)	470	390	240	60
Níquel (Ni)	0.07	0.07	0.07	0.07
Selenio (Se)	0.01	9E-3	6E-3	3E-3
Plata (Ag)	0.12	0.1	0.06	0.01
Sodio (Na)	700	590	360	100
Zinc (Zn)	4	3.4	2.1	0.7
Benceno	6E-3	6E-3	6E-3	6E-3
Naftaleno	0.03	0.03	0.02	0.02
Etil Benceno	0.03	0.03	0.02	0.02
Propilbenceno	2E-4	2E-4	2E-4	2E-4
Etilcloruro	0.1	0.1	0.1	0.1
Tolueno	0.09	0.08	0.05	0.02
Xylenos	0.08	0.075	0.065	0.05
Fenol	1E-3	3E-3	5E-3	3E-3
Cloruro de vinilo	5E-3	4.8E-3	4.4E-3	4E-3
DCE	7E-4	1.1E-3	2.2E-3	3E-3
TCE	5E-3	5E-3	6E-3	6E-3
PCE	0.01	9E-3	6E-3	3E-3
Diclorometano	0.03	0.025	0.13	3E-3
Cloroformo	3E-4	3E-4	3E-4	3E-4
Tetracloruro de carbono	2E-4	2E-4	2E-4	2E-4
Clorobenceno	3E-3	3E-3	3E-3	3E-3
Diclorobenceno	6E-3	6E-3	6E-3	6E-3
DEHP	0.01	0.01	0.01	0.01

3.2.2. Inventario de Ciclo de Vida: Caso de estudio Jaquira

La información fue obtenida a partir entrevistas estructuradas con el representante de la Gerencia de Medio Ambiente de la Municipalidad Provincial del Cusco y técnicos encargados de la operación del RS. Existe información técnica que aún no ha sido recibida por parte del equipo investigador, por lo que no ha podido ser

procesada. Además, se complementó la información a partir de información procedente de la base de datos Ecoinvent v3.3 (ver acápite **3.1.3.2.**).

3.2.2.1. Composición de los residuos

Si bien se cuenta con la composición de los residuos generados en la zona urbana del Cusco, debido a que existe una labor importante de reciclaje de diversas fracciones por parte de la municipalidad, los residuos recolectados no son dispuestos en el RS en su totalidad. A continuación, en la **Tabla N°11** se muestra la composición de los residuos rellenos en el emplazamiento de disposición final Jaquira.

Tabla N°11: Composición estimada de los residuos sólidos municipales rellenos en el emplazamiento de disposición final Jaquira. Fuente: Adaptación de PIGARS CUSCO (MPC, 2015):

Fracciones	Porcentaje (%)
Materia orgánica	49.96
Madera, follaje	6.09
Papel	2.76
Cartón	3.25
Vidrio	3.53
PET	2.70
Plástico Duro	1.88
Bolsas	7.66
Tecnopor y similares	1.34
Metales	2.37
Telas, textiles	1.04
Caucho, cuero y jebe	0.84
Pilas	0.44
Restos de medicinas, focos	0.27
Residuos sanitarios	5.68
Material Inerte	7.62
Ceniza, porcelana y otros	2.20

3.2.2.2. Infraestructura y bienes capitales

En cuanto a la infraestructura del lugar de disposición final de residuos sólidos, cuenta con una balanza para el pesaje de los camiones entrantes con una capacidad

máxima de 80 toneladas, y existen pequeñas oficinas de material noble (concreto y mampostería). Si bien dentro del relleno no existen vías de circulación considerables, la ruta desde la cantera hacia el lugar de disposición final es una vía no pavimentada (afirmada), y tiene una longitud total de 1 km. Entre las instalaciones, además, se cuenta con 1 pozo de lixiviados con una capacidad total de 500 m³. Debido a que el lugar de disposición final está localizado en una depresión entre 2 cerros, está conformado por 10 plataformas trapezoidales-piramidales de material relleno flanqueadas y contenidas por los cerros, por lo que cada celda tiene un área aproximada de 4 Ha. Al momento que el presente informe fue escrito aún no se contaba con los planos y otros datos técnicos. Asimismo se desconoce la cantidad de celdas cerradas y por abrir. Las celdas son de 4 m de alto, 90 m de ancho y 400 m de largo. Adicionalmente, el talud de cada plataforma es de 30°. Respecto a la cobertura de las celdas, esta es realizada con material arcilloso proveniente de una cantera dentro de las inmediaciones del terreno, a aproximadamente 800 metros de la celda actualmente abierta, para luego ser cubierta con geotextiles y geomembranas de HDPE de 2 mm. Además, la cobertura realizada tiene un espesor de 10 cm.

La cuantificación y adaptación por UF (1 tonelada de RSM rellena en el lugar de disposición final Jaquira) de todos los bienes materiales empleados en la construcción y operación de este emplazamiento se puede apreciar en su totalidad en la **Tabla N°12** a continuación.

Tabla N°12: Cuantificación parcial de los materiales empleados en la construcción y mantenimiento del RS adaptados a la UF.

Material	Unidad	Cantidad por Tonelada Rellenada
Grava	m ³	1.68E-02
Concreto	m ³	5.17E-08
HDPE	kg	7.66E-03
PVC	kg	1.08E-04
Acero	kg	7.11E-07
Movimiento de tierras	m ³	6.75E-5
Diésel	l	2.38E-04

3.2.2.3. Descomposición de los residuos

Al igual que como se mencionó en el capítulo **3.2.1.3.**, la descomposición de los residuos se da mediante una tasa de decaimiento de primer orden (USEPA, 1998, 2005; IPCC, 2006). Una reacción de primer orden depende linealmente de un solo reactivo. En este caso, la descomposición del total de compuestos se da mediante la

suma agregada del proceso de descomposición de cada fracción existente en los desechos rellenos. La ecuación por la que se rige este proceso es la siguiente presentada en el capítulo 3.2.1.3.

Como se mencionó con anterioridad (ver capítulo 3.1.4.1.), la determinación de los factores “k” de descomposición de los residuos involucra el desarrollo investigaciones de gran profundidad las cuales no han podido desarrollarse al momento para las locaciones estudiadas, por lo que se empleó los empleados por el IPCC (2006). El IPCC otorga los valores en un rango, con valores inferiores, medios y superiores. A continuación, en la **Tabla N°13** se muestran los factores de descomposición de los residuos para la composición que se estima es rellena en el RS Jaquira:

Tabla N°13: Factores de descomposición de los residuos por fracción rellena en el RS Jaquira. Fuente: Adaptación de la Guía del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (2006).

Fracciones	k _{inferior}	k _{medio}	k _{superior}
Materia orgánica	0.1	0.185	0.2
Madera, follaje	0.02	0.03	0.04
Papel	0.05	0.06	0.07
Cartón	0.05	0.06	0.07
Vidrio ⁶	-	-	-
PET ⁶	-	-	-
Plástico duro ⁶	-	-	-
Bolsas ⁶	-	-	-
Tecnopor y similares ⁶	-	-	-
Metales ⁶	-	-	-
Telas, textiles	0.05	0.06	0.07
Caucho, cuero y jebe ⁶	-	-	-
Pilas	0.02	0.03	0.04
Restos de medicinas, focos	0.05	0.06	0.07
Residuos sanitarios	0.05	0.06	0.07
Papel periódico	0.05	0.06	0.07
Material Inerte	0.02	0.03	0.04
Ceniza, porcelana y otros ⁶	-	-	-
Tetrapak	0.05	0.06	0.07

⁶ Dado que estas fracciones no contienen carbono biodegradable en su composición química, se considera que no se degradan generando biogás (Olesen et al., 2014).

A primera vista se puede apreciar que debido a las diferentes condiciones geoclimáticas del lugar de disposición final Jaquira, como la cantidad superior de

precipitaciones anuales, los valores de los factores de descomposición de los residuos son ligeramente mayores a los del escenario costero.

3.2.2.4. Generación y tratamiento de biogás

De igual manera a lo ocurrido en el RS Portillo Grande (ver capítulo **3.2.1.5.**), la generación del biogás se da en base a la descomposición de los residuos explicada en el capítulo anterior (ver acápite **3.2.2.3.**). Cuando los residuos son descompuestos anaeróbicamente se genera fundamentalmente gas metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) debido a las condiciones anaeróbicas existentes en el RS, tal como se explicó anteriormente (ver acápite **1.1.1.**). Adicionalmente, en el biogás son emitidos diversas sustancias en menores composiciones, los cuales han sido investigados y medidos por diferentes autores y se muestran en la **Tabla N°06** en el capítulo **3.2.1.4.**.

En la actualidad el lugar de disposición final Jaquira no realiza ningún tipo de tratamiento al biogás, por lo que todos los componentes son directamente emitidos a la atmósfera. Sin embargo, un porcentaje de ellos es oxidado en las cubiertas superiores del RS tal y como se explicó en el capítulo **3.2.1.4.**, y son mostrados en la **Tabla N°09**.

3.2.2.5. Generación y tratamiento de lixiviados

Al igual que como se mencionó en el capítulo **3.2.1.5.**, la generación de los lixiviados se da por la percolación de los líquidos y la humedad contenida en los RSM. Estos líquidos arrastran consigo parte del contenido de los sólidos dispuestos, por lo que su composición química depende también de la de los RSM. Asimismo, la generación de los lixiviados también es afectada por la velocidad con la que se descomponen los residuos y la intensidad de las precipitaciones de la zona (Lema et al., 1988).

Al igual que el RS Portillo Grande, el lugar de disposición final de Cusco está diseñado para que los lixiviados percolen a través de sus capas superiores y lleguen así a las inferiores, donde se encuentran los sistemas de colección. A diferencia del RS Portillo, en existen canales impermeabilizados de arcilla y geomembranas, los cuales transportan los lixiviados al pozo principal. En este se acumulan los lixiviados hasta determinados niveles y luego son bombeados, con la ayuda de motobombas, a la cima de la celda cerrada previamente. Una vez en ella, los lixiviados son reinyectados al relleno. Al llevar a cabo esta recirculación de lixiviados se acelera la descomposición de los residuos ya rellenos. Adicionalmente se debe mencionar que

además de existir canales impermeabilizados para los lixiviados, también existen canales especialmente diseñados para las precipitaciones. El objetivo de la incorporación de esta característica fue para evitar que los lixiviados se mezclen con el agua de las lluvias, se sobrepasen los niveles del pozo de lixiviados y se desborden, y en consecuencia contaminen la cuenca.

La concentración de los compuestos presentes en el modelado pueden verse en la **Tabla N°10**, en el capítulo anterior.

3.2.3. Inventario de Ciclo de Vida: Caso de estudio Nauta

La información fue obtenida a partir de los planos, presupuestos y entrevistas estructuradas con los representantes de la Municipalidad Provincial de Loreto - Nauta y técnicos encargados de la operación del RS. Además, se complementó la información a partir de información procedente de la base de datos Ecoinvent v3.3 (ver acápite **3.1.3.2.**).

3.2.3.1. Composición de los residuos

En la actualidad debido a que en el RS Nauta se realizan labores de segregación para el compostaje y reciclado si se hacen estudios de caracterización de los residuos, con una amplia identificación de fracciones, incluyendo reciclables y compostables. A continuación, en la **Tabla N°14** se muestra la composición de los residuos rellenos en el RS Nauta.

Tabla N°14: Composición de los residuos sólidos municipales rellenos en el RS Nauta. Fuente: Adaptación del Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos de Nauta (Municipalidad Provincial de Loreto - Nauta, 2013).

Tipo de Residuo	Porcentaje (%)
Aprovechable	78.07
Compostable	65.06
Madera	0.74
Residuos de jardines	4.02
Algodón	0.06
Pluma	0.17
Residuos de alimentos	60.07
Reciclables	13.01
Papel	2.25
Blanco	0.47
Periódico	0.68
Mixto	1.10
Fill	0.00
Cartón	1.72
Blanco	0.05
Marrón	1.04
Mixto	0.63
Vidrio	1.30
Blanco	0.48
Marrón	0.55
Verde	0.27
Plástico	5.35
PET	2.51
HDPE	0.8
PVC	0.21
LDPE	0.37
PP	0.26
PS	0.39
Otros	0.81
Tetrapak	0.21
Metales	2.18
Fierro	0.76
Lata	1.35
No ferrosos	0.07

Cobre	0.06
Bronce	0.01
Residuos no aprovechables	18.36
Bolsas plásticas	4.24
Envolturas de golosinas, plástico metalizado	0.99
Tecnopor	0.27
Telas	0.36
Textiles	0.96
Carbón	0.24
Ceniza	0.39
Residuos de construcción	0.49
Jebe	0.09
Cuero	0.89
Hueso	0.24
Material inerte	9.20
Residuos sólidos peligrosos	3.55
Envases con aceites quemados	0.05
Envases de reactivos	0.00
Envases de insecticidas	0.00
Focos	0.02
Fluorescentes	0.02
Pintura	0.15
Pilas	0.08
Baterías	0.00
Material de medicamentos	0.13
Papel higiénico	1.57
Toalla higiénica	0.04
Pañal	1.49
Total	100.00

3.2.3.2. Infraestructura y bienes capitales

En cuanto a la infraestructura del relleno, cuenta con una balanza para el pesaje de los camiones entrantes con una capacidad máxima de 80 toneladas, y existen oficinas de madera. El relleno también cuenta con una planta de reaprovechamiento y un área destinada al acopio de abono orgánico, ambas techadas. Respecto a las vías de circulación, son vías de pavimento de concreto con una longitud total de 220 m. Entre las instalaciones además se cuenta con 2 pozos de lixiviados con una capacidad total de 8 m³. El relleno está conformado por 3 celdas tipo trinchera con una capacidad total de 30,000 toneladas. Actualmente existen 1 celda cerrada, 1 celda abierta, y 1 celda por abrir. Respecto a la cobertura de las

celdas, esta es realizada con material arcilloso proveniente de una cantera dentro de las inmediaciones del terreno, a aproximadamente 200 metros de la celda actualmente abierta. Además, la cobertura realizada tiene un espesor de 20 cm. Asimismo, en la celda cerrada se ha realizado un trabajo de reforestación con especies autóctonas, y se tiene planeado replicarlo en las celdas por cerrar.

La cuantificación y adaptación por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta) de toda la información previamente mencionada ha sido parcialmente realizada, por lo que se ha incluido en parte en el presente informe. A continuación, en la **Tabla N°15** se muestra la cuantificación parcial realizada hasta el momento de los materiales empleados en el RS adaptados a la UF.

Tabla N°15: Cuantificación parcial de los materiales empleados en la construcción y mantenimiento del RS adaptados a la UF.

Material	Unidad	Cantidad por tonelada rellena
Arena	m ³	5.76E-06
Concreto	m ³	4.92E-06
Acero	kg	5.62E-05
Movimiento de tierras	m ³	4.29E-05
Grava	ton	1.18E-04
Arcilla	m ³	1.94E-05
Diésel	l	2.16E-04

3.2.3.3. Descomposición de los residuos

Al igual que como se mencionó en los capítulos **3.2.1.3.** y **3.2.1.3.**, la descomposición de los residuos se da mediante una tasa de decaimiento de primer orden (USEPA, 1998, 2005; IPCC, 2006). Una reacción de primer orden depende linealmente de un solo reactivo. En este caso, la descomposición del total de compuestos se da mediante la suma agregada del proceso de descomposición de cada fracción existente en los deshechos rellenos. La ecuación por la que se rige este proceso se presentó en el capítulo **3.2.1.3.** Como se mencionó con anterioridad, la determinación de los factores “*k*” de descomposición de los residuos involucra el desarrollo investigaciones de gran profundidad las cuales no han podido desarrollarse al momento para las locaciones estudiadas, por lo que se emplearon los usados por el IPCC (2006). El IPCC otorga los valores en un rango, con valores inferiores, medios y

superiores. En la **Tabla N°16** se muestran los factores de descomposición de los residuos para la composición que se estima es rellenada en el RS Nauta.

Tabla N°16: Factores de descomposición de los residuos por fracción rellenada en el RS Nauta. Fuente: Adaptación de la Guía del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (2006).

Fracciones	k _{inferior}	k _{medio}	k _{superior}
Materia orgánica	0.17	0.400	0.700
Madera, follaje	0.03	0.035	0.050
Papel	0.06	0.070	0.085
Cartón	0.06	0.070	0.085
Vidrio ⁷	-	-	-
PET ⁷	-	-	-
Plástico duro ⁷	-	-	-
Bolsas ⁷	-	-	-
Tecnopor y similares ⁷	-	-	-
Metales ⁷	-	-	-
Telas, textiles	0.06	0.070	0.085
Caucho, cuero y jebe ⁷	-	-	-
Pilas	0.03	0.035	0.050
Restos de medicinas, focos	0.06	0.070	0.085
Residuos sanitarios	0.06	0.070	0.085
Papel periódico	0.06	0.070	0.085
Material Inerte	0.03	0.035	0.050
Ceniza, porcelana y otros ⁷	-	-	-
Tetrapak	0.06	0.070	0.085

⁷ Dado que estas fracciones no contienen carbono biodegradable en su composición química, se considera que no se degradan generando biogás (Olesen et al., 2014).

A primera vista se puede apreciar que debido a las diferentes condiciones geoclimáticas del RS Nauta, como la cantidad superior de precipitaciones anuales y las altas temperaturas de la selva tropical amazónica, los valores de los factores de descomposición de los residuos – especialmente de los residuos orgánicos – son considerablemente mayores a los de los escenarios costero y andino.

3.2.3.4. Generación y tratamiento de biogás

De igual manera a lo ocurrido en el RS Portillo Grande (ver capítulo **3.2.1.4.**) y el lugar de disposición final Jaquira (ver capítulo **3.2.2.4.**), la generación del biogás se da en base a la descomposición de los residuos explicada en el capítulo anterior (ver acápite **3.2.3.3.**). Cuando los residuos son descompuestos anaeróbicamente se genera fundamentalmente gas metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) debido a las condiciones anaeróbicas existentes en el RS, tal como se explicó anteriormente (ver acápite **1.1.1.**). Adicionalmente, en el biogás son emitidos diversos gases en menores composiciones, los cuales han sido investigados y medidos por diferentes autores y se muestran en la **Tabla N°06** en el capítulo **3.2.1.4.**

En la actualidad el RS Nauta no realiza ningún tipo de tratamiento al biogás, por lo que todos los componentes son directamente emitidos a la atmósfera. Sin embargo, un porcentaje de ellos es oxidado en las cubiertas superiores del RS tal y como se explicó en el capítulo **3.2.1.4.**, y son mostrados en La **Tabla N°09.**

3.2.3.5. Generación y tratamiento de lixiviados

Del mismo modo que en los subcapítulos **3.2.1.5.** y **3.2.2.5.**, la generación de los lixiviados se da por la percolación de los líquidos y la humedad contenida en los RSM. Estos líquidos arrastran consigo parte del contenido de los sólidos dispuestos, por lo que su composición química depende también de la de los RSM. Asimismo, la generación de los lixiviados también es afectada por la velocidad con la que se descomponen los residuos y la intensidad de las precipitaciones de la zona (Lema et al., 1988).

Al igual que el RS Portillo Grande y en el lugar de disposición final de Cusco, el RS Nauta está diseñado para que los lixiviados percolen a través de sus capas superiores y lleguen así a las inferiores, donde se encuentran los sistemas de colección. A diferencia de los casos de Lima y Cusco, el terreno en el que está ubicado el RS Nauta contiene arcillas expansivas muy poco permeables, por lo que se puede considerar el terreno prácticamente impermeable. En el fondo de las celdas existen canales impermeabilizados de arcilla y PET, los cuales transportan los lixiviados al pozo principal. En este se acumulan los lixiviados hasta determinados niveles y luego son bombeados, con la ayuda de motobombas, a la celda cerrada previamente, donde los lixiviados son reinyectados al relleno. Al llevar a cabo esta recirculación de lixiviados se acelera la descomposición de los residuos ya rellenos. Asimismo, dada la elevada cantidad de precipitaciones a lo largo del año, el volumen de lixiviados de esta localidad es considerablemente mayor al de las otras regiones.

La concentración de los compuestos presentes en el modelado pueden verse en la **Tabla N°10**, en el capítulo anterior.

3.3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

El Análisis de Impacto del Ciclo de Vida (AICV) consiste en evaluar numéricamente, mediante diversos métodos establecidos, el impacto ambiental del sistema como se anticipó en el subcapítulo **1.1.2.** de este manuscrito. En esta etapa de la evaluación se enlaza el ICV construido previamente con un impacto ambiental potencial. En la actualidad existen diversos métodos para realizar este análisis, cada uno de ellos con sus propios matices metodológicos. Sin embargo, son solo algunos de estos los que son altamente recomendados. Hauschild y otros colegas elaboraron una revisión bibliográfica en 2012 por encargo de la Comisión Europea, en la cual evaluaron todos los métodos de evaluación de impactos y sus respectivas categorías de impacto. En ella, luego de una extensa verificación, clasificaron los métodos en: I) recomendables y satisfactorios; II) recomendables pero con mejoras necesarias, y III) recomendables pero aplicables con cautela. Por último, todos aquellos métodos no recomendables fueron excluidos de clasificación alguna.

En este reporte se ha optado por emplear tanto métodos recomendados por la revisión mencionada previamente, como métodos ampliamente utilizados en la literatura. Asimismo, dada la naturaleza holística de los inventarios generados, se ha buscado evaluar los mismos en la mayor cantidad de categorías de impacto posibles. Es por ello que se ha elegido la aplicación del método *IPCC 2013*, el cual se enfoca en la caracterización de GEI (es decir el Potencial de Calentamiento Global), y el método *ReCiPe 2008*, el cual involucra diversas categorías de impacto como acidificación, eutrofización y agotamiento de la capa de ozono. A continuación se explican las categorías de impacto empleadas en el presente estudio:

- Calentamiento Global/ Cambio Climático (CC): Se refiere al aumento gradual de las temperaturas de la atmósfera y océanos de la Tierra a consecuencia del incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Dicho incremento es provocado por los procesos de combustión con fines energéticos de carburantes fósiles y por la deforestación, además de su continuo aumento que se proyecta en gran medida para el futuro (EPA 2016).
- Material Particulado (FMP): El material particulado es la generación y dispersión en la atmósfera de partículas de tamaños menores a 10 µm

(micrómetros). Estas son perjudiciales para la salud ya que las partículas emitidas penetran en el aparato respiratorio, bloqueando los pulmones y evitando el paso del aire a través del organismo (EPA, 2016).

- Potencial de acidificación (PA): La acidificación es causada por la emisión de protones en los ecosistemas terrestres y acuáticos. En los sistemas terrestres los efectos se manifiestan como una disminución en el crecimiento del bosque y como consecuencia final su desaparición, dado que este es el proceso de introducción de sustancias ácidas en el medio ambiente. Este proceso es provocado por las emisiones a la atmósfera de óxidos de azufre y de nitrógeno, provenientes principalmente de la quema de combustibles fósiles (EPA, 2016).
- Potencial de agotamiento de la capa de ozono (ACO): Se enfoca en el agotamiento de la capa de ozono producto de los gases contaminantes agregados a la atmósfera, especialmente los compuestos cloro-fluorocarbonados (CFC) los cuales se encuentran principalmente en aerosoles y sistemas de refrigeración.
- Potencial de eutrofización: La eutrofización acuática puede definirse como el enriquecimiento de nutrientes del medio acuático. Esta eutrofización es producto de las actividades humanas tomándose en consideración la contaminación del agua debido a la emisión de sustancias tóxicas. Además, el carácter a largo plazo del enriquecimiento de nutrientes, ya sea a través del aire o de los ríos, implica que el agua marina también se vea contaminada, aunque debido a diferentes fuentes e impactos (ReCiPe, 2015). Se traduce en la categoría de potencial de eutrofización de agua dulce (EAD) y eutrofización de marina (EM).
- Categorías de toxicidades: El factor de caracterización se divide en toxicidad humana (TH) y eco toxicidad. Esta explica la persistencia ambiental (destino) y la acumulación en la cadena alimentaria humana (exposición) y la toxicidad (efecto) de un producto químico (ReCiPe, 2015). Se divide en las categorías de ecotoxicidad terrestre (ET), ecotoxicidad de agua dulce (ETAD) y ecotoxicidad marina (ETM).

A partir del uso del software EASETECH y de los métodos de análisis de IPCC 2013 para cómputo general de potencial de calentamiento global y ReCiPe Midpoint H para las demás categorías de impacto a analizar, se procedió a la presentación de los resultados más importantes (ReCiPe, 2008). En primer lugar, en la **Tabla N°16** se indican las sustancias de referencia que se tomaron en cuenta para reportar el impacto ambiental en cada categoría de impacto. Dichas sustancias, que son las que fijan los propios métodos de análisis, están representadas en kg equivalentes.

Tabla N°17: Sustancias de referencia usadas en la caracterización de las categorías de impacto seleccionadas.

Metodología	Categoría de Impacto	Unidad
IPCC 2013	Cambio Climático	kg CO ₂ -eq
ReCiPe 2008	Agotamiento de la capa de ozono (ACO)	kg CFC-11 eq
	Potencial de acidificación (PA)	kg SO ₂ eq
	Eutrofización de agua dulce (EAD)	kg P eq
	Toxicidad humana (TH)	kg 1,4-DB eq
	Formación de partículas (FP)	kg PM ₁₀ eq
	Ecotoxicidad terrestre (ET)	kg 1,4-DB eq
	Ecotoxicidad de agua dulce (ETAD)	kg 1,4-DB eq
	Ecotoxicidad marina (EM)	kg 1,4-DB eq

Al tener los ICVs de cada sistema debidamente ensamblados, se procedió a analizarlos con los métodos antes mencionados. Al realizar este análisis se pudieron identificar tanto las emisiones totales del sistema a lo largo de su ciclo de vida, como las emisiones parciales en cada etapa del tratamiento. Asimismo, también se pudo verificar la temporalización de las emisiones por la descomposición de los RSU en cada zona geoclimática. En la siguiente etapa del reporte se expondrán los resultados en cada uno de los casos de estudio evaluados.

3.3.1. Impacto ambiental: Método IPCC 2013

En los siguientes acápite se expondrán los resultados obtenidos en la categoría de impacto de Cambio Climático para los diferentes rellenos analizados.

3.3.1.1. Caso de estudio RS Portillo Grande

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a las diversas etapas del tratamiento de los residuos sólidos en el RS Portillo Grande. Todos los resultados conciernen a las emisiones de GEI equivalentes en kg CO₂-eq.

3.3.1.1.1. Emisiones totales

Las emisiones totales del relleno Portillo Grande, según la UF empleada, ascienden a un rango de entre 567.9 kg CO₂-eq a 628.3 kg CO₂-eq. Estas se encuentran en un rango promedio si se comparan con las

emisiones de otros rellenos sanitarios de similares características – valga decir, quema sin recuperación de energía de biogás – en otras regiones como Europa y Estados Unidos. Sin embargo, las emisiones son de igual modo elevadas si se las compara con otras tecnologías que incluyen recuperación de energía o reactores semi-anaeróbicos. A continuación, se muestra la **Tabla N°18**, en la que se puede encontrar el detalle de los impactos según el factor k de descomposición de residuos empleado.

Tabla N°18: Emisiones totales del RS Portillo Grande según la constante k empleada para cada escenario por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Portillo Grande), y según el tipo de medio de disposición:

	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Botadero poco profundo	789.4	804.6	805.8
Botadero profundo	1469	1497	1499
Relleno sanitario sin tratamiento de biogás	1359	1407	1438
Combustión de biogás	567.9	594.1	628.3
Recuperación de energía	135.5	150.1	185.9

3.3.1.1.2. Infraestructura y bienes capitales

El impacto ambiental de la infraestructura del RS Portillo Grande, similarmente a lo que ocurre en el estudio realizado por Brogaard et al. (2013), es considerablemente reducido por UF. Sin embargo, el impacto de este relleno es significativamente menor a lo expuesto en dicho estudio, en donde se concluye que los bienes materiales e infraestructura pueden representar hasta aproximadamente el 10% del impacto total del relleno. En este caso, el impacto total de la infraestructura equivale a 2.56 kg CO₂-eq, lo cual se traduce a un rango de entre el 0.41% y el 0.45 del impacto total, según la constante k que se emplee. Asimismo, dado que el valor del impacto de la infraestructura no varía con la composición de los residuos o

de las condiciones climáticas, este se mantiene constante para los 3 casos. En la **Tabla N°19** se pueden ver dichos resultados según el k empleado.

Tabla N°19: Emisiones totales de la infraestructura del RS Portillo Grande según la constante k empleada por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Portillo Grande):

	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Impacto (kg CO ₂ -eq)	2.56	2.56	2.56
Porcentaje del impacto total (%)	0.45	0.43	0.41

Estos resultados se deben fundamentalmente a la naturaleza de la infraestructura del RS y al volumen de operación diaria del mismo. Dado que el RS tiene una extensión de aproximadamente 80 Ha, recibe cerca de 2000 toneladas de RSU al día y la mayoría del complejo está compuesto por elementos de tierra, el principal contribuyente al impacto es la quema de combustibles fósiles. Este uso de combustibles se da tanto para el funcionamiento de las bombas de lixiviados, grupos electrógenos y otros equipos, como para el uso de la maquinaria del lugar (retroexcavadoras, volquetes y otros).

3.3.1.1.3. Generación y tratamiento de biogás

Cuando se habla de los impactos dados por la generación y tratamiento del biogás, es necesario tener en cuenta los procesos físicos y químicos que se dan en el relleno. Al disponer los RSU en el RS, estos se empiezan a descomponer, tal y como se explicó en el acápite **3.2.1.3.** Asimismo, como se expuso en el subcapítulo **3.2.1.4.**, un porcentaje de los gases generados son recolectados y quemados, mientras que otro porcentaje no logra ser quemado. Los gases que no se pueden coleccionar y quemar se filtran por las capas del RS y al llegar a la superficie se oxidan, convirtiéndose en CO₂ y H₂O (acápites **3.2.1.4.**). Dicho esto, se puede decir que existe un potencial de generación de CH₄ dependiente de la composición de los RSU colocados en el RS y de la locación de este. A pesar de esto, no todo el gas generado va a ser emitido a la atmósfera por los procesos previamente mencionados. Por lo tanto, existe un porcentaje del biogás que no será realmente emitido (será oxidado), y que sobre el

potencial total generado dentro del RS, puede considerarse como negativo, es decir, como una emisión evitada.

El impacto total de la etapa de generación y tratamiento de biogás en el RS Portillo Grande, varía entre 891.6 kg CO₂-eq y 945.2 kg CO₂-eq, dependiendo de la constante k considerada. En la **Tabla N°20** se pueden observar con mayor detalle los procesos específicos de esta etapa, así como sus impactos según la constante empleada.

Tabla N°20: Emisiones totales del RS Portillo Grande según la constante k empleada por proceso por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Portillo Grande):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	362.87	434.30	549.18
Oxidación (años 0 a 5)	-121.67	-145.50	-184.18
Descomposición (años 5 a 15)	518.57	577.50	643.10
Oxidación (años 5 a 15)	-248.77	-276.00	-307.50
Descomposición (años 15 a 100)	904.58	802.14	632.78
Oxidación (años 15 a 100)	-532.08	-487.74	-396.48
Combustión	8.132	8.351	8.321
Impacto total	891.6	913.1	945.2

Al ver estos resultados, a primera vista puede parecer un poco engañoso que el impacto total de esta etapa sea mayor al impacto total de todo el ciclo de vida del relleno sanitario. Sin embargo, como se verá en la sección siguiente, el impacto se ve reducido debido al secuestro de carbono que se produce en el confinamiento de los RSU en el RS.

Asimismo, al comparar los periodos de 0 a 5 años con los periodos de 15 a 100 años, se puede apreciar claramente que con el incremento de la constante k invierte la tendencia de generación de GEI. Es decir, en los primeros 15 años se generará una mayor cantidad de emisiones al considerar el rango alto de los valores propuestos para la constante k . Adicionalmente, en los posteriores 85 años, con el mismo valor de la constante, se generarán menos emisiones que con los valores inferiores de la constante. Sin embargo, estas variaciones pueden considerarse como no

poco significativas debido a la poca variabilidad climática de la costa peruana.

Asimismo, se debe rescatar que la quema de biogás, como se adelantó en capítulos anteriores, si bien genera emisiones de GEI, también reduce el impacto en comparación a la emisión directa del biogás. A continuación, en la **Tabla N°21**, se muestran los resultados de un modelado el cual simula las condiciones del RS Portillo Grande, con la diferencia que se excluye la combustión del biogás.

Tabla N°21: Emisiones totales del RS Portillo Grande según la constante k empleada por proceso sin considerar la combustión del biogás por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Portillo Grande):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	362.9	434.3	549.2
Oxidación (años 0 a 5)	-121.7	-145.5	-184.2
Descomposición (años 5 a 15)	518.6	577.5	643.1
Oxidación (años 5 a 15)	-248.8	-276.0	-307.5
Descomposición (años 15 a 100)	904.6	802.1	632.8
Oxidación (años 15 a 100)	-532.1	-487.7	-396.5
Emisión directa del biogás	802.4	824.1	821.0
Impacto total	1686	1729	1758

Por consiguiente, al comparar el escenario con quema de biogás y el escenario con emisión directa de este a la atmósfera, tenemos en la **Tabla N°22** las siguientes variaciones para los k 's respectivos:

Tabla N°22: Variación de los impactos generados en el RS entre el caso con quema de biogás y emisión directa, según la constante k utilizada

Escenario	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Emisión directa de biogás	1686	1729	1758
Quema descentralizada de biogás	891.7	913.1	945.2
Reducción de emisiones con quema descentralizada de biogás	47.11%	47.19%	46.23%

Adicionalmente, se debe rescatar que la recuperación de energía del biogás, como se adelantó en capítulos anteriores, si bien genera emisiones de GEI, también reduce el impacto en comparación a la emisión directa del biogás y la combustión del biogás, fundamentalmente debido a que se dejan de consumir otros combustibles fósiles para generar energía. A continuación, en la **Tabla N°23**, se muestran los resultados de un modelado en el cual se simulan las futuras posibles condiciones del RS Portillo Grande, si se implementase la recuperación de energía.

Tabla N°23: Emisiones totales del RS Portillo Grande según la constante k empleada por proceso considerando la recuperación de energía por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Portillo Grande):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	362.9	434.3	549.2
Oxidación (años 0 a 5)	-121.7	-145.5	-184.2
Descomposición (años 5 a 15)	518.6	577.5	643.1
Oxidación (años 5 a 15)	-248.8	-276.0	-307.5
Descomposición (años 15 a 100)	904.6	802.1	632.8
Oxidación (años 15 a 100)	-532.1	-487.7	-396.5
Recuperación de energía	-424.3	-435.7	-434.1
Impacto total	461.8	471.6	505.5

Por consiguiente, al comparar el escenario con recuperación de energía y el escenario con emisión directa de este a la atmósfera, tenemos

mayores reducciones de emisiones. En la **Tabla N°24** se observan los resultados para las variaciones para los k 's respectivos.

Tabla N°24: Variación de los impactos generados en el RS entre el caso con recuperación de energía y emisión directa, según la constante k utilizada:

Escenario	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Emisión directa de biogás	1686	1729	1758
Recuperación de energía	461.8	471.6	185.9
Reducción de emisiones con recuperación de energía	72.6%	72.7%	71.2%

De estos resultados puede apreciarse que al no existir tratamiento del biogás, los impactos se ven incrementados. Por ende, se puede decir que el simple hecho de quemar el biogás descentralizadamente reduce en hasta un 47% el impacto total de un RS en condiciones similares a las del RS Portillo Grande, y recuperar energía reduce su impacto hasta en un 73%.

3.3.1.1.4. Generación y tratamiento de lixiviados y almacenamiento de carbono

Otro proceso importante en el tratamiento de los residuos en RRSS es la generación de los lixiviados. Como se explicó en el acápite **3.2.1.5.**, los lixiviados se dan en función de la descomposición de los residuos, las temperaturas y las precipitaciones de la zona. Posteriormente, un porcentaje de los lixiviados es colectado por los sistemas de tratamiento, mientras que el porcentaje restante percola por el suelo. Los lixiviados colectados son transportados a pozos especiales, para luego ser reinyectados al relleno. Al ser reinyectados, se acelera la descomposición de los residuos, pero, además, estos vuelven a percolar hasta el fondo del relleno, en donde una vez más, un porcentaje se infiltra en el subsuelo y otro porcentaje es colectado por los sistemas de colección.

Por otro lado, existe una fracción de los residuos dispuestos, que a lo largo de los 100 años analizados no se logra descomponer. Dichos

residuos contienen una fracción compuesta por carbono, la cual al no ser emitida al ambiente, puede ser considerada como una emisión evitada. En consecuencia, se considera que dichos residuos secuestran carbono por el almacenamiento de los residuos sólidos.

A continuación, en la **Tabla N°25**, se pueden ver las cantidades de carbono secuestradas por los lixiviados según la constante k utilizada, así como el porcentaje evitado que representan sobre el total de emisiones generadas por la descomposición (acápite 3.3.1.1.4.). De esto puede apreciarse que aproximadamente el 20% del carbono presente en los residuos queda almacenado en el suelo. Por ende, se genera una emisión evitada.

Tabla N°25: Secuestro de carbono total del RS Portillo Grande según la constante k empleada por proceso

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Secuestro de carbono por almacenamiento de residuos	-326.3	-321.5	-319.6
Porcentaje (%) sobre el total de emisiones generadas en la descomposición	19.4	18.6	18.2

3.3.1.1.5. Emisiones anualizadas

Al analizar el ciclo de vida de un RS, debido a la naturaleza de la descomposición de los residuos, es imperativo descomponer la generación de biogás a lo largo del tiempo. De esa manera se puede afrontar en mejor medida las estrategias necesarias para optimizar las operaciones del RS. La **Figura 10** presenta las emisiones generadas debido a la descomposición de los residuos a lo largo de los primeros 30 años de vida del RS. Se eligió un tiempo de visualización de 30 años debido a que, como se ve en la imagen, en dicha cantidad de años se generó entre el 74% y el 87% de las emisiones totales estimadas para los 100 primeros años del RS, dependiendo de la constante k empleada. Asimismo, dicha figura solo muestra los impactos producidos por la generación del biogás. La **Figura**

10 muestra de una manera más clara lo mencionado en el **capítulo 3.3.1.1.3.** sobre la inversión de las cantidades anuales descompuestas a partir de determinado año, en este caso a partir del año 16.

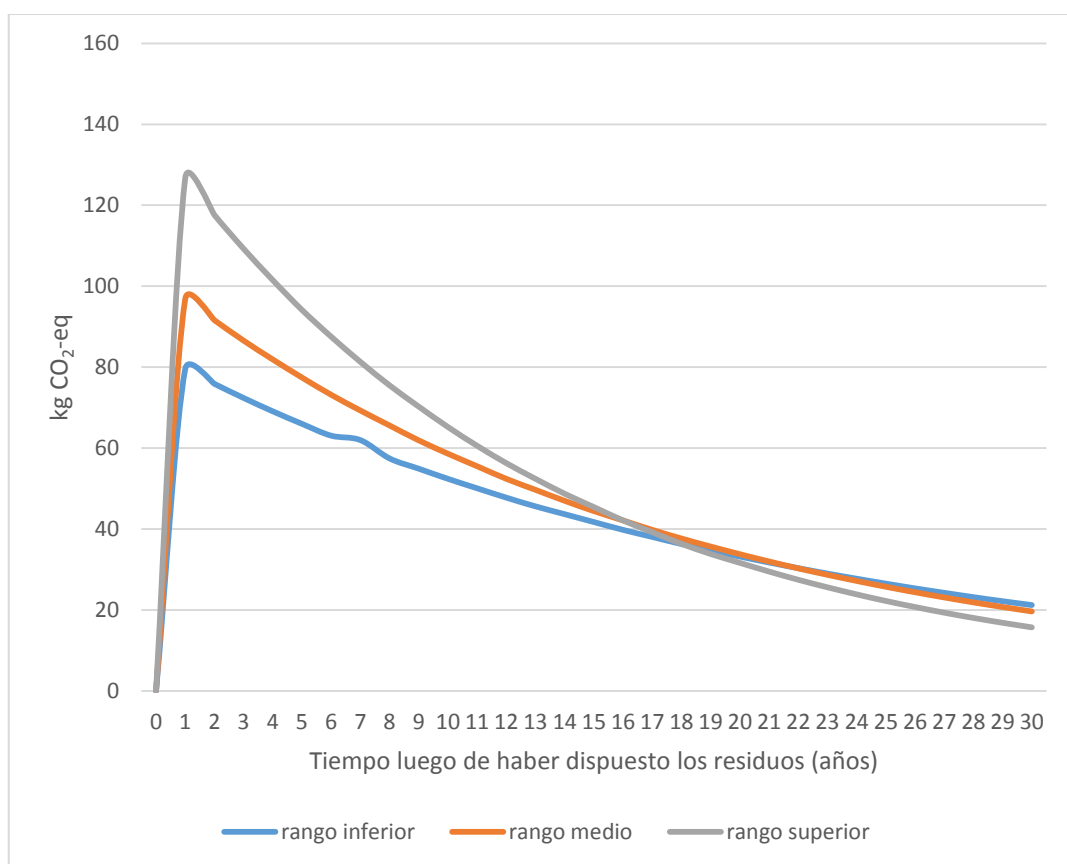


Figura 10: Emisiones anuales de GEI en kg CO₂-eq del RS Portillo Grande para los 30 primeros años de haberse dispuesto la UF, según la constante k .

De similar manera pueden ser presentados los resultados incluyendo la combustión del biogás. En este caso, dado que se da en similar medida para los 3 coeficientes, solo se presentará en la imagen el escenario con el k medio. En la **Figura 11** se puede observar con mayor claridad la diferencia que existe entre los 3 casos, así como la mejora sustancial que representan la quema del biogás y en mayor medida la recuperación de energía respecto de la emisión directa de este.

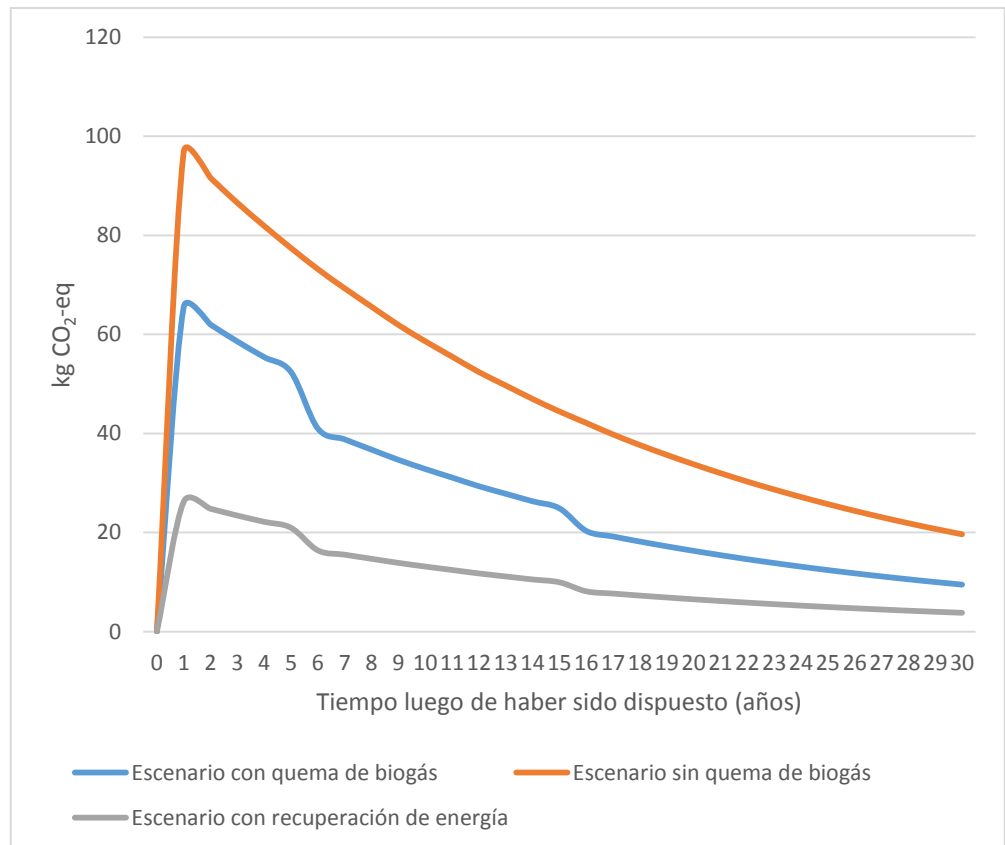


Figura 11: Emisiones anuales de GEI en kg CO₂-eq del RS Portillo Grande para los 30 primeros años de haberse dispuesto la UF, con la constante k media, considerando la quema de biogás y la recuperación de energía.

Las reducciones en las emisiones que se pueden apreciar en los años 5 y 15 se deben fundamentalmente a que se asumió que en dichos años se aumentaba la eficiencia con la que se colectaba el biogás. Esto se debió a que a partir de dichos años habría cantidades suficientes de residuos para poder intensificar las labores de colección de biogás en el RS. Asimismo, de analizar ambos gráficos queda claro que la mayor cantidad de emisiones se da en los primeros años. Sin embargo, luego del año 30 sigue existiendo una cantidad considerable de emisiones. Es por ello que en escenarios como el presente sería necesario realizar la quema del biogás por lo menos hasta 30 años luego de clausurar el RS, de modo que se puedan reducir los impactos de manera adecuada.

3.3.1.2. Impacto ambiental: caso de estudio Jaquira

En la presente subsección se exponen los resultados para el análisis de las distintas etapas del tratamiento de los residuos sólidos en el

emplazamiento de disposición final de Jaquira. Todos los resultados conciernen a las emisiones de GEI equivalentes en kg CO₂-eq.

3.3.1.2.1. Emisiones totales

Las emisiones totales del emplazamiento de disposición final de Jaquira, según la UF empleada, ascienden a un rango de entre 1386 kg CO₂-eq a 1419 kg CO₂-eq. Estas se encuentran en un rango promedio si se comparan con las emisiones de otros rellenos sanitarios de características similares – es decir, sin tratamiento alguno de biogás – en otras regiones de climatologías similares en Europa y Estados Unidos. Asimismo, son más elevadas que las del emplazamiento de disposición final de Portillo Grande, principalmente debido a la ausencia de un sistema de combustión del biogás. Además, las emisiones son excesivamente elevadas si se las compara con otras tecnologías que incluyen recuperación de energía o reactores semi-anaeróbicos. La **Tabla N°26** presenta en detalle las emisiones de gases de efecto invernadero según el factor *k* de descomposición de residuos empleado.

Tabla N°26: Impactos totales en kg CO₂-eq de los escenarios para el RS Jaquira, según las constantes *k* empleadas por caso por UF (1 tonelada de RSM rellena en el emplazamiento de disposición final Jaquira):

	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	<i>k</i> _{inferior}	<i>k</i> _{medio}	<i>k</i> _{superior}
Botadero poco profundo	714.9	725.7	731.9
Botadero profundo	1326	1346	1358
Relleno sin tratamiento de biogás	1386	1407	1419
Combustión de biogás	209.9	339.5	361.5
Recuperación de energía	23.8	170.6	194.2

3.3.1.2.2. Infraestructura y bienes capitales

El impacto ambiental de la infraestructura del emplazamiento de disposición final de Jaquira, similarmente a lo que ocurre en el estudio

realizado por Brogaard et al. (2013), es considerablemente reducido por UF. Si bien el impacto de este relleno es significativamente menor a lo expuesto en dicho estudio, en donde se concluye que los bienes materiales e infraestructura pueden representar hasta aproximadamente el 10% del impacto total del relleno, es mayor al caso de Portillo Grande. En este caso, el impacto total de la infraestructura equivale a 16.72 kg CO₂-eq, lo cual se traduce a un rango de entre el 1.18% y el 1.21% del impacto total, según la constante k que se emplee. Esto se debe principalmente a la mayor tecnificación de la infraestructura, la cual incluye geomallas y geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE). Asimismo, dado que el valor del impacto de la infraestructura no varía con la composición de los residuos o de las condiciones climáticas, este se mantiene constante para los 3 casos. En la **Tabla N°27** se pueden observar dichos resultados según el k empleado.

Estos resultados se deben fundamentalmente a la naturaleza de la infraestructura del RS y al volumen de operación diaria del mismo. Dado que el RS tiene una extensión de aproximadamente 9.5 Ha y percible cerca de 380 toneladas de RSU al día, los principales contribuyentes al impacto son la quema de combustibles fósiles y el aprovisionamiento de los materiales de HDPE. Este uso de combustibles se da tanto para el funcionamiento de electrónicos como para el uso de la maquinaria del lugar (retroexcavadoras, volquetes y otros).

Tabla N°27: Impactos totales en kg CO₂-eq del RS Jaquira según la constante k empleada para la infraestructura:

	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Impacto (kg CO ₂ -eq)	16.72	16.72	16.72
Porcentaje del impacto total (%)	1.21	1.19	1.18

3.3.1.2.3. Generación y tratamiento de biogás

Al abordar los impactos relacionados a la generación y tratamiento del biogás, se debe tener en cuenta los procesos físicos y químicos que se dan en el emplazamiento. Cuando se disponen los RSU en el RS, estos se empiezan a descomponer, tal y como se mencionó en el acápite **3.2.2.3.**

Del mismo modo, como se expuso en el subcapítulo **3.2.2.4.**, un porcentaje de los gases producidos son recolectados y emitidos directamente a la atmósfera, mientras que otro porcentaje no logra ser capturado. Los gases no colectados se filtran por las capas del RS y al llegar a la superficie se oxidan, convirtiéndose en CO_2 y H_2O (acápites **3.2.1.4.** y **3.2.2.4.**). Al decir esto, se puede decir que existe un potencial de generación de CH_4 que depende directamente de la composición de los RSU colocados en el RS y de la locación de este. A pesar de esto, no todo el gas generado va a ser emitido a la atmósfera por los procesos previamente mencionados. Por lo tanto, existe un porcentaje del biogás que no será realmente emitido (será oxidado), y que sobre el potencial total generado dentro del RS, puede considerarse como negativo, es decir, como una emisión evitada.

El impacto total de la etapa de generación y tratamiento de biogás en el emplazamiento de disposición final de Jaquira varía entre 1619 kg CO_2 -eq y 1636 kg CO_2 -eq, dependiendo de la constante k considerada. En la **Tabla N°28**, se ve con mayor detalle los procesos específicos de esta etapa, así como sus impactos según la constante empleada.

Al ver estos resultados, a primera vista puede parecer un poco engañoso que el impacto total de esta etapa sea mayor al impacto total de todo el ciclo de vida del relleno sanitario. Sin embargo, como se verá en la sección siguiente, el impacto se ve reducido debido al secuestro de carbono que se produce en el confinamiento de los RSU en el RS. Además, es preciso resaltar que los impactos presentados en la presente tabla no deben sumar el impacto total del emplazamiento, ya que como se vio en anteriores capítulos (**3.2.1.4.** y **3.2.2.4.**) del total de las emisiones generadas por la descomposición, una fracción es oxidada y posteriormente emitida al ambiente, mientras que otra es directamente emitida a la atmósfera.

Tabla N°28: Impactos totales en kg CO₂-eq del emplazamiento de disposición final Jaquira según la constante *k* empleada por proceso considerando la emisión directa del biogás por UF (1 tonelada de RSM rellena en el emplazamiento de disposición final Jaquira):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	<i>k</i> _{inferior}	<i>k</i> _{medio}	<i>k</i> _{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	562.0	841.0	891.6
Oxidación (años 0 a 5)	-16.09	-24.15	-25.69
Descomposición (años 5 a 15)	580.0	532.8	523.9
Oxidación (años 5 a 15)	-18.01	-16.55	-16.29
Descomposición (años 15 a 100)	476.8	257.2	220.0
Oxidación (años 15 a 100)	-331.7	-178.1	-154.2
Emisión directa del biogás	1188	1079	1068
Impacto total	1619	1631	1636

Asimismo, al comparar los periodos de 0 a 5 años con los periodos de 15 a 100 años, se puede apreciar claramente que del mismo modo que en el RS Portillo Grande, con el incremento de la constante *k* se invierte la tendencia de generación de GEI. Es decir, en los primeros 15 años se generará una mayor cantidad de emisiones al considerar el rango alto de los valores propuestos para la constante *k*, mientras que en los siguientes 85 años, con el mismo valor de la constante, se generarán menos emisiones que con los valores inferiores de la constante. Asimismo, se puede ver que estas variaciones pueden ser más significativas que el caso de la costa peruana, principalmente debido a la variabilidad climática de la sierra andina.

Otro aspecto que resalta en este emplazamiento es la pequeña cantidad de gases oxidados en la superficie en los primeros 15 años (aproximadamente 40 kg CO₂-eq si promediamos los 3 escenarios de Cusco, en comparación a aproximadamente 430 kg CO₂-eq si promediamos los 3 escenarios de Lima). Esto se debe a que al existir sistemas de colección de gases en Cusco, pero no quema de biogás, un elevado porcentaje del biogás es emitido directamente a la atmósfera sin haber experimentado el proceso de oxidación.

Asimismo, se debe rescatar que de existir quema de biogás, como se adelantó en capítulos anteriores, si bien se generan emisiones de GEI, también se reduce el impacto en comparación a la emisión directa del biogás. En la **Tabla N°29**, se muestran los resultados de un modelado el cual simula las condiciones del emplazamiento de disposición final de Jaquira, con la diferencia que se asume una hipotética combustión del biogás.

Tabla N°29: Impactos totales en kg CO₂-eq del emplazamiento de disposición final de Jaquira según la constante *k* empleada por proceso considerando la combustión descentralizada del biogás por UF (1 tonelada de RSM rellena en el emplazamiento de disposición final Jaquira):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	<i>k</i> _{inferior}	<i>k</i> _{medio}	<i>k</i> _{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	562.0	841.0	891.6
Oxidación (años 0 a 5)	-16.09	-24.15	-25.69
Descomposición (años 5 a 15)	580.0	532.8	523.9
Oxidación (años 5 a 15)	-18.01	-16.55	-16.29
Descomposición (años 15 a 100)	476.8	257.23	220.0
Oxidación (años 15 a 100)	-331.7	-178.1	-154.2
Combustión descentralizada	12.04	10.93	10.82
Impacto total	442.8	563.0	578.4

Por consiguiente, al comparar el escenario con quema descentralizada de biogás y el escenario con emisión directa de este a la atmósfera se obtiene la **Tabla N°30** con las siguientes variaciones para los *k*'s respectivos:

Tabla N°30: Variación de los impactos generados en el RS entre el caso con quema de biogás y emisión directa, según la constante k utilizada:

Escenario	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Emisión directa de biogás	1619	1631	1636
Quema de descentralizada biogás	442.8	563.0	578.4
Variación	72.65%	65.48%	64.64%

Asimismo, se debe mencionar que al existir recuperación de energía, como se adelantó en capítulos anteriores, si bien se generan emisiones de GEI, también se reduce el impacto en comparación a la emisión directa del biogás. En la **Tabla N°31** se muestran los resultados de un modelado el cual simula las condiciones del emplazamiento de disposición final de Jaquira, con la diferencia que se asume una hipotética combustión del biogás.

Tabla N°31: Impactos totales en kg CO₂-eq del emplazamiento de disposición final de Jaquira según la constante k empleada por proceso considerando la recuperación de energía por UF (1 tonelada de RSM rellena en el emplazamiento de disposición final Jaquira):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	562.0	841.0	891.6
Oxidación (años 0 a 5)	-16.09	-24.15	-25.69
Descomposición (años 5 a 15)	580	532.8	523.9
Oxidación (años 5 a 15)	-18.01	-16.55	-16.29
Descomposición (años 15 a 100)	476.8	257.23	220.0
Oxidación (años 15 a 100)	-331.7	-178.1	-154.2
Recuperación de energía	-174.0	-158.0	-156.4
Impacto total	254.9	399.4	422.2

Consecuentemente, cuando se compara el escenario con recuperación de energía y el escenario con emisión directa de biogás a la atmósfera, se

obtiene la **Tabla N°32**, la cual muestra los resultados para las variaciones para los k 's respectivos.

Tabla N°32: Variación de los impactos generados en el RS entre el caso con recuperación de energía y emisión directa, según la constante k utilizada:

Escenario	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$
Emisión directa de biogás	1619	1631	1636
Recuperación de energía	254.9	399.4	422.2
Reducción de emisiones	84.25%	75.51%	74.17%

De estos resultados puede apreciarse que al no existir tratamiento alguno del biogás, los impactos son considerablemente elevados. Por ende, se puede decir que el simple hecho de quemar el biogás reduciría en hasta un 73% el impacto total de un RS en condiciones similares a las del emplazamiento de disposición final de Jaquira, mientras que recuperar energía lo reduciría hasta en un 84%.

3.3.1.2.4. Generación y tratamiento de lixiviados

Como se mencionó anteriormente, en los RRSS la generación de los lixiviados juega un papel trascendental. Como se explicó en el acápite **3.2.1.5.**, esta se da en función de la descomposición de los residuos, las temperaturas y las precipitaciones de la zona. Posteriormente, un porcentaje de los lixiviados es colectado por los sistemas de tratamiento, mientras que la fracción restante percola por el suelo. Los lixiviados colectados son transportados a pozos especiales, para luego ser reinyectados al relleno. Al ser reinyectados, se acelera la descomposición de los residuos. Sin embargo, estos vuelven a percolar hasta el fondo del relleno, en donde una vez más, un porcentaje se infiltra en el subsuelo y otro porcentaje es colectado y reinyectado.

Por otro lado, existe una fracción de los residuos dispuestos, que a lo largo de los 100 años analizados no se logra descomponer. Dichos residuos contienen una fracción compuesta por carbono, la cual al no ser emitida al ambiente, puede ser considerada como una emisión evitada. En

consecuencia, se considera que dichos residuos secuestran carbono por el almacenamiento de los residuos sólidos.

En la **Tabla N°33**, se pueden ver las cantidades de carbono secuestradas según la constante k utilizada, así como el porcentaje evitado que representan sobre el total de emisiones generadas por la descomposición (acápite **3.3.1.1.4.**).

Tabla N°33: Secuestro de carbono total del emplazamiento de disposición final de Jaquira según la constante k empleada por proceso por UF (1 tonelada de RSM rellena en el emplazamiento de disposición final Jaquira):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Secuestro de carbono por almacenamiento de residuos	231.1	228.8	228
Porcentaje (%) sobre el total de emisiones generadas en la descomposición	14.3	14.0	13.9

3.3.1.2.5. Emisiones anualizadas

Al analizar el ciclo de vida de un RS, debido a la naturaleza de la descomposición de los residuos, es imperativo descomponer las generación de biogás a lo largo del tiempo. De esa manera se puede afrontar en mejor medida las estrategias necesarias para darle un mejor derempeño al RS. A continuación, en la **Figura 10**, se dan las emisiones generadas debido a la descomposición de los residuos a lo largo de los primeros 30 años de vida del RS. Se eligió un tiempo de visualización de 30 años debido a que, como se ve en la imagen, en dicha cantidad de años se generó entre el 74% y el 87% de las emisiones totales (a 100 años), según la constante k empleada. Asimismo, en la presente figura solo se muestran los impactos producidos por la generación del biogás.

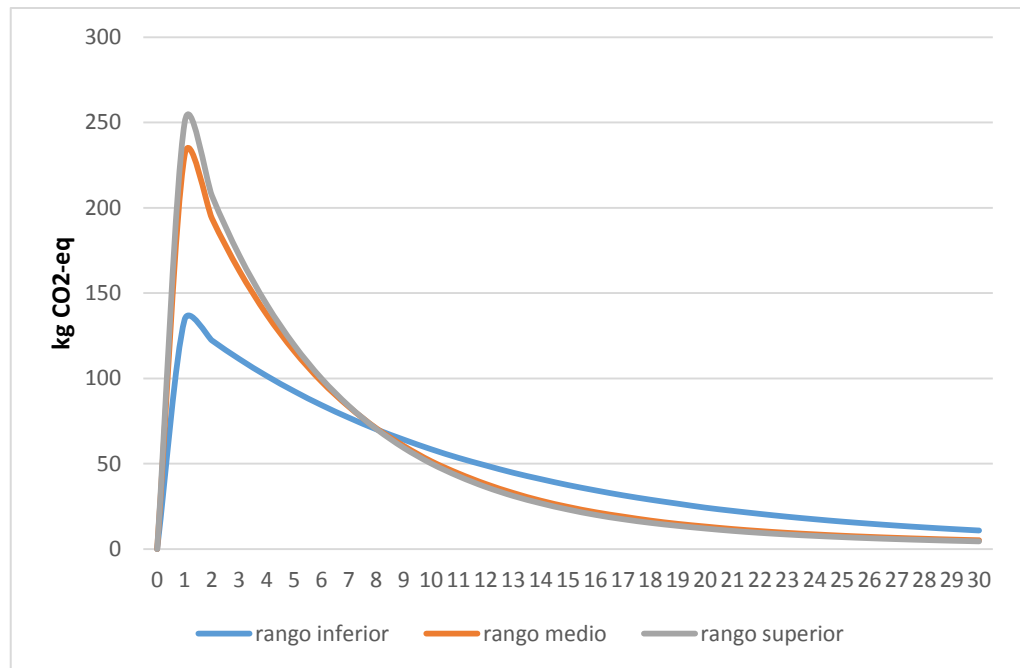


Figura 12: Emisiones anuales de GEI en kg CO₂-eq del emplazamiento de disposición final Jaquira para los 30 primeros años de haberse dispuesto la UF, según la constante k , sin considerar tratamiento de biogás.

De este gráfico se puede apreciar de una manera más clara lo mencionado en el **capítulo 3.3.1.1.3.** sobre la inversión de las cantidades anuales descompuestas a partir de determinado año, en este caso a partir del año 16.

De similar manera pueden ser presentados los resultados incluyendo la combustión del biogás y recuperación de energía. En este caso, dado que se da en similar medida para los 3 coeficientes, solo se presentará en la imagen el escenario con el k medio.

En la **Figura 13** se puede observar con mayor claridad la diferencia que existe entre los 3 casos, así como la mejora sustancial que representan la quema del biogás y en mayor medida la recuperación de energía respecto de la emisión directa de este. Las caídas en las emisiones que se pueden apreciar en los años 5 y 15 se deben fundamentalmente a que se asumió que en dichos años se aumentaba la eficiencia con la que se colectaba el biogás. Esto se debió a que a partir de dichos años habría cantidades suficientes de residuos para poder intensificar las labores de colección de biogás en el emplazamiento. Asimismo, de analizar ambos gráficos queda claro que la mayor cantidad de emisiones se da en los primeros años

(hasta 60%). Luego del año 30 solo será emitido el 40% restante, distribuido en 70 años. Es por ello que en escenarios como el presente sería necesario continuar con la quema del biogás por lo menos hasta 30 años luego de clausurar el RS.

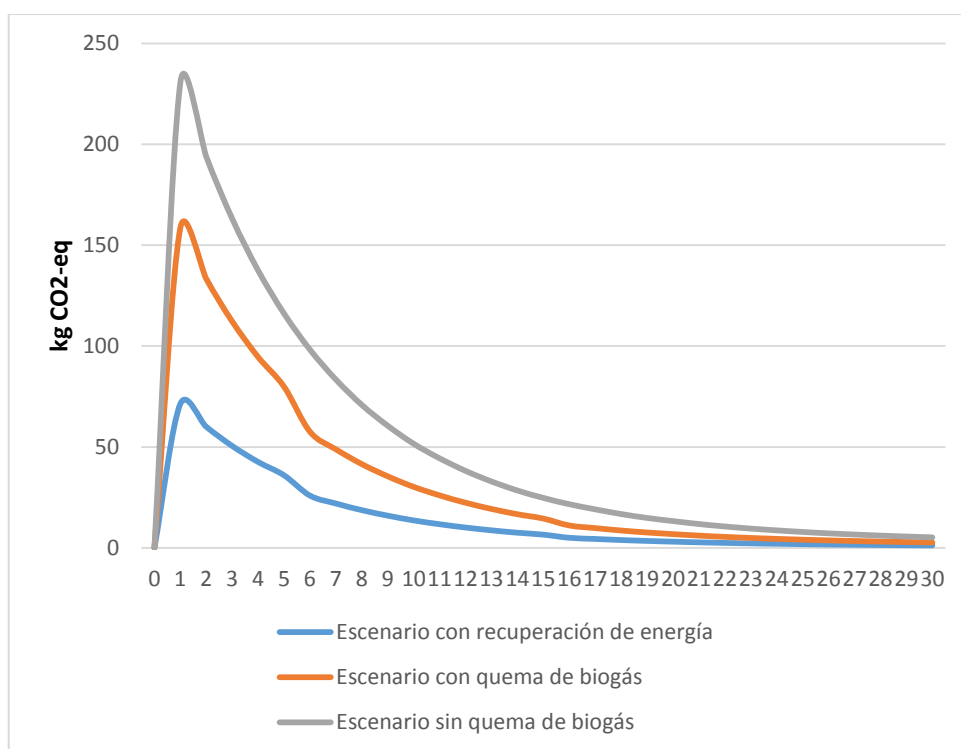


Figura 13: Emisiones anuales deGEI en kg CO₂-eq del emplazamiento de disposición final Jaquira para los 30 primeros años de haberse dispuesto la UF, con la constante k media, considerando la quema de biogás y la recuperación de energía.

De este gráfico también se puede apreciar de una manera más clara lo mencionado en el **capítulo 3.3.1.1.3.** sobre la inversión de las cantidades anuales descompuestas a partir de determinado año, en este caso a partir del año 16. Asimismo, al ver los valores pico se puede observar que los valores de las emisiones son más altos que aquellos del caso de Lima. Ello se debe fundamentalmente a las condiciones climáticas a las que está expuesto el emplazamiento.

3.3.1.3. Impacto ambiental: caso de estudio Nauta

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a las diversas etapas del tratamiento de los residuos sólidos en el RS de Nauta.

Todos los resultados conciernen a las emisiones de GEI equivalentes en kg CO₂-eq.

3.3.1.3.1. Emisiones totales

Las emisiones totales del RS de Nauta, según la UF empleada, ascienden a un rango de entre 1350 kg kg CO₂-eq a 1378 kg CO₂-eq. Ellas se encuentran en un rango promedio si se les compara con las emisiones de otros rellenos sanitarios de similares características – valga decir quema sin recuperación de energía de biogás – en otras regiones como Europa y Estados Unidos. Asimismo, son menores que las del emplazamiento de disposición final de Jaquira, principalmente debido a la ausencia de combustión del biogás. A pesar de ello, como se verá más adelante, la velocidad con la que se generan las emisiones es notablemente mayor a las 2 regiones analizadas anteriormente. Por ello, la mayor cantidad de emisiones se dará en los primeros años luego de haberse dispuesto los RSU. Adicionalmente, las emisiones son ampliamente elevadas si se las compara con otras tecnologías que incluyen recuperación de energía o reactores semi-anaeróbicos. La **Tabla N°34** muestra el detalle de los impactos según el factor *k* de descomposición de residuos empleado.

Tabla N°34: Emisiones de GEI en kg CO₂-eq totales del RS de Nauta según la constante *k* empleada por escenario por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta):

	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Botadero poco profundo	707.2	717.6	718.6
Botadero profundo	1314	1333	1335
RS sin tratamiento de biogás (actual)	1350	1376	1378
RS con quema de biogás	536.8	695.5	748.2
RS con recuperación de energía	188.1	354.5	402.1

En las secciones posteriores se realizará un desglose de los impactos con mayor detalle según los principales procesos llevado a cabo en el RS.

3.3.1.3.2. Infraestructura y bienes capitales

El impacto ambiental de la infraestructura del RS de Nauta, similarmente a lo que ocurre en el estudio realizado por Brogaard y otros colegas en 2013, es considerablemente reducido por UF. Si bien el impacto de este relleno es significativamente menor a lo expuesto en dicho estudio, en donde se concluye que los bienes materiales e infraestructura pueden representar hasta aproximadamente el 10% del impacto total del relleno, también es menor al caso de Portillo Grande. En este caso, el impacto total de la infraestructura equivale a 2.35 kg CO₂-eq, lo cual se traduce a ser el 0.17% del impacto total en todos los casos. Esto se debe principalmente al volumen reducido del relleno y a la precaria infraestructura del emplazamiento. Asimismo, dado que el valor del impacto de la infraestructura no varía con la composición de los residuos o de las condiciones climáticas, este se mantiene constante para los 3 casos. En la **Tabla N°35** se pueden ver dichos resultados según el *k* empleado.

Tabla N°35: Emisiones de la infraestructura del RS Nauta según la constante *k* empleada para el escenario actual por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta):

	<i>k</i> _{inferior}	<i>k</i> _{medio}	<i>k</i> _{superior}
Impacto (kg CO ₂ -eq)	2.35	2.35	2.35
Porcentaje del impacto total	0.17%	0.17%	0.17%

Estos resultados se deben fundamentalmente a la naturaleza de la infraestructura del RS y al volumen de operación diaria del mismo. Dado que el RS tiene una extensión de aproximadamente 4.5 Ha y percible cerca de 17 toneladas de RSU al día, los principales contribuyentes al impacto son la quema de combustibles fósiles. Este uso de combustibles se da tanto para el funcionamiento de electrónicos como para el uso de la maquinaria del lugar (retroexcavadoras, volquetes y otros).

3.3.1.3.3. Generación y tratamiento de biogás

Como se mencionó en capítulos previos (3.2.3.3. y 3.2.3.4.), la etapa de generación y tratamiento del biogás ocurren diversas reacciones: unas generarán biogás, mientras que otras lo oxidarán. Por lo tanto, existe un porcentaje del biogás que no será realmente emitido y que, sobre el potencial total generado dentro del RS, puede considerarse como negativo, es decir, como una emisión evitada.

El impacto total de la etapa de generación y tratamiento de biogás en el RS de Nauta varía entre 1615.47 kg CO₂-eq y 1616.22 kg CO₂-eq, dependiendo de la constante k considerada. En la siguiente tabla, la **Tabla N°36**, se ve con mayor detalle los procesos específicos de esta etapa, así como sus impactos según la constante empleada.

Tabla N°36: Emisiones de GEI en kg CO₂-eq totales del RS de Nauta según la constante k empleada por proceso por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	875.25	1299.02	1457.75
Oxidación (años 0 a 5)	-78.98	-117.17	-131.49
Descomposición (años 5 a 15)	559.62	250.99	105.07
Oxidación (años 5 a 15)	-50.54	-22.74	-9.60
Descomposición (años 15 a 100)	180.60	65.83	53.40
Oxidación (años 15 a 100)	-25.07	-9.14	-7.41
Ventilación	643.3	565.4	540.2
Impacto total	1615.47	1615.83	1616.22

Al analizar los resultados puede parecer un poco engañoso que el impacto total de esta etapa sea mayor al impacto total de todo el ciclo de vida del relleno sanitario. Sin embargo, como se verá en la sección siguiente, el impacto se ve reducido debido al secuestro de carbono que se produce en el confinamiento de los RSU en el RS.

Asimismo, al comparar los periodos de 0 a 5 años con los periodos de 15 a 100 años, se puede apreciar claramente que del mismo modo que en

el emplazamiento de disposición final de Jaquira, con el incremento de la constante k se invierte la tendencia de generación de GEI. Es decir, en los primeros 15 años se generará una mayor cantidad de emisiones al considerar el rango alto de los valores propuestos para la constante k , mientras que en los siguientes 85 años, con el mismo valor de la constante, se generarán menos emisiones que con los valores inferiores de la constante. De similar forma se puede ver que estas variaciones pueden ser más significativas que el caso de la costa peruana y la sierra andina, fundamentalmente debido a la leve variabilidad climática de la amazonía peruana y sus lluvias constantes casi a lo largo de todo el año.

De igual modo, se debe rescatar que de existir quema de biogás, como se adelantó en capítulos anteriores, si bien se generan emisiones de GEI, también se reduce el impacto en comparación a la emisión directa del biogás; esto debido a la oxidación del metano que ocurre al quemarlo. A continuación, en la **Tabla N°37**, se muestran los resultados de un modelado el cual simula las condiciones del RS de Nauta, con la diferencia que se asume una hipotética combustión del biogás.

Tabla N°37: Emisiones totales del RS de Nauta según la constante k empleada por proceso considerando la combustión del biogás por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	875.25	1299.02	1457.75
Oxidación (años 0 a 5)	-78.98	-117.17	-131.49
Descomposición (años 5 a 15)	559.62	250.99	105.07
Oxidación (años 5 a 15)	-50.54	-22.74	-9.60
Descomposición (años 15 a 100)	180.60	65.83	53.40
Oxidación (años 15 a 100)	-25.07	-9.14	-7.41
Combustión	6.52	5.73	5.47
Impacto total	713.5	816.3	843.2

Por consiguiente, al comparar el escenario con quema de biogás y el escenario con emisión directa de este a la atmósfera, tenemos en la **Tabla N°38** las siguientes variaciones para los k 's respectivos:

Tabla N°38: Variación de los impactos generados en el RS entre el caso con quema de biogás y emisión directa, según la constante k utilizada por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta):

Escenario	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Emisión directa de biogás	1615.47	1615.83	1616.22
Quema de biogás	713.5	816.3	843.2
Variación	55.83%	49.48%	47.83%

De igual modo, se debe rescatar que de existir quema de biogás, como se adelantó en capítulos anteriores, si bien se generan emisiones de GEI, también se reduce el impacto en comparación a la emisión directa del biogás; esto debido a la oxidación del metano que ocurre al quemarlo. A continuación, en la **Tabla N°39**, se muestran los resultados de un modelado el cual simula las condiciones del RS de Nauta, con la diferencia que se asume una hipotética combustión del biogás.

Tabla N°39: Emisiones totales del RS de Nauta según la constante k empleada por proceso considerando la recuperación de energía del biogás por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Descomposición (años 0 a 5)	875.25	1299.02	1457.75
Oxidación (años 0 a 5)	-78.98	-117.17	-131.49
Descomposición (años 5 a 15)	559.62	250.99	105.07
Oxidación (años 5 a 15)	-50.54	-22.74	-9.60
Descomposición (años 15 a 100)	180.60	65.83	53.40
Oxidación (años 15 a 100)	-25.07	-9.14	-7.41
Recuperación de energía	-518.90	-456.00	-435.70
Impacto total	383.3	549.6	597.2

Por consiguiente, al comparar el escenario con recuperación de energía y el escenario con emisión directa de este a la atmósfera, tenemos en la **Tabla N°40** las siguientes variaciones para los k 's respectivos:

Tabla N°40: Variación de los impactos generados en el RS entre el caso con recuperación de energía y emisión directa, según la constante k utilizada:

Escenario	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Emisión directa de biogás	1615.47	1615.83	1616.22
Recuperación de energía	383.3	549.6	597.2
Variación	76.27%	65.99%	63.05%

De estos resultados puede apreciarse que al existir la quema del biogás, los impactos disminuyen notoriamente. Por ende, se puede decir que el simple hecho de quemar el biogás reduciría en hasta un 56% el impacto total de un RS en condiciones similares a las del emplazamiento de disposición final de Nauta. Por otro lado, de existir recuperación de energía, dicho porcentaje incrementaría hasta el 76%, por lo que los beneficios ambientales de su incorporación serían notoriamente amplios. Sin embargo, estos porcentajes son menores a los escenarios anteriores (Lima y Cusco), debido a la distribución temporal de las emisiones. Esta problemática será expuesta en acapites posteriores.

3.3.1.3.4. Generación y tratamiento de lixiviados

Como se explicó en el acápite **3.2.1.5.**, la generación de los lixiviados se da en relación a la descomposición de los desechos, las temperaturas y las precipitaciones de la zona. Luego, un porcentaje de los lixiviados es colectado por los sistemas de tratamiento, mientras que el porcentaje restante percola por el suelo. Ambas fracciones, las cuales tienen la misma composición, arrastran consigo una parte del carbono presente en los RSU dispuestos en el RS. Los lixiviados colectados son transportados a pozos especiales, para luego ser reinyectados al relleno. Al ser reinyectados, se acelera la descomposición de los residuos, pero además estos vuelven a percolar hasta el fondo del relleno, en donde una vez más, un porcentaje se

infiltra en el subsuelo y otro porcentaje es colectado por los sistemas de colección.

Existe una fracción de los residuos dispuestos que a lo largo de los 100 años analizados no se logra descomponer. Dichos residuos contienen una fracción compuesta por carbono, la cual al no ser emitida al ambiente, puede ser considerada como una emisión evitada. En consecuencia, se considera que dichos residuos secuestran carbono por el almacenamiento de los residuos sólidos.

A continuación, en la **Tabla N°41**, se pueden ver las cantidades de carbono secuestradas por los lixiviados según la constante k utilizada, así como el porcentaje evitado que representan sobre el total de emisiones generadas por la descomposición (acápito 3.3.1.1.4.).

Tabla N°41: Secuestro de carbono total RS de Nauta según la constante k empleada por proceso por UF (1 tonelada de RSM rellena en el RS Nauta):

Proceso	Impacto (kg CO ₂ -eq)		
	k_{inferior}	k_{medio}	k_{superior}
Secuestro de carbono por almacenamiento de residuos	-195.2	-195.1	-195.1
Porcentaje (%) sobre el total de emisiones generadas en la descomposición	12.1	12.1	12.1

Debido a los altos ratios de residuos orgánicos generados en nauta, los cuales poseen una constante k elevada, es decir, se descomponen más rápido, los porcentajes de secuestro de carbono son considerablemente menores que a los casos anteriores.

3.3.1.3.5. Emisiones anualizadas

Al analizar el ciclo de vida de un RS, debido a la naturaleza de la descomposición de los residuos, es imperativo descomponer la generación de biogás a lo largo del tiempo. De esa manera se puede afrontar en mejor medida las estrategias necesarias para darle un mejor desempeño al RS. A continuación, en la **Figura 10**, se dan las emisiones

generadas debido a la descomposición de los residuos a lo largo de los primeros 30 años de vida del RS. Se eligió un tiempo de visualización de 30 años debido a que, como se ve en la imagen, en dicha cantidad de años se generó entre el 74% y el 87% de las emisiones totales (a 100 años), según la constante k empleada. Asimismo, en la presente figura solo se muestran los impactos producidos por la generación del biogás.

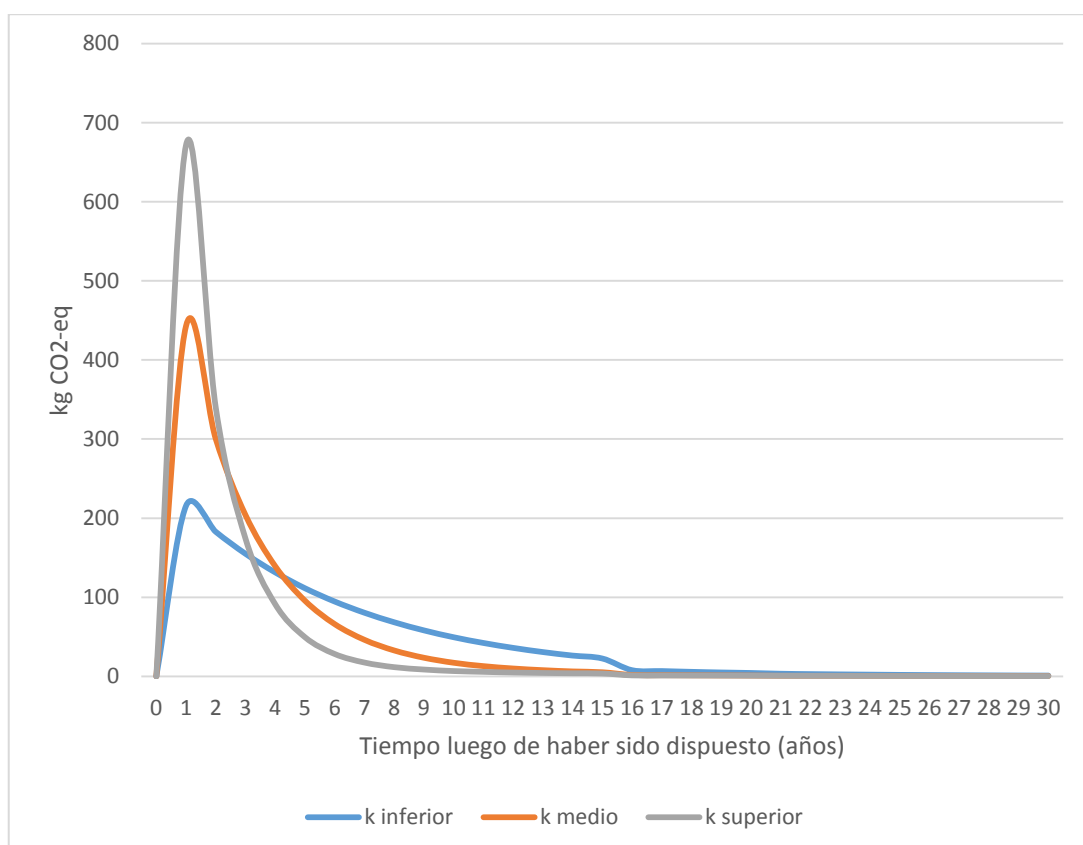


Figura 14: Emisiones anuales de GEI en kg CO₂-eq del RS Portillo Grande para los 30 primeros años de haberse dispuesto la UF, según la constante k , sin considerar tratamiento de biogás.

De este gráfico se puede apreciar de una manera más clara lo mencionado en el subcapítulo 3.3.1.1.3. sobre la inversión de las cantidades anuales descompuestas según las constantes k a partir de determinado año, en este caso a partir del año 3. Asimismo, se puede observar con mayor claridad que, como se mencionó en el capítulo 3.3.1.3.3., la mayor parte de los residuos se descomponen, debido a las altas y constantes temperaturas y precipitaciones de la selva amazónica, de una manera más acelerada. En consecuencia, dentro de los 5 primeros años se generan entre el 54% y el 90% de los gases totales disponibles a

emitir a la atmósfera. Asimismo, se puede ver que del año 16 en adelante las emisiones anuales son prácticamente despreciables, ya que a partir de dicho año, solo quedan por emitir entre el 11% y el 3% de las emisiones totales según la constante k empleada. Tener en consideración estos resultados es crucial para el entendimiento de un RS en condiciones similares, y por ende para el diseño y manejo de futuras instalaciones de este tipo.

De similar manera pueden ser presentados los resultados incluyendo la combustión del biogás. En este caso, dado que se da en similar medida para los 3 coeficientes, solo se presentará en la imagen el escenario con el k medio.

En la **Figura 15** se puede diferenciar con mayor claridad las variaciones presentes en cada uno de los 3 casos. Asimismo, en ella se puede ver la mejora sustancial que representan la quema del biogás y en mayor medida la recuperación de energía respecto de la emisión directa de este. Las disminuciones de las emisiones que se pueden apreciar en el años 5 se deben fundamentalmente a que se asumió que en dicho año se aumentaba la eficiencia con la que se colectaba el biogás por asuntos operativos y técnicos propios de los RRSS. Asimismo, esto se debió a que a partir de dicho año habría cantidades suficientes de residuos para poder intensificar las labores de colección de biogás en el RS. Adicionalmente, al realizar un análisis minucioso a ambas figuras queda claro que la mayor cantidad de emisiones se da en los primeros años. Sin embargo, a diferencia de los RRSS anteriores, es luego del año 15 que prácticamente no se emiten gases a la atmósfera; para el año 5 se ha emitido entre el 54% y el 90%, y para el año 15 se ha emitido entre el 89% y 97%. Es por ello que en escenarios como el presente solo sería necesario continuar con la quema del biogás por lo menos hasta 5 años luego de clausurar el RS.

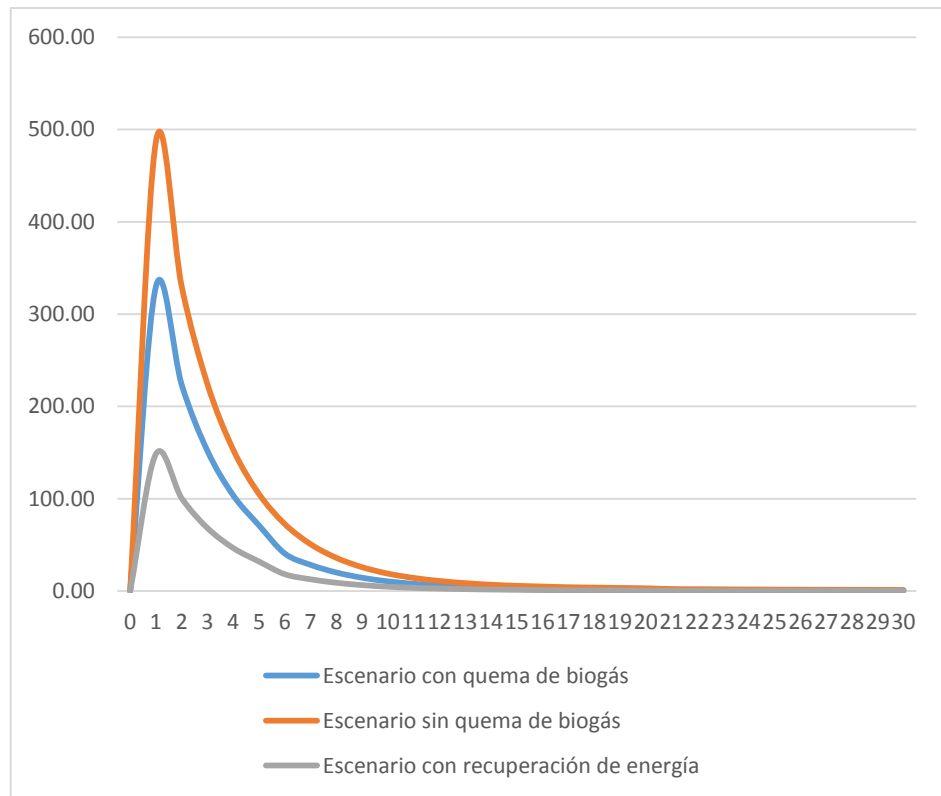


Figura 15: Emisiones anuales del RS Nauta para los 30 primeros años de haberse dispuesto la UF, con la constante k media, considerando la quema de biogás y la recuperación de energía.

3.3.2. Impacto ambiental: Método ReCiPe 2008

A lo largo del presente acápite se expondrán los resultados comparativos entre los 3 rellenos para las categorías de impacto del método ReCiPe 2008. Además, estos impactos solo serán expuestos para los escenarios actualmente en operación.

3.3.2.1. Agotamiento de la Capa de Ozono (ACO)

En la categoría de impacto de ACO se puede ver claramente como en los 3 rellenos, el biogás, al tener en su composición otros gases contaminantes además del CO_2 y CH_4 , contribuye prácticamente en su totalidad al impacto total de cada RS. Asimismo, en menor medida contribuye a ellos la etapa denominada “infraestructura”. Esto se debe al uso de combustibles y otros materiales en la construcción y operación de

los RRSS. Los resultados para cada RS con las diferentes constantes k utilizadas se pueden ver a continuación en la **Tabla N°35** y en la **Figura 16**.

Tabla N°42: Resultados para la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono (ReCiPe 2008) para cada RS según las constantes k y las etapas del ciclo de vida analizadas.

Agotamiento de la Capa de Ozono (ACO) (kg CFC-11-eq)									
Etapas	Lima			Cusco			Nauta		
	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$
Oxidación	5.30E-04	5.35E-04	5.45E-04	2.53E-04	3.22E-04	3.32E-04	5.22E-04	5.79E-04	5.96E-04
Combustión	8.46E-06	8.69E-06	8.66E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.50E-04	5.92E-04	5.86E-04	3.49E-04	3.06E-04	2.92E-04
Infraestructura	1.56E-09	1.56E-09	1.56E-09	6.63E-09	6.63E-09	6.63E-09	8.39E-08	8.39E-08	8.39E-08
Lixiviados	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total	5.38E-04	5.44E-04	5.54E-04	9.03E-04	9.13E-04	9.18E-04	8.71E-04	8.85E-04	8.88E-04

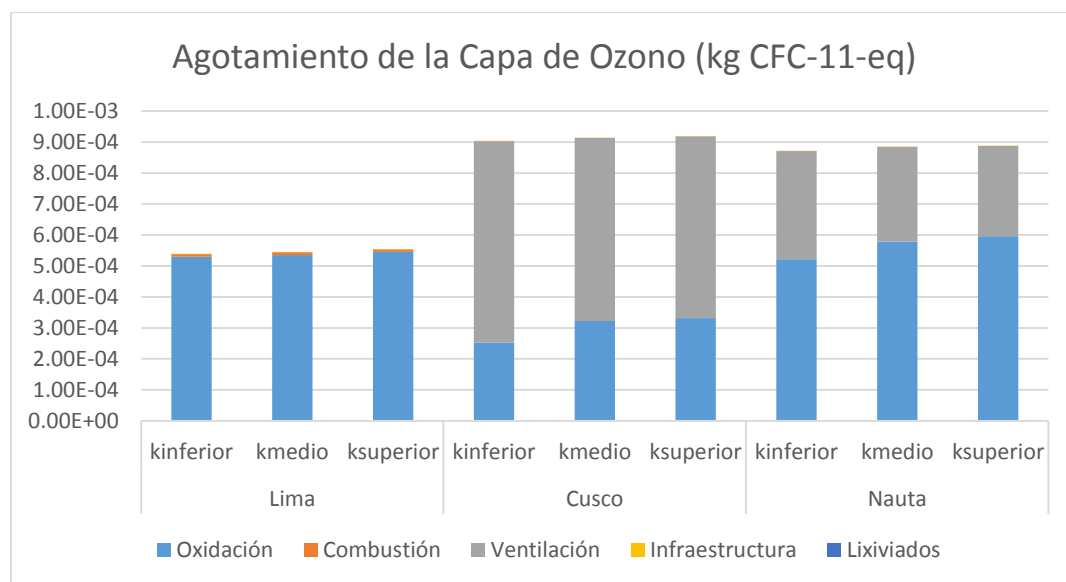


Figura 16: Resultados para la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono (ReCiPe 2008) para cada RS, según las constantes k y las etapas del ciclo de vida analizadas.

Tanto de la **Tabla N°42** como de la **Figura 15** se puede observar que el RS Portillo Grande tiene un impacto aproximadamente 30% menor a los escenarios de Cusco y Nauta. Esto se debe a la presencia de la quema del biogás, en la que sustancias altamente contaminantes como los CFC's y HCFC's son descompuestos. Como se vio en el acápite 3.2.1.4., la combustión del biogás elimina en hasta un 98% la presencia de gases altamente contaminantes en esta categoría, como el diclorometano, tetracloruro de carbono y el dicloroetano. Estos resultados muestran que la combustión de estos gases juega un papel importante en la reducción del impacto de ACO. Esto teniendo en consideración la firma de la enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, en el que los países firmantes se comprometieron a reducir progresivamente las emisiones de HCFC's, CFC's y HFC's. Asimismo, al reducir los HFC's, el acuerdo de Kigali fortalece el Acuerdo de París, ya que dichos contaminantes también tienen un elevado potencial de calentamiento global..

3.3.2.2. Acidificación Terrestre (AT)

En la categoría de impacto de AT se puede ver claramente como en los 3 rellenos, la etapa de infraestructura y operación, al consumir combustibles fósiles y otros materiales contaminantes, tiene una participación considerable del impacto total de los RRSS. Sin embargo, esto se da en menor medida en Lima y Nauta, donde la infraestructura es más rudimentaria que en Cusco, en donde se han empleado geomallas y geo membranas de HDPE, el cual es un material sintético que en su etapa de producción genera contaminantes afines a esta categoría de impacto. Por otro lado, se puede ver como en el RS Portillo Grande se generan impactos adicionales a los mencionados anteriormente, en la etapa de combustión del biogás. Ello es consecuencia de la combustión en sí del biogás, la cual, si bien reduce los impactos en categorías como CC, los incrementa en la categoría de AT. Los resultados para cada RS con las diferentes constantes k utilizadas se pueden ver a continuación en la **Tabla N°36** y en la **Figura 17**. Dichos resultados no están en función de las constantes k ya que su variación no afectó el análisis.

Tabla N°43: Resultados para la categoría de Acidificación Terrestre (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas.

Etapas	Acidificación Terrestre (AT) (kg SO ₂ -eq)		
	Lima	Cusco	Nauta
Oxidación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Combustión	3.22E-02	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Infraestructura	1.26E-02	5.00E-02	7.81E-03
Lixiviados	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total	4.47E-02	5.00E-02	7.81E-03

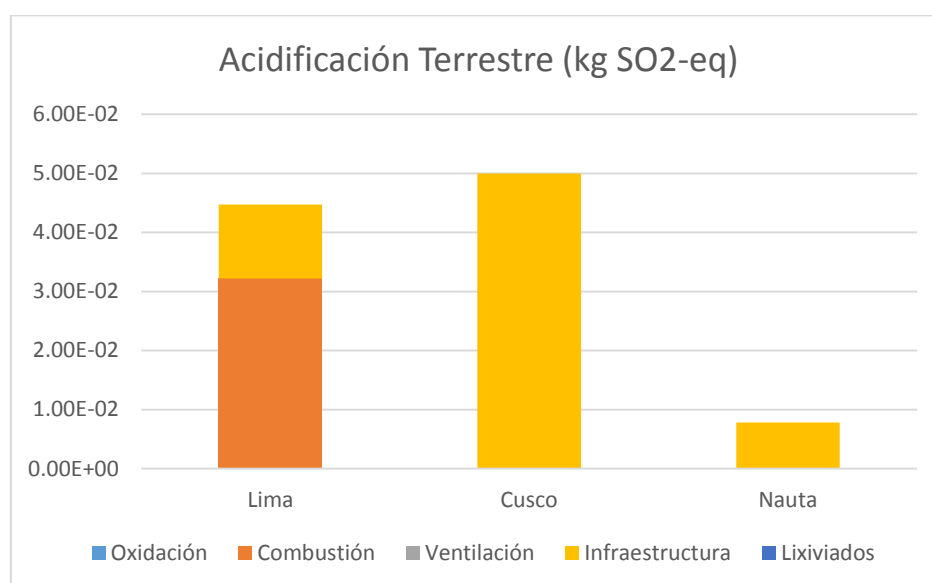


Figura 17: Resultados para la categoría de Acidificación Terrestre (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas.

En el caso de Lima, las principales emisiones contribuyentes al impacto fueron las de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco y óxidos de azufre, fundamentalmente por la combustión del biogás. En cuanto al emplazamiento de Cusco, durante la producción de los materiales de pertenecientes a la infraestructura, como el HDPE, y por el consumo de combustibles se emitieron, de igual modo, los contaminantes mencionados anteriormente. En el caso de Nauta las emisiones fueron óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, pero en menores cantidades.

3.3.2.3. Eutrofización de Agua Dulce (EAD)

En la categoría de impacto de EAD se puede observar claramente en los resultados como los 3 RS tiene resultados notoriamente distintos. Los resultados para cada RS para las diferentes etapas del ciclo de vida se pueden ver a continuación en la **Tabla N°44** y en la **Figura 18**. Los resultados en cuestión no están en función de las constantes k ya que su variación no afectó el análisis.

Tabla N°44: Resultados para la categoría de Eutrofización del Agua Dulce (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas.

Etapa	Eutrofización de Agua Dulce (kg P-eq)		
	Lima	Cusco	Nauta
Oxidación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Combustión	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Infraestructura	2.57E-06	1.57E-05	2.77E-05
Lixiviados	3.53E-06	6.37E-05	1.94E-04
Total	6.10E-06	7.94E-05	2.21E-04

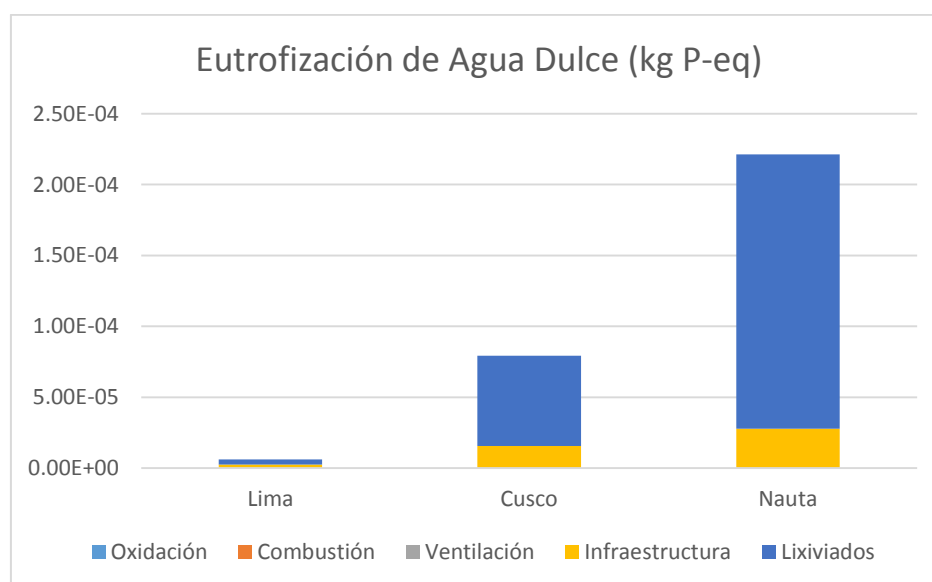


Figura 18: Resultados para la categoría de Acidificación Terrestre (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas.

Al evaluar la **Figura 18**, se puede ver claramente como el RS ubicado en Nauta tiene un impacto doblemente mayor que el ubicado en Cusco, y casi 40 veces mayor al de Portillo Grande. Este fenómeno se debe fundamentalmente a las precipitaciones de cada localidad, dado que en nauta son vastamente superiores a los otros 2 escenarios. La intensidad de las precipitaciones afecta directamente a la generación de lixiviados, por lo que es precisamente en dicha etapa en la que el impacto se ve incrementado al comparar los 3 escenarios. Dado que las precipitaciones son más intensas, una mayor cantidad de contaminantes se disuelven en los lixiviados y se emiten al ambiente. En los tres casos los principales contaminantes son el fosfato y el fósforo, presentes tanto en el suelo como en el medio acuático.

3.3.2.4. Eutrofización Marina (EM)

El caso de la EM es similar a la EAD en cuanto a la predominancia de los impactos según cada RRSS. Sin embargo, los 3 emplazamientos tienen resultados notoriamente distintos. Los resultados para cada RS para las diferentes etapas del ciclo de vida se pueden ver a continuación en la **Tabla N°45** y en la **Figura 19**. Los resultados en cuestión no están en función de las constantes k ya que su variación no afectó el análisis.

Tabla N°45: Resultados para la categoría de Eutrofización del Agua Dulce (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas.

Etapas	Eutrofización Marina (kg N-eq)		
	Lima	Cusco	Nauta
Oxidación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Combustión	1.43E-03	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Infraestructura	8.89E-04	1.28E-03	3.93E-04
Lixiviados	9.29E-04	3.97E-03	1.93E-01
Total	3.24E-03	5.25E-03	1.94E-01

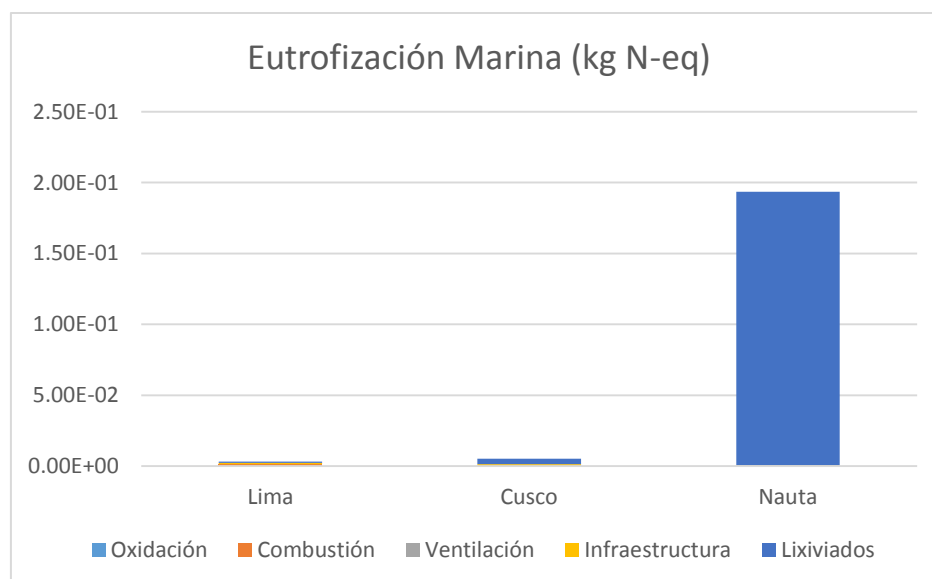


Figura 19: Resultados para la categoría de Acidificación Terrestre (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas.

A pesar que los resultados son similares los de la categoría de impacto de EAD, estos difieren de aquellos en diversos factores. Para empezar, la EAD cuantifica las emisiones potenciales de fósforo (P), las cuales tienen mayores impactos en agua dulce, mientras que la EM mide las emisiones potenciales de nitrógeno (N), que afectan en mayor medida a los ecosistemas marinos. Además, como se puede observar en las tablas, los resultados difieren en por lo menos 2 órdenes de magnitud, siendo los de EM mayores. Además, se ve una clara predominancia de la generación de los lixiviados por sobre las otras etapas del ciclo de vida de los RRSS. Esto se debe esencialmente a que, al haber mayores precipitaciones en la zona de Nauta, mayores cantidades del ion amonio, nitrato, nitrógeno, amoníaco y cianuro son lavadas y extraídas del relleno, introduciéndose así en el ambiente.

3.3.2.5. Toxicidad Humana (TH)

La categoría de Toxicidad Humana representa el daño potencial que diversas sustancias químicas pueden producir en los seres humanos. Los resultados para cada RS para las diferentes etapas del ciclo de vida según sus constantes k se pueden ver a continuación en la **Tabla N°46** y en la **Figura 20**.

Tabla N°46: Resultados para la categoría de Toxicidad Humana (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k de descomposición respectivas.

	Toxicidad Humana (kg 1.4 DB-eq)								
	Lima			Cusco			Nauta		
Etapas	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$
Oxidación	4.04E-01	4.08E-01	4.15E-01	1.93E-01	2.45E-01	2.52E-01	3.98E-01	4.39E-01	4.52E-01
Combustión	4.60E-01	4.73E-01	4.71E-01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.89E-01	4.45E-01	4.41E-01	2.63E-01	2.30E-01	2.20E-01
Infraestructura	4.93E-02	4.93E-02	4.93E-02	1.46E-01	1.46E-01	1.46E-01	1.81E-01	1.81E-01	1.81E-01
Lixiviados	6.27E-03	6.25E-03	6.25E-03	2.84E-02	2.84E-02	2.84E-02	3.56E-01	3.56E-01	3.56E-01
Total	9.20E-01	9.36E-01	9.42E-01	8.57E-01	8.64E-01	8.67E-01	1.20E+00	1.21E+00	1.21E+00

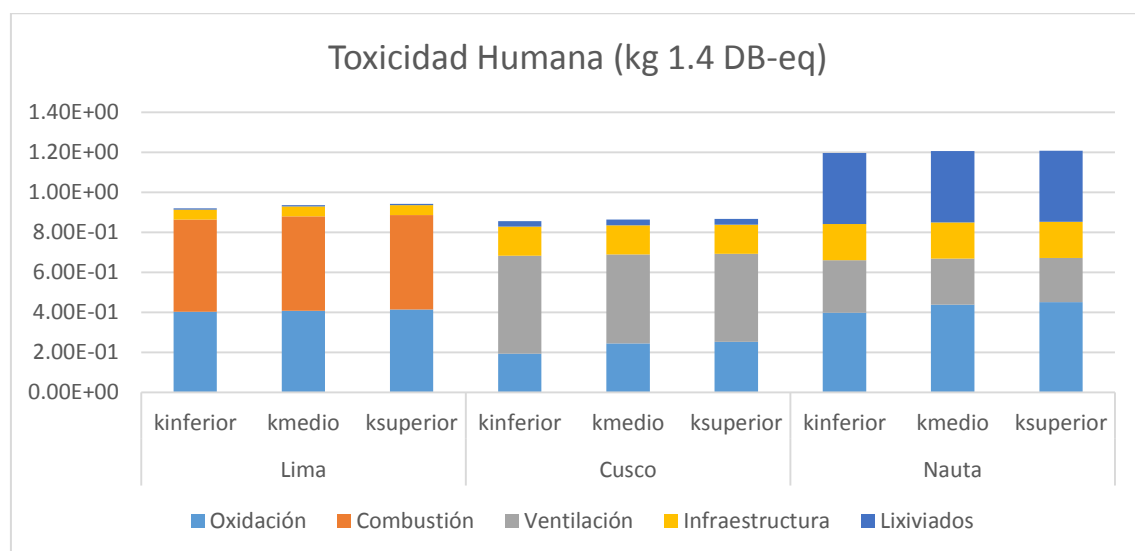


Figura 20: Resultados para la categoría de Toxicidad Humana (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k .

Como se puede ver en la **Figura 20**, en esta categoría de impacto la etapa de combustión en el RS Portillo Grande tiene impactos significativos. Esto se debe principalmente debido a que como la combustión del biogás se realiza abiertamente, diversos contaminantes producto de ella son

emitidos a la atmósfera sin filtrarse. Asimismo, otros compuestos que forman parte del biogás no logran ser oxidados por la combustión durante este proceso, por lo que del mismo modo son directamente emitidos. Siguiendo esta idea, la filtración del biogás a lo largo de las capas del RRSS no logra descomponer dichos compuestos. En el caso de Lima, las sustancias de mayor impacto fueron el CFC-12, el fluoruro de hidrógeno y el mercurio. De similar manera ocurre en Cusco, pero al existir capas impermeables y geomembranas, se dificulta ligeramente la emisión de dichos contaminantes, y se limita principalmente a los gases directamente emitidos al aire. Los contaminantes emitidos al aire son el CFC-12, el etano, mercurio, antimonio, fósforo, y los contaminantes emitidos al agua son las dioxinas, plomo, arsénico y tolueno. Por último, dada la magnitud de los lixiviados en Nauta, también tienen un impacto considerable en esta categoría de impacto. Los contaminantes emitidos al aire son el CFC-12, etano, mercurio, plomo, antimonio y CFC-11, y al agua los iones de arsénico, bario, selenio, zinc y plata. En los 3 casos las sustancias de mayor volumen emitido fueron los CFCs. Sin embargo, estas sustancias tienen factores de caracterización entre 10 y 1000 veces menores que los metales pesados (CFC-11: 64.4 kg 1.4 DB-eq; CFC-12: 535 kg 1.4 DB-eq; mercurio: 56600 kg 1-4 DB-eq; plomo: 16200 kg 1.4 DB-eq; arsénico: 14900 kg 1.4 DB-eq) . En consecuencia, dado que los metales pesados son considerados más tóxicos, al estar presentes en menores volúmenes sus impactos cobran gran importancia.

3.3.2.6. Ecotoxicidad Terrestre (ET)

La categoría de ET mide los impactos que generan diversos contaminantes en los ecosistemas en los suelos. A continuación, en la **Tabla N°47** y en la **Figura 21** se pueden ver los resultados para cada RS para las diferentes etapas del ciclo de vida según sus constantes *k* respectivas.

Tabla N°47: Resultados para la categoría de Ecotoxicidad Terrestre (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k de descomposición respectivas.

	Ecotoxicidad Terrestre (kg 1.4 DB-eq)								
	Lima			Cusco			Nauta		
Etapas	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$
Oxidación	1.48E-05	1.49E-05	1.52E-05	7.14E-06	8.89E-06	9.12E-06	1.46E-05	1.58E-05	1.62E-05
Combustión	1.38E-05	1.41E-05	1.41E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.69E-05	1.54E-05	1.53E-05	9.08E-06	7.96E-06	7.60E-06
Infraestructura	3.61E-05	3.61E-05	3.61E-05	6.30E-05	6.30E-05	6.30E-05	2.27E-04	2.27E-04	2.27E-04
Lixiviados	1.20E-09	1.19E-08	1.19E-09	2.59E-08	2.59E-08	2.59E-08	7.13E-08	7.13E-08	7.13E-08
Total	6.47E-05	6.52E-05	6.54E-05	8.71E-05	8.73E-05	8.74E-05	2.51E-04	2.51E-04	2.51E-04

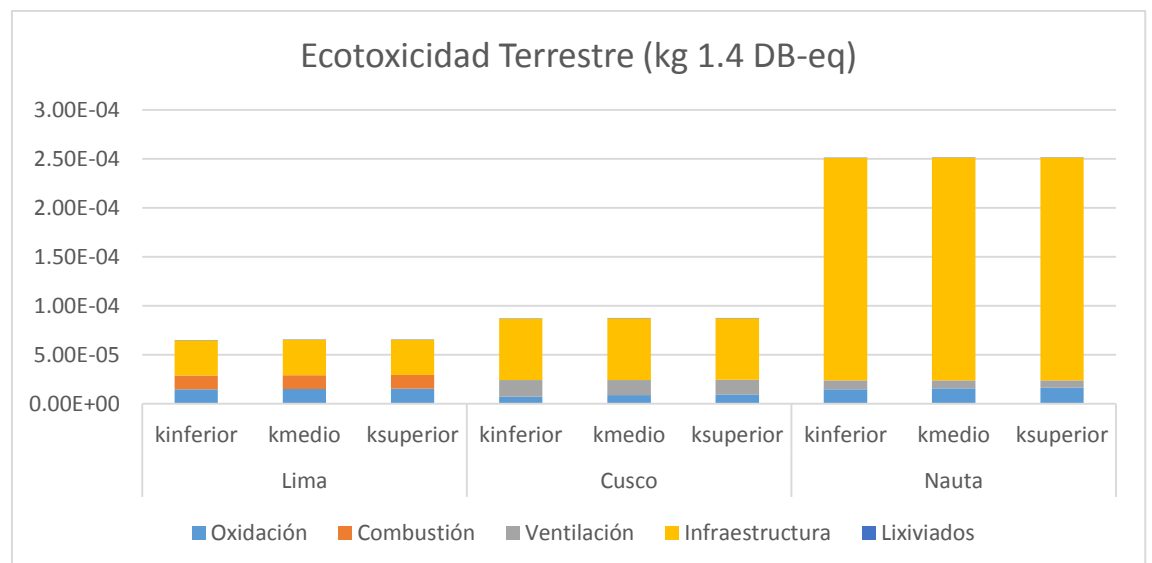


Figura 21: Resultados para la categoría de Ecotoxicidad Terrestre (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k .

Al analizar en detalle los resultados, se puede ver que de manera similar a los impactos de Nauta son los más pronunciados. Esto se debe debido al elevado volumen de movimiento de suelo tropical amazónico

deforestado en relación a la unidad funcional, además de los impactos generados por los materiales empleados en su construcción. Los principales contaminantes generadores de estos impactos son el vanadio, etano, cobre, zinc, mercurio, bromo, cromo cobre y fenol.

3.3.2.7. Ecotoxicidad de Agua Dulce (ETAD)

De manera similar a las anteriores categorías de toxicidad, la categoría de ETAD mide los impactos que generan diversos contaminantes en los ecosistemas de agua dulce. A continuación, en la **Tabla N°48** y en la **Figura 22** se pueden ver los resultados para cada RS para las diferentes etapas del ciclo de vida según sus constantes k respectivas.

Tabla N°48: Resultados para la categoría de Ecotoxicidad de Agua Dulce (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k de descomposición respectivas.

Ecotoxicidad de Agua Dulce (kg 1.4 DB-eq)									
Etapas	Lima			Cusco			Nauta		
	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$
Oxidación	1.51E-06	1.54E-06	1.55E-06	7.06E-07	8.91E-07	9.17E-07	1.46E-06	1.60E-06	1.64E-06
Combustión	2.49E-06	2.56E-06	2.55E-06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.76E-06	1.60E-06	1.59E-06	9.45E-07	8.28E-07	7.91E-07
Infraestructura	1.17E-04	1.17E-04	1.17E-04	3.04E-03	3.04E-03	3.04E-03	5.11E-04	5.11E-04	5.11E-04
Lixiviados	2.76E-04	2.75E-04	2.75E-04	2.14E-03	2.14E-03	2.14E-03	1.73E-02	1.73E-02	1.73E-02
Total	3.97E-04	3.96E-04	3.96E-04	5.18E-03	5.17E-03	5.17E-03	1.78E-02	1.78E-02	1.78E-02

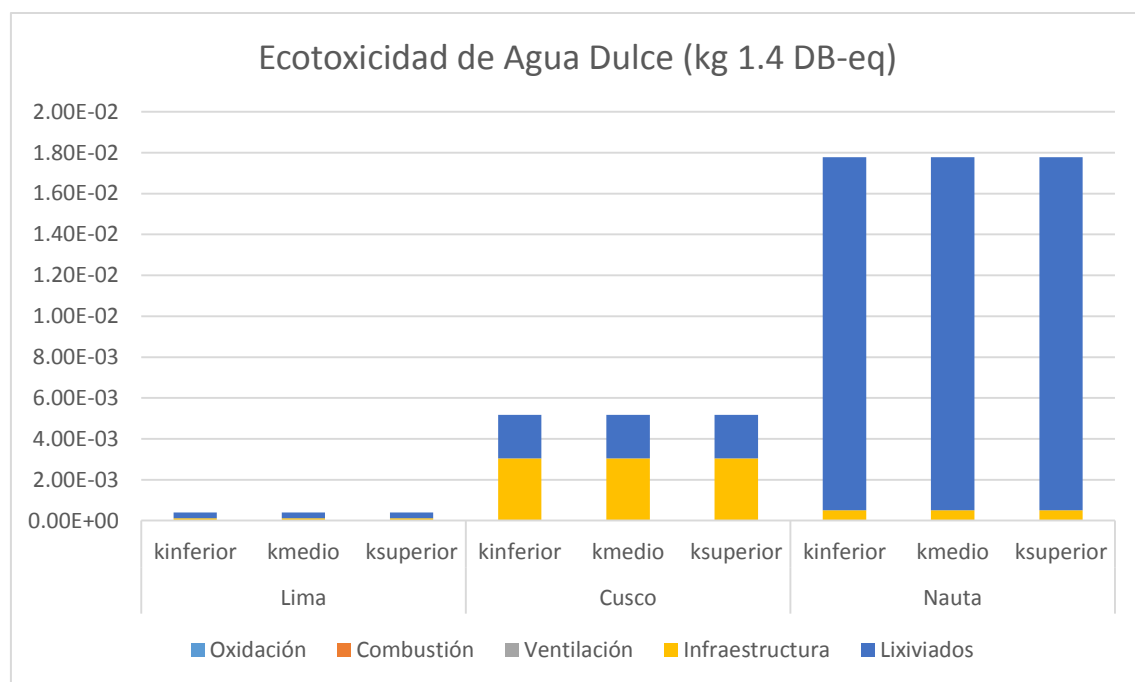


Figura 22: Resultados para la categoría de Ecotoxicidad de Agua Dulce (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k .

De estos resultados se puede ver como, al igual que en otros impactos relacionados a los ecosistemas acuáticos, el RS de Nauta tiene mayores impactos. Esto se debe a las mismas razones: al existir mayores precipitaciones, mayor cantidad de contaminantes son extraídos del RS en los lixiviados. Dichos contaminantes son los iones de cobre, níquel, arsénico, zinc y plata, además del bario, el selenio y el bromo. De similar modo, la presencia de materiales de mayor nivel técnico en Cusco incrementan el impacto de la etapa de infraestructura del RS. Asimismo, el bajo nivel de precipitaciones en Lima genera que su impacto en esta categoría sea notoriamente menor a ambos casos.

3.3.2.8. Ecotoxicidad Marina (ETM)

De manera similar a las anteriores categorías de toxicidad, la categoría de ETM mide los impactos que generan diversos contaminantes en los ecosistemas de agua marina. A continuación, en la **Tabla N°49** y en la **Figura 23** se pueden ver los resultados para cada RS para las diferentes etapas del ciclo de vida según sus constantes k respectivas.

Tabla N°49: Resultados para la categoría de Ecotoxicidad de Agua e (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k de descomposición respectivas.

	Ecotoxicidad Marina (kg 1.4 DB-eq)								
	Lima			Cusco			Nauta		
Etapas	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$	$k_{inferior}$	k_{medio}	$k_{superior}$
Oxidación	1.99E-04	2.01E-04	2.04E-04	9.53E-05	1.19E-04	1.23E-04	1.96E-04	2.13E-04	2.19E-04
Combustión	8.24E-05	8.47E-05	8.44E-05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.31E-04	2.11E-04	2.09E-04	1.24E-04	1.09E-04	1.04E-04
Infraestructura	2.57E-04	2.57E-04	2.57E-04	1.38E-03	1.38E-03	1.38E-03	2.12E-03	2.12E-03	2.12E-03
Lixiviados	2.41E-04	2.40E-04	2.40E-04	1.88E-03	1.88E-03	1.88E-03	1.49E-02	1.49E-02	1.49E-02
Total	5.81E-04	5.82E-04	5.82E-04	3.59E-03	3.59E-03	3.59E-03	1.74E-02	1.74E-02	1.74E-02

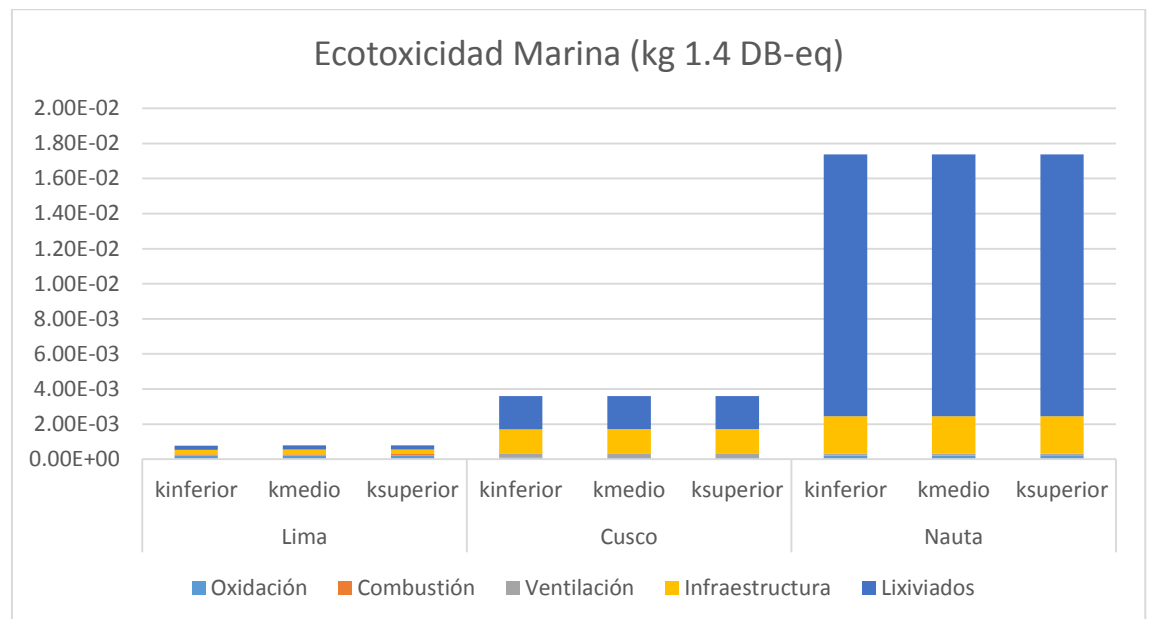


Figura 23: Resultados para la categoría de Ecotoxicidad de Agua Marina (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k .

De estos resultados se puede ver como, al igual que en otros impactos relacionados a los ecosistemas acuáticos, el RS de Nauta tiene mayores impactos. Esto se debe a las mismas razones: al existir mayores

precipitaciones, mayor cantidad de contaminantes son extraídos del RS en los lixiviados. Dichos contaminantes son los iones de cobre, níquel, arsénico, zinc, cromo y plata. De similar modo, la presencia de materiales de mayor nivel técnico en Cusco incrementan el impacto de la etapa de infraestructura del RS.

3.3.2.9. Formación de Material Particulado (FMP)

A continuación, en la tabla **Tabla N°50** y en la **Figura 24** se presentan los resultados para la categoría de impacto FMP. Debido a que los resultados no fueron afectados por las diferentes constantes de descomposición k los resultados no se muestran en función de ellos.

Tabla N°50: Resultados para la categoría de Ecotoxicidad de Agua e (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k de descomposición respectivas.

Formación de Material Particulado (kg PM10-eq)			
Etapas	Lima	Cusco	Nauta
Oxidación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Combustión	1.32E-02	0.00E+00	0.00E+00
Ventilación	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Infraestructura	5.52E-03	1.71E-02	4.05E-03
Lixiviados	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Total	1.87E-02	1.71E-02	4.05E-03

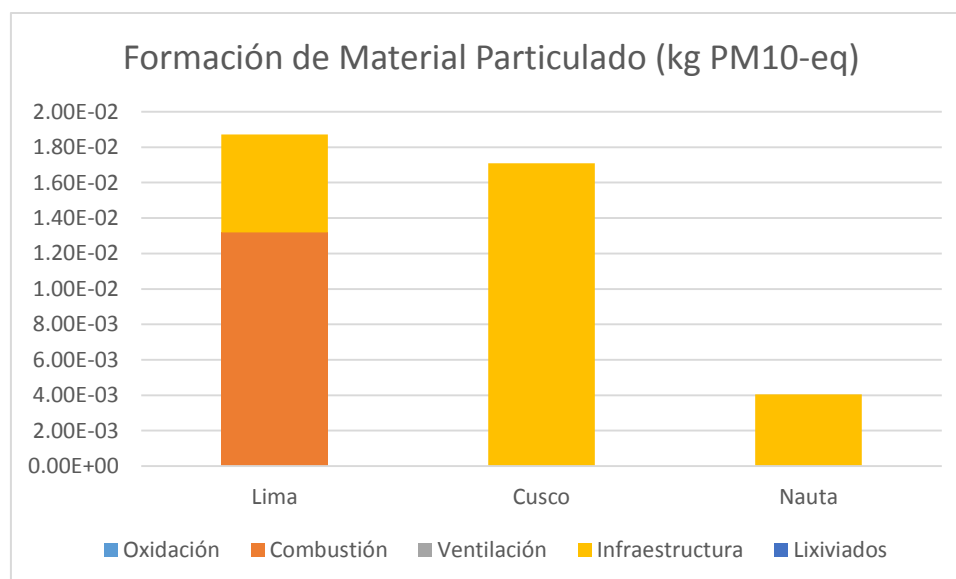


Figura 23: Resultados para la categoría de Ecotoxicidad de Agua Marina (ReCiPe 2008) para cada RS según las etapas del ciclo de vida analizadas y las constantes k .

Como se puede observar, los impactos más pronunciados se dan para el RS Portillo Grande, donde el principal aporte se da en la etapa de combustión. Esto se debe principalmente a la generación y emisión de óxidos de nitrógeno, material particulado de $2.5 \mu\text{m}$, al dióxido de azufre y al amoníaco como contaminantes residuales del biogás. Asimismo, se puede ver que para el emplazamiento cusqueño el impacto es extenso para la infraestructura. Esto se debe a las emisiones de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y material particulado de $2.5 \mu\text{m}$, el amoníaco y óxidos de azufre producto de la fabricación de los materiales de HDPE.

4. Conclusiones y recomendaciones

Para la creación de los ICVs, se ha tenido que estudiar el comportamiento y desempeño de distintos RRSS en diversas locaciones. Asimismo, a lo largo del presente reporte se han analizado las fuentes de impactos ambientales principales en RRSS. Para ello, se tuvo que considerar el ciclo de vida de los emplazamientos y las interacciones de estos con el ambiente, validando flujos y balances de masa en las diversas etapas de vida de los RRSS. En la presente sección se expondrán las conclusiones a las que se ha llegado a lo largo del presente estudio, así como las recomendaciones propuestas por el equipo investigador respecto a los principales resultados obtenidos.

4.1. Conclusiones

Como se expuso a lo largo del presente reporte, cuando se habla de RRSS es necesario tener en cuenta la ubicación geográfica del emplazamiento. Ella será de alta relevancia para la climatología de la zona en la que se ubiquen las instalaciones de tratamiento y disposición final de los RSU. En consecuencia, los diversos parámetros climáticos y geográficos propios de la locación en la que se encuentren estos emplazamientos serán determinantes para la velocidad de descomposición y generación de lixiviados en el relleno. Al tener temperaturas y precipitaciones más elevadas, se tendrá una descomposición de los residuos más veloz, como ocurre en el escenario de Nauta. Por el contrario, si se tienen ubicaciones más templadas y secas, se tendrán ratios de descomposición más bajos, lo que ocasionará que la descomposición sea más uniforme a lo largo del tiempo, como ocurre en el caso de Lima.

Teniendo esto en cuenta, y analizando los resultados de las diversas categorías de impacto, se puede ver que el RS de Nauta tiene mayores impactos en aquellas categorías directamente ligadas tanto a las condiciones geoclimáticas (temperaturas y precipitaciones fundamentalmente), como lo son CC, EAD, EM, ET, ETAD y ETM. Especialmente en las categorías relacionadas al agua se ve como la ausencia del manejo de los lixiviados y aguas pluviales tiene grandes impactos. Por lo tanto, sería adecuado tomar en cuenta estas consideraciones para mejorar el funcionamiento de los RRSS en condiciones similares (tropicales amazónicas y otras), de modo que dichos impactos se vean reducidos. Asimismo, siguiendo la misma línea y analizando las mismas categorías de impacto, se puede verificar que los resultados más bajos se dan para el RS Portillo Grande. Esto se debe, adicional y opuestamente a las razones expuestas para el RS Nauta (condiciones geoclimáticas secas y templadas), debido a la quema del biogás. Dicha combustión reduce el efecto de diversos contaminantes en el ambiente, los cuales están presentes en el biogás. Sin embargo, genera también otras afectaciones, como un impacto mayor en categorías de impacto como FMP y AT respecto a la emisión directa de estos gases. No obstante, estos impactos podrían verse reducidos y controlados de implementarse medidas técnicas como filtros posteriores al quemado de biogás en las chimeneas.

Pese a lo mencionado anteriormente, las categorías de impacto no convencionales, es decir aquellas categorías relacionadas a la toxicidad (TH, ET, ETAD y ETM) deben ser analizadas con cuidado. Estas categorías están basadas en métodos empíricos que siguen en desarrollo, por lo que pueden ser poco precisas y no

considerar gases u otros contaminantes que podrían tratarse como importantes. Es por ello que actualmente siguen llevándose a cabo intensivas investigaciones al respecto.

Por otra parte, como era de esperarse, al considerarse métodos de tratamiento del biogás se redujeron los impactos ambientales en los 3 rellenos analizados. Sin embargo, hubo un tratamiento que fue extensamente superior a los demás, especialmente en la categoría de impacto de Cambio Climático: la recuperación de energía. Ello se debió a que en el escenario de recuperación de energía se considera que se dejan de utilizar otros combustibles fósiles, específicamente gas natural, para emplear el biogás como fuente de energía. Al considerar dicho margen se reduce considerablemente el impacto. Contrariamente, la combustión simple de biogás no conduce a un reaprovechamiento de la energía, por lo que existiría un potencial energético desperdiciado.

Considerando lo expuesto anteriormente, lo más apropiado para que el Perú pueda cumplir sus metas propuestas en los NDC sería lograr la implementación de mecanismos de combustión o recuperación de energía en los RRSS. Con miras a reducir al menos el 10% de las emisiones de GEI mediante estas medidas, dada la temporalidad de las emisiones, sería de crucial importancia priorizar su implementación en emplazamientos tropicales por sobre regiones no tropicales. Asimismo, como se vio en capítulos anteriores, de implementar la combustión de biogás en Cusco y Nauta se reduciría concretamente entre el 40% y 70% de las emisiones actuales. Por otro lado, en Lima de implementar la recuperación de energía se reduciría hasta en un 75% las emisiones actuales. Por último, estas medidas no solo ayudarían al cumplimiento del Acuerdo de París, sino también al Acuerdo de Kigali. Esto se daría ya que se reduciría la emisión de sustancias altamente contaminantes que tienen alto potencial de calentamiento global y alto potencial de agotamiento de la capa de ozono, como lo son los HFC's.

4.2. Recomendaciones

Teniendo en consideración a las principales conclusiones plasmadas en este reporte, se procederá a brindar las recomendaciones principales por parte del grupo investigador.

La primera recomendación, aplicable a los 3 RRSS estudiados (y a todos los RRSS del país, ya sean actuales o futuros) radica en la educación a la población en la jerarquía de residuos. Ella se basa en la prevención de la generación, el reuso, el fomento segregación para el reciclado y compostaje, la

recuperación energética y finalmente la disposición final (European Commission, 2008). Al reducir los materiales ingresantes a los RRSS se reducirán sus impactos, y además se estará en camino de una economía circular.

La segunda recomendación radica en algo en lo que ha venido trabajando el MINAM en los últimos años: el salto de botaderos abiertos a RRSS. Esta solución implica cierto control en la disposición de los residuos, por lo que los impactos se ven reducidos en diversos aspectos. Esto también conllevaría a la tecnificación de los emplazamientos, incorporando así cubiertas impermeables como geomembranas, sistemas de colección de gases y lixiviados, y otros sistemas pertinentes. Ello permitiría reducir impactos ambientales en todas las categorías estudiadas. Asimismo, podría articularse un sistema de cooperación con recicladores informales que actualmente laboran en emplazamientos como estos en nefastas condiciones, de modo que ambos lados se vean beneficiados, como sucede en Cusco.

Una tercera recomendación, principalmente para hacerle frente a las condiciones geoclimáticas adversas, como lo serían las elevadas precipitaciones en RRSS tropicales, sería la implementación de sistemas de impermeabilización contra aguas pluviales en las celdas. Esto podría ir de soluciones menos costosas como el techado de las celdas, a más costosas como colocado de sistemas de bombeo, geomembranas y otras alternativas técnicas para prevenir el ingreso de dichas aguas y evacuarlas sin que afecten al relleno. Además, con ello se podría reducir considerablemente la generación de lixiviados y sus impactos vinculados.

En cuarto lugar, se recomienda que se apliquen capas denominadas “biocubiertas”, o de oxidación de metano. Estas contienen concentraciones altas de bacterias metanogénicas que consumen parte del CH_4 producido y lo transforman en CO_2 . Si bien esta alternativa no reduce las emisiones en ratios muy elevados, es una alternativa que no conlleva mayores inversiones, y podría aplicarse en cualquier RS.

Como quinta recomendación, y aplicable a los RRSS con manejos controlados y estables como Jaquira y Nauta, estaría la quema simple del biogás. La implementación de sistemas como este no requiere de inversiones muy significativas respecto al costo total del RS y genera beneficios ambientales elevados en diversos ámbitos. Sin embargo, si bien esta alternativa incrementa sustancialmente los ratios de descomposición del CH_4 en CO_2 respecto a la biocubierta, también se incrementan los costos de

operación. Como se vió en capítulos anteriores, la aplicación de esta medida en emplazamientos como estos reduciría su impacto en más del 50%. Además, esta medida podría ser aplicable a todo relleno independientemente de la cantidad de residuos que percibe diariamente.

La sexta recomendación se asemeja a la anterior. Esta consiste en implementar sistemas de generación de energía en los RS. Estos sistemas pueden ser de dos tipos: el primero consiste en la construcción de una planta de recuperación de energía en el emplazamiento de relleno. La segunda implica transportar el biogás generado por medio de tuberías a industrias cercanas que puedan emplear el biogás para generar energía. Como se vió anteriormente, la recuperación de energía es la medida que mayores beneficios ambientales brinda, sin embargo demanda altos costos de inversión iniciales, y podría no ser económicamente viable para RRSS pequeños.

Finalmente, en la **Tabla N°51** se muestran los inventarios finales a entregar al finalizar el proyecto. Estos serán preparados en inglés y estarán disponibles en acceso libre en dos formatos internacionales estandarizados: Ecospol d e ILCD.

Tabla N°51: Inventarios finales a entregar al finalizar el proyecto.

Zona representada	Inventario
Costa desértica	landfill, large size (>50 t), arid, without biogas treatment
	landfill, large size (>50 t), arid, biogas treatment, flare
	landfill, large size (>50 t), arid, biogas treatment, Energy recovery
Cordillera de los Andes	landfill, large size (>50 t), andean, without biogas treatment
	landfill, large size (>50 t), andean, biogas treatment, flare
	landfill, large size (>50 t), andean, biogas treatment, energy recovery
Selva tropical amazónica	landfill, small size (<20 t), tropical, without biogas treatment
	landfill, small size (<20 t), tropical, biogas treatment, flare
	landfill, small size (<20 t), tropical, biogas treatment, energy recovery

5. Agradecimientos

El equipo investigador quiere agradecer a la Municipalidad Provincial de Loreto – Nauta, la Municipalidad Provincial del Cusco e Innova Ambiental por poner a disposición los rellenos sanitarios que manejan de modo que el proyecto se pueda llevar a cabo de manera satisfactoria. Asimismo, agradecer a Joel Inga Pinedo, Fernando Vargas y Percy Taco Palma por su activa colaboración en la entrega de datos. También queremos agradecer al profesor titular de la Universidad de Cantabria, Rubén Aldaco, por las gestiones administrativas realizadas para hacer posible el convenio de colaboración entre las dos universidades. Por último, al Gobierno Federal de Alemania (Deutsche Bundesregierung) y a la ONU – Medio Ambiente por financiar el presente proyecto; sin su participación este no se podría estar haber llevado a cabo.

This project is part of the International Climate Initiative (IKI). The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) supports this initiative on the basis of a decision adopted by the German Bundestag.

6. Referencias

Barlaz, M. A. (1998). Carbon storage during biodegradation of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(2), 373-380.

Belboom, S., Digneffe, J. M., Renzoni, R., Germain, A., & Léonard, A. (2013). Comparing technologies for municipal solid waste management using life cycle assessment methodology: a Belgian case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(8), 1513-1523.

Biogas composition. (2017). *Biogas-renewable-energy.info*. Recuperado el 22 de mayo de 2017, de http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html

Bjelić, D., Čarapina, H. S., Markić, D. N., Pešić, Ž. Š., Mihajlov, A., & Vukić, L. (2015). Environmental assessment of waste management in Banjaluka region with focus on landfilling. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 14(6).

Brogaard, L. K., Stentsøe, S., Willumsen, H. C., & Christensen, T. H. (2013). Quantifying capital goods for waste landfilling. *Waste Management & Research*, 31(6), 585-598.

Brundtland, G. (1987). Our Common Future—Call for Action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291-294. doi:10.1017/S0376892900016805

Camobreco, V., Ham, R., Barlaz, M., Repa, E., Felker, M., Rousseau, C., & Rathle, J. (1999). Life-cycle inventory of a modern municipal solid waste landfill. *Waste Management and Research*, 17(6), 394-408.

Cherubini, F., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2009). Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, 34(12), 2116-2123.

Clavreul, J., Baumeister, H., Christensen, T. H., & Damgaard, A. (2014). An environmental assessment system for environmental technologies. *Environmental Modelling & Software*, 60, 18-30.

DEFRA (2004) Review of Environmental and Health Effects of Waste

Management: Municipal Solid Waste and Similar Wastes. Department for Environment, Food and Rural Affairs, London, UK

European Commission, 2015. Closing the Loop - an EU Action Plan for the Circular Economy, Com(2015) 614 Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission, Brussels.

Environmental Research and Education Foundation (1998) Final Report on the Life-Cycle Inventory of a Modern Municipal Solid Waste Landfill. Prepared by Ecobalance

Feldmann, J. and Hirner, V. (1995) Occurrence of volatile metal and metalloid species in landfill and sewage gases. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 60, 339-359

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy—A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768.

Gentil, E. C., Damgaard, A., Hauschild, M., Finnveden, G., Eriksson, O., Thorneloe, S., ... & Li, R. (2010). Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions. *Waste Management*, 30(12), 2636-2648.

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32.

Guerrero, L. A., Maas, G., & Hogland, W. (2013). Solid waste management challenges for cities in developing countries. *Waste Management*, 33(1), 220-232.

International Organization for Standardization (ISO) 14040:2006, *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*.

International Organization for Standardization (ISO) 14044:2006, *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. *Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan*, 2, 48-56.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013 – The physical Science Basis*. Disponible en:

http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf

Johannessen, L. M., & Boyer, G. (1999). *Observations of solid waste landfills in developing countries: Africa, Asia, and Latin America*. The World Bank.

Kirkeby, J. T., Birgisdottir, H., Hansen, T. L., Christensen, T. H., Bhandar, G. S., & Hauschild, M. (2006). Environmental assessment of solid waste systems and technologies: EASEWASTE. *Waste Management & Research*, 24(1), 3-15.

Kirkeby, J. T., Birgisdottir, H., Bhandar, G. S., Hauschild, M., & Christensen, T. H. (2007). Modelling of environmental impacts of solid waste landfilling within the life-cycle analysis program EASEWASTE. *Waste Management*, 27(7), 961-970.

Khoo, H. H., Tan, L. L., & Tan, R. B. (2012). Projecting the environmental profile of Singapore's landfill activities: Comparisons of present and future scenarios based on LCA. *Waste Management*, 32(5), 890-900.

Kong, D., Shan, J., Iacoboni, M., & Maguin, S. R. (2012). Evaluating greenhouse gas impacts of organic waste management options using life cycle assessment. *Waste Management & Research*, 30, 800-812.

Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., ... & Christensen, T. H. (2014a). Review of LCA studies of solid waste management systems—Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Management*, 34(3), 573-588.

Laurent, A., Clavreul, J., Bernstad, A., Bakas, I., Niero, M., Gentil, E., ... & Hauschild, M. Z. (2014b). Review of LCA studies of solid waste management systems—Part II: Methodological guidance for a better practice. *Waste Management*, 34(3), 589-606.

Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner*

Production, 115, 36-51.

Machado, S. L., Carvalho, M. F., Gourc, J. P., Vilar, O. M., & do Nascimento, J. C. (2009). Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste Management*, 29(1), 153-161.

Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T. H., & Scharff, H. (2009). Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management & Research*, 27(8), 825-836.

Manfredi, S., Christensen, T. H., Scharff, H., & Jacobs, J. (2010a). Environmental assessment of low-organic waste landfill scenarios by means of life-cycle assessment modelling (EASEWASTE). *Waste Management & Research*, 28(2), 130-140.

Manfredi, S., Tonini, D., & Christensen, T. H. (2010b). Contribution of individual waste fractions to the environmental impacts from landfilling of municipal solid waste. *Waste Management*, 30(3), 433-440.

Manfredi, S., Tonini, D., & Christensen, T. H. (2011). Environmental assessment of different management options for individual waste fractions by means of life-cycle assessment modelling. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 995-1004.

Manfredi, S., & Christensen, T. H. (2009). Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling. *Waste Management*, 29(1), 32-43. Ménard, J. F., Lesage, P., Deschênes, L., & Samson, R. (2004). Comparative life cycle assessment of two landfill technologies for the treatment of municipal solid waste. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9(6), 371-378.

Ministerio de Ambiente (MINAM) (2012). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) 2012*. Disponible en:

<http://sinia.minam.gob.pe/documentos/inventario-nacional-gases-efecto-invernadero-ingei-2012>

Ministerio de Ambiente (MINAM) (2013). *Informe: Diagnóstico de los Residuos Sólidos en el Perú*. Disponible en:

https://www.nefco.org/sites/nefco.org/files/pdf-files/1_diagnostico_de_los_residuos_solidos_en_el_peru.pdf

Ministerio de Ambiente (MINAM) (2014). *Sexto informe nacional de residuos sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal 2013*. Disponible en: <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20160328155703.pdf>

Ministerio de Ambiente (2015). *La Contribución Nacional del Perú – iNDC: agenda para un desarrollo climáticamente responsable*. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wp-content/uploads/sites/11/2015/12/LA-CONTRIBUCI%C3%93N-NACIONAL-DEL-PER%C3%9A1.pdf>

Ministerio de Ambiente (MINAM) (2016). *Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016 – 2024*. Disponible en: http://hera.pcm.gob.pe/ecoeficiencia/wp-content/uploads/2016/09/Plan_Nacional_Gestion_Integral_Residuos_Solidos_2016_2024.pdf

Niskanen, A., Manfredi, S., Christensen, T. H., & Anderson, R. (2009). Environmental assessment of Ämmässuo Landfill (Finland) by means of LCA-modelling (EASEWASTE). *Waste Management & Research*, 27(5), 542-550.

Olesen, A. O. U., Damgaard, A., (2014). Landfilling in EASETECH: Data collection and modeling of the landfill modules in EASETECH. *Internal report*.

Quesada, R., Salas, N., Arguedas, M., & Botero, R. (2007). Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás. *Revista Tierra Tropical*, 139-147.

Relleno Sanitario Huaycoloro | Petramás. (2017). *Petramas.com*. Recuperado el 22 de mayo de 2017, de <http://www.petramas.com/relleno-sanitario-huaycoloro-2/>

Scheutz, C. and Kjeldsen, P. (2005) Biodegradation of Trace Gases in Simulated Landfill Soil Cover Systems. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55, 878-885

Starostina, V., Damgaard, A., Rechberger, H., & Christensen, T. H. (2014). Waste management in the Irkutsk Region, Siberia, Russia: Environmental assessment of current practice focusing on landfilling. *Waste Management & Research*, 32(5), 389-396.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2010). Copenhagen Accord – Appendix II - Nationally appropriate mitigation actions of developing country Parties. Disponible en:

http://unfccc.int/meetings/cop_15/copenhagen_accord/items/5265.php

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015). Adoption of the Paris Agreement. Report No. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>

US EPA (1998). Landfill Air Emissions Estimation Model (Version 2.01). EPA-68-D1- 0117, EPA 68-D3-0033, US Environmental Protection Agency.

US EPA (2005). First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills. EPA-600/R-05/072, US Environmental Protection Agency.

US EPA (2006) *Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-cycle Assessment of Emissions and Sink*. 3rd edition. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA. Disponible en: <http://www.epa.gov/climatechange/wycd/waste/downloads/fullreport.pdf>

Vázquez-Rowe, I., Reyna, J. L., García-Torres, S., & Kahhat, R. (2015). Is climate change-centrism an optimal policy making strategy to set national electricity mixes? *Applied Energy*, 159, 108-116.

Visvanathan, C., Pokhrel, D., Cheimchaisri, W., Hettiaratchi, J. P. A., & Wu, J. S. (1999). Methanotrophic activities in tropical landfill cover soils: effects of temperature, moisture content and methane concentration. *Waste Management & Research*, 17(4), 313-323.

Wanichpongpan, W., & Gheewala, S. H. (2007). Life cycle assessment as a decision support tool for landfill gas-to energy projects. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1819-1826.

Yang, N., Damgaard, A., Lü, F., Shao, L. M., Brogaard, L. K. S., & He, P. J. (2014). Environmental impact assessment on the construction and operation of municipal solid waste sanitary landfills in developing countries: China case study. *Waste Management*, 34(5), 929-937.