

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Ambiental**



TESIS

**Aplicación de la Minería de Rellenos en el cálculo de la  
distribución de las rutas de valorización de un relleno sanitario**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental.

Elaborado por

Alvaro Reyes Izquierdo

 [0009-0005-6720-2963](https://orcid.org/0009-0005-6720-2963)

Asesor

M.Sc. Norvin Plumieer Requena Sánchez

 [0000-0001-6584-1466](https://orcid.org/0000-0001-6584-1466)

LIMA – PERÚ

2023

---

Citar/How to cite	Reyes Izquierdo [1]
Referencia/Reference	[1] A. Reyes Izquierdo, " <i>Aplicación de la Minería de Rellenos en el cálculo de la distribución de las rutas de valorización de un relleno sanitario</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2023.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---



---

Citar/How to cite	(Reyes, 2023)
Referencia/Reference	Reyes, A. (2023). <i>Aplicación de la Minería de Rellenos en el cálculo de la distribución de las rutas de valorización de un relleno sanitario</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

### ***Dedicatoria***

*A Dios, por permitirme culminar este proyecto.*

*A mis padres, Edgar y Patricia, por ser mi soporte espiritual de vida.*

*A mi hermana Marcela, por ser siempre un modelo de esfuerzo y dedicación.*

*A mis abuelos Nélide, Félix y Hilda por sus constantes palabras de aliento.*

*A mi abuelo Salomón, y mis bisabuelos Juan y Laura, que desde el cielo me*

*brindan la fortaleza para querer ser mejor cada día.*

## **Agradecimientos**

A MSc. Norvin Requena, por su orientación técnica y personal brindada para el desarrollo de la presente tesis.

A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, por brindarme una formación académica de primer nivel.

Al Grupo de Jóvenes Profesionales (YPG) de la Asociación Internacional de Residuos (ISWA), por abrirme las puertas al mundo de la gestión integral de residuos, y ser fuente de información técnica de primera mano.

A mi familia, por siempre impulsarme a ser mejor día a día.

A mi pareja, por ser siempre una fuente de inspiración personal y profesional.

A mis amigos operadores de maquinaria pesada, sin los cuales no podría haberse desarrollado la presente investigación.

A mis amigos del Código 2014-1 de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, por sus amistad y valiosos consejos.

## Resumen

La presente investigación se centró en aplicar los diversos aspectos metodológicos de la Minería de Rellenos (LFM), con la finalidad de valorizar los residuos almacenados en un relleno sanitario peruano, enfatizando el análisis en la caracterización y evaluación de alternativas de uso de la fracción combustible y la fracción fina (< 6.3 mm) obtenidas a partir de los residuos enterrados en dicha infraestructura de disposición final. Para tal fin, se tomó como área de estudio una celda de disposición final de residuos sólidos municipales en un relleno sanitario peruano. Dicha celda cuenta con un área superficial de 0.74 hectáreas, tiene un perímetro y una altura máxima de relleno de aproximadamente 345 metros y 5 metros, respectivamente, así como una antigüedad 9 a 10 años. Para el muestreo, se colectaron 7 muestras de residuos de 1 m<sup>3</sup> a través de excavaciones realizadas a 3 - 4 metros de profundidad. Las muestras se secaron al aire libre mediante volteo durante un periodo de 10 a 11 días, y las fracciones de residuos fueron clasificadas mediante procesos de tamizaje a 6.3 mm, clasificación manual y separación magnética, para ser finalmente pesadas. Posteriormente, la fracción fina (< 6.3 mm) y la fracción combustible (plásticos, madera, papel y cartón, caucho, textiles, pañales y materia orgánica) fueron analizadas en laboratorio con la finalidad de evaluar su uso potencial.

Los resultados mostraron que la fracción combustible representó el  $31.09 \pm 3.61$  % en masa de los residuos enterrados, siendo esta una cantidad favorable en miras a la posible ejecución de un proyecto de LFM. Esta fracción presentó un Poder Calorífico Inferior (PCI) en el rango de 13.71 a 15.69 MJ/kg, un contenido de cloro (Cl) en el rango de 0.3601 a 0.4141 %, y un contenido de mercurio (Hg) en relación al PCI de 0.021 a 0.027 mg/MJ, lo cual permitió clasificarlo como Combustible Sólido Recuperado (CSR) de acuerdo al estándar europeo EN 15359, asignándole un código de clase PCI 4; Cl 2; Hg 2. Respecto a su uso potencial, se realizó un comparativo con normas internacionales para uso de combustibles sólidos alternativos tales como la RAL-GZ 724 (Alemania), el Decreto

Ministerial 22 (Italia), la Ordenanza de Incineración de Residuos (Austria), y los Criterios de EURITS para la Coincineración de Residuos en Hornos de Cemento, determinándose finalmente su aptitud de uso para coincineración en plantas de producción de cemento.

Por otro lado, la fracción fina representó un  $26.67 \pm 1.43$  % del total de residuos enterrados. Respecto al uso potencial de esta fracción, el análisis comparativo de sus propiedades fisicoquímicas con requisitos mínimos internacionales para producción de compost tales como NCh 2880. Of 2004, NTEA-006-SMA-RS-2006, NTC 5167, y NMX-AA-180-SCFI-2018, descartó su aptitud como abono orgánico debido a excedencias en parámetros como arsénico, cadmio, cobre, plomo; así como a contenidos insuficientes de macronutrientes primarios, carbono orgánico y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Por otro lado, el alto contenido de materia orgánica presente en esta fracción (7.53 % - 11.66 %) descartó también su uso como material de construcción como subrasante o relleno. Dado que la fracción fina cumplió con los ECA-Suelos para uso de suelo Comercial/Industrial/Extractivo, se propone mantener su uso como material de cobertura en el mismo emplazamiento para la disposición final de nuevos residuos sólidos, evitando así los gastos de la explotación de nuevas canteras de arcilla.

La alta cantidad de fracción combustible demostró que la minería de rellenos (LFM) y la posterior producción de CSR para uso en la industria cementera representa una opción para el postcierre de los rellenos sanitarios peruanos, así como un método para extender su vida útil, y una opción para la valorización de residuos no biodegradables. Esta cantidad presupone una recuperación de volumen y espacio aéreo disponible para nuevos usos; los cuales, podrían ser 'reclamados' y habilitados, previa nivelación y conformación de terreno con la fracción fina, abriendo el camino a nuevas actividades productivas y de servicios como el establecimiento y venta de lotizaciones industriales.

Palabras clave — relleno sanitario, minería de rellenos, fracción fina, fracción combustible.

## Abstract

This research focused on applying the various methodological aspects of Landfill Mining (LFM), with the aim of valorizing the waste stored in a Peruvian landfill, emphasizing the analysis in the characterization and evaluation of alternative uses of the combustible fraction and the fine fraction (< 6.3 mm) obtained from the waste buried in this infrastructure. For this purpose, a municipal solid waste disposal cell in a Peruvian sanitary landfill was taken as the study area. This cell has a surface area of 0.74 hectares, a perimeter and a maximum fill height of approximately 345 metres and 5 metres, respectively, and is 9 to 10 years old. For sampling, seven waste samples 1 m<sup>3</sup> each were collected from excavations at a depth of 3-4 metres. The samples were air-dried by tumbling for a period of 10 to 11 days, and the residue fractions were sorted by sieving at 6.3 mm, manual sorting and magnetic separation, and finally weighed. Subsequently, the fine fraction (< 6.3 mm) and the combustible fraction (plastics, wood, paper and cardboard, rubber, textiles, nappies and organic matter) were analyzed in the laboratory in order to evaluate their potential use.

The results showed that the combustible fraction represented  $31.09 \pm 3.61$  % by mass of the buried waste, which is a favorable quantity for the possible implementation of an LFM project. This fraction presented a Net Calorific Value (NCV) in the range of 13.71 to 15.69 MJ/kg, a chlorine (Cl) content in the range of 0.3601 to 0.4141 %, and a mercury (Hg) content in relation to the NCV of 0.021 to 0.027 mg/MJ, which allowed it to be classified as Solid Recovered Fuel (SRF) according to the European standard EN 15359, assigning it a class code of LCP 4; Cl 2; Hg 2. Regarding its potential use, a comparison was made with international standards for the use of alternative solid fuels such as RAL-GZ 724 (Germany), Ministerial Decree 22 (Italy), the Waste Incineration Ordinance (Austria), and the EURITS Criteria for the Co-incineration of Waste in Cement Kilns, finally determining its suitability for use for co-incineration purposes in cement production plants.

On the other hand, the fine fraction represented  $26.67 \pm 1.43$  % of the total buried waste. Regarding the potential use of this fraction, the comparative analysis of its physicochemical properties with international minimum requirements for compost production such as NCh 2880. Of 2004, NTEA-006-SMA-RS-2006, NTC 5167, and NMX-AA-180-SCFI-2018, ruled out its suitability as organic fertilizer due to excesses in parameters such as arsenic, cadmium, copper, lead; as well as insufficient contents of primary macronutrients, organic carbon and Cation Exchange Capacity (CEC). Furthermore, the high content of organic matter present in this fraction (7.53 % - 11.66 %) also ruled out its use as a construction material for subgrade or fill. Since the fine fraction still complies with the Peruvian national standards for Commercial/Industrial/Extractive land use, it is proposed to maintain its use as a cover material on the same site for the final disposal of new solid waste, thus avoiding the costs of exploiting new clay quarries.

The high amount of combustible fraction demonstrated that landfill mining (LFM) and the subsequent production of SRF for use in the cement industry represents an option for the post-closure of Peruvian landfills, as well as a method to extend their useful life, and an option for the valorisation of non-biodegradable waste. This quantity presupposes a recovery of volume and air space available for new uses, which could be 'reclaimed' and enabled, after levelling and shaping the land with the fine fraction, opening the way to new productive and service activities such as the establishment and sale of industrial lots.

Keywords — landfill, landfill mining, fine fraction, combustible fraction.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vii
Introducción .....	xxii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2.1 Formulación del problema.....	3
1.2.1.1 Problema principal .....	3
1.2.1.2 Problemas específicos .....	3
1.3 Objetivos del estudio .....	4
1.3.1 Objetivo general .....	4
1.3.2 Objetivos específicos .....	4
1.4 Hipótesis del estudio .....	4
1.4.1 Hipótesis general .....	4
1.4.2 Hipótesis específicas.....	4
1.5 Antecedentes investigativos.....	5
1.6 Justificación e importancia de la investigación .....	11
Capítulo II. Marco teórico y conceptual .....	13
2.1 Marco teórico .....	13

2.1.1	Economía circular .....	13
2.1.2	Minería de rellenos.....	16
2.1.2.1	Concepto y Generalidades.....	16
2.1.2.2	Historia de la Minería de Rellenos.....	21
2.1.2.3	Aspecto metodológico: Paso a paso .....	25
2.1.2.3.1	Información preliminar del sitio.....	26
2.1.2.3.2	Prospección geofísica .....	27
2.1.2.3.2.1	Inducción Electromagnética en el Dominio de Frecuencia (EMI).....	30
2.1.2.3.2.2	Tomografía de Resistividad Eléctrica .....	31
2.1.2.3.3	Muestreo de residuos.....	32
2.1.2.3.3.1	Estrategia de muestreo .....	32
2.1.2.3.3.2	Técnicas de muestreo .....	35
2.1.2.3.4	Caracterización de residuos.....	37
2.1.2.3.4.1	Humedad .....	37
2.1.2.3.4.2	Consistencia .....	38
2.1.2.3.4.3	Composición .....	39
2.2	Marco conceptual.....	45
2.2.1	Fracción combustible .....	45
2.2.1.1	Clasificación de los CSR.....	47
2.2.1.1.1	Poder Calorífico Inferior (PCI) .....	48
2.2.1.1.2	Contenido de cloro .....	48

2.2.1.1.3	Contenido de mercurio .....	49
2.2.1.1.4	Otros parámetros de interés.....	50
2.2.1.2	Usos de los CSR.....	51
2.2.2	Fracción fina .....	55
2.3	Marco legal .....	60
2.3.1	Marco normativo nacional .....	60
2.3.2	Marco normativo internacional .....	62
2.3.2.1	Gestión de residuos y desarrollo de LFM .....	62
2.3.2.2	Uso de combustibles sólidos alternativos.....	65
2.3.2.3	Uso de material tipo suelo.....	68
2.3.2.3.1	Compost.....	68
2.3.2.3.2	Material de construcción como subrasante o relleno.....	69
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....		71
3.1	Tipo y diseño de investigación .....	71
3.2	Área de estudio.....	72
3.3	Unidad de análisis.....	73
3.4	Período de análisis.....	73
3.5	Procedimiento experimental.....	73
3.5.1	Investigación preliminar del sitio.....	74
3.5.2	Prospección geofísica .....	75
3.5.3	Excavaciones y muestreo de residuos .....	75

3.5.4	Transporte y pesaje de muestras .....	78
3.5.5	Acondicionamiento de muestras .....	79
3.5.5.1	Etapa de secado .....	79
3.5.5.2	Reducción de tamaño .....	79
3.5.5.3	Determinación de la composición de residuos .....	80
3.5.6	Caracterización fisicoquímica de fracciones de interés .....	84
3.5.6.1	Fracción combustible .....	84
3.5.6.1.1	Reducción de tamaño .....	85
3.5.6.1.2	Determinación del contenido de humedad .....	86
3.5.6.1.3	Determinación del Poder Calorífico Inferior (PCI).....	87
3.5.6.1.4	Determinación del contenido de cloro (Cl).....	89
3.5.6.1.5	Determinación del contenido de flúor (F), bromo (Br) y azufre (S).....	91
3.5.6.1.6	Determinación del contenido de mercurio .....	91
3.5.6.1.7	Determinación del contenido de otros metales.....	91
3.5.6.2	Fracción fina (< 6.3 mm) .....	92
3.5.6.2.1	Determinación de la densidad aparente .....	93
3.5.6.2.2	Determinación de pH.....	93
3.5.6.2.3	Determinación de la conductividad eléctrica.....	94
3.5.6.2.4	Determinación del contenido de carbono orgánico.....	94
3.5.6.2.5	Determinación de la clase textural.....	94
3.5.6.2.6	Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) .....	94

3.5.6.2.7	Determinación del contenido de metales.....	95
3.5.6.2.8	Determinación del contenido de potasio y fósforo disponible .....	96
3.5.6.2.9	Determinación del contenido de nitrógeno total.....	96
3.5.6.2.10	Determinación de la relación carbono – nitrógeno (C/N) .....	96
3.5.7	Cálculo y procesamiento de datos.....	97
3.5.7.1	Cálculo de la composición de residuos .....	97
3.5.7.2	Cálculo del contenido de cloro (Cl), flúor (F), bromo (Br) y azufre (S) .....	98
3.5.7.3	Cálculo del contenido de mercurio y otros metales en relación al PCI.....	100
3.5.7.4	Contenido de materia orgánica (M.O.) en fracción fina.....	100
3.5.7.5	Evaluación de uso potencial de fracciones.....	101
3.5.7.5.1	Evaluación del uso potencial de la fracción combustible .....	101
3.5.7.5.1.1	Determinación del código de clase según estándar europeo EN 15359.....	101
3.5.7.5.1.2	Compatibilidad con normas para uso de combustibles alternativos.....	102
3.5.7.5.2	Evaluación del uso potencial de la fracción fina .....	105
3.5.7.5.2.1	Uso potencial como compost .....	106
3.5.7.5.2.2	Uso potencial como material de construcción (subrasante y/o relleno) .....	109
3.5.8	Variables e indicadores .....	110
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados .....		112
4.1	Resultados .....	112
4.1.1	Muestreo y composición de residuos enterrados.....	112
4.1.1.1	Medición de espesor de cobertura y densidad estabilizada.....	112

4.1.1.2	Secado y reducción de tamaño de muestras.....	113
4.1.1.3	Composición de las muestras de residuos .....	114
4.1.1.3.1	Comprobación de normalidad mediante Test Shapiro-Wilk .....	115
4.1.1.3.2	Composición de residuos del área de estudio .....	116
4.1.2	Caracterización de la fracción combustible .....	119
4.1.2.1	Composición de la fracción combustible .....	119
4.1.2.2	Caracterización morfológica .....	121
4.1.2.3	Análisis fisicoquímico de la fracción combustible .....	123
4.1.2.3.1	Contenido de humedad y Poder Calorífico .....	124
4.1.2.3.2	Contenido de cloro (Cl), flúor (F), bromo (Br) y azufre (S) .....	124
4.1.2.3.3	Contenido de mercurio y otros metales .....	125
4.1.2.4	Uso potencial de la fracción combustible.....	126
4.1.2.4.1	Aceptación y clasificación de la fracción combustible como CSR.....	126
4.1.2.4.2	Comparación normativa y uso potencial.....	127
4.1.3	Caracterización de la fracción fina (< 6.3 mm) .....	129
4.1.3.1	Cumplimiento de los ECA-Suelo .....	129
4.1.3.2	Comparación normativa y uso potencial.....	130
4.1.3.2.1	Compost.....	130
4.1.3.2.2	Material de construcción como subrasante o relleno .....	133
4.2	Análisis y discusión .....	133
4.2.1	Condiciones y composición de residuos enterrados .....	133

4.2.1.1	Espesor de capa de cobertura y densidad estabilizada de residuos.....	133
4.2.1.2	Composición de residuos sólidos enterrados .....	134
4.2.2	Características de la fracción combustible .....	136
4.2.2.1	Propiedades fisicoquímicas y código de clase .....	136
4.2.2.2	Determinación de uso potencial .....	138
4.2.2.2.1	Cumplimiento normativo.....	138
4.2.2.2.2	Uso de la fracción combustible.....	140
4.2.3	Características de la fracción fina (< 6.3 mm) .....	141
4.2.3.1	Determinación de uso potencial .....	141
4.2.3.1.1	Compost.....	141
4.2.3.1.2	Material de construcción como subrasante o relleno.....	144
4.2.3.1.3	Otras alternativas de uso .....	145
	Conclusiones .....	146
	Recomendaciones .....	149
	Referencias bibliográficas.....	150
	Anexos .....	176

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Características del emplazamiento y número de muestras superficiales .....	33
Tabla 2: Descripción del contenido de humedad en muestras de residuos .....	37
Tabla 3: Descripción de la consistencia en muestras de residuos.....	39
Tabla 4: Especificaciones y clases de CSR .....	48
Tabla 5: Tamaño de partícula de la fracción fina según la literatura.....	57
Tabla 6: Resumen de usos para la fracción fina en proyectos de LFM .....	59
Tabla 7: Características principales del área de estudio .....	74
Tabla 8: Condiciones meteorológicas durante la fase de secado.....	79
Tabla 9: Cálculo del diámetro equivalente de partícula .....	86
Tabla 10: Criterios de EURITS para la co-incineración de residuos en hornos de cemento (EC, 2003).. ..	103
Tabla 11: Valores límite para co-incineración de combustibles sustitutos producidos a partir de residuos según la Ordenanza de Incineración de Residuos (AVV) (BMLFUW, 2010).....	103
Tabla 12: Valores límite para co-incineración de combustibles sólidos recuperados según la norma RAL-GZ 724 Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (RAL, 2012).....	104
Tabla 13: Valores límite para criterios de fin de residuos (End-of-Waste) para combustibles sólidos secundarios (CSS) según Decreto Ministerial Nro. 22 (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2013).....	104
Tabla 14: Estándares nacionales de Calidad Ambiental para Suelo (ECA-Suelo).....	105
Tabla 15: Requisitos del producto compostado según la Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004.....	106

Tabla 16: Requisitos de los mejoradores de suelos según la Norma Mexicana Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 .....	107
Tabla 17: Especificaciones por tipo de composta según Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018.....	107
Tabla 18: Requisitos específicos para el abono orgánico según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (Segunda Actualización) .....	108
Tabla 19: Contenido de materia orgánica permisible en suelos para ser usados como material de construcción como subrasante o relleno.....	109
Tabla 20: Variables e indicadores analizadas durante el presente estudio .....	110
Tabla 21: Espesor de capa de arcilla compactada por punto de muestreo .....	112
Tabla 22: Peso de muestra y densidad estabilizada de residuos .....	113
Tabla 23: Peso de muestra reducida tras procesos de cuarteo.....	113
Tabla 24: Peso de fracción de residuos por punto de muestreo.....	114
Tabla 25: Cantidad porcentual de fracción de residuos por punto de muestreo .....	115
Tabla 26: Resultados de prueba Shapiro-Wilk para las muestras de residuos.....	115
Tabla 27: Estadísticos descriptivos de las cantidades porcentuales de fracciones de residuos.....	116
Tabla 28: Cantidad porcentual de fracción combustible por punto de muestreo.....	118
Tabla 29: Estadísticos descriptivos de la cantidad de fracción combustible .....	118
Tabla 30: Cantidad porcentual de subfracción de residuos en fracción combustible .....	119
Tabla 31: Resultados de prueba Shapiro-Wilk en las subfracciones de la fracción combustible .....	120
Tabla 32: Estadísticos descriptivos de las cantidades porcentuales de subfracciones combustibles.....	120

Tabla 33: Tamaños de partícula equivalente para la fracción combustible.....	123
Tabla 34: Contenido de humedad y Poder Calorífico en la fracción combustible .....	124
Tabla 35: Contenido de Cl, F, Br y S en la fracción combustible.....	124
Tabla 36: Contenido de mercurio y otros metales en la fracción combustible .....	125
Tabla 37: Propiedades fisicoquímicas de los CSR en el marco del EN 15359 .....	126
Tabla 38: Comparativo de propiedades de los CSR con los Criterios de EURITS y el Decreto Ministerial Nro. 22.....	128
Tabla 39: Comparativo de propiedades de los CSR con la Ordenanza de Incineración de Residuos (AVV) y la RAL-GZ 724.....	129
Tabla 40: Contenido de metales en los finos en comparación con ECA-Suelo .....	130
Tabla 41: Comparativo de propiedades de la fracción fina (< 6.3 mm) con normativas internacionales para compost .....	131
Tabla 42: Comparativo de las propiedades fisicoquímicas de los CSR del área de estudio con valores reportados en la literatura .....	137
Tabla 43: Contenido de metales en los suelos locales en comparación con los ECA-Suelo.....	142

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Esquema de una economía circular .....	15
Figura 2: Diagrama de flujo del proceso de minería de rellenos.....	19
Figura 3: Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 9, 11, 12, 13 y 14 .....	20
Figura 4: Proyecto de LFM en el relleno sanitario Samaritaine .....	24
Figura 5: Ejemplo de modelo conceptual construido con información histórica .....	27
Figura 6: Efecto costo beneficio al combinar métodos convencionales y geofísicos .....	29
Figura 7: Ejemplo del uso del método EMI para mapeo subsuperficial del subsuelo .....	31
Figura 8: Aplicación del método ERT en la determinación de variaciones verticales.....	32
Figura 9: Excavaciones en los rellenos sanitarios de Traunstein (izquierda) y Miltenberg (derecha).....	34
Figura 10: Perforación con martillo en los depósitos de cenizas volantes del relleno de Onoz, Bélgica .....	36
Figura 11: Excavaciones de residuos sólidos en los rellenos sanitarios de Delhi y Hyderabad, India .....	36
Figura 12: Tamizado manual de residuos (izquierda) y tambor de cribado (derecha) .....	41
Figura 13: Proceso de clasificación manual de residuos sólidos.....	42
Figura 14: Separador densimétrico de aire para clasificación de residuos.....	43
Figura 15: Separadores magnéticos y esquema de funcionamiento .....	43
Figura 16: Distribución de equipos en proyecto de LFM en relleno sanitario Perdido .....	44
Figura 17: Presentaciones de CSR de acuerdo al método de producción.....	47

Figura 18: Evolución del TSR (%) de combustibles fósiles por alternativos en la industria cementera en la UE y países seleccionados en el periodo 1990 – 2016.....	52
Figura 19: Aporte de energía térmica de CDR en las plantas de cemento austriacas (1988 – 2017).....	53
Figura 20: Influencia del tamaño de partícula en la apariencia de la fracción fina .....	57
Figura 21: Modelo conceptual del área de estudio.....	75
Figura 22: Distribución de puntos de monitoreo en el área de estudio .....	76
Figura 23: Excavación de zanjas con retroexcavadora .....	77
Figura 24: Medición de profundidad de capa de arcilla .....	78
Figura 25: Descarga de muestras de residuos en plataforma de acondicionamiento .....	78
Figura 26: Reducción de tamaño (cuarteo) de las muestras de residuos .....	80
Figura 27: Tamizaje manual de residuos para separación de fracción fina .....	81
Figura 28: Separación de componentes metálicos con imán de neodimio .....	82
Figura 29: Pesaje individual de fracciones de residuos.....	83
Figura 30: Fracciones de residuos observadas durante la caracterización .....	84
Figura 31: Muestras de fracción combustible enviadas a laboratorio para análisis .....	86
Figura 32: Pelletización de fracción combustible y pesaje en crisol de combustión .....	88
Figura 33: Ensamblaje y presurización de bomba calorimétrica.....	88
Figura 34: Adición de agua destilada y recolección de solución postcombustión.....	90
Figura 35: Digestión y filtrado de muestras para análisis de metales .....	92
Figura 36: Espectrofotómetros de emisión atómica ICP/OES y ICP/MS .....	92
Figura 37: Muestras de fracción fina enviadas a laboratorio para análisis.....	93

Figura 38: Triángulo textural de la USDA mostrando las 12 clases texturales .....	95
Figura 39: Composición final de los residuos enterrados en el área de estudio .....	117
Figura 40: Composición final de la fracción combustible.....	121
Figura 41: Partículas unidimensionales de la fracción combustible.....	122
Figura 42: Partículas bidimensionales de la fracción combustible.....	122
Figura 43: Partículas tridimensionales de la fracción combustible.....	122
Figura 44: Código de clase de los CSR .....	127
Figura 45: Contenido de cadmio en la fracción fina y suelos locales.....	143
Figura 46: Contenido de plomo en la fracción fina y suelos locales .....	143

## Introducción

Durante el último siglo, el clásico modelo de economía lineal ha derivado en grandes cantidades de residuos sólidos generados y dispuestos en el ambiente (AIDIS, 2018). Ello, sumado a las problemáticas de los bajos índices de reciclaje en el Perú (Savino et al., 2018) evidencian la existencia de grandes volúmenes de residuos dispuestos en rellenos sanitarios, de los cuales se desconoce su actual potencial de valorización. En tal sentido, la presente investigación se centra en aplicar los diversos aspectos metodológicos de la Minería de Rellenos (LFM), con la finalidad de valorizar los residuos almacenados en un relleno sanitario peruano, enfatizando el análisis en la caracterización y evaluación de alternativas de uso de la fracción combustible y la fracción fina (< 6.3 mm).

La Minería de Rellenos o Landfill Mining (LFM) es definida como el proceso de extracción y recuperación de recursos a partir de residuos sólidos previamente dispuestos y/o enterrados en rellenos sanitarios mediante el uso de tecnologías de transformación innovadoras y respetando criterios sociales y de protección ambiental (Hogland et al., 2010; Jones et al., 2010; Krook et al., 2012; Jones et al., 2013). Visto el contexto anterior, la LFM se posiciona como una herramienta para enfrentar nuestra problemática, debido a que permite la valorización de los residuos almacenados, y otros beneficios como la recuperación de superficie de relleno sanitario, la extensión de vida útil de los rellenos sanitarios actuales, la recuperación de tierras para nuevos usos, la eliminación o mitigación de fuentes de contaminación, entre otros (Kurian et al., 2003; Hogland et al., 2004; Rosendal et al., 2009; Diener et al., 2013; Hermann et al., 2014; Buccella et al., 2018).

La presente investigación está estructurada en siete capítulos. En el Capítulo I se desarrolla la problemática de la investigación, objetivos, hipótesis, y la justificación del desarrollo del trabajo. En el Capítulo II se resume el marco teórico, marco legal, y los antecedentes referentes al presente estudio. En el Capítulo III se resume el procedimiento

experimental el cual incluye la fase exploratoria de un proyecto de LFM, así como los métodos de ensayo empleados. En el Capítulo IV se exponen los resultados obtenidos respecto al muestreo y composición de los residuos enterrados, así como las características de la fracción combustible y fracción fina (< 6.3 mm). En el Capítulo V se analizan y discuten los resultados obtenidos y descritos en el capítulo precedente. Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de investigación.

# Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

## 1.1 Generalidades

El presente capítulo aborda la descripción del problema de investigación, así como la formulación de objetivos e hipótesis asociados a la investigación. Asimismo, incluye una revisión de antecedentes investigativos recogidos de la literatura.

## 1.2 Descripción del problema de investigación

En los últimos cinco años, en el Perú se ha establecido una nueva legislación en materia de gestión de residuos sólidos. Este nuevo marco legal (Decreto Legislativo 1278 y su Reglamento) ha instaurado principios y lineamientos que priorizan: (1) la prevención o minimización de la generación de residuos sólidos en la fuente; y (2) la recuperación y valorización energética (Waste-to-Energy) o material (Waste-to-Material) de los residuos, que incluyan la reutilización, reciclaje, compostaje, co-procesamiento, entre otras alternativas que garanticen la protección de la salud pública y el ambiente, minimizando y destacando así al relleno sanitario como la última opción para la gestión de residuos.

En el contexto latinoamericano, por su parte, las tasas de reciclaje y/o recuperación son muy bajas (entre 1 a 20 %, excepcionalmente), lo que significa que aproximadamente el 90 % de los residuos sólidos urbanos no se recuperan y terminan siendo destinados a disposición final (Savino et al., 2018). El escenario peruano relacionado con la gestión de residuos no difiere de estas estadísticas. De hecho, durante el 2018, solo el 1 % del total de residuos sólidos generados en nuestro país fueron recuperados, 52 % fue efectivamente dispuesto en rellenos sanitarios y 47 % terminó en botaderos a cielo abierto, fue quemado o dispuesto inadecuadamente de alguna otra manera en calles, ríos, o quebradas, resultando en un total de 2371 ha de áreas degradadas por residuos sólidos (MINAM, 2018; Defensoría del Pueblo, 2019). Estos datos reflejan la debilidad de nuestro sistema de gestión de residuos sólidos en materia de recuperación y valorización de residuos, y la necesidad inmediata de contar con un mayor número de rellenos sanitarios, ya que los

actuales no son suficientes para disponer el total de residuos generados por nuestra población (Orihuela, 2018). En efecto, según cifras del MINAM declaradas ante medios comunicativos (RPP, 2022), en la actualidad se cuenta con 65 rellenos sanitarios en el Perú, existiendo aún un déficit de 120 infraestructuras de disposición final. A esto se suman proyecciones del Banco Mundial (2018), las cuales indican que, para el año 2050, la generación de residuos se incrementará en 70 %, impulsada por la rápida urbanización y el crecimiento poblacional.

Durante el último siglo, el clásico modelo de economía lineal basado en el esquema 'fabricar-usar-descartar' ha derivado en grandes cantidades de residuos sólidos dispuestos en el ambiente (AIDIS, 2018). Ello, sumado a las problemáticas antes mencionadas referentes a la valorización y disposición final de residuos en el Perú, evidencian la existencia de grandes volúmenes de residuos dispuestos en el ambiente de los cuales se desconoce su actual potencial de valorización. Dado este contexto, es necesario resolver si existe la posibilidad de recuperar aquellos residuos que a lo largo de los años han sido depositados en estas infraestructuras, con el fin de reincorporarlos a los ciclos de materiales, utilizando herramientas que soporten y coadyuven a la transición efectiva hacia una economía circular. En otras palabras, mirar al pasado para solucionar los problemas del presente.

En ese marco, la Minería de Rellenos o Landfill Mining (LFM), definida como el proceso de extracción y recuperación de recursos a partir de residuos sólidos previamente dispuestos y/o enterrados en rellenos sanitarios mediante el uso de tecnologías de transformación innovadoras y respetando criterios sociales y de protección ambiental (Hogland et al., 2010; Jones et al., 2010; Krook et al., 2012; Jones et al., 2013), se posiciona como una herramienta para enfrentar nuestra problemática nacional. Esto debido a que, de acuerdo a su definición, la LFM permite la valorización de los residuos almacenados; y, por consiguiente, diversos beneficios subyacentes entre los cuales se encuentran: la

recuperación de espacio y superficie de relleno sanitario, la extensión de vida útil de los rellenos sanitarios actuales, la recuperación de tierras aptas para nuevos usos, la eliminación o mitigación de fuentes de contaminación reales o potenciales, entre otros (Kurian et al., 2003; Hogland et al., 2004; Rosendal et al., 2009; Diener et al., 2013; Hermann et al., 2014; Buccella et al., 2018). Este nuevo concepto implica dejar de considerar al relleno sanitario como un lugar destinado a la disposición final de los residuos; y, por el contrario, conceptualizarlo como un almacenamiento temporal de recursos (Bosmans et al., 2013; RAWFILL, 2021), permitiendo no solo incorporar nuevamente estos materiales a los ciclos técnicos o biológicos, sino también ser un atenuante ante la creciente necesidad de contar con rellenos sanitarios adicionales.

En tal sentido, la presente investigación se centra en aplicar los diversos aspectos metodológicos de la Minería de Rellenos (LFM), con la finalidad de valorizar los residuos almacenados en un relleno sanitario peruano, enfatizando el análisis en la caracterización y evaluación de alternativas de uso de la fracción combustible y la fracción fina (< 6.3 mm) obtenidas a partir de los residuos enterrados en dicha infraestructura de disposición final.

## **1.2.1 Formulación del problema**

### **1.2.1.1 Problema principal**

¿Cuál es la cantidad porcentual de fracción combustible y fracción fina (< 6.3 mm) presentes en los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano?

### **1.2.1.2 Problemas específicos**

- a) ¿Qué características tiene la fracción combustible obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano según el estándar europeo EN 15359?
- b) ¿Cuál es la forma de valorización de la fracción combustible obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano?
- c) ¿Cuál es la forma de valorización de la fracción fina (< 6.3 mm) obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano?

### **1.3 Objetivos del estudio**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar la cantidad porcentual de fracción combustible y fracción fina (< 6.3 mm) presentes en los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

Este subcapítulo se le identifica como encabezado de tercer nivel.

- a) Determinar la clase de la fracción combustible obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano según el estándar europeo EN 15359.
- b) Determinar la forma de valorización de la fracción combustible obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano.
- c) Determinar la forma de valorización de la fracción fina (< 6.3 mm) obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano.

### **1.4 Hipótesis del estudio**

#### **1.4.1 Hipótesis general**

La fracción combustible y fracción fina (< 6.3 mm) representan un 30 % y 40 % del total de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano, respectivamente.

#### **1.4.2 Hipótesis específicas**

- a) La fracción combustible obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano puede ser clasificada como Combustible Sólido Recuperado según el estándar europeo EN 15359, con un código de clase PCI (3) – Cl (1) – Hg (1).
- b) La fracción combustible obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano puede ser valorizada de forma energética, siendo su uso potencial el co-procesamiento en plantas de producción de cemento.

- c) La fracción fina (< 6.3 mm) obtenida a partir de los residuos enterrados de un relleno sanitario peruano puede ser valorizada de forma material, siendo su uso potencial la reutilización directa como compost.

## 1.5 Antecedentes investigativos

En la presente sección, se describen los principales antecedentes bibliográficos referentes a la presente investigación:

- Kurian et al. (2003) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Studies on Landfill Mining at solid waste dumpsites in India (Estudios sobre Minería de Rellenos en infraestructuras de disposición final de residuos en India)”. En este trabajo, los autores evaluaron la utilidad de la minería de rellenos en la rehabilitación de rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales en países en desarrollo. Para tal fin, ejecutaron estudios exploratorios en las infraestructuras de disposición final de Kodungaiyur (KDG) y Perungudi (PDG), ubicados en la ciudad de Chennai, India. Los resultados indicaron que la fracción combustible (textiles, madera, plásticos, caucho) representó un 40 % y 4 % del total de residuos excavados en los rellenos sanitarios de PDG y KDG, respectivamente. Los autores indicaron que esta gran diferencia pudo verse influenciada por la antigüedad de los residuos depositados (10 años mayor para el caso de KDG) y el estado de degradación de estos. Por otro lado, la fracción fina (< 2 mm), obtenida a partir de pantallas vibratorias, representó un 40 % y 68 % del total de residuos excavados en PDG y KDG respectivamente, con valores variables de pH en el rango de 6.9 a 8.6. El análisis de metales demostró la viabilidad del uso de estas matrices como abono para cultivos no alimenticios, en base al comparativo con los estándares de la U.S. EPA; así como para fines de material de cobertura.
- Jain et al. (2005) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Heavy metal content in soil reclaimed from a municipal solid waste landfill (Contenido

de metales pesados en el suelo recuperado de un relleno sanitario municipal)”. En dicho artículo, los autores caracterizaron la concentración de diversos metales pesados en la fracción fina o suelo recuperado (< 6.3 mm) obtenida a partir de residuos sólidos dispuestos con una antigüedad entre 3 a 8 años en el relleno sanitario municipal del condado de Alachua – ACSWL, ubicado en el estado de Florida, Estados Unidos. De acuerdo a los resultados obtenidos, el suelo recuperado representó aproximadamente el 60 % del total de residuos excavados; siendo constituido, en su mayoría, por arena y materia orgánica descompuesta, con impurezas de vidrios y cerámicos. Para la determinación de la viabilidad de usos potenciales de esta fracción, sus concentraciones de metales pesados fueron comparadas con estándares internacionales de calidad de suelo de Estados Unidos, Reino Unido, y Países Bajos. La mayoría de los metales pesados demostraron estar por debajo de dichos límites, a excepción del arsénico, berilio, y cadmio. Los autores sugirieron la necesidad de realizar un estudio más detallado de los riesgos específicos del uso de esta fracción dependiendo de la aplicación final, así como un análisis de toxicidad en los lixiviados.

- Quaghebeur et al. (2013) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Characterization of landfilled materials: screening of the enhanced landfill mining potential (Caracterización de materiales depositados en rellenos sanitarios: evaluación del potencial en el marco de la minería de rellenos)”. En dicho artículo, los autores evaluaron las opciones de valorización para los residuos depositados en el relleno sanitario REMO en Houthalen, Bélgica, mediante la ejecución de excavaciones en ubicaciones estratégicas que contenían residuos sólidos municipales o residuos industriales con una antigüedad variable entre 14 a 29 años. La cantidad encontrada de fracción combustible varió entre 23 a 50 %, con un PCI promedio de 18 MJ kg<sup>-1</sup>, el cual confirmó el potencial de utilización de esta fracción en tecnologías de obtención

de energía. Respecto a la fracción fina (< 10 mm), esta representó 40 % – 60 % del total de residuos excavados y presentó oportunidades de uso como material de construcción y/o compost acorde a las regulaciones regionales de Flandes, Bélgica. En el caso específico de las excavaciones en residuos industriales, la fracción fina presentó altas concentraciones de metales (Cu, Cr, Ni, y Zn), sugiriendo la oportunidad de la recuperación de estos.

- Passamani et al. (2016) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Potential SRF generation from a closed landfill in northern Italy (Generación potencial de CSR a partir de un relleno sanitario clausurado en el norte de Italia)”. En dicha investigación, los autores evaluaron la posibilidad de producir CSR y CSR combustible (de acuerdo al Decreto Ministerial 22) a partir de residuos dispuestos en forma de fardos cilíndricos envueltos en un relleno sanitario clausurado en el norte de Italia, con la finalidad de simular los productos a obtenerse en la futura construcción de una planta de tratamiento mecánico-biológicos (MBT) a cargo del consejo municipal local. Para tal fin, los autores usaron valores bibliográficos de PCI, contenido de cloro y mercurio por tipo de material, los cuales, en combinación con la composición real de los residuos dispuestos, determinaron las características hipotéticas de los CSR. El análisis inicial demostró que los CSR se encontraban en la Clase 1 para el contenido de cloro y mercurio. No obstante, el bajo valor del PCI evitaba su consideración como CSR combustible (Clase 4). Análisis posteriores, considerando una planta de biosecado, así como la remoción de residuos inertes permitieron el incremento del PCI hasta niveles aceptables (Clase 3) de acuerdo al Decreto Ministerial 22.
- Zhou et al. (2015) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Characteristics and fertilizer effects of soil-like materials from Landfill Mining (Características y efectos fertilizantes de la fracción tipo suelo procedentes de la Minería de Rellenos)”. En esta investigación, los autores analizaron los

efectos fertilizantes de la fracción fina (< 10 mm) obtenida a partir residuos dispuestos con una antigüedad de 10 a 22 años en el relleno sanitario de Yingchun, ubicado en la ciudad de Jingmen, provincia de Hubei, China Central. Tras las campañas de muestreo, la fracción fina representó 75.02 % del total de residuos excavados y presentó valores promedio de pH, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y Conductividad Eléctrica (CE) de 8.14, 84.53 cmol(+) kg<sup>-1</sup> y 1190.55 µS cm<sup>-1</sup>, respectivamente. Por otro lado, las concentraciones de nutrientes fueron superiores a los de las tierras agrícolas locales, mientras que las concentraciones de metales se encontraron por debajo de los límites establecidos en los estándares de calidad de compost en China (GB 8172–87). Respecto a los efectos fertilizantes de esta fracción, fueron analizados a través de pruebas en recipientes con la especie *I. balsamina* L., demostrando su utilidad como enmienda de suelo, sustrato de cultivo y materias primas para la producción de abonos.

- Jani et al. (2016) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Characterisation of excavated fine fraction and waste composition from a Swedish landfill (Caracterización de la fracción fina y composición de los residuos de un relleno sanitario sueco)”. En dicho artículo, los autores describieron las principales características de la fracción fina y la composición de los residuos almacenados desde el año 2009 en el relleno sanitario Högbypörp, ubicado en la ciudad de Estocolmo, Suecia. Los resultados de muestreo, las operaciones de tamizaje, y la clasificación manual demostraron que la fracción fina (< 10 mm) representó un 38 % del total de residuos excavados; mientras que, la fracción combustible (plástico, madera, papel y textiles), un 29.9 %, demostrando para esta última una oportunidad potencial de reaprovechamiento energético. Respecto a la fracción fina, esta presentó una humedad y PCI promedio de 25.5 % y 1.7 MJ kg<sup>-1</sup>, los cuales descartaron la posibilidad de reaprovechamiento energético de esta fracción. Por otro lado, los

análisis de metales pesados determinaron concentraciones superiores a los estándares de calidad ambiental para suelos contaminados según la Agencia de Protección Ambiental Sueca (SEPA). Por tal motivo, para determinar el potencial de valorización material de esta fracción, se ejecutaron análisis adicionales en sus lixiviados, determinándose que la mejor opción era redistribuirlos en el mismo relleno sanitario como material inerte.

- Ranieri et al. (2017) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Sampling, characterisation and processing of solid recovered fuel production from municipal solid waste: An Italian plant case study (Muestreo, caracterización y procesamiento de la producción de combustibles sólidos recuperados a partir de residuos sólidos urbanos: Un estudio de caso de una planta italiana)”. En dicha investigación, los autores determinaron la clasificación del combustible sólido recuperado producido en la planta municipal de tratamiento de residuos sólidos de la localidad de Massafra (ciudad de Tarento, región de Apulia, Sur de Italia), compuesta por un proceso MBT con subprocesos tales como, triturado, tamizaje, separación de metales ferrosos, bioestabilización, y separadores hidráulicos. Tras la evaluación de la composición inicial de los residuos y la eficiencia del proceso MBT, se concluyó que sólo el 31% del flujo de entrada de residuos sólidos urbanos (madera, plásticos, celulosa) se recuperó como CSR, con un PCI promedio de 15.77 MJ kg<sup>-1</sup>, un contenido promedio de cloro de 0.06 %, una mediana de contenido de mercurio en relación al PCI < 0.0064 mg MJ<sup>-1</sup> y percentil 80 < 0.0068 mg MJ<sup>-1</sup>. El CSR producido se enmarcó en el sistema de clasificación de la norma europea EN 15359, siendo clasificado con el siguiente código de clase: PCI (3) – Cloro (1) – Mercurio (1).
- Rotheut & Quicker (2017) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Energetic utilization of refuse derived fuels from landfill mining (Aprovechamiento energético de combustibles derivados de residuos de la

minería de rellenos)”. En esta investigación, los autores evaluaron la influencia del aprovechamiento energético de diversas proporciones de CDR en la operación de la planta de incineración Hannover (Alemania). Al respecto, los CDR fueron preparados mediante procesos MBT (trituradores, separadores densimétricos y magnéticos) a partir de residuos depositados entre los años 1988 a 2002 en el relleno sanitario Pohlsche Heide (Renania, Alemania). El análisis realizado demostró que los CDR tenían un PCI variable entre 9.2 MJ kg<sup>-1</sup> y 23.9 MJ kg<sup>-1</sup>, contenidos de humedad entre 9.1 % y 30 %, y contenido de cloro entre 0.6 % y 2.4 %. Por otro lado, y en referencia a la operación de la planta de incineración, el estudio demostró la viabilidad del uso de CDR, en proporciones de mezcla 1:10 (residuos excavados : residuos frescos), siendo esta la proporción que causaba menores fluctuaciones en parámetros operacionales como la generación de vapor, la concentración de contaminantes en las emisiones gaseosas, y el consumo de aditivos.

- Sakri et al. (2021) desarrollaron el artículo de investigación denominado “Refuse-derived fuel potential production for co-combustion in the cement industry in Algeria (Potencial de la producción de Combustibles Derivados de Residuos para el co-procesamiento en la industria de cemento en Argelia)”. El objetivo de este trabajo fue examinar el potencial de producción y utilización de CDR a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) para su uso como combustible alternativo en hornos de cemento en Argelia. Para tal fin, se tomó como área de estudio la planta de clasificación de residuos del relleno sanitario de Soumaa, ubicado en el valiato de Blida (Algeria). Las fracciones combustibles > 80 mm (separadas por tamices) se sometieron a un proceso de secado al aire libre y se voltearon periódicamente para aumentar el PCI y la materia seca (MS). Al final del proceso de secado, el PCI y la MS de los CDR fue de 16 MJ kg<sup>-1</sup> y 87 %, respectivamente, mientras que el cloro presentó una concentración entre 0.37 % y 0.80 %. El análisis económico y ambiental confirmó la viabilidad del

uso de los CDR en la industria cementera argelina indicando que, un índice de sustitución de 15 % generaría un consumo de CDR de 4.7 toneladas métricas (Mt) h<sup>-1</sup>, un ahorro de gas natural y emisiones de CO<sub>2</sub> de 4347.2 Nm<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> y 0.3 Mt h<sup>-1</sup>, respectivamente; así como un ahorro económico de 65 USD h<sup>-1</sup>.

## **1.6 Justificación e importancia de la investigación**

En el marco del desarrollo sostenible, el presente trabajo de investigación, basado en la ejecución de la LFM, contribuye directamente con la transición efectiva hacia una economía circular, pues persigue la recuperación y valorización de flujos de residuos históricos depositados en rellenos sanitarios, y su posterior reinserción en los ciclos de materiales, sean técnicos o biológicos. Adicional a ello, la ejecución de actividades de LFM se ve integrada en cinco (5) de los diecisiete (17) Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), contribuyendo de manera efectiva a la erradicación de la pobreza y la protección del planeta (RAWFILL, 2021). Dichos objetivos se detallan a continuación (ONU, 2015):

- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura
- Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles.
- Objetivo 12: Producción y consumo responsables
- Objetivo 13: Acciones para combatir el cambio climático
- Objetivo 14: Conservación de la vida submarina

Finalmente, en el contexto de la realidad peruana, el desarrollo del presente trabajo de investigación contribuirá directamente a contar con información base para el desarrollo futuro de proyectos de LFM, los cuales, debido a sus múltiples objetivos (el reaprovechamiento de residuos previamente dispuestos, la recuperación de espacio y superficie de relleno sanitario, la extensión de vida útil de los rellenos sanitarios actuales, la recuperación de tierras aptas para nuevos usos, la eliminación o mitigación de fuentes de contaminación reales o potenciales, entre otros) (Kurian et al., 2003; Hogland et al.,

2004; Rosendal et al., 2009; Diener et al., 2013; Hermann et al., 2014; Buccella et al., 2018), permitirán no solo contribuir activamente con los mandatos legislativos respecto a la recuperación y valorización energética (Waste-to-Energy) o material (Waste-to-Material) de los residuos (Decreto Legislativo 1278), sino también hacer frente a la constante necesidad de contar con rellenos sanitarios adicionales. Asimismo, y de manera indirecta, evitará cambios de uso de suelo en nuevas tierras, permitiendo su uso para distintos fines como el crecimiento urbano; y, previniendo, además, los impactos negativos que estos cambios conllevan, tales como la cancelación de diversos servicios ambientales del suelo, entre los que se encuentran: la producción de biomasa, la filtración y purificación del agua, la regulación de la erosión y la regulación del clima (Caprile, 2015).

## Capítulo II. Marco teórico y conceptual

### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 Economía circular

El modelo de economía circular es un concepto que se enmarca en el desarrollo sostenible, y consiste en preservar el valor de los materiales y productos durante el mayor tiempo posible, evitando enviar de regreso a la naturaleza la mayor cantidad de desechos que sea posible y logrando que estos se reintegren al sistema productivo para su reutilización (Espaliat, 2017; Deckmyn, 2018; Solórzano, 2018). De esta manera, se reduce al mínimo la generación de residuos; y, por otro lado, dada la reintegración y/o reúso de estos en los sistemas productivos, se reduce el ingreso de nueva materia prima y energía en los procesos (Andersen, 2007; CEPAL, 2021).

Este modelo se contrapone y desvincula del clásico modelo de economía lineal de producción – consumo – eliminación, en el cual se fabrican productos a partir de materia prima, para luego ser vendidos en el mercado, utilizados por el consumidor, y finalmente desechados. Por el contrario, busca generar un círculo virtuoso en el cual se devuelva al sistema industrial lo que este pueda reutilizar; y, a la naturaleza, lo que pueda ser devuelto, intentando reproducir los ciclos biológicos y técnicos (AIDIS, 2018). Respecto a este último punto, es importante considerar las siguientes definiciones (Fundación Ellen MacArthur, 2015; González, 2016; Cámara Argentina de Comercio y Servicios, 2017):

- **Ciclo técnico:** Consiste en la gestión de reservas de materias finitas. El uso sustituye al consumo. En este ciclo, las materias técnicas o productos son diseñados de tal manera que se permita su reinserción a la tecnosfera al final de su vida útil, permaneciendo siempre en el sistema industrial. Para su reincorporación, los materiales podrán ser reusados, redistribuidos, refabricados, o ser sometidos a procesos de mantenimiento y/o reciclaje.

- Ciclo biológico: Comprende los flujos de materias renovables. El consumo únicamente se produce en el ciclo biológico. En este ciclo, los nutrientes renovables (biológicos) se regeneran en su mayor parte y se reincorporan a la biosfera mediante procesos de degradación.

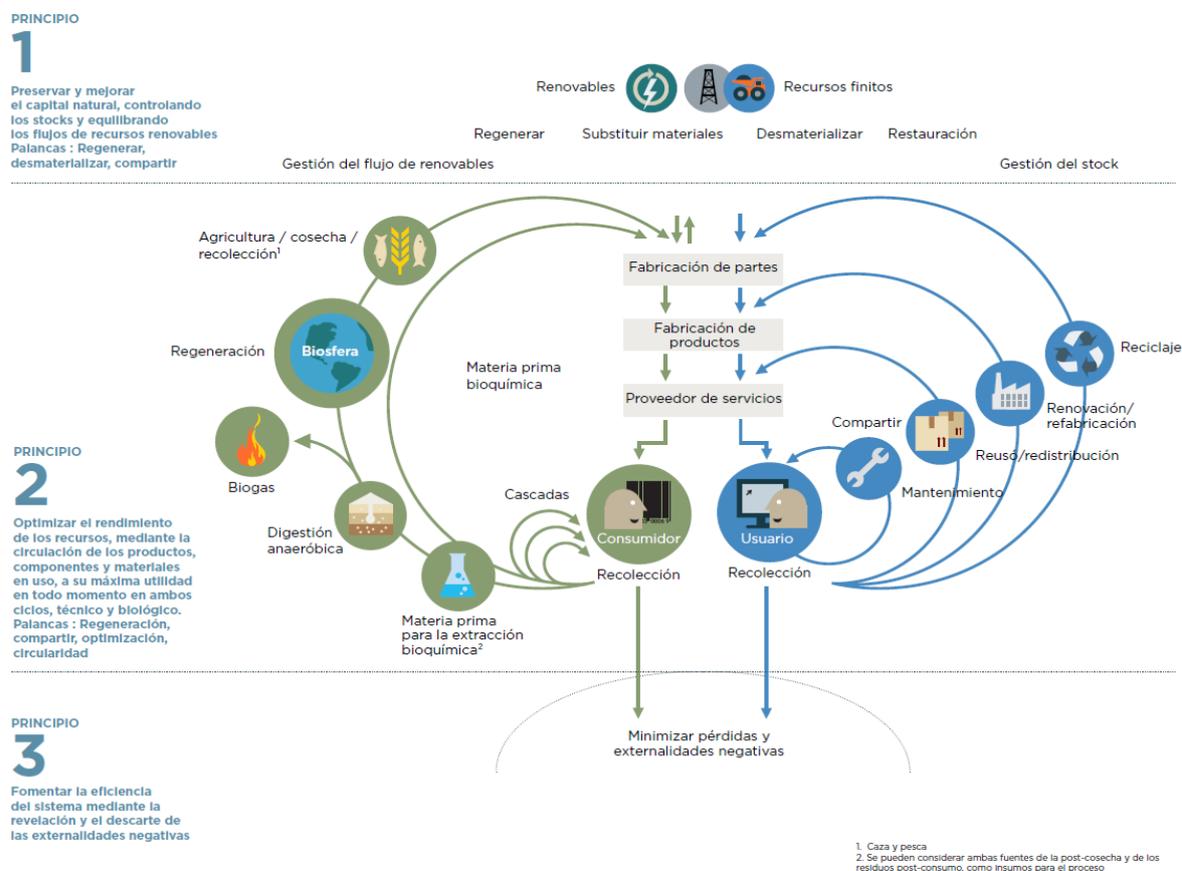
Según la Fundación Ellen MacArthur (2015), la Economía Circular se basa en 3 principios:

- Principio 1: Preservar y mejorar el capital natural controlando reservas finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables.
- Principio 2: Optimizar los rendimientos de los recursos distribuyendo productos, componentes y materias con su utilidad máxima en todo momento tanto en ciclos técnicos como biológicos.
- Principio 3: Promover la eficacia de los sistemas detectando y eliminando del diseño los factores externos negativos.

De manera ilustrativa, en la Figura 1 se muestra un esquema de economía circular.

# Figura 1

## Esquema de una economía circular



Nota. De *Hacia una economía circular: motivos económicos para una transición acelerada* (p. 6), por Fundación Ellen MacArthur, 2015 (<https://bit.ly/3BMMngf>)

Los fundamentos, principios y objetivos de la Economía Circular, son posibles, si y solo si, se cuenta con una adecuada gestión de residuos, que implique su jerarquización en la totalidad del ciclo, desde la prevención hasta la reutilización, el reciclado, la recuperación de energía y la disposición final de los materiales que no sea posible usar (Lansink, 2018). No obstante, y a lo largo de los años, el clásico modelo de economía lineal basado en “tomar, hacer, desechar” ha derivado en grandes cantidades de residuos sólidos dispuestos en el ambiente, sea en rellenos sanitarios, o en botaderos a cielo abierto u otras prácticas inadecuadas. Ello, sumado a las bajas tasas de valorización y reciclaje de residuos en la región de América Latina y el Caribe (Savino, 2018; CEPAL, 2021), incluyendo al Perú, evidencia la existencia de grandes volúmenes de residuos dispuestos

en el ambiente de los cuales se desconoce su actual potencial de valorización; y, por ende, su rol de contribución en el marco de la Economía Circular.

En ese marco, Jones et al. (2013) definió que, en un escenario de Economía Circular, los ciclos de materiales deben cerrarse mediante tres (03) enfoques: el reciclaje directo de los residuos de fabricación y/o manufactura previos al consumo (por ejemplo, escorias de producción de acero), y; por otro lado, el reciclaje de productos al final de su vida útil y posteriores al consumo (por ejemplo, el reciclaje de botellas PET para fabricación de nuevos insumos y/o la recuperación de metales a partir de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos). El tercer enfoque, por su parte, busca generar una conexión retrospectiva con las prácticas inadecuadas de la economía lineal; y, se basa en la recuperación de flujos de residuos históricos (y futuros) mediante el minado de rellenos sanitarios u otras infraestructuras de disposición final. Este último enfoque es el que se desarrolla como base para la presente investigación.

## **2.1.2 Minería de rellenos**

### **2.1.2.1 Concepto y Generalidades**

La Minería de Rellenos (Landfill Mining, LFM) se define como el proceso de extracción y recuperación de recursos a partir de residuos sólidos previamente dispuestos y/o enterrados en un relleno sanitario, mediante el uso de tecnologías de transformación innovadoras y respetando criterios sociales y de protección ambiental (Hogland et al., 2010; Jones et al., 2010; Krook et al., 2012; Jones et al., 2013). Este enfoque implica que, se modifique la perspectiva del relleno sanitario como un lugar destinado a la disposición final de los residuos; y, por el contrario, se le observe como una reserva dinámica de recursos a largo plazo (Bosmans et al., 2013; RAWFILL, 2021).

Sin perjuicio de lo anterior, Jones et al. (2013) estableció dos (02) estrategias para el desarrollo de proyectos de LFM. En primera instancia, la Minería de Rellenos in-situ se

refiere a la recuperación de recursos desde el mismo emplazamiento sin ejecutar actividades invasivas de excavación (por ejemplo, la extracción de metano). En segundo lugar, la Minería de Rellenos ex-situ implica la recuperación de recursos mediante la excavación parcial o total de los residuos previamente enterrados para su posterior tratamiento. La decisión respecto a cuál de las estrategias mencionadas son aplicables para un proyecto específico de LFM dependen de parámetros intrínsecos del relleno sanitario, tales como el tamaño, la ubicación, la edad, el tipo de residuos, la composición, e información histórica disponible (Jones et al., 2012).

Como punto de partida, y de acuerdo a su definición, la Minería de Rellenos tiene como objetivo fundamental recuperar los residuos vertidos, considerarlos como recursos, y reintroducirlos a los ciclos de materiales, tanto en los ciclos técnicos como biológicos (Quaghebeur et al., 2013). Asimismo, cuenta con objetivos específicos, entre los cuales se encuentran: la reducción de la superficie y volumen del relleno sanitario; la conservación de espacio y vida útil, la eliminación de fuentes potenciales de contaminación; la mitigación de una fuente de contaminación existente; la recuperación de energía; el reciclaje de los materiales recuperados; la recuperación de tierras aptas para nuevos usos; la reducción de los costes de gestión y postclausura, la remodelación del emplazamiento, entre otros (Kurian et al., 2003; Hogland et al., 2004; Rosendal et al., 2009; Diener et al., 2013; Hermann et al., 2014; Buccella et al., 2018).

Es importante considerar que, dada la heterogeneidad del contenido de residuos en un relleno sanitario, y de acuerdo a los estudios piloto y los proyectos finalizados de LFM desarrollados en el mundo, cada relleno sanitario tiene un potencial diferente en lo que respecta a proyectos de LFM. Factores como la edad del relleno sanitario, los tipos de residuos, las condiciones meteorológicas y el país o la región donde se encuentra el relleno sanitario influyen en el tipo de materiales almacenados y en su potencial de valorización (Jones et al., 2013; Quaghebeur et al., 2013). No obstante, y en líneas generales, los

residuos excavados podrán ser procesados y valorizados sea de forma energética o material (Tielemans & Laevers, 2010). Respecto a este último punto, es necesario considerar las siguientes definiciones (Decreto Legislativo 1278):

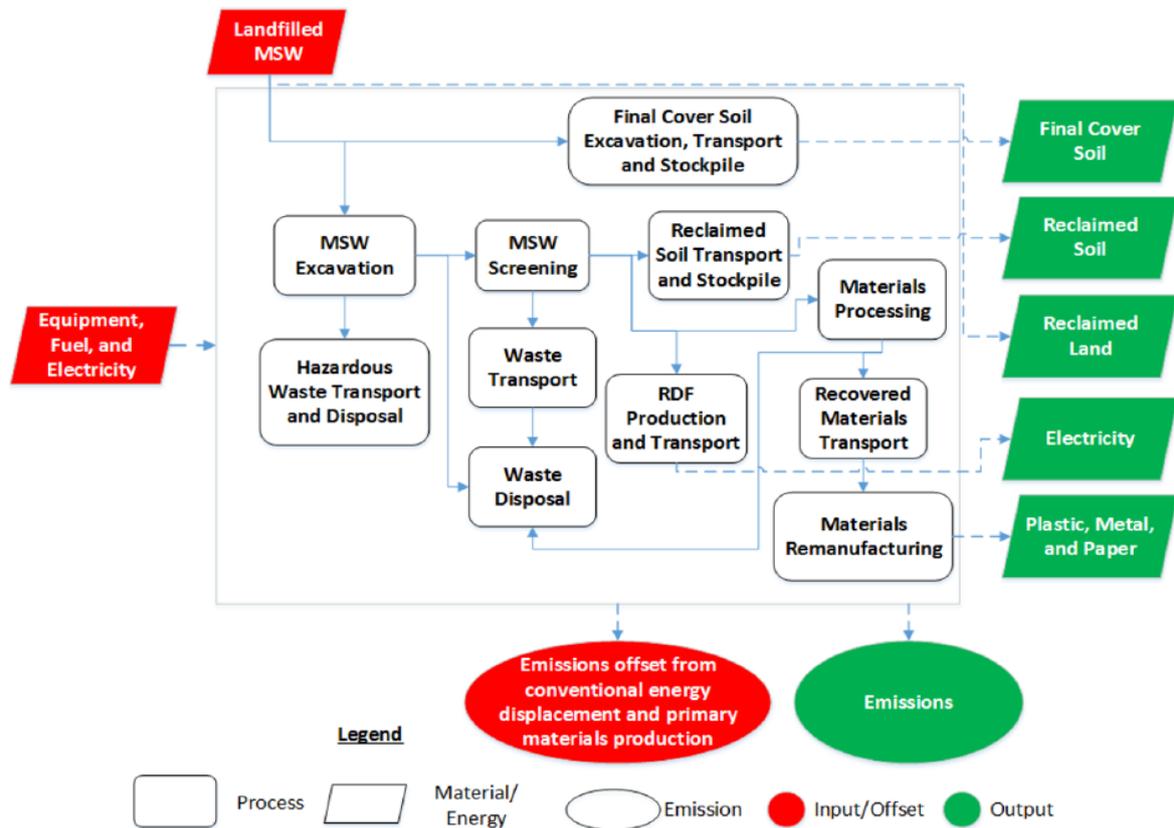
- Valorización: Cualquier operación cuyo objetivo sea que el residuo, uno o varios de los materiales que lo componen, sea reaprovechado y sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales o recursos en los procesos productivos. La valorización puede ser de forma material o energética.
- Valorización energética: Constituyen operaciones de valorización energética, aquellas destinadas a emplear residuos con la finalidad de aprovechar su potencial energético, tales como: Co-procesamiento, coincineración, generación de energía en base a procesos de biodegradación, biochar, entre otros.
- Valorización material: Constituyen operaciones de valorización material: reutilización, reciclado, compostaje, recuperación de aceites, bio-conversión, entre otras alternativas que a través de procesos de transformación física, química, u otros demuestren su viabilidad técnica, económica o ambiental.

Típicamente, durante un proceso de LFM, las fracciones recuperables incluyen metales, combustibles, y material similar a suelo (Somani et al., 2018). Solo aquellas fracciones no aprovechables (debido a limitaciones tecnológicas y/o financieras) podrán ser depositadas nuevamente para su posterior aprovechamiento (Jones et al., 2013; Hermann et al., 2014). Por tal motivo, para determinar el potencial de reaprovechamiento de los posibles residuos extraídos de un relleno sanitario específico, es esencial realizar un estudio de caracterización del emplazamiento, que incluya un análisis cuantitativo y cualitativo de los residuos almacenados (Prechthai et al., 2008). Al respecto, en la Figura 2, se presenta un diagrama de flujo generalizado del proceso de LFM (mayores detalles

respecto al aspecto metodológico y las fracciones obtenidas serán descritas en capítulos posteriores).

**Figura 2**

*Diagrama de flujo del proceso de minería de rellenos*



*Nota.* De "Life-Cycle Inventory and Impact Evaluation of Mining Municipal Solid Waste Landfills", de Jain et al., 2014, *Environmental Science & Technology*, 48(5), p. 2921 (doi: 10.1021/es404382s)

Finalmente, adicional al rol que desempeña la minería de rellenos en el marco de la economía circular (Jones et al., 2013) y los objetivos previamente mencionados, esta se ve integrada en cinco (5) de los diecisiete (17) Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), contribuyendo de manera efectiva a la erradicación de la pobreza y la protección del planeta (RAWFILL, 2021). A continuación, se detallan estos ODS y su implicancia con la LFM (ver Figura 3):

- Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura
- Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles.
- Objetivo 12: Producción y consumo responsables
- Objetivo 13: Acciones para combatir el cambio climático
- Objetivo 14: Conservación de la vida submarina

### Figura 3

*Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 9, 11, 12, 13 y 14*



*Nota. De La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, por ONU, 2015 (<https://bit.ly/3PHgxav>)*

Respecto a su implicancia en los ODS, se debe tener en consideración la naturaleza innovadora de la LFM, la cual, sumada a su objetivo fundamental de la búsqueda de la reinscripción en la economía de los residuos contenidos en los rellenos sanitarios, contribuye activamente al desarrollo de la comunidad circundante a estas infraestructuras, promoviendo su sostenibilidad (RAWFILL, 2021).

Por otro lado, y en referencia a la acción climática, el desarrollo de la LFM puede coadyuvar a mitigar impactos potenciales o reales relacionados al cambio climático. Como ejemplo de tal premisa podemos citar a Europa, región en la cual un gran porcentaje de rellenos sanitarios antiguos están ubicados en zonas costeras y aluviales, propensas a inundaciones por el aumento del nivel del mar causado por el cambio climático (Wille, 2018). Esto se suma a eventos ambientales a nivel mundial, como el drenaje de lixiviados tóxicos debido a la inundación de más de 13 rellenos sanitarios causados por el Huracán Harvey (U.S. EPA, 2017), o la contaminación de áreas costeras en West Coast (Nueva

Zelanda) y Lingreville (Francia) por los colapsos de los rellenos sanitarios históricos de Fox River y Samaritaine, respectivamente, inducidos por eventos de tormenta (JonoB, 2019, Nicholls et al., 2021).

Finalmente, y de manera indirecta, el desarrollo de la LFM evita cambios de uso de suelo en nuevas tierras, permitiendo su uso para distintos fines como el crecimiento urbano; y, previniendo, además, los impactos negativos que estos cambios conllevan, tales como la cancelación de diversos servicios ambientales del suelo, entre los que se encuentran: la producción de biomasa, la filtración y purificación del agua, la regulación de la erosión y la regulación del clima (Caprile, 2015).

### **2.1.2.2 Historia de la Minería de Rellenos**

La primera experiencia de Minería de Rellenos se remonta al año 1953 en el relleno sanitario de Hiriya en Israel, en el cual se ejecutó un proyecto con la finalidad de obtener fertilizantes y/o suelos mejorados para huertos (Savage et al., 1993). Esta experiencia se mantuvo como la única reportada hasta los años 1980 – 1990, tiempos en los cuales la Minería de Rellenos surgió como una alternativa viable en respuesta a la promulgación de regulaciones y marcos normativos más exigentes (por ejemplo, la Directiva 1999/31/CE) que establecieron criterios mínimos para la construcción, operación, mantenimiento, cierre y postcierre de rellenos sanitarios, con requisitos tales como: revestimiento de celdas, sistemas de recolección de lixiviados, monitoreo de aguas subterráneas, acciones de protección y remediación ambiental, entre otros (Krook et al., 2012; Wagner & Raymond, 2015). En ese sentido, los primeros proyectos de LFM se centraron básicamente en reducir la brecha entre los requerimientos normativos y las condiciones existentes de los rellenos sanitarios en dicha época, buscando la remediación de problemas de contaminación mediante la reubicación de residuos dispuestos en nuevas celdas revestidas, obteniendo beneficios como la extensión de la vida útil de los rellenos sanitarios existentes por la venta de productos intermedios y la recuperación de espacio aéreo, evitando los costos de la

construcción de nuevas infraestructuras de disposición final en terrenos no disturbados (U.S. EPA, 1997; Dhar, 2015).

Tal fue el caso de los proyectos de LFM desarrollados en los rellenos sanitarios de Naples (Condado de Collier, Florida) y Edinburg (Condado de Saratoga, Nueva York) durante los periodos 1986 – 1992 y 1988, respectivamente; en los cuales, visto el riesgo potencial de contaminación a los acuíferos circundantes y la proximidad a la etapa de cierre, se ejecutaron actividades de minado y reubicación de residuos, obteniendo beneficios como la recuperación de suelos aptos para fines de material de cobertura o compostaje, la venta de algunas fracciones reciclables (neumáticos, metales, entre otros), la reducción de la huella física del relleno sanitario, la eliminación de la fuente potencial de contaminación; y, por ende, la minimización de gastos futuros de remediación (Morelli, 1992; The World Resource Foundation, 1997; U.S. EPA, 1997; Kurian et al., 2003; Strange, 2010). Posteriormente, otros proyectos de LFM, con los mismos objetivos y beneficios, se desarrollaron en Norteamérica, tales como los ejecutados en los rellenos sanitarios de Hopewell (Pennsylvania), Barre (Massachusetts), Newbury (Massachusetts), Wyandot (Ohio), Clovis (California), Perdido (Florida), entre otros (Nelson, 1995; Guerriero, 1996; IWCS, 2009; Strange, 2010; Jain et al., 2013; Ortner et al., 2014; Dhar, 2015). Un caso especial fue el proyecto de LFM desarrollado en el periodo 1991 – 1993 en el relleno sanitario de Frey Farm (Pennsylvania), el cual fue ejecutado con la finalidad de proveer residuos adicionales para explotar la máxima capacidad operativa de una planta de incineración de residuos en el condado de Lancaster (U.S. EPA, 1997; Hogland et al., 2004).

De igual manera, en el continente europeo, los impulsores para el desarrollo de proyectos de LFM se debieron también a requerimientos normativos más exigentes, sumando a ellos la necesidad de eliminar los rellenos sanitarios que obstaculizaban el desarrollo y la expansión urbana (Cossu et al., 1996; Dhar, 2015). De hecho, el primer

proyecto de LFM se dio en el año 1993, en el relleno sanitario de Burghof en el país de Alemania, a manera de proyecto demostrativo para la recuperación de volumen útil de relleno sanitario (Hogland et al., 2004). Posteriormente, diversos estudios piloto y proyectos de LFM se desarrollaron en el continente europeo, motivados en su mayoría por índices de rehabilitación ambiental, protección de agua subterránea y marina, y demanda de tierra para usos industriales, tales como los ejecutados en los rellenos sanitarios de Rennerod (Alemania), Walkmühle (Alemania), Arnhem (Holanda), Apeldoorn (Holanda), Kiener-Deponie (Austria), Landskrona (Suecia), Samaritaine (Francia), entre otros (Bergstedt, 2008; Ortner et al., 2014; Dhar, 2015; Nicholls et al., 2021). Un caso particular fue el proyecto desarrollado con fines de recuperación de metales en el año 2008 en el relleno sanitario de Elbisgraben (Suiza), un relleno de tipo industrial que recibió en su mayoría escorias metálicas provenientes de una planta de incineración de residuos sólidos (BAFU, 2009).

En el continente asiático, por su parte, la mayoría de los proyectos de LFM han sido desarrollados con la finalidad de recuperar espacio aéreo, material de cobertura, compost y combustible alternativo a partir de las fracciones de residuos combustibles. Tal es el caso de los proyectos ejecutados entre los años 1989 a 2005 en los rellenos sanitarios de Deonar (India), Kodungaiyur (India), Perungudi (India), Guhagoda (Sri Lanka), San Lin (China), entre otros (Scheu and Bhattacharya, 1997; Kurian et al., 2003; Werellagama & Samarakoon, 2007; Ortner et al., 2014).

De lo descrito en los párrafos anteriores, se puede apreciar que, la mayoría de los proyectos de LFM desarrollados alrededor del mundo se han centrado en aspectos correctivos (ver Figura 4), siendo pocos los casos en los que se priorizó la recuperación de materiales como objetivo inicial (Kaartinen et al., 2013; Wagner & Raymond, 2015). De hecho, en la mayoría de los proyectos culminados, un gran porcentaje de los residuos excavados fueron redistribuidos en celdas revestidas adyacentes.

## Figura 4

### Proyecto de LFM en el relleno sanitario Samaritaine



*Nota.* La figura muestra el relleno sanitario de Samaritaine (comuna de Lingreville, Baja Normandía, Francia) antes y después del proyecto de LFM. (A) Colapso del relleno sanitario tras eventos de tormenta ocurridos en 2016. (B) Sitio rehabilitado. De "Coastal landfills and rising sea levels: A challenge for the 21st century", de Nicholls et al., 2021, *Frontiers in Marine Science*, 8, p. 17 (doi: 10.3389/fmars.2021.710342)

No obstante, y más allá del potencial de la Minería de Rellenos en el marco de la economía circular y el desarrollo sostenible, la falta de proyectos reportados a gran escala que sustenten la recuperación total de materiales vía energética y/o material indican que, en el contexto actual de gestión de residuos, esta estrategia no ha sido aún considerada una opción altamente viable (Bryden, 2000; Hull et al., 2005). Esto último debido a la complejidad de escalar los resultados obtenidos en proyectos a escala laboratorio en referencia a la calidad de los productos finales a ser reinsertados en el mercado, así como la falta de estimación de costos en conceptos relacionados a la evasión de actividades de remediación ambiental a largo plazo y la recuperación de terrenos para desarrollo urbano o industrial (Krook, 2021). Es en este contexto que, durante los últimos años, diversos autores han sumado esfuerzos para evaluar, desde diferentes aristas, factores que aporten a la viabilidad de la Minería de Rellenos como una estrategia circular para el desarrollo sostenible. Entre ellos, podemos encontrar los estudios realizados por Bosmans et al. (2013), Van Passel et al. (2013), Danthurebandara et al. (2015), y Winterstetter et al. (2015)

en los cuales se abordaron aspectos tales como: tecnologías innovadoras de recuperación energética de residuos, análisis de huella de carbono de proyectos de LFM, métodos de evaluación económica y financiera de proyectos de LFM desde perspectivas del Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) y Costos Totales de Ciclo de Vida (LCC, por sus siglas en inglés), métodos de evaluación para la determinación del potencial de materiales como recursos o reservas, entre otros.

A estos esfuerzos se suman iniciativas cofinanciadas por la Unión Europea tales como los proyectos NEW-MINE y RAWFILL, desarrollados por el Consorcio Europeo de Minería de Rellenos (EURELCO, por sus siglas en inglés) e instituciones tales como Cleantech Flanders (Bélgica), ATRASOL (Bélgica), la Universidad de Lieja (Bélgica), la Universidad de Linköping (Suecia), la Universidad de Linneo (Suecia), SPAQuE (Bélgica), la Universidad de Padua (Italia), la Universidad de Ghent (Bélgica), la Universidad de Antwerp (Bélgica), el Instituto Flamenco de Investigación Tecnológica – VITO (Bélgica), la Universidad de Wageningen (Holanda), el Instituto Superior Técnico de Lisboa (Portugal), ECOREM (Bélgica), la Universidad de Cranfield (Reino Unido), la Agencia de Residuos de Cataluña (España), entre otros.

### **2.1.2.3 Aspecto metodológico: Paso a paso**

Diversos autores (Sormunen et al., 2008; IWCS, 2009; Spooren et al., 2012; Jones et al., 2013; Quaghebeur et al., 2013; Danthurebandara et al., 2015; Zhou et al, 2015; SMART GROUND, 2017; Faitli et al., 2019; RAWFILL, 2021) han definido la secuencia metodológica para el desarrollo de proyectos de LFM, la cual comprende, de manera enunciativa y no limitativa, los siguientes subprocesos:

- Estabilización aeróbica, cuando corresponda
- Remoción de vegetación y suelo orgánico
- Excavación y transporte

- Clasificación y separación de fracciones de residuos
- Transformación de productos intermedios
- Recuperación del terreno
- Redispersión de residuos, cuando corresponda

Asimismo, y en similitud al desarrollo de proyectos mineros, previo a la ejecución del proyecto de LFM, es necesario la ejecución de una etapa de exploración que determine las características del emplazamiento y de los residuos dispuestos; y, por ende, su potencial de valorización. Esta etapa comprende, por su parte, los siguientes subprocesos:

- Información preliminar del sitio
- Prospección geofísica, cuando corresponda
- Muestreo de residuos
- Caracterización de residuos

En las subsecciones a continuación, se describirán los subprocesos constituyentes de la etapa previa de exploración e investigación del emplazamiento:

#### **2.1.2.3.1 Información preliminar del sitio**

Es realizada en gabinete y constituye la primera etapa del estudio exploratorio. Según Hogland et al. (1997), esta fase comprende la recopilación de información básica del sitio, incidiendo de manera no limitativa en los siguientes detalles:

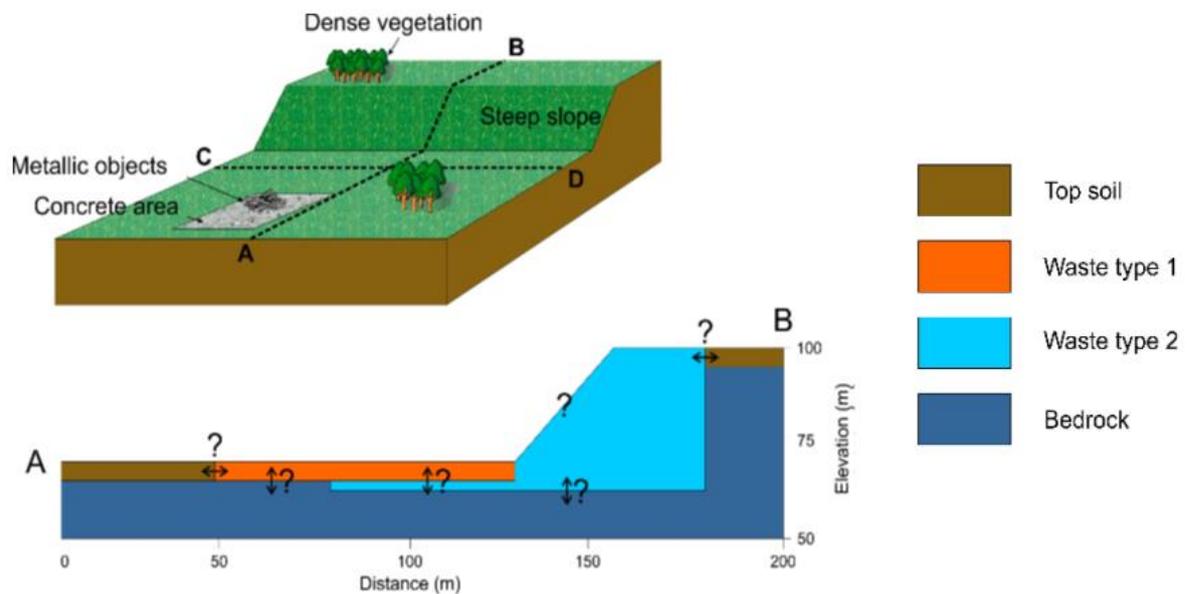
- Método de operación del sitio (por capas o por área)
- Geometría de las celdas de disposición final (volumen, profundidad o altura)
- Diseño de las celdas y propiedades del terreno
- Origen de los residuos dispuestos (municipal, industrial, mixto) y variación espacial (puede obtenerse por archivos fotográficos)

- Antigüedad del relleno sanitario y periodo de operación
- Presencia de agua subterránea

Con la información recopilada, será posible, en mayor o menor medida, la determinación de un modelo conceptual básico del emplazamiento, como el ejemplo que se muestra en la Figura 5:

**Figura 5**

*Ejemplo de modelo conceptual construido con información histórica*



*Nota.* Adaptado de *Landfill Miner Guide* (p. 43), por RAWFILL, 2021 (<https://bit.ly/3Vaa9cQ>)

### **2.1.2.3.2 Prospección geofísica**

En algunos casos, la información preliminar permite desarrollar un sólido modelo conceptual del emplazamiento y así proceder directamente con los muestreos a través de perforaciones o zanjas. No obstante, en caso no se cuente con suficiente información histórica sobre la composición, extensión y geometría diseño del relleno sanitario, los métodos geofísicos pueden ser aplicados para afinar la delimitación del sitio y las características de su contenido (Caterina et al., 2019).

Los métodos de prospección geofísica son usados para proveer información directa de las características geométricas del relleno sanitario, así como información indirecta de las propiedades fisicoquímicas de los materiales en su interior (residuos y lixiviados) (Tsourlos et al., 2014). La ventaja de su uso radica en que están constituidos por técnicas de rápida ejecución, poco costosas, no invasivas y de aplicación en superficie, que permiten medir las propiedades de los materiales (a nivel y a profundidad) tales como la conductividad eléctrica (o su inversa, la resistividad eléctrica), la densidad o la rigidez.

Entre las técnicas de prospección geofísica más comunes se encuentran la Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT), la Magnetometría (MAG), la Inducción Electromagnética en el Dominio de Frecuencia (EMI), la Polarización Inducida (IP), el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), la Tomografía de Refracción Sísmica (SRT), el Radar de Penetración Terrestre (GPR), entre otras. La decisión respecto a cuál técnica usar recae sobre múltiples factores, entre los cuales se destacan: la resolución requerida, la presencia de interferencias (por ejemplo, geomembrana de HDPE), la profundidad de estudio, entre otros (RAWFILL, 2021). No obstante, y considerando las diferentes interpretaciones que pueden derivar del resultado de la aplicación de una única técnica de prospección geofísica (por ejemplo: altas conductividades o bajas resistividades indican presencia elevada de lixiviados o contenido metálico), diversos estudios recomiendan la combinación de más de un método para obtener resultados de calidad (Ross et al. 1990; Nyquist & Doll, 1993; Orlando & Marchesi, 2001).

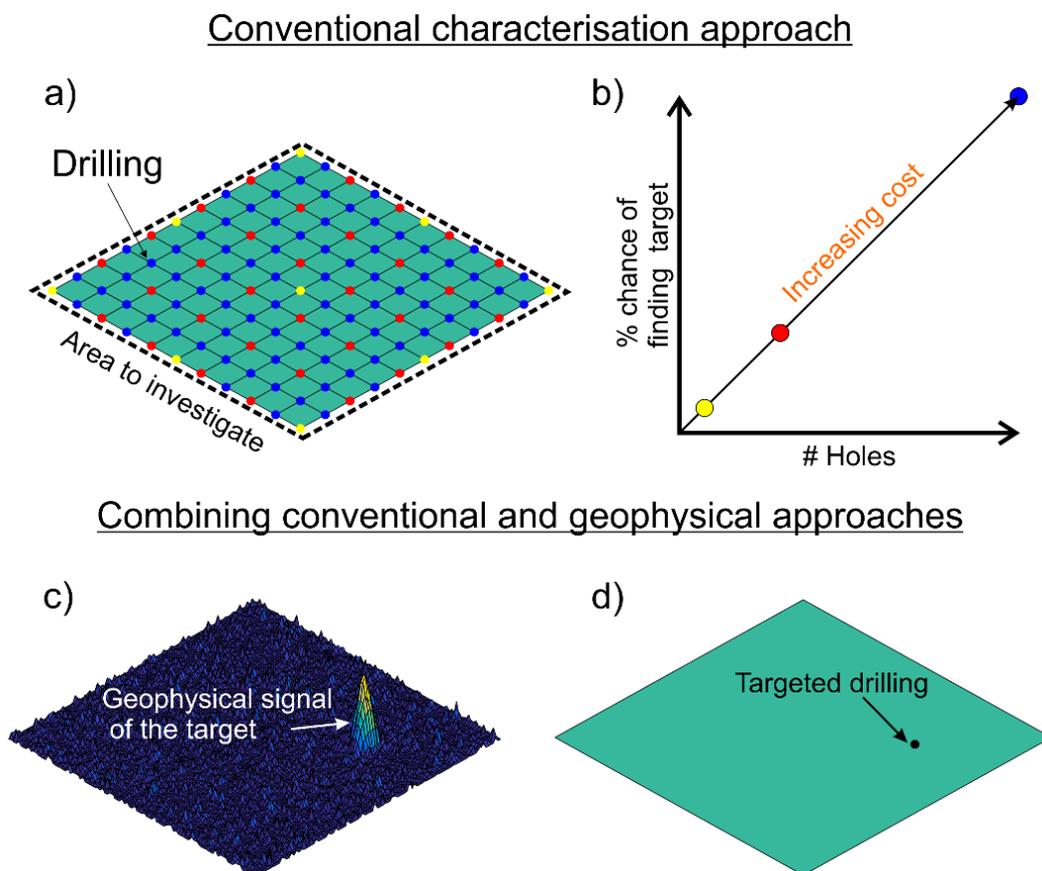
Es importante añadir que, la sola utilización de métodos de prospección geofísica para la conceptualización global del emplazamiento es insuficiente, dada la complejidad en la interpretación. Por otro lado, la ejecución de muestreos directos (perforaciones o excavaciones) con alta resolución elevan considerablemente los costos totales del estudio exploratorio. Por tal motivo, se recomienda la aplicación conjunta de técnicas de prospección geofísica con muestreos confirmatorios de detalle, optimizando los recursos

del proyecto (Yannah et al, 2017). De manera ilustrativa, en la Figura 6, se muestra como una combinación de métodos de prospección geofísica y convencionales generan una eficiencia en el costo beneficio del proyecto.

A continuación, se dará una breve descripción de las técnicas de ERT y FDEM, las cuales, según autores como Abu-Zeid & Santarato (2004), Martinho & Almeida (2006), Karlık & Kaya (2001), y Porsani et al. (2004), son los métodos geofísicos más apropiados para la caracterización de infraestructuras de disposición final. Asimismo, se ilustrará de manera gráfica como estas técnicas permiten mejorar el modelo conceptual del sitio de interés.

**Figura 6**

*Efecto costo beneficio al combinar métodos convencionales y geofísicos*



*Nota.* (a) Un muestreo convencional con una grilla de alta resolución genera (b) mayores costos a mayor número de perforaciones. (c) Los métodos geofísicos pueden determinar áreas de interés localizadas para

aplicar (d) un muestreo de detalle, reduciendo el número de excavaciones y los costos asociados. De *Landfill Miner Guide* (p. 39), por RAWFILL, 2021 (<https://bit.ly/3Vaa9cQ>)

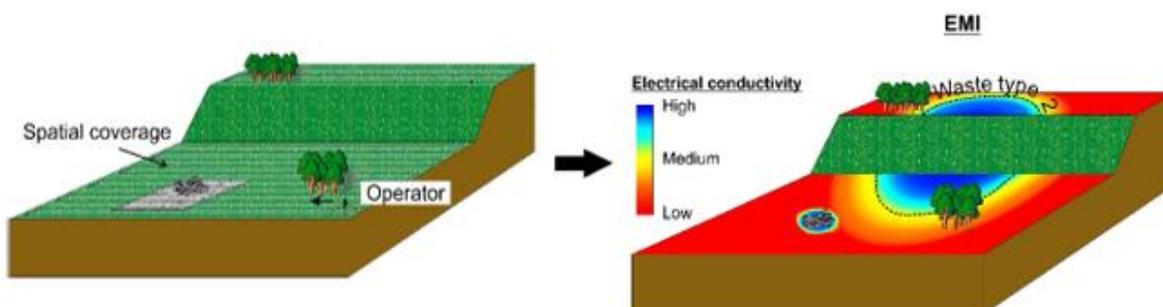
#### **2.1.2.3.2.1 Inducción Electromagnética en el Dominio de Frecuencia (EMI)**

El método EMI mide la conductividad eléctrica en suelos y rocas (en general, materiales) mediante la inducción de corrientes pulsantes en el terreno con una bobina transmisora y monitoreando la magnitud y la fase de la corriente electromagnética inducida con una bobina receptora (Reynolds, 2011). La ventaja del uso de este método radica en que es ideal para mapear los cambios laterales de la conductividad del subsuelo, determinar la profundidad y el espesor de las capas geológicas, la orientación de las fracturas, entre otros (Chongo et al., 2015; Soupios et al., 2015; Kourgialas et al., 2016). No obstante, su mayor limitante radica en que, a mayores profundidades de medición, se requieren bobinas transmisoras de gran tamaño, lo cual dificulta la ejecución desde el punto de vista logístico (Soupios & Ntarlagiannis, 2017). Por tal motivo, este método suele usarse mayormente para el mapeo subsuperficial del terreno, para luego combinar sus resultados con los obtenidos a través de métodos con mayor alcance a profundidad (por ejemplo: estudios ERT) (Minsley et al. 2012; Briggs et al., 2016) para obtener mejores modelos conceptuales.

En la Figura 7 se ilustra el uso de este método para la estimación de la extensión e identificación de heterogeneidades a nivel subsuperficial:

## Figura 7

Ejemplo del uso del método EMI para mapeo subsuperficial del subsuelo



*Nota.* Este método generalmente se aplica en grillas con un interlineado espacial con la finalidad de capturar la mayor información del terreno (ver líneas punteadas). Para el caso mostrado, los resultados permiten estimar la extensión lateral del relleno sanitario así como la identificación de dos áreas (rojo y azul) con diferentes tipos de residuos. Adaptado de *Landfill Miner Guide* (p. 45), por RAWFILL, 2021 (<https://bit.ly/3Vaa9cQ>)

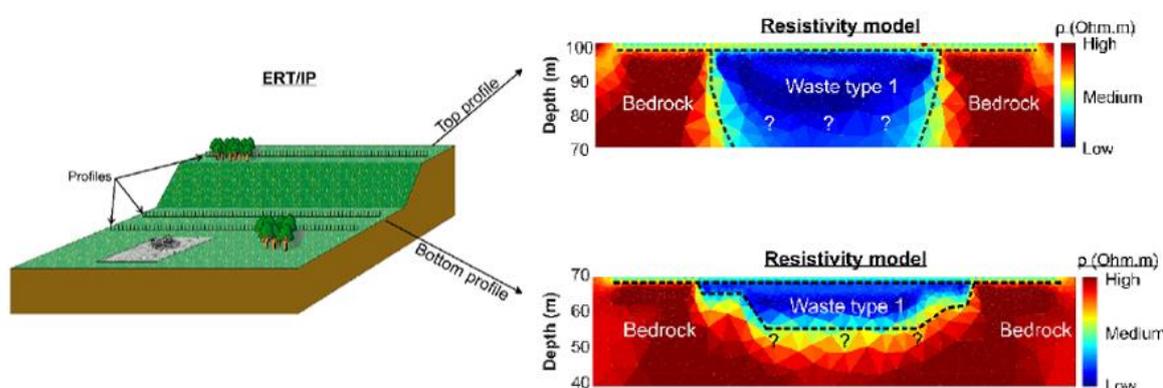
### 2.1.2.3.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT) tiene como objetivo determinar la distribución espacial de resistividad  $\rho$  en el subsuelo, a través de la medición con el uso de cuatro electrodos (Rubin and Hubbard, 2005). Un par de electrodos se utiliza para la inyección de corriente y un par de electrodos se utiliza para medir la diferencia de potencial generada en el subsuelo (Reynolds, 2011). La ventaja de su uso es su fácil adaptabilidad al modo multicanal, el cual, permite la medición simultánea por múltiples pares de electrodos, haciendo posible la creación de imágenes 2D, e incluso 3D, de la resistividad aparente del subsuelo (Rubin and Hubbard, 2005; Çınar et al., 2016; Konstantaki, 2016; Ntarlagiannis et al., 2016).

En la Figura 8 continuación se ilustra el uso de este método para la determinación de perfiles verticales a profundidad:

## Figura 8

### Aplicación del método ERT en la determinación de variaciones verticales



*Nota.* La figura muestra el uso del método ERT, el cual generalmente se aplica a lo largo de líneas 2D estratégicamente ubicadas, de tal manera que permitan obtener perfiles verticales de las áreas identificadas en los mapeos subsuperficiales (ver perfil superior e inferior). Para el ejemplo mostrado, los resultados confirman la presencia y extensión vertical de las zonas previamente identificadas, así como la presencia de roca madre. Adaptado de *Landfill Miner Guide* (p. 46), por RAWFILL, 2021 (<https://bit.ly/3Vaa9cQ>)

#### 2.1.2.3.3 Muestreo de residuos

De acuerdo a lo descrito en los ítems anteriores, la información preliminar del sitio, sumado a los estudios geofísicos (cuando correspondan), permiten construir un modelo conceptual más detallado del emplazamiento. No obstante, esto no implica que se deba omitir la ejecución de campañas de muestreos directos, pues son estas las que entregarán información concreta y representativa del contenido y las características de los residuos al interior del relleno sanitario. Al respecto, durante esta etapa de exploración, es de vital importancia definir la estrategia y las técnicas de muestreo a emplear.

##### 2.1.2.3.3.1 Estrategia de muestreo

La estrategia de muestreo hace referencia al diseño de la red de muestreo y al número de muestras. En ese aspecto, es necesario aclarar que, a la fecha, no existe una regla definitiva que determine el número de muestras por área de relleno sanitario ni el volumen mínimo de estas. En la mayoría de los casos, estos aspectos se han determinado

en base a los recursos disponibles y la geometría del sitio. En la Tabla 1, se presenta un resumen de la cantidad de ubicaciones de monitoreo ejecutados en diversos estudios en rellenos sanitarios.

**Tabla 1**

*Características del emplazamiento y número de muestras superficiales*

<b>Nombre</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Área Superficial (ha)</b>	<b>Número de muestras superficiales</b>	<b>Referencia</b>
N.E.	EE.UU.	0.80	7	Das et al. (2002)
Kodungaiyur	India	160	18	Kurian et al. (2003)
Perungudi	India	22.0	6	Kurian et al. (2003)
Alachua	EE.UU.	11.0	19	Jain et al. (2005)
N.E.	Tailandia	10.8	4	Prechthai et al. (2008)
REMO	Bélgica	128	10	Quaghebeur et al. (2013)
N.E.	Finlandia	3.20	3	Kaartinen et al. (2013)
Yingchun	China	11.3	9	Zhou et al. (2014)
SR	Alemania	0.30	11	Hölzle (2017)
Traunstein	Alemania	0.28	45	Hölzle (2017)
Miltenberg	Alemania	0.58	33	Hölzle (2017)
Kudjape	Estonia	3.90	4	Bhatnagar et al. (2017)

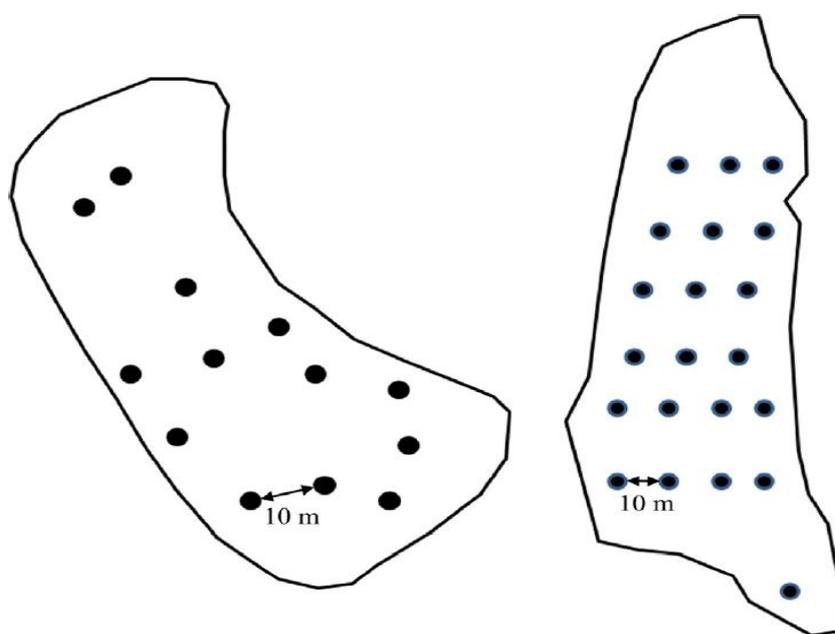
*Nota.* N.E.: No especificado

Como se puede apreciar de lo descrito en la Tabla 1, no existe un consenso entre autores respecto al número mínimo de muestras por área superficial. Esta misma tendencia se repite para los criterios de decisión en los muestreos a profundidad. Por ejemplo, en el estudio desarrollado por Bhatnagar et al. (2017), en las cuatro (04) ubicaciones de muestreo se establecieron cuatro (04) estratos a profundidad, definidos en base a la antigüedad de los residuos depositados (entre 4 a 8 años de diferencia). Asimismo, en el caso desarrollado por Quaghebeur et al. (2013), en cada ubicación de monitoreo se tomaron submuestras a diferentes intervalos de profundidad (0 – 1 m, 1 – 2 m, ...) hasta una profundidad máxima de 15 m. No obstante, la decisión de ejecutar o no muestreos de profundidad recae principalmente sobre el tipo de maquinaria utilizada, así como información histórica y geométrica del sitio. Finalmente, respecto al diseño de la red de

muestreo, esta es altamente variable entre la literatura recogida. Mientras algunos autores como Esakku et al. (2003) definieron redes de muestreo superficiales con puntos ubicados en las esquinas de triángulos equiláteros de 30 m esbozados sobre el área superficial del emplazamiento, otros como Hölzle (2017) definieron patrones basados en grillas regulares (ver Figura 9).

### Figura 9

*Excavaciones en los rellenos sanitarios de Traunstein (izquierda) y Miltenberg (derecha)*



*Nota.* De "Contaminants in landfill soils – Reliability of pre-feasibility studies", de Hölzle, 2017, *Waste Management*, 63, p. 339 (doi:10.1016/j.wasman.2016.08.024)

De manera enunciativa y no limitativa, se pueden usar distintos patrones de muestreo (rejillas regulares, rejillas triangulares, rejillas circulares, diagonales múltiples, aleatorio, zig-zag, entre otros), los cuales, deben ser definidos por el operador en base a las características del sitio.

#### **2.1.2.3.3.2 Técnicas de muestreo**

Las técnicas de muestreo hacen referencia al método de extracción de muestras, el cual implica el uso de equipos usados tanto en proyectos de minería a superficie como en la operación de rellenos sanitarios (IWCS, 2009). Al respecto, los métodos más utilizados incluyen la ejecución de pozos de perforación y/o excavaciones.

Respecto a los pozos de perforación, estos son realizados con máquinas perforadoras, y los métodos pueden variar entre el tipo rotatorio o por percusión (RAWFILL, 2021). En líneas generales, la ventaja de su uso radica en que permite la toma de muestras a profundidades mayores a 5 – 6 m, cuenta con gran variedad de diámetros de toma de muestra (dependiendo del cabezal utilizado), y previene la generación de olores y polvo dada la extensión del área expuesta. No obstante, entre sus principales desventajas se encuentran el costo de la maquinaria, la lentitud de ejecución, así como la necesidad de terrenos estables para la circulación de los equipos (ATRASOL, 2018).

Por otro lado, las zanjas o excavaciones son realizadas por equipos como excavadoras o retroexcavadoras (Dhar, 2015). Son los métodos más sencillos para analizar los primeros metros de depósitos de residuos, y se caracterizan por ser de bajo coste y rápida ejecución. No obstante, las principales desventajas de este método están relacionadas a la limitante en profundidad (4 – 5 m como máximo), y la presencia de olores por el tamaño de la zanja (ATRASOL, 2018).

En líneas generales, la decisión de qué equipos y métodos utilizar recaerá sobre un análisis de las ventajas y desventajas de estos. No obstante, algunos autores como Kaartinen et al. (2013) recomiendan la ejecución de zanjas mediante excavadoras dado que estas conservan mejor las propiedades de las muestras, en contrario a las técnicas de perforación que, debido a los efectos vibratorios, tienden a reducir el tamaño de las

partículas de los residuos de mayor tamaño. De manera ilustrativa, en las Figuras 10 y 11 se presentan ejemplos de muestreos con pozos de perforación y excavaciones:

### Figura 10

*Perforación con martillo en los depósitos de cenizas volantes del relleno de Onoz, Bélgica*



*Nota.* De *Landfill Miner Guide* (p. 56), por RAWFILL, 2021 (<https://bit.ly/3Vaa9cQ>)

### Figura 11

*Excavaciones de residuos sólidos en los rellenos sanitarios de Delhi y Hyderabad, India*



*Nota.* De "Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India", de Somani et al., 2018, *Waste Management & Research*, 36(8), p. 749 (doi: 10.1177/0734242x18782393)

Posterior a la ejecución del muestreo de residuos, es necesario realizar la caracterización de estos. Usualmente, esta tarea se realiza en facilidades destinadas para dicha finalidad, ubicadas a una distancia predeterminada de las ubicaciones de muestreo; por lo cual es necesario un transporte previo de las muestras. Para tal fin, se puede hacer uso de diferentes equipos de carguío y transporte tales como cargadores frontales, volquetes y/o fajas transportadoras (Hogland et al., 1997; Ford et al., 2013; Dhar, 2015).

#### **2.1.2.3.4 Caracterización de residuos**

Esta etapa es de alta importancia durante el estudio exploratorio, pues permite definir el potencial de reaprovechamiento almacenado en el relleno sanitario; y, por ende, la viabilidad del proyecto de LFM. Con la finalidad de proveer de información relevante, estandarizada, y fácilmente intercambiable, RAWFILL (2021) estableció una lista de propiedades y parámetros para la descripción de los residuos almacenados, entre las cuales destacan las siguientes: humedad, consistencia y composición. A continuación, se presenta una breve descripción de dichas propiedades.

##### **2.1.2.3.4.1 Humedad**

RAWFILL (2021) establece la siguiente clasificación cualitativa para describir el contenido de agua en las muestras de residuos (ver Tabla 2):

**Tabla 2**

*Descripción del contenido de humedad en muestras de residuos*

<b>Categoría</b>	<b>Definición</b>
Seco	No se observa humedad en las partículas de mayor tamaño ni en la matriz de materiales finos.
Bajo contenido de humedad	Los elementos grandes están secos, pero la matriz de finos está ligeramente húmeda. Esta matriz está ligeramente agrupada, formando conglomerados de mayor tamaño. No obstante, estos elementos pueden fragmentarse fácilmente.

<b>Categoría</b>	<b>Definición</b>
Contenido de humedad moderado	Los elementos grandes y la matriz fina están claramente húmedos. La matriz forma conglomerados separados entre sí, pero cada vez más cohesivo y difíciles de fragmentar a medida que aumenta el grado de humedad.
Alto contenido de humedad	Toda la masa de residuos, elementos grandes y matriz fina, está empapada. Las gotas de lixiviado son visibles, aunque no se observa percolación. La matriz fina tiene consistencia plástica y forma una masa fangosa.
Saturado	Toda la masa de residuos, elementos grandes y matriz fina, está completamente empapada. Se observa lixiviación/percolación. La matriz fina forma un lodo húmedo. Se presume alta probabilidad de la existencia de un acuífero cercano.

*Nota.* De *Landfill Miner Guide* (p. 61), por RAWFILL, 2021 (<https://bit.ly/3Vaa9cQ>)

Si bien la categorización líneas arriba tiene un carácter cualitativo, esto no limita la ejecución de ensayos analíticos que determinen el contenido cuantitativo de humedad (en porcentaje). La importancia de conocer este parámetro, desde cualquiera de los enfoques antes descritos, es de alta relevancia pues puede afectar significativamente el proceso de clasificación y separación de residuos, tanto a escala piloto como industrial (Kaartinen et al., 2013). De hecho, Dhar (2015) afirma que los ‘grumos’ de materiales finos (generados por altos contenidos de humedad) encontrados en los residuos excavados son altamente perjudiciales pues limitan la eficiencia en la separación de materiales. Por tal motivo, algunos autores como Esakku et al. (2003), Hull et al. (2005), Jain et al. (2005), Zhao et al. (2007), Quaghebeur et al. (2013), Rong et al. (2017), Tom et al. (2016), García et al. (2018), y Somani et al. (2018) proponen la implementación de etapas previas de secado, sea de manera natural (al aire libre), mecánica o a través de procesos de biosecado.

#### **2.1.2.3.4.2 Consistencia**

Según RAWFILL (2021), este parámetro está relacionado al estado físico de los residuos y puede clasificarse de acuerdo a lo descrito en la Tabla 3:

**Tabla 3***Descripción de la consistencia en muestras de residuos*

<b>Categoría</b>	<b>Definición</b>
Quebradizo	Los cúmulos de residuos están sueltos y pueden fragmentarse y desaglomerarse fácilmente.
Cohesivo	Los cúmulos de residuos pueden desaglomerarse parcialmente y algunas partes caen al formar una pila.
Compacto	Los cúmulos de residuos no se pueden desaglomerar sin un esfuerzo considerable.

*Nota.* De "Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India", de Somani et al., 2018, *Waste Management & Research*, 36(8), p. 749 (doi: 10.1177/0734242x18782393)

**2.1.2.3.4.3 Composición**

La composición de residuos es la propiedad de mayor importancia durante un estudio exploratorio de LFM, pues de esta depende la cantidad de posibles recursos existentes; y por ende, su potencial de recuperación durante la ejecución del proyecto de minado a gran escala (Cossu et al., 1995; Joseph et al., 2004). En líneas generales, la composición de residuos puede describirse en base a las siguientes subcategorías no limitativas:

- Metales ferrosos y no ferrosos
- Papel y cartón
- Plásticos
- Vidrio y cerámicos
- Minerales (rocas y concreto)
- Caucho
- Textiles
- Madera
- Materia orgánica
- Residuos peligrosos

- Otros/no identificables visualmente (fracción fina/ matriz de materiales finos)

Cabe mencionar que, la composición de los residuos es variable entre cada infraestructura de disposición final, y está influenciada por factores tales como su origen, edad, estado de degradación, entre otros (Jain et al., 2014). Dicha composición, y las características intrínsecas de las subfracciones identificadas, permitirán definir la ruta de valorización óptima de los residuos en el proyecto real de LFM, sea vía energética (Waste-to-Energy) o material (Waste-to-Material). Por tal motivo, RAWFILL (2021) afirma que, la composición también puede ser descrita en base al potencial de aprovechamiento, tomando las siguientes subfracciones de manera referencial:

- Fracción fina (materiales finos)
- Fracción combustible (incluye plástico, papel, cartón, caucho, textiles, entre otros)
- Materiales no combustibles (incluye materiales inertes tales como metales, vidrios, cerámicos, minerales)

Respecto a la metodología para la determinación de la composición de residuos, los estudios recogidos en la literatura incluyen metodologías de carácter manual y mecanizada, cuya elección varía dependiendo de la cantidad y volumen de muestras. Por ejemplo, para la separación de la fracción fina, algunos autores como Quaghebeur et al. (2013), Zhou et al. (2015), y Somani et al. (2018) proponen el tamizaje manual, mientras que otros como Chen et al. (2010), Jani et al. (2016), y Faitli et al. (2019), el uso de tambores tamizadores, trómeles, y pantallas giratorias (ver Figura 12). Cabe mencionar que, para la separación de la fracción fina, es necesario la definición previa de un tamaño específico de partícula, el cual será discutido en secciones posteriores.

## Figura 12

*Tamizado manual de residuos (izquierda) y tambor de cribado (derecha)*



*Nota.* (I) De “Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India”, de Somani et al., 2018, *Waste Management & Research*, 36(8), p. 749 (doi: 10.1177/0734242x18782393). (D) De “Recycling combustibles from aged municipal solid wastes (MSW) to improve fresh MSW incineration in Shanghai: Investigation of necessity and feasibility”, de Chen et al., 2010, *Front. Environ. Sci. Eng. China*, 4, p. 237 (doi: 10.1007/s11783-010-0016-5)

De igual manera, para la separación de las demás fracciones, se cuenta con una diversidad de equipos y metodologías. Por ejemplo, si la finalidad es separar las fracciones de manera individual, lo más recomendable es emplear un proceso de clasificación manual (ver Figura 13). No obstante, se pueden utilizar métodos mecanizados, los cuales deberán ser escogidos en base al objetivo propuesto para el proyecto de LFM. Entre ellos, destacan los siguientes (Hogland et al., 1997; Dhar, 2015):

- Separadores densimétricos por aire
- Separadores de metales
- Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés)

### Figura 13

#### Proceso de clasificación manual de residuos sólidos



Nota. (I) De “Assessment of a residual municipal solid waste landfill for prospective landfill mining”, de Faitli et al., 2019, *Waste Management & Research*, 37(12), p. 1233 (doi: 10.1177/0734242x19881197). (D) De “Characteristics and Fertilizer Effects of Soil-Like Materials from Landfill Mining”, de Zhou et al., 2015, *CLEAN - Soil, Air, Water*, 43(6), p. 943 (doi: 10.1002/clen.201400510)

Respecto a los separadores densimétricos, estos son usados para separar las fracciones ligeras y de baja densidad (generalmente la fracción combustible) de las fracciones pesadas (materiales inertes como metales, vidrios, cerámicos, minerales) mediante el paso de corrientes de aire (ver Figura 14) (Dhar, 2015). Al respecto, es importante considerar que, estas tecnologías tienen un mayor desempeño cuando la composición de los residuos es uniforme, tienen una consistencia quebradiza y un bajo contenido de humedad; por lo cual se debe analizar previamente su implementación y conveniencia (Ford et al., 2013).

Por otro lado, los separadores de metales difieren respecto al tipo de elementos metálicos a extraer. En ese sentido, los metales ferrosos son separados mediante el uso de separadores magnéticos (en forma de barra o rodillos); mientras que los elementos no ferrosos, a través de separadores de corrientes de Foucault (Dhar, 2015). En la Figura 15 se ilustra el uso de separadores magnéticos y su esquema de funcionamiento.

**Figura 14**

*Separador densimétrico de aire para clasificación de residuos*



*Nota.* De “Recycling combustibles from aged municipal solid wastes (MSW) to improve fresh MSW incineration in Shanghai: Investigation of necessity and feasibility”, de Chen et al., 2010, *Front. Environ. Sci. Eng. China*, 4, p. 237 (doi: 10.1007/s11783-010-0016-5)

**Figura 15**

*Separadores magnéticos y esquema de funcionamiento*



*Nota.* De *Combustibles Sólidos Recuperados y Combustibles Derivados de Residuos* [Trabajo Final de Máster, Universidad de Sevilla] (p. 48), por A. Yaque, 2013 (<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70450>)

Finalmente, es importante precisar que, durante un proyecto de LFM, sea a nivel exploratorio o durante la etapa de explotación, las metodologías de separación pueden ser combinadas buscando la mayor eficiencia del proceso. En la Figura 16 se muestra la

distribución de equipos durante el proyecto de LFM en el relleno sanitario Perdido ubicado en el estado de Florida, Estados Unidos (Jain et al., 2013), en la cual se observa la excavación y separación de residuos mediante el uso de excavadoras, tractores, fajas transportadoras, y pantallas giratorias.

### Figura 16

*Distribución de equipos en proyecto de LFM en relleno sanitario Perdido*



*Nota.* De "Case study of landfill reclamation at a Florida landfill site", de Jain et al., 2013, *Waste Management*, 33(1), p. 113 (doi: 10.1016/j.wasman.2012.09.011)

Si bien la composición de residuos es la propiedad de mayor importancia pues determina la cantidad de recursos potenciales existentes, esta no define por si sola la viabilidad del proyecto de LFM dado que, esta última variable depende de múltiples factores, entre ellos, la evaluación de los potenciales beneficios económicos del proyecto (U.S: EPA, 1997). Al respecto, se debe considerar que, el proceso de separación y clasificación de residuos dará lugar a diferentes subfracciones, las cuales, durante un

proyecto real de LFM, podrán venderse directamente; o, en su defecto, constituirán productos intermedios que necesiten un tratamiento adicional para obtener precios de mercado más altos (Danthurebandara et al., 2015). En efecto, algunos elementos como los metales y vidrios podrán ser vendidos directamente en el mercado; mientras que, otros elementos como la fracción combustible, podrán ser procesados con el uso de equipos móviles in situ (trituradores, imanes y clasificadores de aire) para producir combustibles alternativos a ser utilizados en instalaciones de combustión o co-procesamiento de residuos sólidos (por ejemplo, una central eléctrica de carbón) (Jain et al., 2014; RAWFILL, 2021).

## **2.2 Marco conceptual**

### **2.2.1 Fracción combustible**

Tal cual se mencionó en el capítulo anterior, la fracción combustible está constituida por diferentes subfracciones tales como: plástico, papel, cartón, caucho, textiles, entre otros (ver Figura 15). Durante un proyecto de LFM, esta fracción representa típicamente el 20 % - 30 % del total de los residuos excavados (Zhou et al, 2015), y es usualmente procesada para producir combustibles alternativos que sean valorizados en la ruta energética (Waste-to-Energy), la cual, según Bosmans et al. (2013), abarca los procesos de recuperación de energía de los residuos, en forma de electricidad y/o calor.

Ahora bien, cuando de combustibles alternativos se trata, e independientemente de su método de obtención (sea a través de proyectos de LFM, segregación en la fuente o minería urbana), es necesario diferenciar entre dos conceptos fundamentales: los Combustibles Derivados de Residuos (CDR o RDF, por sus siglas en inglés) y los Combustibles Sólidos Recuperados (CSR o SRF, por sus siglas en inglés) (Garcés, 2014). Los CSR se definen como combustibles sólidos preparados (procesados, homogeneizados y mejorados a una calidad que puede ser comercializada entre productores y usuarios) a partir de residuos sólidos no peligrosos con el propósito de ser utilizados para la

recuperación de energía en plantas de incineración, co-incineración, o coprocesamiento, y que cumplen con los requisitos de clasificación y especificación establecidos en la norma técnica EN 15359 “Combustibles sólidos recuperados. Especificaciones y clases” (Rada y Andreottola, 2012). Todos los demás combustibles que no cumplen estos criterios, sean peligrosos o no peligrosos, se consideran CDR (Yaque, 2013). Dada la variedad de los componentes que lo constituyen, los CSR son combustibles muy heterogéneos, y sus propiedades fisicoquímicas pueden ser diferentes dependiendo principalmente del tipo de residuo y del tratamiento específico utilizado para su producción (Gallardo et al., 2017). Al respecto, los CSR pueden producirse a partir de una gran variedad de residuos, incluyendo fracciones de residuos combustibles secos procesados y segregados en la fuente como, por ejemplo, envases de cartón de bebidas o botellas de PE/PET, residuos de envases o rechazos de fabricación, neumáticos de desecho, biomasa desechada (por ejemplo, paja, residuos de madera sin tratar, lodos de depuradora secos), residuos textiles, etc. (Lorber et al., 2012; Ragazzi & Rada, 2012). Por otro lado, en cuanto al tratamiento específico utilizado para su producción, los CSR pueden obtenerse mediante procesos de tratamiento mecánico-biológico (MBT, por sus siglas en inglés) (Passamani et al., 2016), que incluyen el biosecado, el tamizado, entre otras técnicas (ver Figura 17).

## Figura 17

*Presentaciones de CSR de acuerdo al método de producción*



*Nota.* (I) CSR sin compactación. De “Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry – Update 2019”, de Sarc et al., 2019, *Waste Management & Research*, 37(9), p. 889 (doi: 10.1177/0734242x19862600). (D) CSR compactado. De “Characterization of Korean solid recovered fuels (SRFs): an analysis and comparison of SRFs”, de Choi et al., 2012, *Waste Management & Research*, 30(4), p. 443 (doi: 10.1177/0734242x12441239)

### 2.2.1.1 Clasificación de los CSR

De acuerdo a su definición, para ser denominados como tal, los CSR deben cumplir con especificaciones técnicas y de calidad descritas en la norma EN 15359 “Combustibles sólidos recuperados. Especificaciones y clases”. Esta norma técnica ofrece un sistema de clasificación basado en atributos económicos, técnicos y ambientales, los cuales son:

- Valor medio para el Poder Calorífico Inferior (PCI)
- Valor medio para el contenido de cloro
- Mediana y Percentil 80 para el contenido de mercurio en relación al PCI

La finalidad de dicho estándar de clasificación (ver Tabla 4) es definir un lenguaje común entre productores y usuarios, que permita una mayor confianza en la producción y venta de combustibles alternativos.

**Tabla 4***Especificaciones y clases de CSR*

Propiedad	Medida estadística	Unidad	Clases				
			1	2	3	4	5
Poder Calorífico Inferior	Media	MJ/kg	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Cloro (Cl)	Media	% (m)	≤ 0.2	≤ 0.6	≤ 1.0	≤ 1.5	≤ 3
Mercurio (Hg)	Mediana	mg/MJ	≤ 0.02	≤ 0.03	≤ 0.08	≤ 0.15	≤ 0.50
	Percentil 80	mg/MJ	≤ 0.04	≤ 0.06	≤ 0.16	≤ 0.30	≤ 1.00

*Nota.* De Norma Europea EN 15359:2011, por Comité Europeo de Normalización, 2011

A continuación, se describirá brevemente la importancia de estos parámetros:

### **2.2.1.1.1 Poder Calorífico Inferior (PCI)**

Según WRAP (2012), el poder calorífico de cualquier combustible describe la cantidad de calor o energía generada cuando este se quema por completo. Es un atributo de tipo económico pues afecta el valor financiero del combustible y, en general, puede expresarse como poder calorífico superior (PCS o GCV, por sus siglas en inglés) o poder calorífico inferior (PCI o NCV, por sus siglas en inglés). Al respecto, el PCS considera que el agua producto de la combustión se encuentra en forma líquida o condensada (es decir, suma el calor latente); mientras que, el PCI, la considera en estado vapor (Arroyo, 2016; Ayala et al., 2016). Dado que en los procesos industriales la evacuación de gases se da a una temperatura mayor al punto de rocío, el calor latente de condensación del vapor de agua no es aprovechado. Por tal motivo, se usa el PCI como la medida más representativa (Garcés, 2014).

### **2.2.1.1.2 Contenido de cloro**

Es un atributo de tipo técnico pues afecta directamente el rendimiento de una instalación de aprovechamiento energético. Su importancia radica en que un combustible con alto contenido de cloro puede provocar corrosión, formación de escorias e incrustaciones en las calderas u hornos debido a los cloruros presentes en los gases de

combustión, incidiendo de manera significativa en los parámetros operacionales de la instalación (WRAP, 2012; Gallardo et al., 2017).

Por otro lado, son también determinantes en la formación de dioxinas y furanos, las cuales son sustancias altamente tóxicas y carcinógenas para el organismo incluso a muy bajas concentraciones (Yaque, 2013; Garcés, 2014). Por tal motivo, durante la producción de CSR se suele limitar aquellos residuos en los cuales el cloro está presente en altas cantidades, como por ejemplo:

- Residuos alimenticios orgánicos que contienen sales inorgánicas como el cloruro de sodio (NaCl) y los cloruros de potasio (KCl);
- Bolsas de plástico halogenadas;
- Policloruro de Vinilo (PVC) presente principalmente en tuberías y accesorios, cables aislantes, etc.;
- Papel y pasta de celulosa blanqueada; y
- Solventes industriales (desengrasantes, productos de limpieza, pesticidas, resinas y pegamentos) (WRAP, 2012; Sarra, 2018).

#### **2.2.1.1.3 Contenido de mercurio**

El mercurio es un elemento tóxico para el ambiente y la salud humana y, típicamente, puede ser encontrado en residuos provenientes de aparatos eléctricos y electrónicos, o en lodos industriales y tortas de filtración. Se le incluye en los atributos ambientales debido a su alta presión de vapor y volatilidad, las cuales permiten que se libere con los gases de escape durante la combustión, pudiendo causar efectos perjudiciales al ambiente (WRAP, 2012). Cabe mencionar que, el mercurio ha sido reconocido como uno de los contaminantes ambientales más importantes a nivel mundial debido a sus efectos a medio y largo plazo sobre la salud.

#### **2.2.1.1.4 Otros parámetros de interés**

Dependiendo del tipo de aplicación final, pueden considerarse parámetros adicionales a los especificados en la norma EN 15359. Por ejemplo, el uso específico de los CSR como combustibles secundarios en las centrales eléctricas de carbón y en las industrias de producción de cemento y cal requiere estándares adicionales y más exigentes para sustituir a los combustibles fósiles primarios y no causar problemas operativos o técnicos en la instalación (Nasrullah et al., 2015). Por tal motivo, algunos países como Alemania, Italia, Austria; y asociaciones como la Agencia Europea para el Tratamiento Responsable de Residuos Especiales (EURITS, por sus siglas en inglés) han definido sus propios estándares de calidad para los CSR. Estas normas varían en función del tipo de instalación en la cual se utilizan estos combustibles, sean hornos de cemento, centrales eléctricas o plantas de coincineración. Entre ellas, podemos citar la norma RAL-GZ 724 (Alemania), el Decreto Ministerial 22 (Italia), la Ordenanza de Incineración de Residuos (Austria), y los Criterios de EURITS para la Coincineración de Residuos en Hornos de Cemento. Dentro de los parámetros adicionales se encuentran los siguientes:

- Contenido de humedad: es considerado un atributo económico pues impacta directamente en el PCI. De hecho, el PCI de un combustible disminuye con el aumento del contenido de humedad (Khan et al., 2009; WRAP, 2012).
- Contenido de cenizas: las cenizas son la fracción mineral inorgánica y no combustible del CSR que permanece tras la combustión completa. Entre sus elementos constituyentes se encuentran elementos tales como sílice (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), magnesio (Mg). Es un parámetro pues puede requerir la implementación de sistemas adicionales de captación de polvo (WRAP, 2012).

- Otros metales como el arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), entre otros, los cuales son considerados por su potencial impacto al ambiente y la salud.

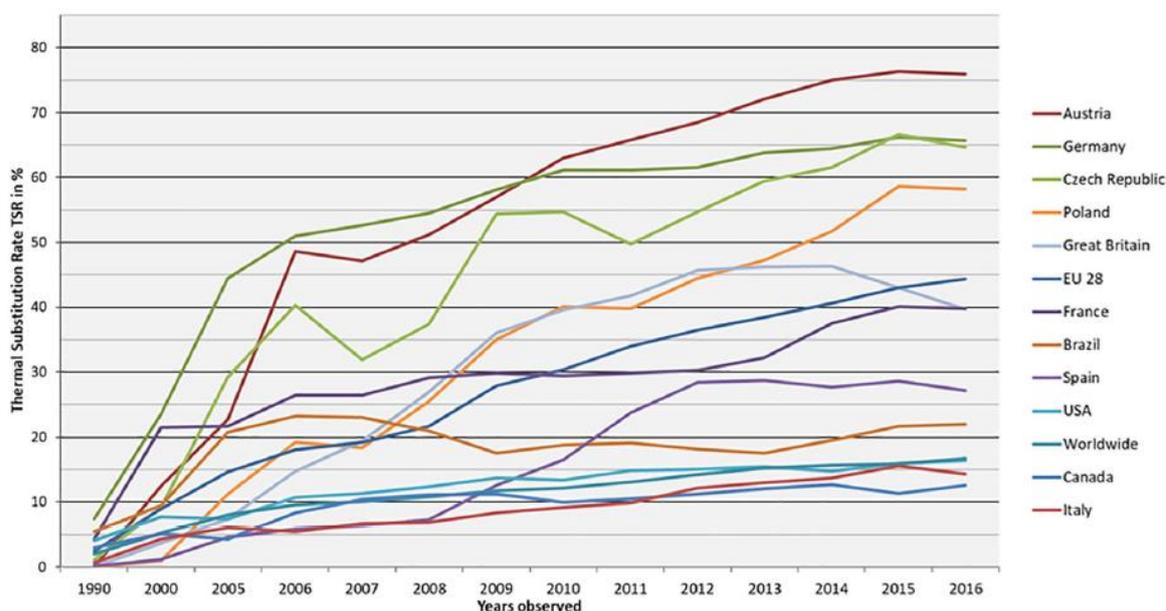
#### **2.2.1.2 Usos de los CSR**

Tal cual se mencionó en las secciones anteriores, los CSR constituyen un importante producto intermedio que, sometido a operaciones de acondicionamiento y/o tratamiento, puede ser valorizado vía energética en diversas aplicaciones tales como la sustitución de combustibles fósiles en las centrales eléctricas de carbón o plantas de producción de cemento, el uso directo en plantas de incineración, el uso como materia prima para los sistemas de pirólisis/gasificación, entre otros (Consonni et al., 2005; Viganò et al., 2011).

Uno de sus usos más desarrollados es el coprocesamiento en plantas de producción de cemento. De hecho, la Comisión Europea (2013), en su documento sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en las industrias de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio, definió el uso de CSR como el actual estado del arte en la industria cementera europea. Las estadísticas de la literatura confirman esta premisa. En efecto, el valor del índice de sustitución térmica (TSR, por sus siglas en inglés) de combustibles fósiles por combustibles alternativos en la Unión Europea (UE) alcanza un valor promedio de 44 %, superior al valor promedio global de 17 %. Países como Canadá y Estados Unidos cuentan con índices de 13 % y 16 %; mientras que, en América Latina, Brasil alcanza un valor de 22 % (Sarc et al., 2019). En la Figura 18, se muestra la tendencia histórica del TSR en la industria cementera en la Unión Europea (EU 28) y países seleccionados.

**Figura 18**

*Evolución del TSR (%) de combustibles fósiles por alternativos en la industria cementera en la UE y países seleccionados en el periodo 1990 – 2016*



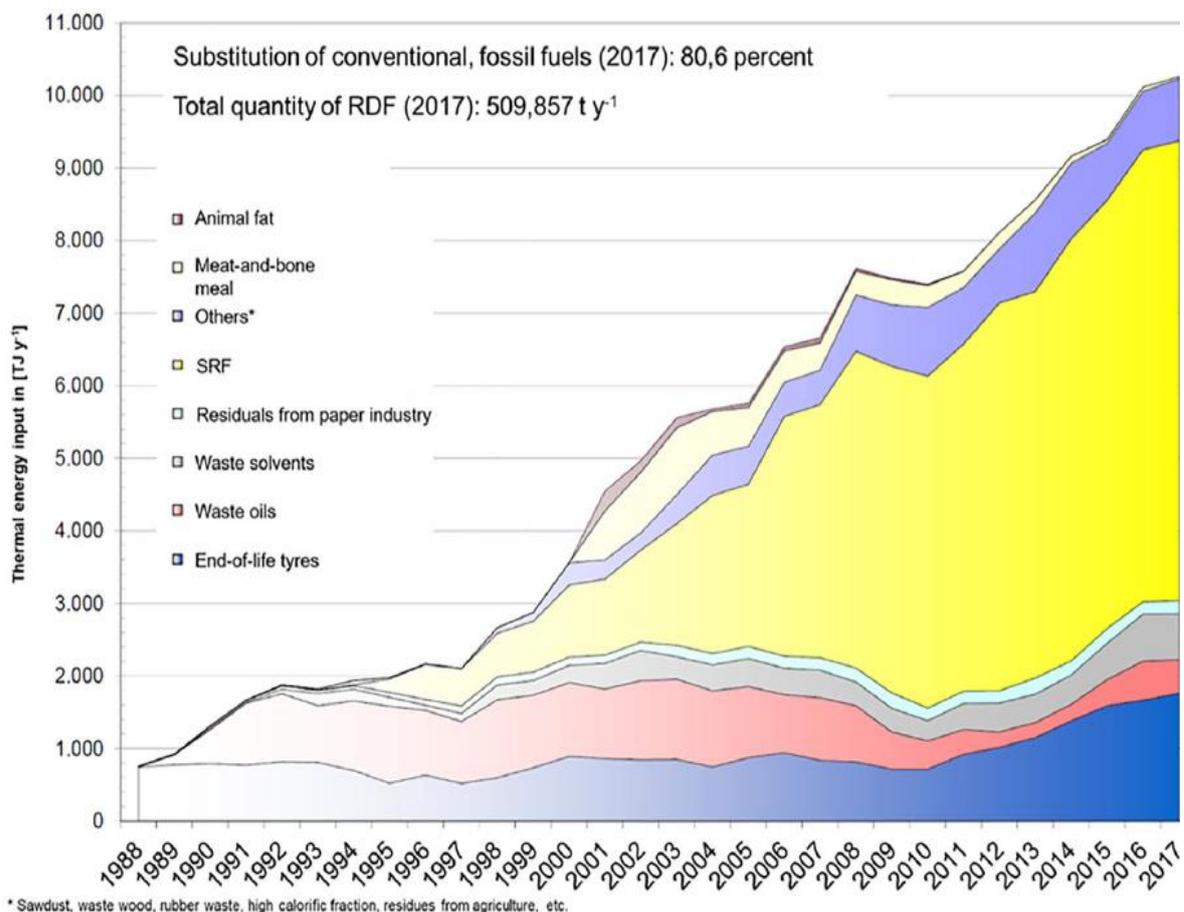
*Nota.* De “Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry – Update 2019”, de Sarc et al., 2019, *Waste Management & Research*, 37(9), p. 886 (doi: 10.1177/0734242x19862600).

Cabe mencionar que, en la figura anterior, se ilustra el TSR referente al reemplazo de combustibles fósiles por combustibles alternativos, los cuales pueden incluir tanto CDR como CSR. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los CSR contribuyen en mayor porcentaje a este índice.

Como ejemplo del enunciado anterior, en la Figura 19 se presenta el aporte de energía térmica de CDR (expresado en términos de tonelada por año) en las plantas de cemento en Austria durante el periodo 1988 – 2017.

**Figura 19**

*Aporte de energía térmica de CDR en las plantas de cemento austriacas (1988 – 2017)*



*Nota.* De “Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry – Update 2019”, de Sarc et al., 2019, *Waste Management & Research*, 37(9), p. 887 (doi: 10.1177/0734242x19862600).

Como puede observarse de las Figuras 18 y 19, el uso de combustibles alternativos y, por consiguiente, de CSR en la industria cementera ha ido en aumento progresivo durante las últimas décadas. Esto debido, en su mayoría, a la introducción de políticas globales (por ejemplo, la Directiva 2008/98/EC) con un claro enfoque en la jerarquización de residuos y la priorización de diversas opciones de manejo (reúso, reciclaje, recuperación energética) frente a la disposición final; así como al desarrollo de iniciativas de alto impacto cuya finalidad es alcanzar la sostenibilidad en la industria cementera y la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), como el caso de la Iniciativa para la Sostenibilidad del

Cemento (CSI, por sus siglas en inglés) desarrollada por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés) en el marco de la iniciativa Low Carbon Technology Partnerships (LCTPi), o el Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea (EU ETS, por sus siglas en inglés) desarrollado en el marco del Protocolo de Kioto.

Dentro de las principales ventajas del coprocesamiento de CSR en hornos de cemento, podemos encontrar las siguientes (Yaque, 2013; Garcés, 2014; CEMBUREAU, 2016; Ferraresi & Niño, 2020):

- Fomenta la economía circular, pues reduce la cantidad de residuos vertidos en rellenos sanitarios mediante el aprovechamiento de su potencial energético.
- No genera residuos, dado que permite que los minerales presentes en los residuos se capturen y formen parte de la estructura mineralógica del clínker, evitando su vertido en rellenos sanitarios o de seguridad.
- Garantiza la destrucción de los compuestos orgánicos existentes en el residuo, debido a las altas temperaturas y los tiempos prolongados de residencia en los hornos rotatorios, previniendo la formación de dioxinas y furanos.
- No incrementa las emisiones de sustancias orgánicas ni de metales.
- Reduce las emisiones netas de GEI debido a la sustitución de combustibles fósiles. Esto debido a que los factores de emisión de los combustibles alternativos son menores a los de los combustibles tradicionales como el petróleo y/o carbón (Habert et al., 2010; IPCC, 2022) y que, por otro lado, el carbón contenido en los combustibles alternativos es en algunos casos considerado carbono-neutral (Aranda et al., 2013).

Respecto a la formación de dioxinas y furanos, es importante aclarar que, un nivel térmico que asegure una temperatura de 800 °C durante un tiempo de residencia de al

menos 2 segundos garantiza la destrucción de estos compuestos (Sarra, 2018). En este aspecto, autores como Karstensen (2008) y Aranda et al. (2013) afirman que las condiciones de combustión en los hornos de cemento son ideales para fines de coprocesamiento de residuos pues alcanzan temperaturas mayores a los 1400 °C y tiempos de residencia de aproximadamente 2.7 segundos.

Por otro lado, diversos estudios recogidos en la literatura confirman las ventajas descritas anteriormente. Por ejemplo, Rovira et al. (2010) evaluó los riesgos ambientales y a la salud pública producidos por la sustitución de combustibles fósiles por ENERFUEL® (marca de CSR desarrollada por la empresa CEMEX) en una planta de producción de cemento en Cataluña, España; mediante el monitoreo de dioxinas, furanos y metales en los componentes suelo y aire. Concluidas las campañas de monitoreo de línea base y post aplicación de ENERFUEL®, en escenarios con un TSR promedio de 15 %, no se encontraron variaciones significativas de estos contaminantes. Del mismo modo, y referente a la reducción en las emisiones de GEI, Khan et al. (2020) calculó el impacto de la sustitución parcial de combustibles fósiles por CSR producidos a partir de residuos comerciales e industriales en la producción de cemento Portland en la planta Finnsementti en Finlandia, obteniendo reducciones de hasta 30 % de kilogramos de carbono equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq).

### **2.2.2 Fracción fina**

De acuerdo a lo descrito en la sección referente a la composición de los residuos, una de las fracciones obtenidas durante un proyecto de LFM es la fracción fina (FF). Según Parrodi et al. (2018), esta fracción, también denominada por su aspecto como matriz tipo suelo o finos, está compuesta del material diario de cobertura, así como de sustancias orgánicas descompuestas (sustancias húmicas), residuos minerales parcialmente meteorizados (arena, fragmentos de ladrillos, hormigón), partículas metálicas finas, y una

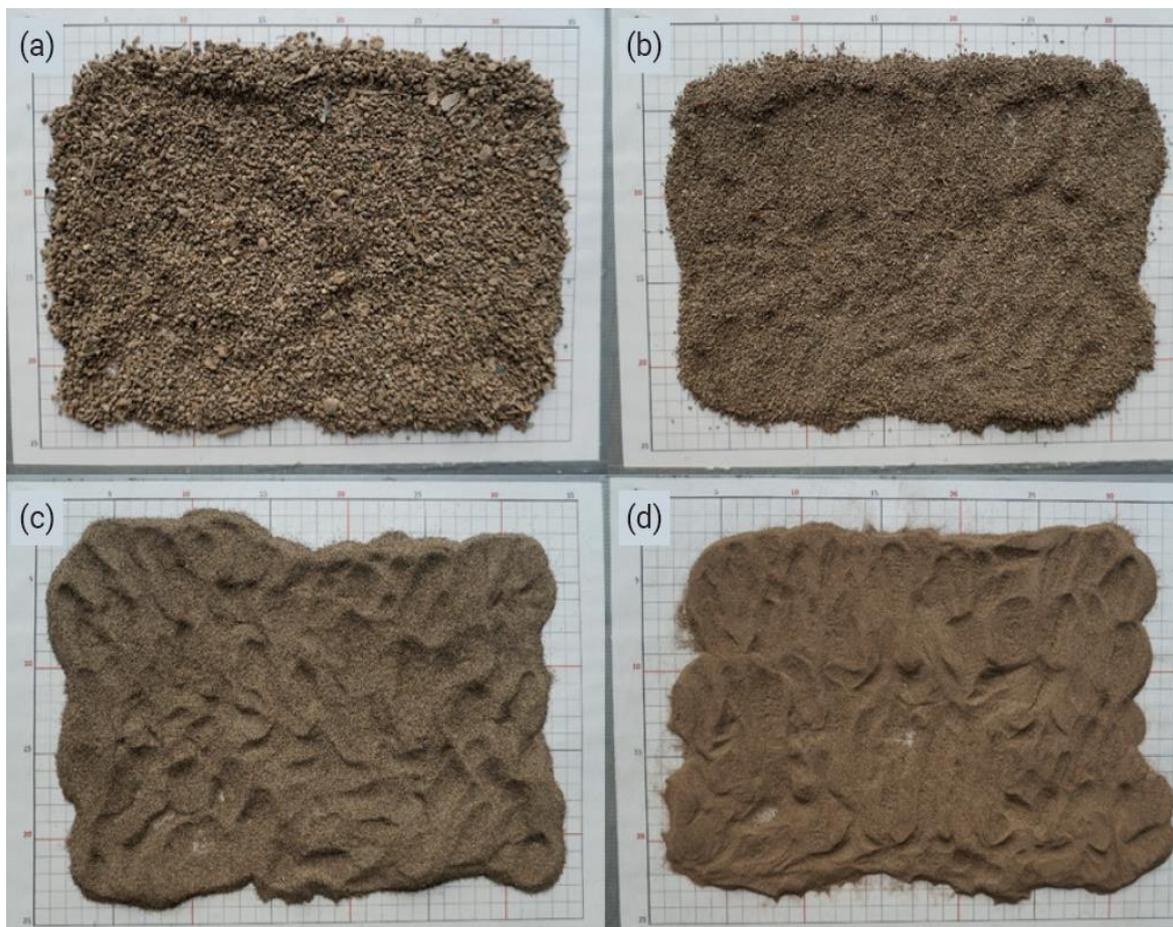
cantidad significativa de plásticos, papel, entre otras impurezas no identificables visualmente.

Diversos estudios (Hogland, 2002; Kurian et al, 2003; Hull et al., 2005; Jain et al., 2005; Kaartinen et al., 2013; Quaghebeur et al., 2013; Zhou et al., 2015; Mönkäre et al., 2016) indican que la fracción fina representa aproximadamente 40 % – 80 % del total de los residuos excavados durante proyectos de LFM. Por tal motivo, y considerando que esta fracción es el principal producto obtenido a través de estas actividades, la viabilidad económica de estos proyectos depende, en gran medida, de las características, contaminantes y opciones potenciales de reúso y/o aprovechamiento de esta fracción (Jain et al., 2013; Masi et al., 2014; Zhou et al., 2015; RAWFILL, 2021).

Al respecto, es importante mencionar que, el volumen de matriz tipo suelo presente en los residuos excavados depende de múltiples factores, entre los cuales destacan los años de almacenamiento. De hecho, los residuos almacenados podrán contener un mayor porcentaje de finos mientras mayor sea el periodo de exposición (generalmente mayor a 6 años) a los procesos de biodegradación (Zhou et al., 2015). Otro factor que influencia directamente las características de la fracción fina es el tamaño o diámetro de partícula ( $\emptyset$ ) (ver Figura 20), el cual, según la literatura recogida, es ampliamente variable (ver Tabla 5). Según U.S. EPA (1997), la definición de este factor está usualmente relacionada al uso proyectado de los finos, recomendando diámetros de hasta 2.5" (63.5 mm) para el uso de la matriz suelo como cobertura diaria en rellenos sanitarios.

## Figura 20

*Influencia del tamaño de partícula en la apariencia de la fracción fina*



*Nota.* (a)  $1.6 \text{ mm} \leq \varnothing \leq 4.5 \text{ mm}$ , (b)  $0.5 \text{ mm} \leq \varnothing < 1.6 \text{ mm}$ , (c)  $0.18 \text{ mm} \leq \varnothing < 0.5 \text{ mm}$ , (d)  $\varnothing < 0.18 \text{ mm}$ . De “Case study on Enhanced Landfill Mining at Mont-Saint-Guibert Landfill in Belgium Mechanical processing, physico-chemical and mineralogical characterisation of fine fractions < 4.5 mm”, de Vollprecht et al., 2020, *Detritus*, 10(1), p. 32 (doi: 10.31025/2611-4135/2020.13940).

## Tabla 5

*Tamaño de partícula de la fracción fina según la literatura*

Referencia	Tamaño de partícula (mm)
Prechthai et al., 2008	50
Jain et al., 2005	6.3
Mönkäre et al., 2016	20
Wolfsberger et al., 2014	40
Masi et al., 2014	4
Kurian et al., 2003	10
Hull et al., 2005	25
Quaghebeur et al., 2013	10

Referencia	Tamaño de partícula (mm)
Hogland, 2002	50
Zhao et al., 2007	40

*Nota.* Adaptado de "Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India", de Somani et al., 2018, *Waste Management & Research*, 36(8), p. 745 (doi:10.1177/0734242x18782393)

Por otro lado, una de las propiedades de las fracciones finas que limitan las opciones potenciales de reúso y/o aprovechamiento es la presencia de contaminantes, determinadas comúnmente en cantidades traza de químicos peligrosos (Reinhart & Townsend, 1997). Al respecto, es común que la mayoría de las sustancias químicas orgánicas sean destruidas durante los procesos bioquímicos ocurridos en los rellenos sanitarios (Field et al., 1995; Reinhart & Townsend, 1997; Atuanya et al., 2000; Cohen and Speitel, 2001). Sin embargo, este no es el caso de los metales pesados, los cuales permanecen por largos periodos en la matriz de residuos (a menos que sean lixiviados), debido a sus bajos índices de movilidad por la existencia de mecanismos atenuantes al interior de los rellenos sanitarios (Finnveden, 1996; Gould et al., 1990). En ese sentido, es importante precisar que, el tamaño de partícula no solo afecta la apariencia y clase textural de las fracciones finas, sino también la presencia de contaminantes, la cual es esencial para definir las opciones potenciales de reúso y/o aprovechamiento de esta fracción. En efecto, Masi et al. (2014) concluyó que la concentración de metales pesados disminuye de manera directamente proporcional al tamaño de partícula, encontrando reducciones de hasta 30 % en la concentración de estos elementos en las fracciones finas con  $\varnothing < 4$  mm, frente a las encontradas en las fracciones con  $\varnothing < 10$  mm.

En la Tabla 6, se presenta un resumen de los usos sugeridos de las fracciones finas en diversos proyectos de LFM ejecutados alrededor del mundo, considerando también el diámetro de partícula elegido, y su aporte en la composición porcentual.

**Tabla 6***Resumen de usos para la fracción fina en proyectos de LFM*

<b>Nombre del sitio</b>	<b>Objetivos del proyecto</b>	<b>Ø (mm)</b>	<b>FF (%)</b>	<b>Uso sugerido</b>	<b>Referencia</b>
Filbornia (Suecia)	Estudio de factibilidad técnica	18	55 – 70	Material de cobertura	Hogland et al., 1997
Perungudi (India)	Estudio de factibilidad y análisis de la fracción fina	2	N.D.	Compost	Kurian et al., 2003
Naples (EEUU)	Protección de aguas subterráneas, recuperación de volumen útil	75	40 – 60	Material de cobertura	Kurian et al., 2003
Frey Farm (Canadá)	Recuperación de combustibles alternativos para planta de incineración	25	41	Material de cobertura	Kurian et al., 2003
Maung Pathum (Tailandia)	Rehabilitación y recuperación de materiales	2	69 – 75	Material de cobertura, compost	Joseph et al., 2004
Burghof (Alemania)	Remediación ambiental y construcción de un nuevo relleno	N.D.	70.5	Material de cobertura	Joseph et al., 2004
Alachua (EEUU)	Estudio de factibilidad y análisis de la fracción fina	6.3	60	N.D.	Jain et al. (2005)
Perdido (EEUU)	Incremento de capacidad útil, reducción de huella física y prevención de contaminación en aguas subterráneas	25	70.4	Material de cobertura, uso fuera del sitio	Dhar, 2015
Edinburg (Reino Unido)	Estudio de factibilidad técnica y económica	25	75	Material de cobertura, uso fuera del sitio	Dhar, 2015
Clovis (EEUU)	Mitigación de contaminación de aguas subterráneas, recuperación de suelos y espacio aéreo	50	60	N.D.	Dhar, 2015
Kuopio (Finlandia)	Estudio de factibilidad y análisis de la fracción fina	20	45 – 50	N.D.	Mönkäre et al., 2016
Lohja (Finlandia)	Estudio de factibilidad y análisis de la fracción fina	20	60 – 70	N.D.	Mönkäre et al., 2016
REMO (Bélgica)	Evaluación del potencial de valorización de residuos	10	40 – 60	Material de construcción, compost	Quaghebeur et al., 2013

Nombre del sitio	Objetivos del proyecto	Ø (mm)	FF (%)	Uso sugerido	Referencia
Yingchun (China)	Estudio de factibilidad y análisis de la fracción fina	10	40 – 60	Fertilizantes y enmienda de suelos	Zhou et al., 2015

*Nota.* N.D.: No disponible. Adaptado de "Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India", de Somani et al., 2018, *Waste Management & Research*, 36(8), p. 746 (doi: 10.1177/0734242x18782393)

Finalmente, es importante aclarar que, el uso destinado para la FF (sea como compost, material de construcción como subrasante o relleno, material de cobertura, entre otros) deberá cumplir con las regulaciones existentes en la localidad o país donde se ejecute el proyecto de LFM.

## 2.3 Marco legal

### 2.3.1 Marco normativo nacional

A nivel nacional, no existe un marco legal que regule de modo específico la ejecución de actividades relacionadas a LFM. No obstante, y de manera enunciativa, se detallan los siguientes instrumentos normativos:

- *Constitución Política del Perú*

En la Constitución de 1993, artículo 2°, inciso 22°, el derecho ambiental es elevado a la categoría de derecho fundamental de la persona e incorporado a los derechos humanos de tercera categoría

- *Ley General del Ambiente*

La Ley N° 28611, emitida en octubre de 2005 por la Presidencia del Consejo de Ministros, es la norma ordenadora del marco normativo legal para la gestión ambiental en el Perú. Establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el cumplimiento del

deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y protección del ambiente, así como sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país.

- *Ley de Gestión Integral de Residuos Peligrosos*

La Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Decreto Legislativo N° 1278) establece derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, con la finalidad de propender hacia la maximización constante de la eficiencia en el uso de los materiales y asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos económica, sanitaria y ambientalmente adecuada con sujeción a las obligaciones, principios y lineamientos de este Decreto Legislativo. Esta norma establece como primera finalidad de la gestión integral de residuos sólidos en el país, la prevención o minimización de la generación de residuos sólidos en origen, frente a cualquier otra alternativa. En segundo lugar, respecto de los residuos generados, prioriza la recuperación y la valorización material y energética de los residuos, entre las cuales se cuenta la reutilización, reciclaje, compostaje, coprocesamiento, entre otras alternativas siempre que se garantice la protección de la salud y del medio ambiente.

- *Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos*

El Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos (Decreto Supremo N° 014-2017-MINAM) tiene como objeto reglamentar el Decreto Legislativo N° 1278, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, a fin de asegurar la maximización constante de la eficiencia en el uso de materiales, y regular la gestión y manejo de residuos sólidos, que comprende la minimización de la generación de residuos sólidos en la fuente, la valorización material y energética de los residuos sólidos, la adecuada disposición final de los mismos y la sostenibilidad de los servicios de limpieza pública. En su artículo 62°, esta norma establece los principales procesos, métodos o técnicas de tratamiento de residuos sólidos, haciendo mención específica a los Combustibles Derivados

de Residuos (CDR) y su posterior valorización energética sea por coprocesamiento, coincineración, etc. Por otro lado, en su artículo 112°, esta norma hace referencia al cierre de rellenos sanitarios, incidiendo en la necesidad de contar con medidas de mitigación ambiental ante posibles impactos en un periodo de por lo menos diez (10) años.

- *Estándares de Calidad Ambiental para Suelos*

El 2 de diciembre del 2017, se publica el Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, el cual deroga al Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM y el Decreto Supremo N° 002-2014-MINAM, y aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, definidos como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. La norma establece los ECA para Suelo basados en el uso del suelo, el cual puede ser de tipo Agrícola, Residencial/Parques, o Comercial/Industrial/Extractivo.

### **2.3.2 Marco normativo internacional**

En la presente sección, se describe el marco normativo a nivel internacional, dividiéndolo en los aspectos relacionados a la gestión de residuos y desarrollo de LFM, el uso de combustibles sólidos alternativos, así como el uso del material tipo suelo.

#### **2.3.2.1 Gestión de residuos y desarrollo de LFM**

El único acercamiento normativo al desarrollo de proyectos de LFM se dio en el continente europeo. En esta región, la gestión de residuos se ve enmarcada en la Directiva 2008/98/CE, la cual establece medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación

y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso. Esta Directiva introduce, entre otros aspectos, la jerarquía de residuos, la cual establece un orden de prioridad de lo que constituye la mejor opción global para el medio ambiente en relación a la gestión de residuos, adoptando el siguiente orden prioritario: prevención, preparación para la reutilización, reciclado, otro tipo de valorización (por ejemplo, la valorización energética), y eliminación.

Por otro lado, la gestión de rellenos sanitarios se ve regulada por la Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos, la cual establece, mediante rigurosos requisitos técnicos y operativos sobre residuos y vertidos, medidas, procedimientos y orientaciones para impedir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos negativos en el medio ambiente del vertido de residuos, en particular la contaminación de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, el suelo y el aire, y del medio ambiente, incluido el efecto invernadero, así como cualquier riesgo derivado para la salud humana, durante todo el ciclo de vida del relleno sanitario.

No obstante, y a pesar del amplio desarrollo de tal marco normativo, ninguno de los instrumentos antes descritos detalla de manera explícita la minería de rellenos ni sus aspectos operacionales. De hecho, la única mención relacionada a este tópico se dio en la Resolución del Parlamento Europeo “Eficiencia de los recursos: hacia una economía circular” del 09 de julio de 2015, la cual indica claramente la necesidad de innovación y transición política en materia de gestión de recursos en la Unión Europea. En esta Resolución, el Parlamento Europeo apoya plenamente la transición hacia una economía circular y señala 80 medidas a la Comisión Europea (CE) con vistas a este cambio político. Específicamente, a través de la medida 40, el Parlamento pide a la CE que investigue a detalle la viabilidad de proponer un marco normativo para la minería de rellenos, que permita la recuperación de las materias primas secundarias que están presentes en los

rellenos sanitarios existentes. Sin embargo, a la fecha, tal marco regulatorio unificado no ha sido desarrollado.

Por tal motivo, en la mayoría de los casos, las regiones y/o países adaptan la normativa sobre permisos ambientales o recurren a las leyes sobre rehabilitación de suelos (RAWFILL, 2021). Por ejemplo, en Flandes, una región Belga con más de 2500 rellenos sanitarios antiguos y amenazas potenciales de aumento del nivel del mar e inundaciones (COCOON, 2019), el 16 de octubre de 2015 el Gobierno Flamenco aprobó un memorándum desarrollado por la Agencia Pública de Residuos de dicha región (OVAM), en el cual se detallaba el nuevo concepto de la Gestión Sostenible de Recursos de los Rellenos Sanitarios (también denominado como LFM) con miras a la gestión sostenible a largo plazo de los rellenos sanitarios (en su mayoría antiguos), incluido el uso provisional, y la valorización de su contenido y superficie. Producto de la aprobación de este memorándum, y como medida indirecta para la recopilación de data de las infraestructuras de disposición final existentes a ser usada en un estadio posterior de ejecución de proyectos de LFM en un marco de gestión dinámica de rellenos sanitarios (DLM, por sus siglas en inglés), el 29 de noviembre del 2017 la OVAM modificó el DECRETO sobre la rehabilitación y la protección de los suelos, obligando a los propietarios de parcelas (potencialmente) contaminadas, independientemente del origen de la contaminación, a realizar una investigación orientativa del suelo para recopilar datos (COCOON, 2019). En esta misma línea, el 03 de mayo de 2019, el Gobierno Flamenco emitió una enmienda para incluir la categoría de LFM en la tabla de clasificación anticipada de VLAREM (el decreto de permisos ambientales en Flandes), creando la obligatoriedad de contar con un permiso ambiental para los proyectos de excavación y explotación de rellenos sanitarios con el propósito de crear valor a partir de residuos, ya sea mediante la generación de energía o mediante su reutilización como materiales.

El ejemplo anterior muestra claramente como las autoridades competentes locales pueden adaptar sus marcos legislativos en materia de residuos, rellenos sanitarios, permisos ambientales, remediación de suelos, entre otros, con la finalidad de promover actividades de LFM o DLM. Para cada caso en particular, los impulsores para la adaptación de cada normativa podrán ser variables, entre ellos: la transición hacia la economía circular, el cambio climático, la gestión del riesgo de inundaciones, entre otros (RAWFILL, 2021).

### **2.3.2.2 Uso de combustibles sólidos alternativos**

El uso de los combustibles alternativos (CSR y CDR) en las diferentes industrias está regulado por sus características fisicoquímicas, expresadas por diversos parámetros de interés. Entre las normas que regulan este aspecto, encontramos las siguientes:

- *Criterios de EURITS para la coincineración de residuos en hornos de cemento (EC, 2003)*

Estos criterios, desarrollados por la Agencia Europea para el Tratamiento Responsable de Residuos Especiales (EURITS, por sus siglas en inglés) y expuestos por la Comisión Europea en su reporte 'Refuse Derived Fuel current practice and perspectives' emitido en el año 2003, definen valores límite para metales, PCI y otros componentes, para el uso específico de los residuos como combustible sustituto en plantas de producción de cemento. Este estándar es usado de manera internacional por la Región Flamenca en Bélgica. No obstante, es preciso mencionar que, la industria cementera considera que estos límites son muy restrictivos, en especial con referencia al valor mínimo del PCI (EC, 2003).

- *Ordenanza de Incineración de Residuos (AVV) (BMLFUW, 2010)*

Esta Ordenanza, desarrollada por el Ministerio Federal Austriaco de Agricultura, Silvicultura, Medio Ambiente y Gestión del Agua (BMLFUW), establece valores

límite para el contenido de ciertos parámetros (principalmente metales pesados) en los combustibles sustitutos de acuerdo al tipo de uso. Entre los usos especificados por esta norma, se encuentran: plantas de producción de cemento (sea en los hornos rotatorios, precalentadores y calcinadores), centrales eléctricas (a base de hulla o lignito y limitando el TRF a un valor máximo de 15 %), y otras plantas de coincineración.

- *Norma Europea EN 15359-2011: Combustibles Sólidos Recuperados: Especificaciones y Clases (CEN/TC, 2011)*

Esta norma europea (EN), desarrollada por el Comité Técnico para la Estandarización CEN/TC 343, define las especificaciones y clases de los Combustibles Sólidos Recuperados (CSR), basándose en un conjunto de parámetros, incluidos parámetros técnicos y medioambientales. Al aplicar la norma EN 15359, un productor puede presentar información fiable y normalizada de un combustible. Este esquema tiene la mera función de proporcionar un lenguaje fácil y uniforme entre el productor, el cliente y otras partes interesadas. El esquema de clasificación utiliza tres parámetros principales: poder calorífico (información económica), cloro (información técnica) y mercurio (información medioambiental). Cada uno de estos parámetros se divide en cinco clases con sus correspondientes valores límite y se le asigna un número del 1 al 5 en función del valor obtenido para el mismo. La combinación de estos números constituye el código de clase.

- *RAL-GZ 724 Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (RAL, 2012)*

En Alemania, los residuos destinados a la valorización energética se subdividen generalmente en combustibles sólidos recuperados y fracciones de alto poder calorífico. Un combustible sólido recuperado es un combustible especialmente preparado a partir de residuos específicos de la producción o municipales que han sido tratados adecuadamente para su uso como materia prima en plantas de coincineración, como en plantas de cemento, o centrales térmicas de carbón.

Los combustibles sólidos recuperados que cumplen la norma de calidad definida según RAL-GZ 724 (desarrollada por el Instituto Alemán de Garantía de Calidad y Etiquetado o RAL) se conocen por la marca protegida SBS®. Esta norma establece valores límite para el contenido de ciertos parámetros (principalmente metales) en los CSR, entre ellos, cadmio, mercurio, talio, arsénico, cobalto, níquel, antimonio, plomo, cromo, cobre, manganeso, vanadio y estaño. Asimismo, establece la obligatoriedad de medir otros parámetros como la humedad, PCI, y el contenido de cloro. Sin embargo, no establece valores límite para estos parámetros puesto aclara que estos son netamente comerciales y deben dejarse a acuerdo libre entre los productores y consumidores

- *Decreto Ministerial Nro. 22 (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2013)*

Este reglamento, desarrollado por el Ministerio de Medio Ambiente y Protección del Territorio y del Mar de Italia, establece los criterios específicos que deben cumplirse para que determinados tipos de combustibles sólidos secundarios (CSS), dejen de clasificarse como residuos. La clasificación de este combustible sólido secundario (CSS, equivalente al concepto de CSR), se basa en los requisitos de la norma técnica estandarizada EN 15359, que identifica, a nivel europeo, la clasificación de los CSR teniendo en cuenta tres parámetros fisicoquímicos o atributos incluidos en los ámbitos ambiental, tecnológico y económico. A los efectos de este reglamento, solo podrá ser considerado combustible sólido secundario (CSS) aquel con PCI y Cl en clases 1, 2, 3; y Hg, en clases 1 y 2, y sus combinaciones asociadas. Asimismo, establece valores límite para metales pesados como antimonio, arsénico, cadmio, cromo, plomo, entre otros. Este Decreto no establece valores límite para el contenido de cenizas y humedad, puesto aclara que estos son parámetros netamente

comerciales y deben dejarse a acuerdo libre entre los productores y consumidores.

### **2.3.2.3 Uso de material tipo suelo**

Para fines de la presente investigación, en la presente sección se define el marco normativo internacional para el uso del material tipo suelo o fracción fina, incidiendo en los usos como compost o material de construcción.

#### **2.3.2.3.1 Compost**

El uso del compost (o composta) se encuentra regulado por las siguientes normativas:

- *Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004. Compost – Clasificación y requisitos (INN, 2004)*

Esta norma tiene por objeto establecer la clasificación y requisitos de calidad del compost producido a partir de residuos orgánicos y de otros materiales orgánicos generados por la actividad humana, tales como los agroindustriales, agrícolas, forestales, ganaderos, pesqueros, de mercados y ferias libres en que se comercializan productos vegetales; de la mantención de parques y jardines; entre otros. Asimismo, establece dos niveles de calidad para el compost: Clase A (alto nivel de calidad) y Clase B (nivel intermedio de calidad).

- *Norma Mexicana Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006 que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos (SMA, 2006)*

Esta norma define la composta como el producto obtenido mediante procesos microbiológicos aerobios y anaerobios, que han pasado por las diferentes etapas termofílicas y mesofílicas, que permiten obtener un producto benéfico

para el suelo e inocuo para el ambiente. Asimismo, establece requisitos fisicoquímicos en base a propiedades como pH, materia orgánica; así como límites máximos permisibles en base a metales pesados como arsénico, cadmio, cobre, plomo, níquel, y zinc.

- *Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (Segunda Actualización). Productos para la Industria Agrícola. Productos orgánicos usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas o Acondicionadores de Suelo (ICONTEC, 2011)*

Esta norma establece los requisitos que deben cumplir y los ensayos a los cuales deben ser sometidos los productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y como enmiendas o acondicionadores de suelo.

- *Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y parámetros de calidad de los productos finales (SCFI, 2018)*

Esta norma establece requerimientos mínimos para la composta (o compost), definido como aquel producto orgánico estable, inocuo, libre de sustancias fitotóxicas, derivado del terminado del proceso de biodegradación de los residuos orgánicos, en el que su grado de madurez, no se reconoce su origen, puesto que sus componentes se han degradado en partículas finas. Al respecto, la norma establece tres (03) tipos de composta: Tipo I, Tipo II, y Tipo III; y sus respectivos límites en base a concentraciones de elementos traza, y otras características fisicoquímicas como pH, Conductividad Eléctrica, materia orgánica, entre otros.

#### **2.3.2.3.2 Material de construcción como subrasante o relleno**

Uno de los componentes que pueden limitar el uso de la fracción fina como un material de construcción, sea como subrasante o relleno en la construcción de pavimentos

o afirmados, es el contenido de materia orgánica. Al respecto, estos límites varían hasta un 5 % (Somani et al., 2018) de acuerdo a diversas legislaciones locales o nacionales, tales como las establecidas por el Departamento de Transporte de Indiana (INDOT), las Especificaciones Estándar de Luisiana para Carreteras y Puentes (2016), el Departamento de Transportes de Texas (2005), el Ministerio de Transporte por Carretera y Autopista de la India (2002), el Departamento de Transportes del Reino Unido (1991), entre otros.

## **Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación**

El presente capítulo describe la metodología aplicada para ejecutar el presente trabajo de investigación. Para tal fin, se consideró como referencia las guías publicadas por los proyectos RAWFILL y SMART GROUND de la Unión Europea (Landfill Miner Guide y Enhanced Landfill Mining Toolkit for Municipal Solid Waste Streams, respectivamente), así como las directrices establecidas por diversos autores tales como Esakku et al., 2003; Jain et al., 2005; Sormunen et al., 2008; Jones et al., 2013; Quaghebeur et al., 2013; Danthurebandara et al., 2015; Zhou et al., 2015; Somani et al., 2018; entre otros.

### **3.1 Tipo y diseño de investigación**

Tal cual se mencionó en secciones anteriores, la presente investigación se centra en aplicar los diversos aspectos metodológicos de la Minería de Rellenos (LFM), con la finalidad de valorizar los residuos almacenados en un relleno sanitario peruano, enfatizando el análisis en la caracterización y evaluación de alternativas de uso de la fracción combustible y la fracción fina (< 6.3 mm) obtenidas a partir de los residuos enterrados en dicha infraestructura de disposición final. Por tal motivo, este estudio es considerado de tipo no experimental descriptivo, pues se centra en observar las características de las fracciones de residuos tal cual suceden en su contexto natural y sin la manipulación de ningún tipo de variables; para que, luego del análisis y descripción de estas, se pueda determinar sus alternativas de uso. Por otro lado, al estar dispuestas tanto la fracción combustible como la fracción fina (< 6.3 mm) en un relleno sanitario específico con una ubicación y antigüedad determinada, también se debe considerar al presente estudio como uno de tipo transeccional, pues las características de estas matrices son observadas y registradas en un momento específico y único.

### 3.2 Área de estudio

Para fines de la presente investigación, se eligió como emplazamiento un relleno sanitario existente ubicado en la costa peruana, en el cual se disponen residuos sólidos urbanos provenientes de diferentes municipios. Esta infraestructura de disposición final ha sido operada según el método del área, el cual consiste en construir el relleno sanitario depositando continuamente los residuos sólidos en la pendiente natural del terreno, previa impermeabilización, y cubriendo diariamente los residuos con material de cobertura específico. Este método constructivo y de operación se utiliza principalmente en zonas donde el nivel freático es profundo y en terrenos relativamente planos, donde la excavación de zanjas o trincheras no es factible. Por otro lado, este método es también usado para rellenar depresiones naturales (Jaramillo, 2002; Sandoval, 2011).

Dada la gran superficie y volumen del relleno sanitario elegido, debido principalmente a su método constructivo y tiempo de operación; y, considerando además la escala piloto de la presente investigación de LFM, se seleccionó como área de estudio una celda de disposición final de residuos sólidos municipales. De acuerdo a información primaria recogida del emplazamiento, la celda seleccionada fue operada durante finales del año 2009 y mediados del año 2010. Respecto a su geometría, esta cubre un área de aproximadamente 0.74 hectáreas, tiene un perímetro y una altura máxima de relleno de aproximadamente 345 metros y 5 metros, respectivamente; y, para el inicio de la presente investigación (noviembre de 2019), tenía una antigüedad entre 9 a 10 años y estaba totalmente cubierta por una capa de arcilla compactada.

Cabe mencionar que, el área de estudio constituye una celda de disposición final de residuos sólidos construida directamente sobre el terreno natural, inmersa en un clima seco, de aspecto desértico y árido, con lluvias y nubosidad incipiente, y amplio rango de brillo solar. Respecto a las variables climáticas, el área presenta una precipitación promedio anual de 16.7 mm, una humedad relativa de 86 %, y temperaturas promedio oscilantes

entre 18.8 °C a 28.1 °C (como temperatura máxima) y 13.4 °C a 18.9 °C (como temperatura mínima). Durante su período de operación, la celda seleccionada recibió residuos de diversos municipios, con una generación promedio per cápita de residuos sólidos urbanos de 0.91 kg/cap/día.

### **3.3 Unidad de análisis**

Para fines de la presente investigación, la unidad de análisis comprende la fracción combustible y la fracción fina (< 6.3 mm) obtenidas mediante la aplicación de los diversos aspectos metodológicos de la Minería de Rellenos (LFM) a partir de los residuos sólidos enterrados en un relleno sanitario peruano; específicamente, en el área de estudio descrita en la sección precedente.

### **3.4 Período de análisis**

El periodo de análisis corresponde al periodo cronológico comprendido entre finales del año 2009 y mediados del año 2010. Por otra parte, es importante precisar que, la presente investigación fue iniciada en noviembre de 2019; por lo cual, para dicha fecha, la celda seleccionada tenía una antigüedad entre 9 a 10 años.

### **3.5 Procedimiento experimental**

En esta sección se describe el procedimiento experimental ejecutado durante el presente trabajo de investigación. Al respecto, este estudio se ve enmarcado dentro de la etapa exploratoria de un proyecto de LFM, la cual tiene como finalidad determinar las características del emplazamiento y de los residuos dispuestos; y, por ende, su potencial de valorización. Como es de conocimiento, esta etapa comprende los siguientes subprocesos: investigación preliminar del sitio, prospección geofísica (cuando corresponda), muestreo y caracterización de residuos. A continuación, se detallará la secuencia metodológica seguida en el marco de dichos subprocesos.

### 3.5.1 Investigación preliminar del sitio

Esta etapa fue realizada en gabinete y constituyó la primera fase del estudio exploratorio. Al respecto, las características principales del área de estudio fueron descritas en la sección con dicho nombre; y, fueron obtenidas a través de información primaria recogida en campo. En la Tabla 7 se presenta un resumen de estas características. De igual manera, en la Figura 21 se muestra el modelo conceptual desarrollado para el emplazamiento a partir de la información histórica.

**Tabla 7**

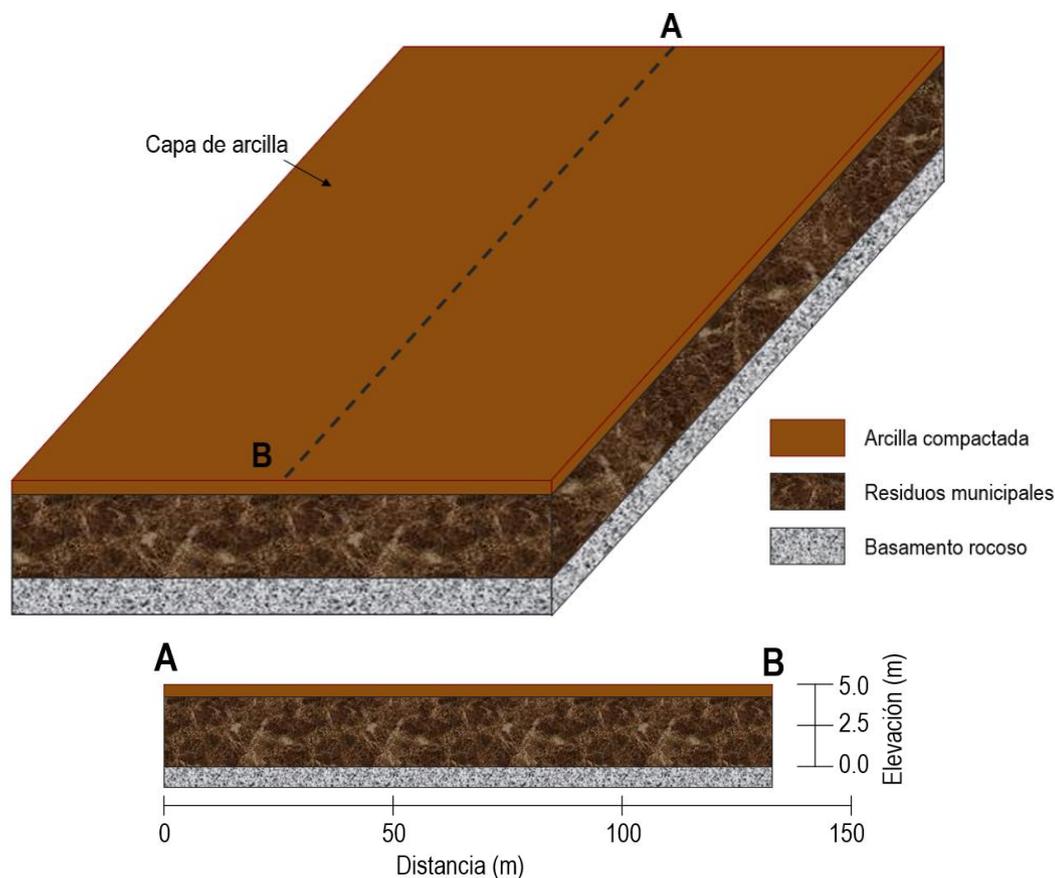
*Características principales del área de estudio*

<b>Característica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Método constructivo	Adimensional	Área
Tipo de residuos	Adimensional	Municipal
Periodo de operación	Año	2009 - 2010
Área superficial	ha	0.74
Perímetro	m	345
Altura máxima de relleno	m	5
Antigüedad	Año	9 - 10

*Nota.* Los parámetros 'área superficial' y 'perímetro' fueron obtenidos través de imágenes satelitales y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

**Figura 21**

*Modelo conceptual del área de estudio*



*Nota.* Se expone el área de estudio como un paralelepípedo con fines ilustrativos.

### 3.5.2 Prospección geofísica

Dado que la información preliminar del emplazamiento permitió desarrollar un sólido modelo conceptual; y, considerando el corto tiempo de operación de la celda seleccionada, lo cual determina la inexistencia de variación espacial del tipo de residuos dispuestos, no se consideró necesario el uso de métodos de prospección geofísica.

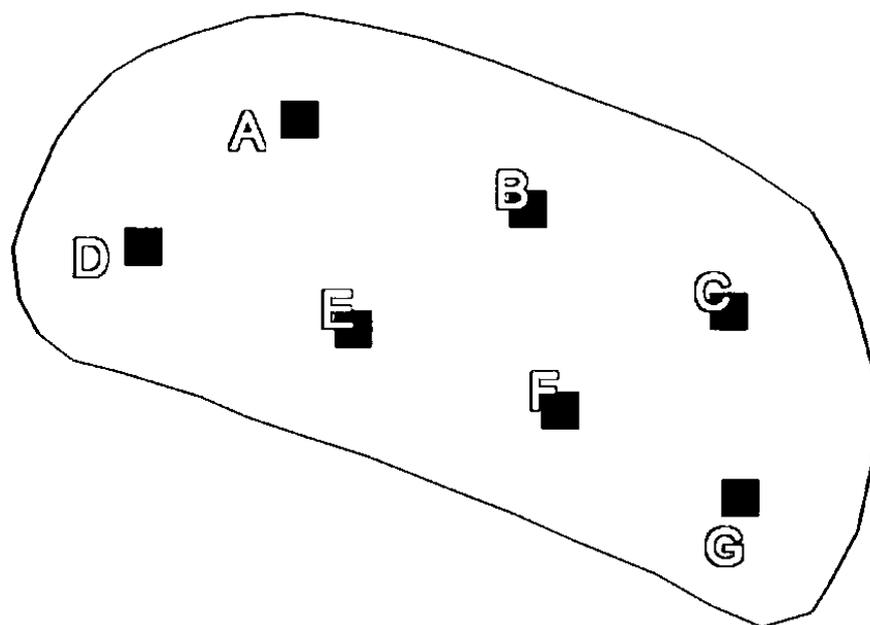
### 3.5.3 Excavaciones y muestreo de residuos

De acuerdo a lo descrito en secciones precedentes, no existe un consenso entre autores respecto al número mínimo de muestras por área superficial, ni al diseño de las redes de muestreo en el marco de proyectos de LFM. No obstante, para fines de la presente

investigación, se tomó como referencia la metodología empleada por Esakku et al. (2003) en su estudio realizado en el relleno sanitario de Perungudi ubicado en la ciudad de Chennai, estado de Tamil Nadu, India. En ese sentido, se empleó un patrón de muestreo con distribución uniforme basado en rejillas triangulares, con 7 puntos de monitoreo (A - G) ubicados en las esquinas de triángulos equiláteros de aproximadamente 30 metros bosquejados sobre el área superficial de la celda seleccionada (ver Figura 22).

### Figura 22

*Distribución de puntos de monitoreo en el área de estudio*



*Nota.* La geometría del área de estudio se expone de manera referencial.

Cabe mencionar que, la elección de un patrón de muestreo regular se basó en la premisa que, este tipo de métodos reducen la variabilidad de las muestras debido a que su levantamiento sigue un patrón geométrico específico (retícula), tomando las muestras a intervalos regulares y cubriendo de forma uniforme el sitio a muestrear (MINAM, 2014).

La toma de muestras fue realizada mediante excavaciones ejecutadas en noviembre de 2019. Al respecto, se prefirió el método de excavación frente otras técnicas

de muestreo ya que esta conserva mejor las propiedades de las muestras. De hecho, técnicas como la perforación pueden reducir el tamaño de las partículas de los objetos más gruesos (Kaartinen et al., 2013). Para el procedimiento de muestreo, se empleó una retroexcavadora con la finalidad de coleccionar muestras representativas de residuos a 3 - 4 metros de profundidad, excavando zanjas de aproximadamente 1 x 1 m<sup>2</sup> de superficie (ver Figura 23). En cada punto de monitoreo, la capa de arcilla compactada fue removida y su espesor fue medido con una cinta métrica (ver Figura 24), para luego extraer muestras de 1 m<sup>3</sup> de residuos en el intervalo de profundidad establecido. Cabe precisar que, la dimensión y la profundidad de las zanjas fueron determinadas en base al ancho total del cucharón y a la máxima profundidad alcanzable por el brazo extensor de la retroexcavadora. En el Anexo 1 se presentan los registros operativos de excavación.

### **Figura 23**

*Excavación de zanjas con retroexcavadora*



*Nota.* La fotografía muestra el brazo extensor de la retroexcavadora.

## Figura 24

### *Medición de profundidad de capa de arcilla*



*Nota.* La capa de arcilla se extendía hasta identificar un color 'negruzco', típico de residuos en descomposición.

### **3.5.4 Transporte y pesaje de muestras**

Una vez colectadas las muestras de residuos, estas fueron cargadas a camiones volquete para luego ser transportadas a la plataforma de acondicionamiento y clasificación, y ser tendidas sobre mantas plásticas de polipropileno (ver Figura 25). Es importante añadir que, para conocer el peso individual de cada muestra de residuos y calcular la densidad estabilizada, los camiones volquete fueron pesados, con y sin carga, en balanzas analíticas electrónicas, con un alcance de medición de 0 a 80000 kg.

## Figura 25

### *Descarga de muestras de residuos en plataforma de acondicionamiento*



*Nota.* Se optó por el uso de mantas de polipropileno para evitar contaminación cruzada en las muestras.

### 3.5.5 Acondicionamiento de muestras

#### 3.5.5.1 Etapa de secado

Dado el contenido moderado de humedad y la consistencia cohesiva de los residuos (identificada visualmente), las muestras fueron inicialmente secadas al aire libre durante 10 - 11 días calendario, similar a los trabajos realizados por Somani et al. (2018). Este periodo de tiempo se seleccionó con la finalidad de reducir el contenido de humedad en las muestras de residuos aprovechando las condiciones meteorológicas y la autogeneración de calor térmico en el material orgánico presente en las muestras debido a la acción microbiana, típica de un proceso de biosecado. En efecto, estudios anteriores demostraron que el primer ciclo y el pico máximo de temperatura durante un proceso de biosecado se alcanzaban en los primeros 12 días (Tom et al., 2016). Para garantizar las condiciones aeróbicas, las muestras de residuos fueron volteadas continuamente por un cargador frontal marca. La Tabla 8 muestra los valores máximos, mínimos y promedios de la temperatura ambiental, precipitación total, humedad relativa y velocidad del viento durante la fase de secado.

**Tabla 8**

*Condiciones meteorológicas durante la fase de secado*

Medida estadística	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Humedad relativa (%)	Velocidad de viento (m/s)
Promedio	20.5	0.0	77	1.8
Máximo	26.7	0.0	98	5.5
Mínimo	16.3	0.0	48	0.0

*Nota.* Adaptado de *Descarga de datos Meteorológicos a nivel nacional*, por SENAMHI, 2019 (<https://bit.ly/3Wx14Me>)

#### 3.5.5.2 Reducción de tamaño

Debido a su gran volumen (1 m<sup>3</sup>), las siete muestras de residuos se sometieron a operaciones de cuarteo para reducir su tamaño y facilitar su manipulación, manteniendo

siempre su representatividad. Estas operaciones se realizaron por medios mecánicos con el uso de un cargador frontal y lampa (ver Figura 26) hasta alcanzar tamaños manejables, de acuerdo a lo descrito en la Guía para la caracterización de residuos municipales publicada por el Ministerio del Ambiente. Las muestras reducidas fueron pesadas en una balanza digital colgante marca CRANE SCALE de 300 kg de máxima capacidad, dando como valor promedio 123 kg. Posteriormente, fueron caracterizadas y analizadas.

### Figura 26

*Reducción de tamaño (cuarteo) de las muestras de residuos*



*Nota.* En primera instancia, se empleaba el cargador frontal dado el gran volumen y peso de las muestras. El cuarteo manual (uso de pala) era aplicado posteriormente a este paso.

#### 3.5.5.3 Determinación de la composición de residuos

Para determinar la composición de los residuos excavados, las muestras secadas y de tamaño reducido fueron sometidas a diversas operaciones de clasificación y separación, tomando como base referencial las siguientes fracciones de residuos: plásticos, metales, madera, caucho, vidrios y cerámicos, papel y cartón, textiles, pañales,

materia orgánica, policloruro de vinilo (PVC), tecnopor o poliestireno expandido, rocas, fracción fina, y otros no visualmente identificables.

En primer lugar, para la separación de la fracción fina, las muestras de residuos se sometieron a operaciones de tamizaje manual con una malla de 6.3 mm de diámetro de apertura (ver Figura 27). En ese sentido, la fracción de cada muestra que logró pasar esta malla se reconoció directamente como "fracción fina" (material "similar a suelo" o "tipo suelo"). Al respecto, es necesario precisar que, el  $\varnothing$  6.3 mm para la fracción fina fue considerado tomando como base la metodología empleada por Jain et al. (2005) en su estudio realizado en el relleno sanitario del suroeste del condado de Alachua, estado de Florida, Estados Unidos. Asimismo, autores como Reinhart & Townsend (1997) reportaron también el uso de este diámetro de partícula en diferentes proyectos de LFM.

### **Figura 27**

*Tamizaje manual de residuos para separación de fracción fina*



*Nota.* La figura muestra la malla de tamizaje (izquierda) y el tamizaje manual (derecha).

Finalmente, se debe considerar también, que este tamaño de partícula es equivalente a valores límite superiores para la clasificación de tipo 'grava fina' en diversas normas de clasificación de suelos tales como el estándar BS 1377, el 'Soil Survey Manual' del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), y la norma ISO 14688 (Blott & Pye, 2012).

Luego, la fracción de cada muestra que quedó retenida sobre la malla de  $\varnothing$  6.3 mm fue separada y clasificada manualmente en las siguientes subcategorías: plásticos, metales, madera, caucho, vidrios y cerámicos, papel y cartón, textiles, pañales, materia orgánica, otros (constituido básicamente por PVC y tecnopor), rocas, fracción fina, y residuales (denominado también como 'fracción intermedia', la cual estuvo compuesta por restos de residuos que no se pudieron clasificar mediante inspección visual; y que, en su mayoría, tuvieron un tamaño de partícula  $6.3 \text{ mm} < \varnothing < 20 \text{ mm}$ ). Posteriormente, se pasó un separador magnético de neodimio por las fracciones clasificadas con la finalidad de eliminar impurezas metálicas ferrosas no identificables visualmente (ver Figura 28).

### **Figura 28**

*Separación de componentes metálicos con imán de neodimio*



*Nota.* El imán de neodimio se aplicó posterior a la aplicación inicial de un imán de ferrita.

Finalmente, las fracciones obtenidas fueron almacenadas y etiquetadas en sacos de polipropileno, y sus pesos dentro de las muestras de residuos se determinaron pesándolas en una balanza digital colgante marca CRANE SCALE de 300 kg de máxima capacidad (ver Figura 29). En la Figura 30 se presentan ejemplos de las fracciones de residuos encontradas durante los procesos de clasificación y separación.

### **Figura 29**

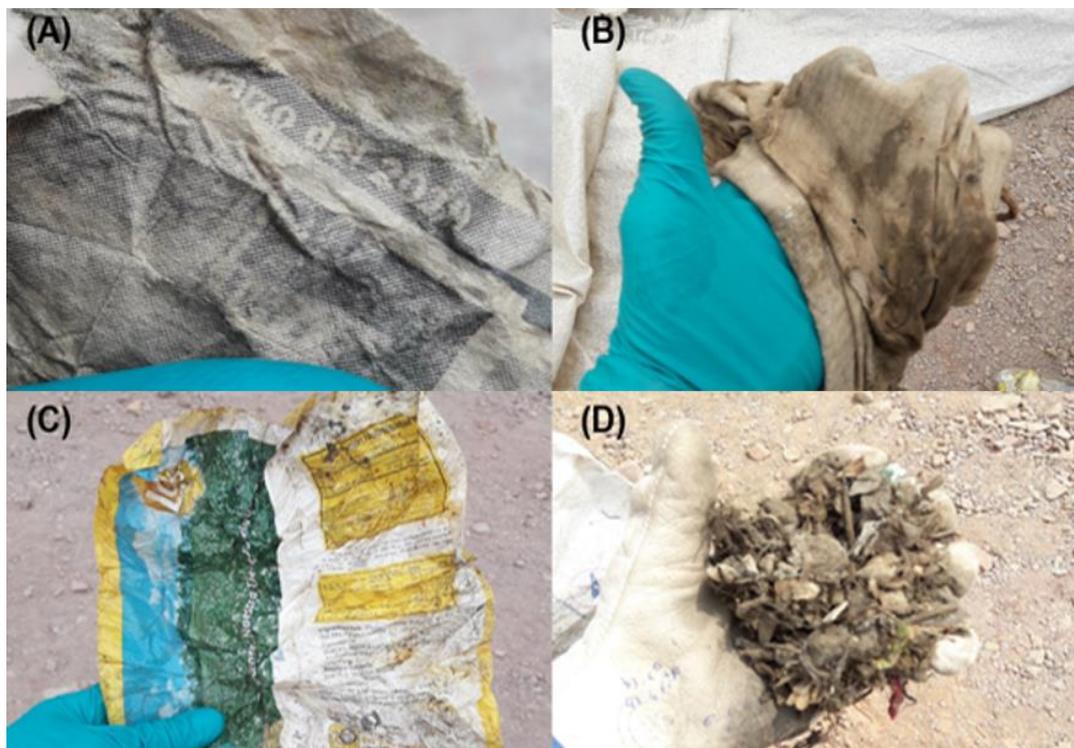
*Pesaje individual de fracciones de residuos*



*Nota.* Fotografía de pesaje de residuos plásticos del punto D.

## Figura 30

*Fracciones de residuos observadas durante la caracterización*



*Nota.* (A) Residuos de papel periódico, en el cual la fecha confirma la antigüedad del área de estudio. (B) Residuos textiles. (C) Residuos plásticos. (D) Fracción residual.

### 3.5.6 Caracterización fisicoquímica de fracciones de interés

#### 3.5.6.1 Fracción combustible

Para la fracción combustible, se consideraron las siguientes subfracciones de residuos: plásticos, madera, papel y cartón, caucho, textiles, pañales y materia orgánica. Posterior a la determinación de composición, estas subfracciones fueron nuevamente agrupadas y homogeneizadas para cada punto de monitoreo, para su posterior análisis, previa reducción de tamaño para facilitar su manipulación.

### **3.5.6.1.1 Reducción de tamaño**

Para facilitar la manipulación de las muestras, y considerando que, los análisis de laboratorio requieren tamaños de partícula reducidos, las muestras combustibles fueron sometidas a procesos de reducción de tamaño mediante las siguientes técnicas:

- Trituración mecánica: el material de interés fue introducido en un molino eléctrico. Esta técnica fue utilizada mayormente en fracciones de residuos resistentes como los residuos madera y plástico duro.
- Corte manual: el material de interés fue cortado con tijeras. Esta técnica fue utilizada en fracciones de residuos de textura suave como los residuos textiles, plásticos, entre otros.

Respecto a la determinación del tamaño final de partícula, se utilizó la metodología descrita por Garcés (2014), en la cual se clasificaron las partículas en unidimensionales (fibras, hilo, mechas, entre otros), bidimensionales (plásticos, papel, cartón, entre otros), y tridimensionales (retazos de madera, entre otros), en base a su tamaño y características. Para el caso de las partículas unidimensionales, su parámetro de medida fue la longitud de estas. No obstante, para las partículas bidimensionales y tridimensionales, se calculó el área o volumen de las partículas; y, finalmente, el diámetro equivalente del círculo o esfera de misma área y volumen previamente calculados, respectivamente.

Cabe mencionar que, estas mediciones se realizaron sobre papel cuadriculado. Las ecuaciones empleadas para el cálculo del diámetro equivalente de partícula se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9****Cálculo del diámetro equivalente de partícula**

Propiedad	Partículas bidimensionales	Partículas tridimensionales
Área/volumen de partícula	$A = \text{largo} \cdot \text{ancho}$	$V = \text{largo} \cdot \text{ancho} \cdot \text{alto}$
Diámetro círculo/esfera equivalente	$d_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$	$d_{eq} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$

Nota. De *Análisis del aprovechamiento de diferentes fracciones de residuos generados en Asturias como CSR* [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Oviedo], de Garcés, 2014, p. 34 (<http://hdl.handle.net/10651/27993>)

Una vez reducido el tamaño de las fracciones de residuos, se procedió a homogeneizarlas para luego tomar porciones representativas de cada punto para su posterior envío a laboratorio y análisis respectivo (ver Figura 31).

**Figura 31**

*Muestras de fracción combustible enviadas a laboratorio para análisis*



Nota. La figura muestra las muestras de fracción combustible de los puntos B y D.

**3.5.6.1.2 Determinación del contenido de humedad**

Para la determinación del contenido de humedad, muestras representativas de fracción combustible (mínimo 20 g) fueron enviadas, en bolsas plásticas de cierre hermético y al interior de coolers con agentes refrigerantes, a las instalaciones del

Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). El método de ensayo empleado fue la norma ASTM D7582 Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. Dicho esto, las muestras fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C. Luego, por diferencia aritmética entre los pesos inicial y final, se obtuvo el valor del contenido de humedad.

#### **3.5.6.1.3 Determinación del Poder Calorífico Inferior (PCI)**

Para la determinación del PCI (en unidades de MJ/kg), muestras de fracción combustible (mínimo 20 g) fueron enviadas, en bolsas plásticas de cierre hermético y al interior de coolers con agentes refrigerantes, a las instalaciones del Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). El método de ensayo empleado fue la norma ASTM D5865 - 13 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, la cual se basa en el principio de adiabaticidad. Previo al análisis, las muestras fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C dado que el ensayo debía ser realizado en base seca. Posteriormente, cantidades reducidas de muestra combustible de aproximadamente 0.2 g ~ 0.5 g fueron pelletizadas (ver Figura 32) para luego ser colocadas en un crisol de combustión.

Acto seguido, se introdujo un hilo de algodón y aceite mineral al crisol como agentes facilitadores de combustión, para luego ensamblar este conjunto a la bomba calorimétrica y presurizarlo con oxígeno a 450 psi (31 bar) al 99.5 % de pureza (ver Figura 33). La estructura armada fue luego introducida al equipo calorímetro semiautomático marca LECO modelo AC600.

**Figura 32**

*Pelletización de fracción combustible y pesaje en crisol de combustión*



*Nota.* Fotografía tomada en las instalaciones de LER-UNALM.

**Figura 33**

*Ensamblaje y presurización de bomba calorimétrica*



*Nota.* Fotografía tomada en las instalaciones de LER-UNALM.

En dicho equipo, la bomba calorimétrica ensamblada descendió a un baño de agua a 25 °C como temperatura inicial en un entorno conocido como cubeta. Esta cubeta fue sellada con una vejiga inflable formando una cavidad denominada cubierta la cual fue también llenada con agua, permitiendo alcanzar condiciones adiabáticas. La ignición se dio por aproximadamente 5 minutos, en los cuales se recogieron medidas periódicas de la

temperatura del agua tanto al interior de la cubeta como de la cubierta. Mediante la diferencia de temperaturas, añadido a algunas correcciones de las capacidades térmicas de los componentes del sistema, el equipo LECO AC600 determinó el Poder Calorífico Superior (PCS) de la muestra. Finalmente, el PCI se calculó a partir del PCS multiplicándolo por un factor de corrección dependiente de la humedad de la muestra.

#### **3.5.6.1.4 Determinación del contenido de cloro (Cl)**

Para la determinación del contenido de cloro, se siguió la metodología de la norma EN 15408 Solid recovered fuels. Methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content, la cual se basa en la oxidación por combustión de las muestras en una bomba calorimétrica presurizada con oxígeno. Durante esta combustión, los compuestos halogenados; en este caso, compuestos halogenados de cloro, son convertidos a cloruros, los cuales son luego absorbidos en una solución absorbente (agua o KOH), para finalmente ser analizados por cromatografía iónica.

En ese sentido, el procedimiento a seguir fue similar al empleado para la determinación del PCI. Para tal fin, muestras representativas de fracción combustible (mínimo 20 g) fueron enviadas, en bolsas plásticas de cierre hermético y al interior de coolers con agentes refrigerantes, a las instalaciones del Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Previo al análisis, las muestras fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C dado que el ensayo debía ser realizado en base seca. De estas muestras, porciones de aproximadamente 0.2 g - 0.5 g (pesos determinados por especificaciones técnicas del equipo) fueron pelletizadas para ser luego introducidas a la bomba calorimétrica, presurizadas con oxígeno a 30 bar, e introducidas al equipo calorímetro semiautomático marca LECO modelo AC600 siguiendo el procedimiento mencionado en el ítem anterior.

Adicionalmente, para cada ensayo, se introdujo 10 mL de agua destilada en la bomba calorimétrica, con la finalidad de servir como líquido absorbente para la captación de los cloruros liberados durante el proceso de combustión. Cabe mencionar que, según la norma EN 15408, el agua destilada puede ser usada como agente absorbente cuando las concentraciones de cloro en las muestras son menores al 1 %.

Finalizada la combustión, la bomba calorimétrica fue dejada en reposo en forma vertical durante aproximadamente 10 minutos permitiendo que los gases liberados desciendan, colectando finalmente la solución en botellas de polietileno enrasando hasta 60 mL con agua destilada (ver Figura 34). Las muestras líquidas, contenidas en botellas de polietileno de 60 mL, fueron enviadas en coolers con agentes refrigerantes a las instalaciones del laboratorio ALS LS PERU S.A.C., en el cual se determinó finalmente la concentración de cloruros por cromatografía iónica, usando como referencia el método EPA 300.0 Determination of inorganic anions by ion chromatography. Adicionalmente, se registró la concentración de cloruros en el agua destilada, con la finalidad de desestimar este valor en el cálculo final.

### Figura 34

*Adición de agua destilada y recolección de solución postcombustión*



*Nota.* Fotografía tomada en las instalaciones de LER-UNALM.

### **3.5.6.1.5 Determinación del contenido de flúor (F), bromo (Br) y azufre (S)**

Para la determinación de estos parámetros, se siguió la misma metodología que la empleada para el cloro, es decir, la norma EN 15408 Solid recovered fuels. Methods for the determination of sulphur (S), chlorine (Cl), fluorine (F) and bromine (Br) content. Para este caso, la oxidación por combustión de las muestras permite que los compuestos halogenados y los compuestos de azufre se conviertan a fluoruros, bromuros y sulfatos.

### **3.5.6.1.6 Determinación del contenido de mercurio**

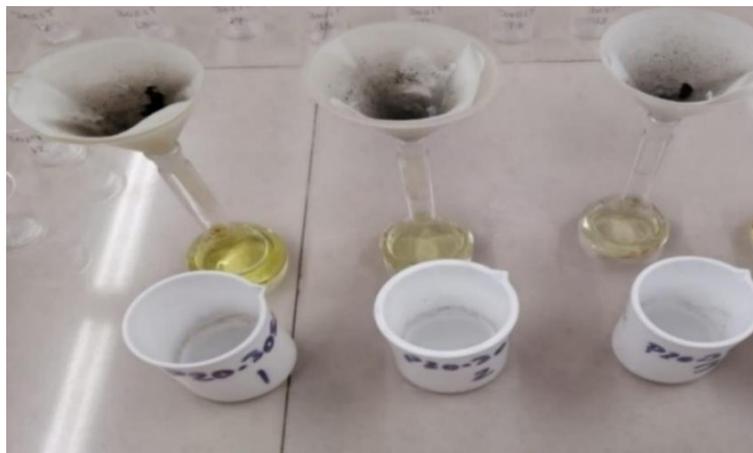
Para la determinación del contenido de mercurio, muestras representativas de fracción combustible (mínimo 200 g) fueron enviadas, en bolsas plásticas de cierre hermético y al interior de coolers con agentes refrigerantes, a las instalaciones del laboratorio CERTIMIN S.A. La norma de referencia empleada fue el método EPA 7471 B. Rev. 2. 2007. Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold Vapor Technique).

### **3.5.6.1.7 Determinación del contenido de otros metales**

Para la determinación del contenido de metales totales, muestras representativas de fracción combustible (mínimo 200 g) fueron enviadas, en bolsas plásticas de cierre hermético y al interior de coolers con agentes refrigerantes, a las instalaciones del laboratorio CERTIMIN S.A. Las normas de referencia empleadas fueron el método EPA 3050B Rev.2.1996 Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, el método EPA 6010D Rev.5. 2018 Inductively Coupled Plasma-Optical, y el método EPA 6020 B Rev.2. 2014 Emission Spectrometry/Inductively coupled Plasma-Mass Spectrometry. Para el desarrollo de esta metodología, las muestras preparadas fueron previamente digeridas con ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), para luego ser filtradas con filtros Whatman No. 41 y ser enviadas a su posterior análisis (ver Figura 35). La determinación final de metales se ejecutó utilizando espectrofotómetros de emisión atómica ICP/OES marca VARIAN modelo IP1204M102 y ICP/MS marca AGILENT modelo JP12051531 (ver Figura 36).

### Figura 35

*Digestión y filtrado de muestras para análisis de metales*



*Nota.* Fotografía tomada en las instalaciones del laboratorio CERTIMIN.

### Figura 36

*Espectrofotómetros de emisión atómica ICP/OES y ICP/MS*



*Nota.* Fotografía tomada en las instalaciones del laboratorio CERTIMIN.

#### 3.5.6.2 Fracción fina (< 6.3 mm)

Para su caracterización fisicoquímica, porciones representativas (1 kg aproximadamente) de estas fracciones fueron enviadas a las instalaciones del Laboratorio de Análisis de Suelos Plantas Aguas Fertilizantes (LASPAF) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y del laboratorio CERTIMIN S.A. (solo para el caso de metales

totales). Al respecto, las muestras fueron enviadas en bolsas plásticas de cierre hermético y al interior de coolers con agentes refrigerantes (ver Figura 37).

### **Figura 37**

*Muestras de fracción fina enviadas a laboratorio para análisis*



*Nota.* Se empleó más de una bolsa hermética para alcanzar el tamaño mínimo de muestra.

#### **3.5.6.2.1 Determinación de la densidad aparente**

Para calcular la densidad aparente de la fracción fina, las muestras fueron secadas previamente en estufa durante 24 horas a 105 °C para obtener el peso de suelo seco. Acto seguido, este peso fue dividido entre el volumen real del suelo, obteniendo finalmente el valor de la densidad aparente.

#### **3.5.6.2.2 Determinación de pH**

El pH de las muestras de fracción fina fue determinado empleando un potenciómetro sobre la suspensión obtenida al diluir los finos en agua destilada en proporción 1:1.

### **3.5.6.2.3 Determinación de la conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica de las muestras de fracción fina fue determinada mediante el uso de un electrodo sobre el extracto acuoso obtenido al diluir los finos en agua destilada en proporción 1:1.

### **3.5.6.2.4 Determinación del contenido de carbono orgánico**

Para esta determinación se empleó el método de Walkley y Black, el cual se basa en la oxidación del sustrato con una solución de dicromato de potasio. Acto seguido, se determina mediante valoración por retroceso la cantidad de dicromato no reducido por la materia orgánica con una solución de sulfato ferroso y usando difenilamina como indicador (García & Ballesteros, 2005).

### **3.5.6.2.5 Determinación de la clase textural**

La clase textural fue determinada mediante el método de Bouyoucos o del hidrómetro. Este método, basado en la Ley de Stokes, consistió en dejar sedimentar la muestra de finos en un medio líquido; para que, basado en la velocidad diferencial de sedimentación de las partículas y con el uso de un densímetro, pueda medirse los porcentajes de arena, limo, y arcilla. Estos porcentajes fueron finalmente contrastados en el Triángulo Textural establecido en el 'Soil Survey Manual' del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), determinando finalmente la clase textural de la muestra (ver Figura 38).

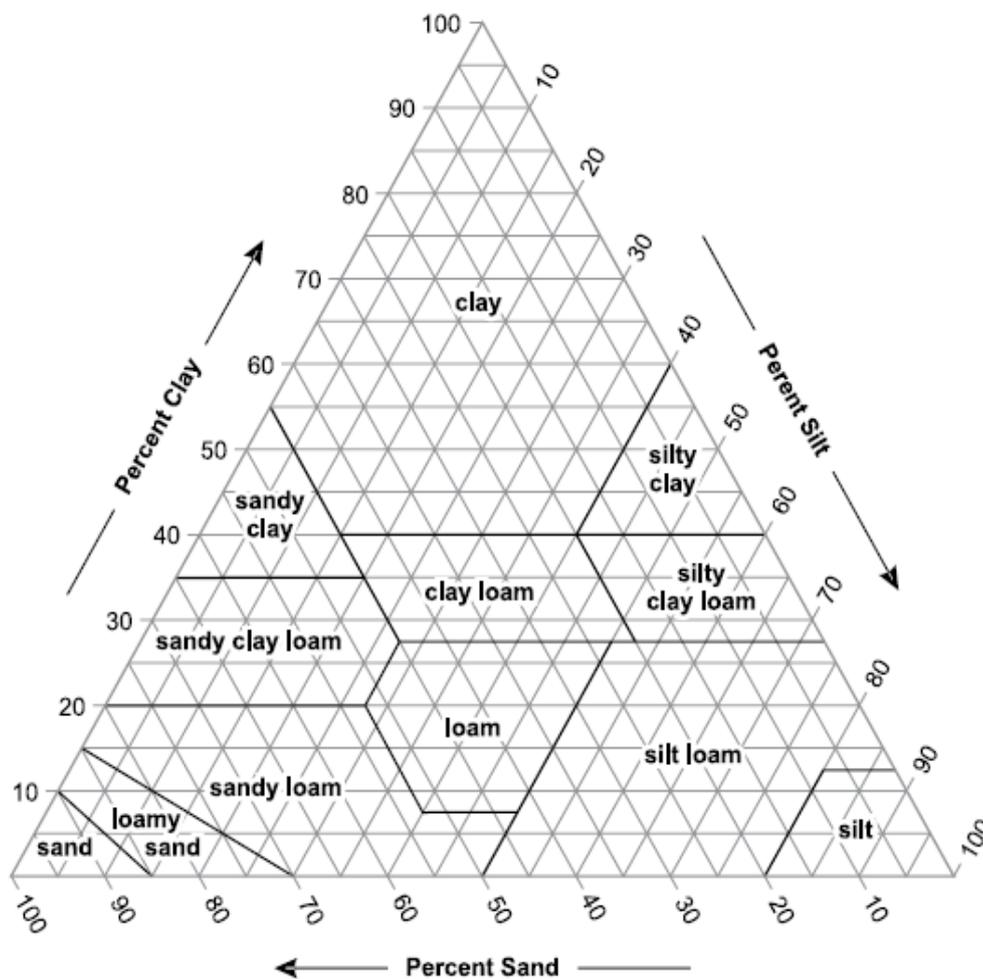
### **3.5.6.2.6 Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)**

La determinación de la CIC se realizó empleando el método de saturación con acetato de amonio ( $\text{CH}_3\text{-COONH}_4$ ) a pH 7, el cual consistió en hacer pasar una solución de esta sustancia en concentración 1 N a través de la muestra de fracción fina. Para el

caso de los cationes cambiables  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ , el método también fue el reemplazamiento con acetato de amonio a pH 7 y posterior cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica. Por otro lado, para los cationes cambiables  $\text{Al}^{+3}$  +  $\text{H}^{+}$ , se empleó el método de Yuan con cloruro de potasio (KCl) como solución extractora; y, de igual manera, posterior cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica.

**Figura 38**

*Triángulo textural de la USDA mostrando las 12 clases texturales*



Nota. De *Soil Survey Manual* (p. 125), por USDA, 1993 (<https://bit.ly/3XTqRPv>)

### 3.5.6.2.7 Determinación del contenido de metales

Las normas de referencia empleadas para la determinación de metales totales fueron el método EPA 3051A Microwave assisted acid digestion of Sediments, Sludges,

and Soils, y el método EPA 6020A. Revision1. 2007. Inductively coupled plasma-mass Spectrometry. De igual manera que para la determinación de metales en la fracción combustible, se siguió un procedimiento de digestión con ácido nítrico (en este caso particular, asistido por microondas), seguido de un filtrado con filtros Whatman No. 41 y posterior análisis de metales por espectrometría de masas.

#### **3.5.6.2.8 Determinación del contenido de potasio y fósforo disponible**

Para este caso particular, la concentración de potasio disponible se determinó mediante el método de extracción con acetato de amonio ( $\text{CH}_3\text{-COONH}_4$ ) 1 N a pH 7. Por otro lado, para la determinación del contenido de fósforo disponible, se empleó el método de Olsen modificado, mediante la extracción con bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ) 0.5 M a pH 8.5.

#### **3.5.6.2.9 Determinación del contenido de nitrógeno total**

El contenido de nitrógeno total fue determinado empleando el Método de Kjeldahl. Este método emplea una digestión ácida (con ácido sulfúrico y catalizadores) a altas temperaturas formando sulfato de amonio; el cual, en exceso de hidróxido de sodio, genera amoniaco. El amoniaco es luego destilado y titulado para determinar el contenido de nitrógeno en la muestra a estudiar (Gregorio et al., 2016).

#### **3.5.6.2.10 Determinación de la relación carbono – nitrógeno (C/N)**

Se obtiene dividiendo el contenido de carbono (C) entre el contenido de nitrógeno total (N). Constituye un índice de alta importancia para la determinación de la aptitud de un sustrato como abono orgánico; pues, en cantidades óptimas, favorece el proceso de oxidación biológica realizado por los microorganismos (O’Ryan & Riffo, 2007). Durante un proceso típico de compostaje, este índice varía de 35:1 a 15:1 (FAO, 2013).

### 3.5.7 Cálculo y procesamiento de datos

#### 3.5.7.1 Cálculo de la composición de residuos

De acuerdo a lo mencionado en secciones anteriores, las fracciones obtenidas durante el proceso de caracterización de residuos fueron almacenadas y etiquetadas en sacos de polipropileno, y pesadas en una balanza digital colgante marca CRANE SCALE de 300 kg de máxima capacidad. Luego, para determinar la composición de residuos en cada muestra, se empleó la ecuación 1, la cual permite determinar la cantidad porcentual de cada fracción de residuos presentes en la muestra ( $Qty$ ), obtenida mediante la división de su peso individual entre el peso total de la muestra, expresado en términos de porcentaje:

$$Qty = \frac{\text{peso de fracción (kg)}}{\text{peso total de la muestra (kg)}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Para fines de la presente ecuación, la fracción de residuos hace referencia a la fracción de plásticos, metales, madera, caucho, vidrios y cerámicos, papel y cartón, textiles, pañales, materia orgánica, PVC y tecnopor, rocas, residuales, fracción fina (< 6.3 mm), y fracción combustible. Al respecto, la cantidad de fracción combustible se determinó mediante la sumatoria individual de las cantidades de plásticos, madera, papel y cartón, caucho, textiles, pañales y materia orgánica.

Cabe mencionar que, los resultados obtenidos mediante la ecuación 1 representan la cantidad porcentual de cada fracción en la muestra de residuos. Para determinar la composición de residuos en toda el área de estudio, primero se deberá verificar el tipo de distribución que siguen los datos, con la finalidad de conocer la medida estadística adecuada para su representación. En ese sentido, se empleó la prueba estadística de Shapiro-Wilk con el uso del software estadístico SPSS. Esta prueba se utiliza para contrastar normalidad cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 observaciones; y, en

muestras grandes, es equivalente al test de Kolmogórov-Smirnov (Flores & Flores, 2021). Una vez confirmada la distribución normal, la composición de residuos en el área de estudio se expresó tomando la media aritmética de las cantidades porcentuales de cada fracción, según la ecuación 2:

$$X = \overline{Qty} \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Donde:

$\overline{Qty}$  es la media aritmética de la cantidad de cada fracción de residuos

t valor de t en la distribución de T Student (para número de muestras < 30)

s es la desviación estándar de la cantidad de cada fracción de residuos

n es el número de muestras, equivalente al número de puntos de monitoreo

### 3.5.7.2 Cálculo del contenido de cloro (Cl), flúor (F), bromo (Br) y azufre (S)

Este cálculo se empleó solo en la fracción combustible. Tal cual se mencionó en las secciones 'Determinación del contenido de cloro' y 'Determinación del contenido de flúor (F), bromo (Br) y azufre (S)', el análisis de ensayo permitió la determinación del contenido de cloruros (Cl<sup>-</sup>), fluoruros (F<sup>-</sup>), bromuros (Br<sup>-</sup>), y sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) en la solución absorbente (agua destilada). No obstante, las normas de combustibles alternativos exigen conocer el contenido total de estos parámetros (expresado en porcentaje másico en base seca) en las muestras de residuos en las formas de cloro (Cl), flúor (F), bromo (Br) y azufre (S). Para tal fin, se registró también la concentración de Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en el agua destilada empleada, con la finalidad de desestimar este valor en el cálculo final de estos parámetros, según la ecuación 3, establecida en la norma EN 15408:

$$w = \frac{(c-c_0) \cdot V}{m} \cdot 100 \% \quad (3)$$

Donde:

w contenido total de cloro, flúor o bromo en base seca (%)

c es la concentración de Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup> o Br<sup>-</sup> en la solución (mg/L)

c<sub>0</sub> es la concentración de Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup> o Br<sup>-</sup> en el agente absorbente (mg/L)

V es el volumen de la solución (L)

m es la masa de la muestra de residuos usada durante el análisis (mg)

Por otro lado, para el cálculo de la concentración de azufre (S) se empleó la ecuación 4; la cual, en esencia, es similar a la ecuación 2, con la diferencia que se agrega un factor de corrección de 0.3338, que representa el radio estequiométrico de las masas relativas de azufre y sulfatos:

$$w = \frac{(c-c_0) \cdot 0.3338 \cdot V}{m} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Donde:

w contenido total de azufre en base seca (%)

c es la concentración de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en la solución (mg/L)

c<sub>0</sub> es la concentración de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en el agente absorbente (mg/L)

V es el volumen de la solución (L)

m es la masa de la muestra de residuos usada durante el análisis (mg)

### 3.5.7.3 Cálculo del contenido de mercurio y otros metales en relación al PCI

Este cálculo se empleó solo en la fracción combustible. Tal cual se mencionó en las secciones 'Determinación del contenido de mercurio' y 'Determinación del contenido de otros metales', los métodos de referencia permitieron determinar el contenido de mercurio y otros metales en las muestras de residuos expresado en mg/kg. No obstante, algunas normas para uso de combustibles alternativos incluyen al mercurio y otros metales en unidades de mg/MJ. Para obtener dicha magnitud, se empleó la ecuación 5.

$$\text{Contenido de metal en relación al PCI } \left(\frac{\text{mg}}{\text{MJ}}\right) = \frac{\text{Contenido de metal } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right)}{\text{PCI de la muestra } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)} \quad (5)$$

### 3.5.7.4 Contenido de materia orgánica (M.O.) en fracción fina

Este cálculo se empleó solo en la fracción fina (< 6.3 mm). Tal cual se mencionó en la sección 'Determinación del contenido de carbono orgánico', el método de Walkley y Black permitió determinar el contenido de carbono orgánico en la fracción fina. Para el cálculo específico de la materia orgánica, se usó la ecuación 6:

$$M.O = C \cdot 1724 \quad (6)$$

Donde:

M.O. es el contenido de materia orgánica en la muestra de finos (%)

C es contenido de carbono orgánico en la muestra de finos (%)

### **3.5.7.5 Evaluación de uso potencial de fracciones**

#### **3.5.7.5.1 Evaluación del uso potencial de la fracción combustible**

Para la evaluación del uso potencial de la fracción combustible, se determinó, en primera instancia, su aceptación como CSR y código de clase según el estándar europeo EN 15359, para luego evaluar su adecuación a otras normas internacionales referentes al uso de combustibles alternativos.

##### **3.5.7.5.1.1 Determinación del código de clase según estándar europeo EN 15359**

Primeramente, para evaluar la aceptación de la fracción combustible como CSR, se tomó como base las propiedades fisicoquímicas establecidas en el estándar europeo EN 15359, las cuales se detallaron previamente en la sección 'Clasificación de los CSR', y corresponden a:

- Media aritmética para el Poder Calorífico Inferior (PCI) (MJ/kg)
- Media aritmética para el contenido de cloro (Cl) en base seca (%)
- Mediana y Percentil 80 para el contenido de mercurio en relación al PCI (mg/MJ)

Ahora bien, el estándar EN 15359 recomienda que, para el cálculo de estos estadísticos descriptivos, se realice muestreos durante un periodo temporal de producción de CSR de 12 meses. No obstante, dada la naturaleza preliminar de la presente investigación, y considerando que, no se tiene instalada una planta de producción de CSR como tal, se realizó solo una campaña de muestreo. Por tal motivo, para la comparación de las propiedades fisicoquímicas establecidas en la norma, se comparó cada muestra de fracción combustible de manera individual.

Para la aceptación y clasificación de la fracción combustible como CSR, una vez medido el PCI, contenido de cloro, y contenido de mercurio, si estos se enmarcan en alguna

de las clases especificadas en la norma europea EN 15359 (ver Tabla 4), se aceptará la clasificación de la fracción combustible como CSR según dicho estándar. De lo contrario, será denominado como CDR. Finalmente, para determinar el código de clase del CSR, se tomó como base las clases o intervalos a las cuales pertenecen las diferentes propiedades fisicoquímicas evaluadas para la fracción combustible en cada muestra, asignándole un código alfanumérico con una nomenclatura según la ecuación 7. Al respecto, cabe añadir que, los atributos o propiedades más ‘deseados’ para los CSR son siempre los correspondientes a la Clase 1, es decir, los códigos más bajos (WRAP, 2012).

$$\text{Código de clase del CSR} = PCI\ x ; Cl\ y ; Hg\ z \quad (7)$$

Donde:

x, y, z            valores del 1 al 5, correspondientes a las clases según la EN 15359

Finalmente, para definir el hipotético CSR producido a partir de la fracción combustible presente en los residuos enterrados en el relleno sanitario, se tomó el código de clase más ‘pesimista’; es decir, aquel con los números de clase más altos de entre las muestras.

#### **3.5.7.5.1.2 Compatibilidad con normas para uso de combustibles alternativos**

Para esta evaluación, se compararon las propiedades fisicoquímicas de la fracción combustible con los valores límite establecidos en normas internacionales para uso de combustibles sustitutos en instalaciones industriales. Entre estas normas, destacan los Criterios de EURITS para la Coincineración de Residuos en Hornos de Cemento, la Ordenanza de Incineración de Residuos, la norma RAL-GZ 724, y el Decreto Ministerial 22, las cuales se presentan en las Tablas 10, 11, 12, y 13, respectivamente.

**Tabla 10***Criterios de EURITS para la coincineración de residuos en hornos de cemento (EC, 2003)*

Parámetro	Unidad	Valor Límite
Poder calorífico	MJ/kg	> 15
Cl	%	0.5
S	%	0.4
Br	%	0.01
F	%	0.1
Be	mg/kg	1
Hg	mg/kg	2
As	mg/kg	10
Se	mg/kg	10
Cd	mg/kg	10
Sb	mg/kg	10
Mo	mg/kg	20
V	mg/kg	200
Cr	mg/kg	200
Co	mg/kg	200
Ni	mg/kg	200
Cu	mg/kg	200
Pb	mg/kg	200
Mn	mg/kg	200
Sn	mg/kg	200
Zn	mg/kg	500

Nota. Adaptado de *Refuse Derived Fuel, current practices and perspectives* (p. 19), por EC, 2003 (<https://bit.ly/3WMIXTD>)

**Tabla 11**

*Valores límite para coincineración de combustibles sustitutos producidos a partir de residuos según la Ordenanza de Incineración de Residuos (AVV) (BMLFUW, 2010)*

Parámetro	Valor Límite en plantas cementeras <sup>a</sup> (mg/MJ)		Valor Límite en centrales eléctricas <sup>b</sup> (mg/MJ)		Valor Límite en otras plantas de coincineración <sup>c</sup> (mg/MJ)	
	Mediana	Percentil 80	Mediana	Percentil 80	Mediana	Percentil 80
Sb	7	10	7	10	7	10
As	2	3	2	3	1	1.5
Pb	20	36	15	27	15	27
Cd	0.23	0.46	0.17	0.34	0.17	0.34
Cr	25	37	19	28	19	28
Co	1.5	2.7	0.9	1.6	0.9	1.6
Ni	10	18	7	12	7	12

Parámetro	Valor Límite en plantas cementeras <sup>a</sup> (mg/MJ)		Valor Límite en centrales eléctricas <sup>b</sup> (mg/MJ)		Valor Límite en otras plantas de coincineración <sup>c</sup> (mg/MJ)	
	Mediana	Percentil 80	Mediana	Percentil 80	Mediana	Percentil 80
Hg	0.075	0.15	0.075	0.15	0.075	0.15

*Nota.* <sup>a</sup> Los valores límite se aplican a las partes de las instalaciones de producción de cemento en las que se quema el clínker de cemento (horno rotatorio, el precalentador de ciclón o de parrilla y el calcinador). <sup>b</sup> Los valores límite se aplican a las calderas que utilizan hulla o lignito y que se utilizan para generar electricidad y calefacción urbana (TRF máximo de 15 %). <sup>c</sup> Los valores límite se aplican a las instalaciones de coincineración, a excepción de las plantas de producción de cemento y las centrales eléctricas.

**Tabla 12**

*Valores límite para coincineración de combustibles sólidos recuperados según la norma RAL-GZ 724 Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (RAL, 2012)*

Parámetro	Valor Límite (mg/MJ)	
	Mediana	Percentil 80
Cadmio (Cd)	0.25	0.56
Mercurio (Hg)	0.038	0.075
Talio (Tl)	0.063	0.13
Arsénico (As)	0.31	0.81
Cobalto (Co)	0.38	0.75
Níquel (Ni)	5.0	10
Antimonio (Sb)	3.1	7.5
Plomo (Pb)	12	25
Cromo (Cr)	7.8	16
Manganeso (Mn)	16	31
Vanadio (V)	0.63	1.6
Estaño (Sn)	1.9	4.4

*Nota.* Los valores límite aplican para el uso de combustibles en plantas de coincineración, como en plantas de cemento, o centrales térmicas de carbón. Aquellos CSR que cumplen estos valores límite, podrán ser además denominados como SBS®.

**Tabla 13**

*Valores límite para criterios de fin de residuos (End-of-Waste) para combustibles sólidos secundarios (CSS) según Decreto Ministerial Nro. 22 (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2013)*

Parámetro	Medida estadística	Valor Límite (mg/kg) <sup>a</sup>
Antimonio (Sb)	Mediana	50
Arsénico (As)	Mediana	5
Cadmio (Cd)	Mediana	4
Cromo (Cr)	Mediana	100

Parámetro	Medida estadística	Valor Límite (mg/kg) <sup>a</sup>
Cobalto (Co)	Mediana	18
Manganeso (Mn)	Mediana	250
Níquel (Ni)	Mediana	30
Plomo (Pb)	Mediana	240
Cobre (Cu)	Mediana	500
Talio (Tl)	Mediana	5
Vanadio (V)	Mediana	10

*Nota.* La presente norma busca dejar de clasificar a los CSS (equivalentes a los CSR, según el artículo 183 del Decreto Legislativo del 3 de abril de 2006) como residuos y clasificarlos como productos (o CSS combustible).

<sup>a</sup> Adicional al cumplimiento de los valores límite de esta tabla, solo los CSS con PCI y CI en las clases 1, 2, o 3, y Hg en las clases 1 y 2 (y combinaciones relacionadas) serán considerados CSS combustibles.

### 3.5.7.5.2 Evaluación del uso potencial de la fracción fina

Para esta evaluación, se compararon las diferentes propiedades fisicoquímicas de la fracción fina (< 6.3 mm) con los valores límite establecidos por diversas normas internacionales para el uso de material tipo suelo como compost o material de construcción (para subrasante o relleno). No obstante, previo a esta comparación, fue necesario determinar si la fracción fina o matriz tipo suelo se encontraba o no contaminada. Para tal fin, sus principales propiedades fueron comparadas con los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo (ECA-Suelo) aprobados por el Ministerio del Ambiente del Perú mediante Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM, así como con la calidad del suelo local circundante al área de estudio, tomando estos valores como la línea base referencial. Los ECA-Suelo se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14**

#### *Estándares nacionales de Calidad Ambiental para Suelo (ECA-Suelo)*

Parámetros	Valor Límite según Uso de Suelo		
	Agrícola <sup>a</sup>	Residencial / Parques <sup>b</sup>	Comercial <sup>c</sup> / Industrial / Extractivo <sup>d</sup>
Arsénico (As)	50	50	140
Bario (Ba)	750	500	2000
Cadmio (Cd)	1.4	10	22
Cromo (Cr)	N.A.	400	1000
Mercurio (Hg)	6.6	6.6	24

Parámetros	Valor Límite según Uso de Suelo		
	Agrícola <sup>a</sup>	Residencial / Parques <sup>b</sup>	Comercial <sup>c</sup> / Industrial / Extractivo <sup>d</sup>
Plomo (Pb)	70	140	800

*Nota.* Adaptado de *Decreto Supremo N° 011-2017 MINAM Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*, por Ministerio del Ambiente (MINAM), 2017. N.A.: No aplicable. <sup>a</sup> Suelo Agrícola: suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas. <sup>b</sup> Suelo Residencial/Parques: suelo ocupado por la población para construir sus viviendas, incluyendo áreas verdes y espacios destinados a actividades de recreación y de esparcimiento. <sup>c</sup> Suelo Comercial: suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla está relacionada con operaciones comerciales y de servicios. <sup>d</sup> Suelo Industrial/Extractivo: suelo en el cual la actividad principal que se desarrolla abarca la extracción y/o aprovechamiento de recursos naturales (actividades mineras, hidrocarburos, entre otros) y/o, la elaboración, transformación o construcción de bienes.

### 3.5.7.5.2.1 *Uso potencial como compost*

Para esta evaluación se compararon las diferentes propiedades fisicoquímicas de la fracción fina con los valores límite establecidos por diversas normas internacionales para producción de compost. Entre estas normas destacan la Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004, la Norma Mexicana Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006, la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018, y la Norma Técnica Colombiana NTC 5167, las cuales se presentan en las Tablas 15, 16, 17, y 18, respectivamente.

**Tabla 15**

*Requisitos del producto compostado según la Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004*

Parámetro	Unidad de medida	Valor Límite	
		Compost Clase A <sup>1</sup>	Compost Clase B <sup>2</sup>
Arsénico (As)	mg/kg	15	20
Cadmio (Cd)	mg/kg	2	8
Cobre (Cu)	mg/kg	100	1000
Cromo (Cr)	mg/kg	120	600
Mercurio (Hg)	mg/kg	1	4
Níquel (Ni)	mg/kg	20	80
Plomo (Pb)	mg/kg	100	300
Zinc (Zn)	mg/kg	200	2000
Nitrógeno Total (N)	%	≥ 0.5	

Parámetro	Unidad de medida	Valor Límite	
		Compost Clase A <sup>1</sup>	Compost Clase B <sup>2</sup>
Conductividad eléctrica (C.E.)	dS/m	3	8
Relación C/N	Ad.	25	30
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	5.0 - 8.5	
Materia orgánica (M.O.)	%	≥ 20	
Densidad aparente	g/cm <sup>3</sup>	0.7	
Tamaño de partícula	Mm	16	

*Nota.* Adaptado de *Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004 Compost - Clasificación y requisitos*, por Instituto Nacional de Normalización (INN), 2004. <sup>1</sup> Producto de alto nivel de calidad, no presenta restricciones de uso. <sup>2</sup> Producto de nivel intermedio de calidad, puede presentar algunas restricciones de uso si su C.E. es mayor a 3 dS/cm

**Tabla 16**

*Requisitos de los mejoradores de suelos según la Norma Mexicana Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006*

Parámetro	Unidad de medida	Valor Límite
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.5 - 8.0
Materia orgánica (M.O.)	%	> 15
Relación C/N	Ad.	12
Fósforo disponible (P)	%	> 0.10
Potasio disponible (K)	%	> 0.25
Arsénico (As)	mg/kg	5
Cadmio (Cd)	mg/kg	1
Cobre (Cu)	mg/kg	30
Plomo (Pb)	mg/kg	6
Níquel (Ni)	mg/kg	5
Zinc (Zn)	mg/kg	90

*Nota.* Adaptado de *Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006* que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos, por Secretaría de Medio Ambiente (SMA), 2006.

**Tabla 17**

*Especificaciones por tipo de composta según Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018*

Parámetros	Unidad de medida	Tipo de composta		
		I	II	III
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.7 - 8.5		
Conductividad eléctrica (C.E.)	dS/m	0.5 - 4	4 - 8	8 - 12
Materia orgánica (M.O.)	%	≥ 50	30 - 50	20 - 30
Carbono orgánico total (C)	%	> 10		

Parámetros	Unidad de medida	Tipo de composta		
		I	II	III
Nitrógeno Total (N)	%	3	2	1
Relación C/N	Ad.	15 – 20	20 – 25	
Macronutrientes primarios - Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K)	%	1 - 3 en cualquiera de ellos y su suma $\leq$ 7: debe portar la leyenda 'Composta - mejorador de suelo orgánico'. Si cualquiera excede 3 o la suma es mayor a 7, debe portar la leyenda 'Fertilizante orgánico' y se debe indicar las cantidades para cada macronutriente.		
Tamaño de partícula	Mm	10	10 - 30	
Arsénico (As)	mg/kg	0.1	0.7	2
Cadmio (Cd)	mg/kg	0.7	1	2
Cromo (Cr)	mg/kg	70	70	250
Cobre (Cu)	mg/kg	70	150	300
Mercurio (Hg)	mg/kg	0.4	0.7	1.5
Níquel (Ni)	mg/kg	25	60	90
Plomo (Pb)	mg/kg	45	120	150
Zinc (Zn)	mg/kg	200	500	500

*Nota.* Adaptado de Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y parámetros de calidad de los productos finales, por Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI), 2018.

**Tabla 18**

*Requisitos específicos para el abono orgánico según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (Segunda Actualización)*

Parámetro	Unidad de medida	Valor Límite
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	4.0 - 9.0
Carbono orgánico total (C)	%	$\geq$ 15
Materia orgánica (M.O.)	%	$\geq$ 30
Nitrógeno Total (N)	%	Declarar si es $>$ 1
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	meq/100g	$\geq$ 30
Arsénico (As)	mg/kg	41
Cadmio (Cd)	mg/kg	39
Cromo (Cr)	mg/kg	1200
Mercurio (Hg)	mg/kg	17
Níquel (Ni)	mg/kg	420
Plomo (Pb)	mg/kg	300

*Nota.* Se considera abono orgánico a todo producto sólido obtenido a partir de la estabilización de residuos de animales, vegetales o residuos sólidos urbanos (separados en la fuente) o mezcla de los anteriores. Adaptado de Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (Segunda actualización). Productos para la Industria Agrícola.

Productos orgánicos usados como Abonos o Fertilizantes y Enmiendas o Acondicionadores de Suelo que establece los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos, por Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2011.

### 3.5.7.5.2.2 Uso potencial como material de construcción (subrasante y/o relleno)

Para esta evaluación, se comparó el contenido de materia orgánica en la fracción fina con los valores establecidos en normas internacionales para el uso de suelo como material de construcción, sea como subrasante o relleno en la construcción de pavimentos o afirmados. Estos límites se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19**

*Contenido de materia orgánica permisible en suelos para ser usados como material de construcción como subrasante o relleno*

País	Límite máximo de materia orgánica	Autoridad reguladora
Estados Unidos	Indiana	3 % para subrasante de carreteras
	Luisiana	5 %
	Texas	1 %
	California	Si es $\leq 1$ %, entonces el suelo puede ser usado sin tratamiento previo. El límite máximo es 5 %
Australia	1 %	Departamento de Transporte y Carreteras Principales
India	3 %	Ministerio de Transporte por Carretera y Autopistas
Reino Unido	2 %	Departamento de Transporte de Reino Unido

*Nota.* Adaptado de "Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India", de Somani et al., 2018, *Waste Management & Research*, 36(8), p. 752 (doi:10.1177/0734242x18782393)

### 3.5.8 Variables e indicadores

En la Tabla 20, se presenta un resumen de las variables e indicadores analizadas en el presente estudio, diferenciándolas entre variables dependientes, independientes e intervinientes, según su naturaleza.

**Tabla 20**

*Variables e indicadores analizadas durante el presente estudio*

Variable	Indicador	Unidad de medida
Dependientes		
Potencial de valorización de residuos enterrados	Código de clase de fracción combustible según estándar EN 15359	Ad. <sup>a</sup>
	Uso potencial de fracción fina (< 6.3 mm)	Ad.
	Uso potencial de fracción combustible	Ad.
Independientes		
Composición de residuos enterrados	Cantidad de plásticos <sup>b</sup>	% (m) <sup>c</sup>
	Cantidad de metales	% (m)
	Cantidad de madera	% (m)
	Cantidad de caucho	% (m)
	Cantidad de vidrios y cerámicos	% (m)
	Cantidad de papel y cartón	% (m)
	Cantidad de textiles	% (m)
	Cantidad de pañales	% (m)
	Cantidad de materia orgánica	% (m)
	Cantidad de PVC y tecnopor	% (m)
	Cantidad de rocas	% (m)
	Cantidad de fracción residuales	% (m)
	Cantidad de fracción fina (< 6.3 mm)	% (m)
	Cantidad de fracción combustible	% (m)
	Características fisicoquímicas de la fracción combustible	Contenido de humedad
Poder Calórico Inferior (PCI)		MJ/kg
Tamaño de partícula		mm
Contenido de cloro (Cl)		% (m, b.s.) <sup>d</sup>
Contenido de flúor (F)		% (m, b.s.)
Contenido de bromo (Br)		% (m, b.s.)
Contenido de azufre (S)		% (m, b.s.)
Contenido de mercurio (Hg)		mg/kg ó MJ/kg
Contenido de otros metales (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sn, Sr, Ti, Tl, V, Zn)		mg/kg ó MJ/kg
Densidad aparente (D.A.)		g/cm <sup>3</sup>

<b>Variable</b>	<b>Indicador</b>	<b>Unidad de medida</b>
Características fisicoquímicas de la fracción fina (< 6.3 mm)	Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH
	Conductividad eléctrica (C.E.)	dS/m
	Contenido de carbono orgánico (C)	% (m)
	Contenido de materia orgánica (M.O.)	% (m)
	Textura (Tx)	Ad.
	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	meq/100g
	Contenido de metales (Al, Sb, As, Ba, Be, Bi, B, Cd, Ca, Co, Cu, Cr, Sn, Sr, P, Fe, Li, Mg, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, K, Se, Si, Na, Ti, Te, U, V, W, Zn)	mg/kg
	Contenido de potasio disponible (K <sub>d</sub> )	ppm
	Contenido de fósforo disponible (P <sub>d</sub> )	ppm
	Contenido de nitrógeno total (N)	% (m)
	Relación C/N (C/N)	Ad.
<b>Intervinientes</b>		
Información preliminar del relleno sanitario	Periodo de operación	Año
	Antigüedad	Año
	Tipo de residuos	Ad.
	Tamaño de partícula	mm

*Nota.* <sup>a</sup> Ad.: adimensional. <sup>b</sup> Esta y todas las demás cantidades dentro de la variable 'Composición de residuos enterrados' se refieren a cantidades porcentuales (Qty, según ecuación 1 y 2). <sup>c</sup> % (m): porcentaje másico. <sup>d</sup> % (m, b.s.): porcentaje másico en base seca.

## Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1 Muestreo y composición de residuos enterrados

Se ejecutaron las excavaciones en los puntos de monitoreo (A - G); midiendo, en primera instancia, los espesores de la capa de cobertura de arcilla compactada, los cuales tuvieron un valor promedio de 1.29 m en el área de estudio (ver Tabla 21). En el Anexo 1 se presentan los registros operativos de excavación.

##### 4.1.1.1 Medición de espesor de cobertura y densidad estabilizada

Se ejecutaron las excavaciones en los puntos de monitoreo (A - G); midiendo, en primera instancia, los espesores de la capa de cobertura de arcilla compactada, los cuales tuvieron un valor promedio de 1.29 m en el área de estudio (ver Tabla 21). En el Anexo 1 se presentan los registros operativos de excavación.

**Tabla 21**

*Espesor de capa de arcilla compactada por punto de muestreo*

Punto	Fecha de excavación	Espesor de capa de arcilla (m)	Profundidad inicial de muestreo (m)	Profundidad final de muestreo (m)
A	16/11/2019	1.40	3.00	4.00
B	16/11/2019	1.10	3.00	4.00
C	23/11/2019	1.20	3.00	4.00
D	23/11/2019	1.20	3.00	4.00
E	26/11/2019	1.30	3.00	4.00
F	26/11/2019	1.30	3.00	4.00
G	25/11/2019	1.50	3.00	4.00

*Nota.* La fecha de excavación no fue la misma para todos los puntos dada la disponibilidad de maquinaria.

Luego, los pesos de las muestras fueron determinados mediante la diferencia aritmética entre el peso del volquete con carga y sin carga. Este valor se empleó para el cálculo de la densidad estabilizada de los residuos (ver Tabla 22).

**Tabla 22***Peso de muestra y densidad estabilizada de residuos*

Punto	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Peso de muestra (kg)	Densidad estabilizada <sup>a</sup> (Tn/m <sup>3</sup> )
A	16860	18150	1290	1.29
B	16860	18120	1260	1.26
C	16880	18370	1490	1.49
D	16850	18320	1470	1.47
E	17810	18920	1110	1.11
F	17800	19010	1210	1.21
G	14950	16520	1570	1.57

Nota. <sup>a</sup> Se calculó dividiendo el peso de la muestra entre su volumen (1 m<sup>3</sup>).

De acuerdo a la Tabla 22, la densidad estabilizada de los residuos enterrados en el área de estudio alcanzó un valor promedio de 1.34 Tn/m<sup>3</sup>.

#### 4.1.1.2 Secado y reducción de tamaño de muestras

Las muestras fueron trasladadas y descargadas sobre mantas plásticas de polipropileno en la plataforma de acondicionamiento y clasificación. Luego, el tamaño de cada una de estas fue reducida por procesos consecutivos de cuarteo, facilitando su manipulación para la posterior etapa de caracterización. En la Tabla 23 se presentan los días de secado por muestra, así como su peso tras los procesos de cuarteo.

**Tabla 23***Peso de muestra reducida tras procesos de cuarteo*

Punto	Tiempo de secado (día)	Peso de muestra reducida (kg)	Reducción de peso <sup>a</sup> (%)
A	10	75.60	94.14%
B	11	87.10	93.09%
C	10	129.40	91.32%
D	11	106.70	92.74%
E	10	122.10	89.00%
F	11	170.90	85.88%
G	10	168.10	89.29%

Nota. <sup>a</sup> Se calculó mediante la diferente aritmética entre la unidad y el cociente de la división entre el peso inicial de la muestra (Tabla 22) y el peso de la muestra reducida

Según los valores de la Tabla 23, las muestras secadas y reducidas alcanzaron un peso promedio de 123 kg, con una reducción de peso respecto a la muestra original de aproximadamente 90.78 % en promedio.

#### 4.1.1.3 Composición de las muestras de residuos

Las muestras secadas y de tamaño reducido fueron sometidas a operaciones de tamizaje manual ( $\varnothing$  6.3 mm), clasificación manual, y separación de metales. Luego, las fracciones obtenidas fueron almacenadas y etiquetadas en sacos de polipropileno, para ser pesadas en una balanza digital colgante. En la Tabla 24 se presentan los pesos de las fracciones de residuos presentes en cada muestra. De igual manera, en la Tabla 25 se muestra la cantidad porcentual de estas fracciones presente en las muestras (Qty).

**Tabla 24**

*Peso de fracción de residuos por punto de muestreo*

Fracción	Punto de muestreo						
	A	B	C	D	E	F	G
	Peso (kg)	Peso (kg)	Peso (kg)	Peso (kg)	Peso (kg)	Peso (kg)	Peso (kg)
Plástico	19.60	16.80	18.50	17.70	19.50	22.10	27.40
Metales	2.60	2.30	3.40	2.80	2.60	3.50	2.60
Madera	2.00	2.00	3.10	2.90	3.50	3.50	2.00
Caucho	0.50	0.50	0.80	0.70	0.70	1.30	1.40
Vidrios y cerámicos	1.90	2.00	1.70	2.90	2.90	3.90	5.40
Papel y cartón	1.60	2.20	2.30	4.20	3.10	4.50	4.00
Textiles	2.80	4.50	7.50	5.90	6.40	11.70	7.30
Pañales	1.50	1.70	3.00	3.10	2.50	1.60	3.60
Materia orgánica	0.70	0.90	1.10	1.10	1.30	1.20	1.80
Rocas	12.60	16.50	25.90	15.80	23.60	36.50	40.60
Otros	0.20	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30	0.40
Residuales	9.70	15.30	27.80	18.60	21.90	33.50	30.90
Fracción fina	19.90	22.30	34.10	30.80	33.80	47.30	40.70
Total	75.60	87.10	129.40	106.70	122.10	170.90	168.10

**Tabla 25***Cantidad porcentual de fracción de residuos por punto de muestreo*

Fracción	Punto de muestreo						
	A Qty <sup>a</sup> (%)	B Qty (%)	C Qty (%)	D Qty (kg)	E Qty (kg)	F Qty (kg)	G Qty (kg)
Plástico	25.93	19.29	14.30	16.59	15.97	12.93	16.30
Metales	3.44	2.64	2.63	2.62	2.13	2.05	1.55
Madera	2.65	2.30	2.40	2.72	2.87	2.05	1.19
Caucho	0.66	0.57	0.62	0.66	0.57	0.76	0.83
Vidrios y cerámicos	2.51	2.30	1.31	2.72	2.38	2.28	3.21
Papel y cartón	2.12	2.53	1.78	3.94	2.54	2.63	2.38
Textiles	3.70	5.17	5.80	5.53	5.24	6.85	4.34
Pañales	1.98	1.95	2.32	2.91	2.05	0.94	2.14
Materia orgánica	0.93	1.03	0.85	1.03	1.06	0.70	1.07
Rocas	16.67	18.94	20.02	14.81	19.33	21.36	24.15
Otros	0.26	0.11	0.15	0.19	0.25	0.18	0.24
Residuales	12.83	17.57	21.48	17.43	17.94	19.60	18.38
Fracción fina	26.32	25.60	26.35	28.87	27.68	27.68	24.21
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Nota. <sup>a</sup> Valor calculado mediante la ecuación 1.

#### 4.1.1.3.1 Comprobación de normalidad mediante Test Shapiro-Wilk

La prueba estadística de Shapiro-Wilk fue empleada para comprobar si los datos correspondientes a las cantidades de las fracciones de residuos presentes en las muestras colectadas provienen o no de una población que sigue una distribución normal. Los resultados de dicha prueba, para cada fracción de residuos, se presentan en la Tabla 26:

**Tabla 26***Resultados de prueba Shapiro-Wilk para las muestras de residuos*

Fracción de residuos	Estadístico calculado ( $W_c$ )	Grados de libertad	Significancia ( $p$ -valor)
Plástico	0.857	7	0.142
Metales	0.948	7	0.709
Madera	0.876	7	0.208
Caucho	0.900	7	0.333
Vidrios y cerámicos	0.915	7	0.432
Papel y cartón	0.845	7	0.111
Textiles	0.977	7	0.942

Fracción de residuos	Estadístico calculado ( $W_c$ )	Grados de libertad	Significancia (p-valor)
Pañales	0.898	7	0.317
Materia orgánica	0.848	7	0.117
Rocas	0.985	7	0.981
Otros	0.933	7	0.576
Residuales	0.905	7	0.360
Fracción fina	0.971	7	0.903

*Nota.* Para la presente prueba se consideró nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0.05, por lo cual el nivel de confianza corresponde al 95%.

De acuerdo a la Tabla 26; y, considerando que, p-valor > 0.05 para todos los casos, la prueba estadística de Shapiro-Wilk confirmó, con un 95 % de confianza, que las variables correspondientes a las cantidades porcentuales de las diferentes fracciones de residuos presentes en las muestras colectadas siguen una distribución normal.

#### 4.1.1.3.2 Composición de residuos del área de estudio

Calculadas las cantidades porcentuales de las fracciones de residuos en las muestras colectadas (ver Tabla 25); y, comprobada la normalidad de estas variables (ver Tabla 26), se procedió a calcular la composición de los residuos enterrados en el área de estudio. Al respecto, en la Tabla 27 se presentan los principales estadísticos descriptivos de las cantidades porcentuales de estas fracciones; las cuales, a su vez, permitieron determinar la composición final de los residuos dispuestos en la celda seleccionada. Asimismo, en la Figura 39 se presenta dicha composición final.

**Tabla 27**

*Estadísticos descriptivos de las cantidades porcentuales de fracciones de residuos*

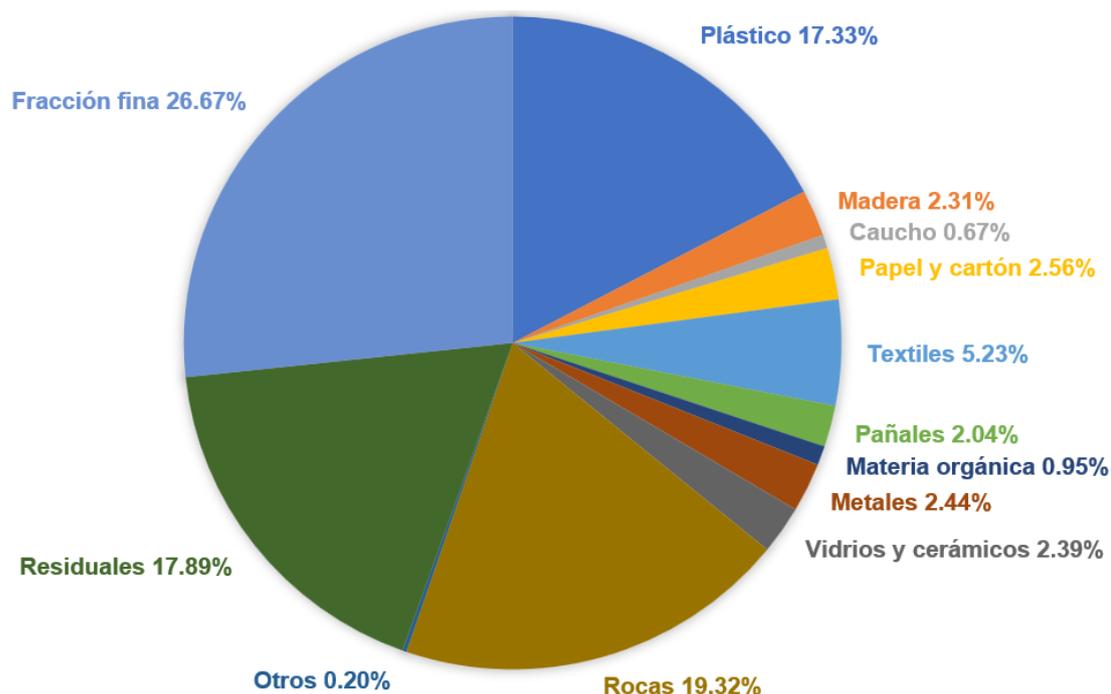
Fracción de residuos	$\overline{Qty}^a$ (%)	$s^b$	$\sigma_{\overline{Qty}}^c$	C.V. <sup>d</sup> (%)	$X^e$ (%)
<b>Plástico</b>	17.33	4.28	1.62	24.68	17.33 ± 3.96
Metales	2.44	0.60	0.23	24.55	2.44 ± 0.55
<b>Madera</b>	2.31	0.57	0.21	24.52	2.31 ± 0.52
<b>Caucho</b>	0.67	0.10	0.04	14.53	0.67 ± 0.09
Vidrios y cerámicos	2.39	0.57	0.22	24.08	2.39 ± 0.53
<b>Papel y cartón</b>	2.56	0.68	0.26	26.42	2.56 ± 0.63

Fracción de residuos	$\overline{Qty}^a$ (%)	$s^b$	$\sigma_{\overline{Qty}}^c$	C.V. <sup>d</sup> (%)	$X^e$ (%)
<b>Textiles</b>	5.23	1.01	0.38	19.39	5.23 ± 0.94
<b>Pañales</b>	2.04	0.59	0.22	28.75	2.04 ± 0.54
<b>Materia orgánica</b>	0.95	0.14	0.05	14.35	0.95 ± 0.13
Rocas	19.33	3.01	1.15	15.74	19.33 ± 2.81
Otros	0.20	0.06	0.02	28.35	0.20 ± 0.05
Residuales	17.89	2.64	1.00	14.78	17.89 ± 2.45
Finos	26.67	1.54	0.58	5.79	26.67 ± 1.43

Nota. Las fracciones de residuos resaltadas en negrita son constituyentes de la fracción combustible. <sup>a, b</sup> Representa la media aritmética y la desviación estándar de la cantidad porcentual de cada fracción de residuos presente en su respectiva muestra (calculadas a partir de los datos de la Tabla 25). <sup>c</sup> Es el error estándar ( $s/\sqrt{n}$ , según ecuación 2), considerando  $n = 7$ . <sup>d</sup> Es el coeficiente de variación, y se calcula dividiendo  $s$  entre  $\overline{Qty}$ . <sup>e</sup> Representa la composición porcentual de la fracción de residuos en el área de estudio ( $X$ , según ecuación 2), considerando un  $t = 2.447$  (para  $\alpha = 0.05$  y  $n = 7$ )

**Figura 39**

*Composición final de los residuos enterrados en el área de estudio*



Nota. No se incluyen las incertidumbres para evitar efectos inadecuados de visualización.

Ahora bien, para determinar la cantidad porcentual de fracción combustible en el área de estudio, se consideró sus subfracciones constituyentes, las cuales corresponden a: plásticos, madera, papel y cartón, caucho, textiles, pañales y materia orgánica. En la

Tabla 28 se presenta la cantidad porcentual de fracción combustible en cada una de las muestras de residuos colectadas en el área de estudio.

**Tabla 28**

*Cantidad porcentual de fracción combustible por punto de muestreo*

Fracción	Punto de muestreo						
	A	B	C	D	E	F	G
	Qty (%)	Qty (%)	Qty (%)	Qty (kg)	Qty (kg)	Qty (kg)	Qty (kg)
Fracción combustible <sup>a</sup>	37.96	32.84	28.05	33.36	30.30	26.86	28.26

*Nota.* <sup>a</sup> Considera la sumatoria individual de las subfracciones plásticos, madera, papel y cartón, caucho, textiles, pañales y materia orgánica.

Al igual que para la composición global, se realizó la prueba Shapiro-Wilk para los valores de la cantidad porcentual de fracción combustible. Al respecto, el p-valor obtenido (0.490) fue mayor al nivel de significancia elegido para la prueba estadística ( $\alpha=0.05$ ); por lo cual, se confirmó, con un 95 % de confianza, que esta variable también sigue una distribución normal. Luego de comprobar su normalidad, su valor final dentro de la composición global del área de estudio quedó determinada por sus estadísticos descriptivos (ver Tabla 29).

**Tabla 29**

*Estadísticos descriptivos de la cantidad de fracción combustible*

Fracción de residuos	$\overline{Qty}^a$ (%)	$s^b$	$\sigma_{Qty}^c$	C.V. <sup>d</sup> (%)	$X^e$ (%)
Fracción combustible	31.09	3.90	1.47	12.54	31.09 ± 3.61

*Nota.* <sup>a, b</sup> Media aritmética y la desviación estándar de la cantidad porcentual de la fracción combustible en la muestra colectada de residuos (a partir de los datos de la Tabla 28). <sup>c</sup> Es el error estándar ( $s/\sqrt{n}$ , según ecuación 2), considerando  $n=7$ . <sup>d</sup> Es el coeficiente de variación. <sup>e</sup> Representa la composición porcentual de la fracción combustible en el área de estudio ( $X$ , según ecuación 2), considerando un  $t=2.447$  (para  $\alpha=0.05$  y  $n=7$ )

De lo observado en la Tabla 27, Tabla 29, y Figura 29, se determinó que, la fracción combustible y la fracción fina (< 6.3 mm) representaron un  $31.09 \pm 3.61$  % y  $26.67 \pm 1.43$  % del total de residuos enterrados en el relleno sanitario.

#### 4.1.2 Caracterización de la fracción combustible

Posterior a la determinación de la composición, las fracciones de residuos plásticos, madera, papel y cartón, caucho, textiles, pañales y materia orgánica, fueron agrupadas y homogeneizadas para cada punto de monitoreo.

##### 4.1.2.1 Composición de la fracción combustible

Para el cálculo de la composición de la fracción combustible, se consideró la sumatoria de las siguientes subfracciones de residuos: plásticos, madera, papel y cartón, caucho, textiles, pañales y materia orgánica. La cantidad porcentual de cada de una de estas subfracciones, dentro del total de la fracción combustible encontrada en cada muestra de residuos se presenta en la Tabla 30.

**Tabla 30**

*Cantidad porcentual de subfracción de residuos en fracción combustible*

Subfracción	Punto de muestreo						
	A	B	C	D	E	F	G
	Qty <sup>a</sup> (%)	Qty (%)	Qty (%)	Qty (%)	Qty (%)	Qty (%)	Qty (%)
Plástico	68.29	58.74	50.96	49.72	52.70	48.15	57.68
Madera	6.97	6.99	8.54	8.15	9.46	7.63	4.21
Caucho	1.74	1.75	2.20	1.97	1.89	2.83	2.95
Papel y cartón	5.57	7.69	6.34	11.80	8.38	9.80	8.42
Textiles	9.76	15.73	20.66	16.57	17.30	25.49	15.37
Pañales	5.23	5.94	8.26	8.71	6.76	3.49	7.58
Materia orgánica	2.44	3.15	3.03	3.09	3.51	2.61	3.79
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

*Nota.* <sup>a</sup> Valor calculado mediante la ecuación 1, considerando el peso total de la fracción combustible como la sumatoria de las subfracciones plásticos, madera, papel y cartón, caucho, textiles, pañales y materia orgánica.

De igual manera, se procedió a verificar la normalidad de estas variables. Los resultados de la prueba Shapiro-Wilk se presentan en la Tabla 31.

**Tabla 31***Resultados de prueba Shapiro-Wilk en las subfracciones de la fracción combustible*

Subfracción de residuos	Estadístico calculado ( $W_c$ )	Grados de libertad	Significancia (p-valor)
Plástico	0.896	7	0.308
Madera	0.917	7	0.444
Caucho	0.832	7	0.083
Papel y cartón	0.968	7	0.880
Textiles	0.952	7	0.751
Pañales	0.961	7	0.825
Materia orgánica	0.964	7	0.853

*Nota.* Para la presente prueba se consideró nivel de significancia ( $\alpha$ ) de 0.05, por lo cual el nivel de confianza corresponde al 95%.

De acuerdo a la Tabla 31, la prueba estadística de Shapiro-Wilk confirmó, con un 95 % de confianza, que las variables correspondientes a las cantidades porcentuales de las diferentes subfracciones de residuos presentes en la fracción combustible siguen también una distribución normal. Comprobada su normalidad, se procedió a calcular la composición final de la fracción combustible, la cual se pudo determinar a partir de los principales estadísticos descriptivos de las cantidades porcentuales de sus subfracciones (ver Tabla 32). En la Figura 40 se presenta esta composición.

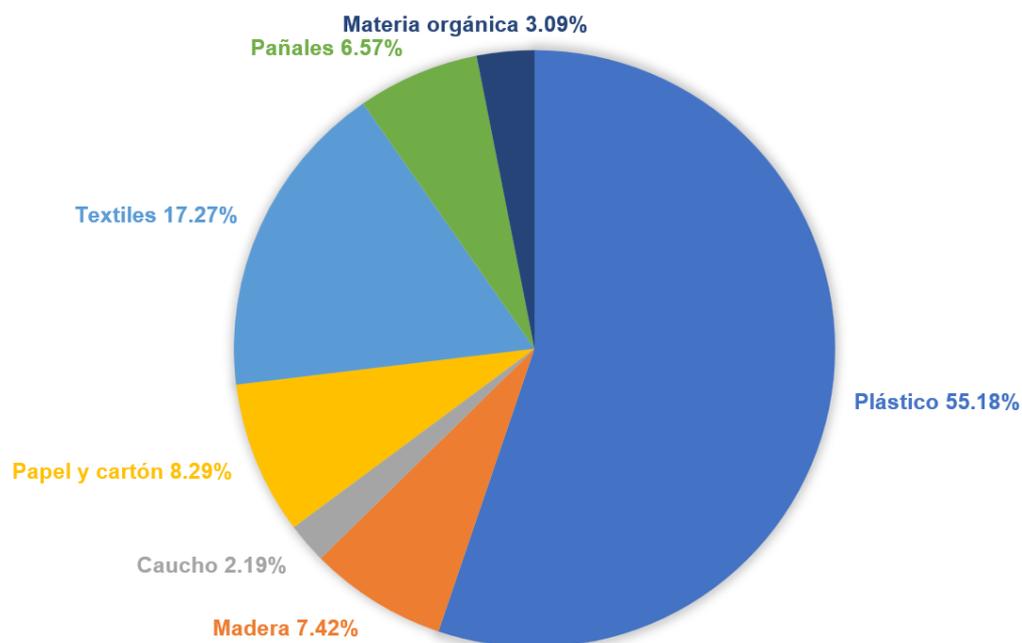
**Tabla 32***Estadísticos descriptivos de las cantidades porcentuales de subfracciones combustibles*

Fracción de residuos	$\bar{Q}_{ty}^a$ (%)	$s^b$	$\sigma_{\bar{Q}_{ty}}^c$	C.V. <sup>d</sup> (%)	$X^e$ (%)
Plástico	55.18	7.00	2.65	12.69	55.18 ± 6.47
Madera	7.42	1.67	0.63	22.47	7.42 ± 1.54
Caucho	2.19	0.50	0.19	23.00	2.19 ± 0.47
Papel y cartón	8.29	2.09	0.79	25.21	8.29 ± 1.93
Textiles	17.27	4.86	1.84	28.17	17.27 ± 4.50
Pañales	6.57	1.83	0.69	27.92	6.57 ± 1.70
Materia orgánica	3.09	0.47	0.18	15.22	3.09 ± 0.43

*Nota.* <sup>a, b</sup> Media aritmética y la desviación estándar de la cantidad porcentual de cada subfracción de residuos en la fracción combustible (a partir de los datos de la Tabla 30). <sup>c</sup> Es el error estándar ( $s/\sqrt{n}$ , según ecuación 2), considerando  $n=7$ . <sup>d</sup> Es el coeficiente de variación. <sup>e</sup> Composición porcentual de la subfracción de residuos en la fracción combustible ( $X$ , según ecuación 2), considerando un  $t=2.447$  (para  $\alpha=0.05$  y  $n=7$ )

**Figura 40**

*Composición final de la fracción combustible*



*Nota.* No se incluyen las incertidumbres para evitar efectos inadecuados de visualización.

De lo observado en la Tabla 32 y Figura 40, se determinó que, la fracción combustible estuvo constituido en su mayoría por plásticos y textiles; los cuales, representaron un  $55.18 \pm 6.47$  % y un  $17.27 \pm 4.50$  % de su composición total, respectivamente.

#### **4.1.2.2 Caracterización morfológica**

Previo al análisis fisicoquímico, y con la finalidad de facilitar su manipulación, se redujo el tamaño de las muestras combustibles mediante procesos de trituración mecánica y corte manual. Al respecto, se tuvieron partículas de naturaleza unidimensional, bidimensional, y tridimensional, cuyas dimensiones (largo, alto, y ancho) fueron determinadas sobre papel cuadrulado (ver Figuras 41, 42, y 43).

### **Figura 41**

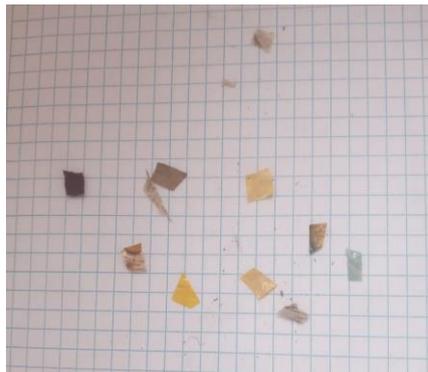
*Partículas unidimensionales de la fracción combustible*



*Nota.* Las cuadrículas del papel fueron empleadas como unidad de medición de dimensiones.

### **Figura 42**

*Partículas bidimensionales de la fracción combustible*



*Nota.* Las cuadrículas del papel fueron empleadas como unidad de medición de dimensiones.

### **Figura 43**

*Partículas tridimensionales de la fracción combustible*



*Nota.* Las cuadrículas del papel fueron empleadas como unidad de medición de dimensiones.

En referencia al área, volumen, y tamaño (o diámetro) equivalente de partícula, estos fueron calculados en base a los valores promedio de las dimensiones antes mencionadas, empleando las ecuaciones de la Tabla 9. Los resultados se presentan en la Tabla 33.

**Tabla 33**

*Tamaños de partícula equivalente para la fracción combustible*

Dimensión		Unidimensionales	Bidimensionales	Tridimensionales
Largo (mm)	Mínimo	9.50	4.00	4.00
	Promedio	12.00	6.00	6.00
	Máximo	14.50	8.00	8.00
Alto (mm)	Mínimo	N.A.	4.00	8.00
	Promedio	N.A.	6.00	10.00
	Máximo	N.A.	8.00	12.00
Ancho (mm)	Mínimo	N.A.	N.A.	2.00
	Promedio	N.A.	N.A.	5.00
	Máximo	N.A.	N.A.	8.00
Área (A) (m <sup>2</sup> )		N.A.	36.00	N.A.
Volumen (V) (m <sup>3</sup> )		N.A.	N.A.	300.00
Diámetro equivalente (mm)		N.A.	6.77	8.31

*Nota.* N.A.: No aplicable. Los cálculos se realizan con los valores promedios de las dimensiones largo, alto, y ancho, según las ecuaciones descritas en la Tabla 9.

De la Tabla 33 se concluyó que, los procesos de trituración mecánica y corte manual redujeron el tamaño de partículas al rango de 6.77 mm a 14.50 mm.

#### **4.1.2.3 Análisis fisicoquímico de la fracción combustible**

Posterior a la reducción de tamaño, las muestras combustibles fueron enviadas a laboratorios externos para su análisis fisicoquímico (ver Anexo 2 Informes de Laboratorio). Cabe mencionar que, dada la homogeneidad de la composición de los residuos en el área de estudio, debido a su corto tiempo de operación, así como a la comprobación estadística dados los coeficientes de variación de sus cantidades porcentuales (C.V. < 30 %, ver Tablas 27, 29 y 32), se optó por reducir el número de muestras considerando los puntos B, D y G, manteniendo así la representatividad espacial del análisis.

#### 4.1.2.3.1 Contenido de humedad y Poder Calorífico

En la Tabla 34 se presentan los resultados analíticos del contenido de humedad y el Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI) en las muestras de residuos.

**Tabla 34**

*Contenido de humedad y Poder Calorífico en la fracción combustible*

Punto	Contenido de humedad (%)	PCS (cal/g)	PCI (cal/g)	PCS <sup>a</sup> (MJ/kg)	PCI <sup>b</sup> (MJ/kg)
B	3.48	3425.47	3306.33	14.33	13.83
D	6.19	3996.31	3749.00	16.72	15.69
G	3.55	3397.12	3276.50	14.21	13.71

Nota. <sup>a, b</sup> El Poder Calorífico (PCS o PCI), en unidades MJ/kg, fue calculado multiplicando su valor en cal/g por el factor de conversión 0.004184

#### 4.1.2.3.2 Contenido de cloro (Cl), flúor (F), bromo (Br) y azufre (S)

Se determinó, en primera instancia, las concentraciones de Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en la solución extraída postcombustión y en el agua destilada usada como agente absorbente. Luego, se empleó las ecuaciones 3 y 4 para calcular el contenido total Cl, F, Br y S, desestimando el aporte de estos por el agua destilada. En la Tabla 35 se presentan las concentraciones totales de estos parámetros.

**Tabla 35**

*Contenido de Cl, F, Br y S en la fracción combustible*

Punto	m (mg)	V (L)	Parámetro	c (mg/L)	C <sub>0</sub> (mg/L)	w <sup>a</sup> (% b.s.)
B	333.00	0.06	Cloro (Cl)	20.44	0.454	0.3601
			Flúor (F)	0.059	< 0.002	0.0010
			Bromo (Br)	< 0.004	< 0.004	0.0000
			Azufre (S)	9.883	0.280	0.0578
D	462.20	0.06	Cloro (Cl)	29.31	0.454	0.3746
			Flúor (F)	0.146	< 0.002	0.0019
			Bromo (Br)	< 0.004	< 0.004	N.D.
			Azufre (S)	14.75	0.280	0.0627
G	396.50	0.06	Cloro (Cl)	27.82	0.454	0.4141
			Flúor (F)	0.118	< 0.002	0.0018

Punto	m (mg)	V (L)	Parámetro	c (mg/L)	C <sub>0</sub> (mg/L)	w <sup>a</sup> (%, b.s.)
			Bromo (Br)	< 0.004	< 0.004	N.D.
			Azufre (S)	9.639	0.280	0.0473
Blanco <sup>b</sup>	N.A.	006	Cloro (Cl)	0.454	---	---
			Flúor (F)	< 0.002 <sup>c</sup>	---	---
			Bromo (Br)	< 0.004 <sup>d</sup>	---	---
			Azufre (S)	0.280	---	---

Nota. <sup>a</sup> El contenido total se calculó empleando las ecuaciones 3 y 4. <sup>b</sup> Agua destilada usada como agente absorbente durante la combustión. <sup>c, d</sup> Para efectos de cálculo, se tomó el valor de 0.002 y 0.004, respectivamente.

#### 4.1.2.3.3 Contenido de mercurio y otros metales

En la Tabla 36 se presentan los resultados analíticos del contenido de mercurio y otros metales presentes en las muestras de residuos (expresados en mg/kg) determinados con los métodos EPA 7471 B. Rev. 2. 2007. Mercury in Solid or Semisolid Waste (Manual Cold Vapor Technique), EPA 3050B Rev.2.1996 Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, EPA 6010D Rev.5. 2018 Inductively Coupled Plasma-Optical, y EPA 6020 B Rev.2. 2014 Emission Spectrometry/Inductively coupled Plasma-Mass Spectrometry. Asimismo, se incluyen los contenidos de estos elementos en relación al PCI, los cuales fueron calculados con la ecuación 5.

**Tabla 36**

*Contenido de mercurio y otros metales en la fracción combustible*

Parámetro	B		D		G	
	mg/kg	mg/MJ <sup>a</sup>	mg/kg	mg/MJ <sup>b</sup>	mg/kg	mg/MJ <sup>c</sup>
Plata (Ag)	< 0.2	< 0.014	< 0.2	< 0.013	0.9	0.066
Aluminio (Al)	2170	156.9	1192	75.99	1629	118.8
Arsénico (As)	3.5	0.253	3.8	0.242	5.5	0.401
Boro (B)	26.1	1.887	23.5	1.498	21.4	1.561
Bario (Ba)	96	6.940	41	2.614	237	17.29
Berilio (Be)	< 0.4	< 0.029	< 0.4	< 0.026	< 0.4	< 0.029
Bismuto (Bi)	< 5	< 0.361	< 5	< 0.319	< 5	< 0.365
Calcio (Ca)	26285	1900	34941	2228	42841	3125
Cadmio (Cd)	0.69	0.050	0.45	0.029	0.59	0.043
Cobalto (Co)	2.17	0.157	2.55	0.163	3.23	0.236

Parámetro	B		D		G	
	mg/kg	mg/MJ <sup>a</sup>	mg/kg	mg/MJ <sup>b</sup>	mg/kg	mg/MJ <sup>c</sup>
Cromo (Cr)	27.2	1.966	46.5	2.964	40.2	2.932
Cobre (Cu)	60.5	4.373	43.3	2.760	44.3	3.231
Hierro (Fe)	8466	612.0	4300	274.1	11052	806.2
Mercurio (Hg)	0.37	0.027	0.40	0.026	0.29	0.021
Potasio (K)	5745	415.3	3634	231.7	5575	406.7
Magnesio (Mg)	1709	123.5	1011	64.45	2175	158.7
Manganeso (Mn)	167	12.07	119	7.586	460	33.55
Molibdeno (Mo)	3.29	0.238	2.53	0.161	4.70	0.343
Sodio (Na)	5959	430.8	4302	274.3	6062	442.2
Níquel (Ni)	< 1	< 0.072	< 1	< 0.064	9	0.657
Fósforo (P)	981	70.91	1274	81.22	912	66.53
Plomo (Pb)	28.7	2.075	20.5	1.307	30.3	2.210
Antimonio (Sb)	< 5	< 0.361	< 5	< 0.319	9	0.657
Selenio (Se)	< 0.9	< 0.065	< 0.9	< 0.057	< 0.9	< 0.066
Estaño (Sn)	27	1.952	19	1.211	< 10	< 0.729
Estroncio (Sr)	50.4	3.643	58.1	3.704	91.4	6.667
Titanio (Ti)	< 100	< 7.229	< 100	< 6.375	< 100	< 7.295
Talio (Tl)	0.40	0.029	0.23	0.015	0.16	0.012
Vanadio (V)	6	0.434	4	0.255	6	0.438
Zinc (Zn)	211	15.25	365	23.27	263	19.18

Nota. <sup>a, b, c</sup> El contenido en relación al PCI se calculó empleando la ecuación 5, con los valores del PCI incluidos en la Tabla 34

#### 4.1.2.4 Uso potencial de la fracción combustible

##### 4.1.2.4.1 Aceptación y clasificación de la fracción combustible como CSR

En la Tabla 37 se presentan las propiedades fisicoquímicas de la fracción combustible en el marco del estándar europeo EN 15359, así como el código de clase de cada muestra con la nomenclatura establecida en la ecuación 7.

**Tabla 37**

*Propiedades fisicoquímicas de los CSR en el marco del EN 15359*

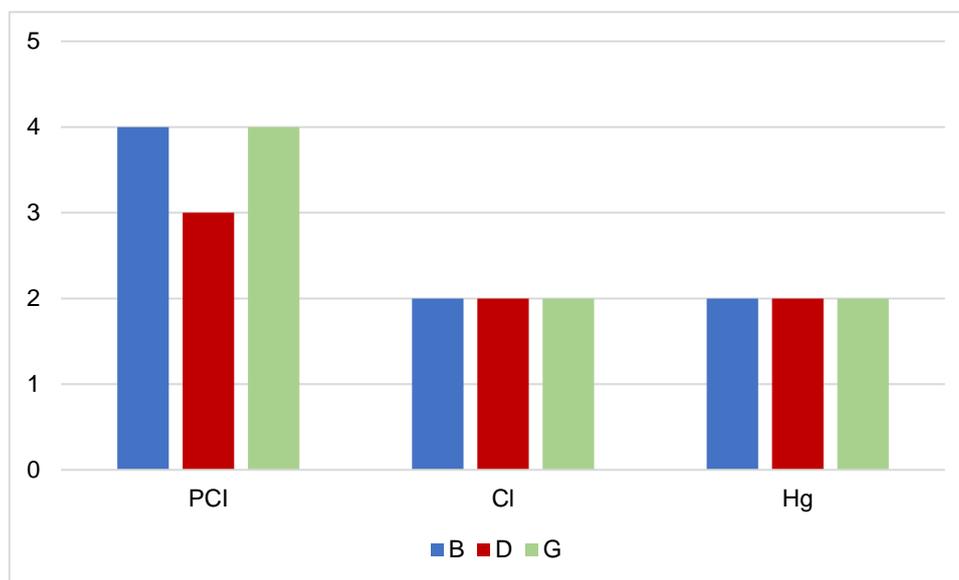
Punto	PCI		CI		Hg		Código de clase <sup>a</sup>
	Valor	Clase	Valor	Clase	Valor	Clase	
B	13.83	4	0.3601	2	0.027	2	PCI 4; CI 2; Hg 2
D	15.69	3	0.3746	2	0.026	2	PCI 3; CI 2; Hg 2
G	13.71	4	0.4141	2	0.021	2	PCI 4; CI 2; Hg 2

Nota. La clase o intervalo se define en base a los rangos de la Tabla 4.

Asimismo, en la Figura 44 se representan dichos códigos de clase.

**Figura 44**

*Código de clase de los CSR*



*Nota.* La figura muestra el código de clase de los CSR de los puntos B, D y G en un diagrama de barras.

De acuerdo a lo mencionado en la propuesta metodológica, se tomó el código de clase más conservacionista para los CSR. En ese sentido, el CSR obtenido a partir de la fracción combustible fue catalogado con un código PCI 4; CI 2; Hg 2.

#### **4.1.2.4.2 Comparación normativa y uso potencial**

El uso potencial de la fracción combustible fue determinado en base a la compatibilidad de las propiedades fisicoquímicas de los CSR producidos a partir de los residuos enterrados en el relleno sanitario con las normas internacionales para uso de combustibles sustitutos en instalaciones industriales. En la Tabla 38 se presenta el comparativo de las propiedades fisicoquímicas de los CSR con los Criterios de EURITS para la Coincineración de Residuos en Hornos de Cemento y los valores límite para criterios de fin de residuos (End-of-Waste) para combustibles sólidos secundarios (CSS)

según Decreto Ministerial Nro. 22. Los valores resaltados en negrita incumplen al menos uno de los criterios antes mencionados.

**Tabla 38**

*Comparativo de propiedades de los CSR con los Criterios de EURITS y el Decreto Ministerial Nro. 22*

Parámetro	Unidad	Punto			Me <sup>a</sup>	Criterios de EURITS <sup>b</sup>	Decreto Ministerial 22 <sup>c</sup> Mediana
		B	D	G			
PCI	MJ/kg	<b>13.83</b>	15.69	<b>13.71</b>	13.83	> 15	---
Cl	%	0.3601	0.3746	0.4141	0.3746	0.5	---
S	%	0.0578	0.0627	0.0473	0.0578	0.4	---
Br	%	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.01	---
F	%	0.0010	0.0019	0.0018	0.0018	0.1	---
Be	mg/kg	< 0.4	< 0.4	< 0.4	0.4	1	---
Hg	mg/kg	0.37	0.40	0.29	0.37	2	---
As	mg/kg	3.5	3.8	5.5	3.8	10	5
Se	mg/kg	< 0.9	< 0.9	< 0.9	0.9	10	---
Cd	mg/kg	0.69	0.45	0.59	0.59	10	4
Sb	mg/kg	< 5	< 5	9	5	10	50
Mo	mg/kg	3.29	2.53	4.70	3.29	20	---
V	mg/kg	6	4	6	6	200	10
Cr	mg/kg	27.2	46.5	40.2	40.2	200	100
Co	mg/kg	2.17	2.55	3.23	2.55	200	18
Ni	mg/kg	< 1	< 1	9	1	200	30
Cu	mg/kg	60.5	43.3	44.3	44.3	200	500
Pb	mg/kg	28.7	20.5	30.3	28.7	200	240
Mn	mg/kg	167	119	<b>460</b>	167	200	250
Sn	mg/kg	27	19	< 10	19	200	---
Tl	mg/kg	0.029	0.015	0.012	0.015	---	5
Zn	mg/kg	211	365	263	263	500	---

*Nota.* Los valores resaltados en negrita incumplen alguno de los criterios. <sup>a</sup> Mediana. Fue calculada a partir de las 3 columnas anteriores. Para aquellos valores con nomenclatura <x, (donde x es un número), se tomó el valor de x para fines de cálculo. <sup>b</sup> Adaptado de *Refuse Derived Fuel, current practices and perspectives* (p. 19), por EC, 2003 (<https://bit.ly/3WMIXTD>). <sup>c</sup> Valores límite para criterios de fin de residuos (End-of-Waste) para combustibles sólidos secundarios (CSS) según Decreto Ministerial Nro. 22 (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2013).

Por otro lado, en la Tabla 39 se presenta el comparativo de las propiedades fisicoquímicas de los CSR con los valores límite para la coincineración de combustibles sustitutos producidos a partir de residuos según la Ordenanza de Incineración de Residuos

(AVV) y los valores límite para la coincineración de combustibles sólidos recuperados según la norma RAL-GZ 724 Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (RAL, 2012). Cabe mencionar que, no se presentaron incumplimientos en ambas normas.

**Tabla 39**

*Comparativo de propiedades de los CSR con la Ordenanza de Incineración de Residuos (AVV) y la RAL-GZ 724*

Parámetro	CSR (mg/MJ)		Ordenanza de Incineración (AVV) <sup>a</sup>						RAL-GZ 724 <sup>b</sup> (mg/MJ)	
	Me <sup>c</sup>	P80 <sup>d</sup>	Plantas cementeras (mg/MJ)		Centrales eléctricas (mg/MJ)		Plantas de coincineración (mg/MJ)		Me	P80
			Me	P80	Me	P80	Me	P80		
Sb	0.361	0.538	7	10	7	10	7	10	3.1	7.5
As	0.253	0.342	2	3	2	3	1	1.5	0.31	0.81
Cd	0.043	0.047	0.23	0.46	0.17	0.34	0.17	0.34	0.25	0.56
Cr	2.932	2.952	25	37	19	28	19	28	7.8	16
Co	0.163	0.206	1.5	2.7	0.9	1.6	0.9	1.6	0.38	0.75
Sn	1.211	1.656	---	---	---	---	---	---	1.9	4.4
Mn	12.07	24.96	---	---	---	---	---	---	16	31
Ni	0.072	0.423	10	18	7	12	7	12	5	10
Hg	0.026	0.026	0.075	0.15	0.075	0.15	0.075	0.15	0.038	0.075
Pb	2.075	2.156	20	36	15	27	15	27	12	25
Tl	0.015	0.023	---	---	---	---	---	---	0.063	0.13
V	0.434	0.436	---	---	---	---	---	---	0.63	1.6

*Nota.* <sup>a</sup> Valores límite para coincineración de combustibles sustitutos producidos a partir de residuos según la Ordenanza de Incineración de Residuos (AVV) (BMLFUW, 2010). <sup>b</sup> Valores límite para coincineración de combustibles sólidos recuperados según la norma RAL-GZ 724 Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (RAL, 2012). <sup>c</sup> Mediana. <sup>d</sup> Percentil 80. Los estadísticos descriptivos fueron calculados a partir de los valores en la Tabla 36. Para aquellos valores con nomenclatura <x, (donde x es un número), se tomó el valor de x para fines de cálculo.

#### 4.1.3 Caracterización de la fracción fina (< 6.3 mm)

##### 4.1.3.1 Cumplimiento de los ECA-Suelo

Previo a la determinación del uso potencial de la fracción fina (< 6.3 mm), y con la finalidad de conocer el nivel de contaminación de esta; se evaluó, en primera instancia, su cumplimiento con los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo (ECA-Suelo) en referencia al contenido de metales. En la Tabla 40 se presenta el contenido de estos

elementos en la fracción fina (para mayores detalles, ver Anexo 2 el cual incluye los informes de laboratorio), en comparación con la norma antes mencionada. Los valores resaltados en negrita incumplen los ECA-Suelo en al menos uno de sus tipos de uso.

**Tabla 40**

*Contenido de metales en los finos en comparación con ECA-Suelo*

Metal	Concentración (mg/kg)							ECA-Suelo por Uso		
	A	B	C	D	E	F	G	Ag <sup>a</sup>	R/P <sup>b</sup>	Co//Ex <sup>c</sup>
As	8.314	11.32	12.09	24.06	9.587	11.72	7.394	50	50	140
Ba	78.66	77.6	81.00	109.2	128.8	101.9	88.34	750	500	2000
Cd	<b>2.189</b>	<b>2.723</b>	<b>3.489</b>	<b>4.675</b>	<b>2.485</b>	<b>3.181</b>	<b>2.767</b>	1.4	10	22
Cr	56.92	43.96	180.0	85.96	39.46	30.95	42.89	N.A.	400	1000
Hg	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	6.6	6.6	24
Pb	65.82	66.34	<b>77.07</b>	<b>285.6</b>	<b>90.84</b>	48.01	52.68	70	140	800

*Nota.* Los valores resaltados en negrita incumplen alguno de los criterios. Adaptado de *Decreto Supremo N° 011-2017 MINAM Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo*, por Ministerio del Ambiente (MINAM), 2017. N.A.: No aplicable. <sup>a</sup> Ag: Suelo agrícola. <sup>b</sup> R/P: Suelo Residencial/Parques. <sup>c</sup> Co//Ex: Suelo Comercial/Industrial/Extractivo.

#### 4.1.3.2 Comparación normativa y uso potencial

##### 4.1.3.2.1 Compost

La evaluación del uso potencial de la fracción fina como compost fue determinada en base a la compatibilidad de las propiedades fisicoquímicas de esta fracción (para mayores detalles, ver Anexo 2 el cual incluye los informes de laboratorio) con las normas internacionales que establecen requisitos mínimos para el compost y mejoradores de suelo. En la Tabla 41 se presenta el comparativo de las propiedades de los finos con la Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004, la Norma Mexicana Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006, la Norma Técnica Colombiana NTC 5167, y la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018. Los valores resaltados en negrita incumplen al menos uno de los criterios antes mencionados.

**Tabla 41**

*Comparativo de propiedades de la fracción fina (< 6.3 mm) con normativas internacionales para compost*

Parámetro	Unidad	Punto							NCh 2880. Of 2004. <sup>a</sup>		NTEA-006-SMA-RS-2006 <sup>b</sup>	NTC 5167 <sup>c</sup>	NMX-AA-180-SCFI-2018 <sup>d</sup>		
		A	B	C	D	E	F	G	Clase A	Clase B			I	II	III
As	mg/kg	<b>8.314</b>	<b>11.32</b>	<b>12.09</b>	<b>24.06</b>	<b>9.587</b>	<b>11.72</b>	<b>7.394</b>	15	20	5	41	0.1	0.7	2
Cd	mg/kg	<b>2.189</b>	<b>2.723</b>	<b>3.489</b>	<b>4.675</b>	<b>2.485</b>	<b>3.181</b>	<b>2.767</b>	2	8	1	39	0.7	1	2
Cu	mg/kg	<b>77.71</b>	<b>63.76</b>	<b>63.02</b>	<b>274.8</b>	<b>128.8</b>	<b>95.88</b>	<b>118.9</b>	100	1000	30	---	70	150	300
Cr	mg/kg	56.92	43.96	<b>180.0</b>	<b>85.96</b>	39.46	30.95	42.89	120	600	---	1200	70	70	250
Hg	mg/kg	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	1	4	---	17	0.4	0.7	1.5
Ni	mg/kg	<b>11.64</b>	<b>11.14</b>	<b>9.429</b>	<b>26.28</b>	<b>7.454</b>	<b>10.56</b>	<b>9.826</b>	20	80	5	420	25	60	90
Pb	mg/kg	<b>65.82</b>	<b>66.34</b>	<b>77.07</b>	<b>285.6</b>	<b>90.84</b>	<b>48.01</b>	<b>52.68</b>	100	300	6	300	45	120	150
Zn	mg/kg	<b>244.69</b>	<b>318.71</b>	<b>415.60</b>	<b>1028.03</b>	<b>463.94</b>	<b>340.02</b>	<b>265.55</b>	200	2000	90	---	200	500	500
N	%	---	<b>0.43</b>	---	0.51	---	---	<b>0.36</b>	≥ 0.5		---	---	3	2	1
C	%	---	<b>3.36</b>	---	<b>3.84</b>	---	---	<b>2.40</b>	---	---	---	≥ 15	> 10		
C.E.	dS/m	---	5.12	---	7.97	---	---	<b>10.01</b>	3	8	---	---	0.5 - 4	4 - 8	8 - 12
CIC	meq/100g	---	<b>18.00</b>	---	<b>13.76</b>	---	---	<b>10.08</b>	---	---	---	≥ 30	---	---	---
C/N	Ad.	---	<b>7.81</b>	---	<b>7.53</b>	---	---	<b>6.67</b>	25	30	12	---	15 - 20	20 - 25	
P <sub>d</sub>	%	---	<b>5.61E-5</b>	---	<b>4.81E-5</b>	---	---	<b>6.53E-5</b>	---	---	> 0.10	---	1 - 3		
K <sub>d</sub>	%	---	<b>0.0026</b>	---	<b>0.0024</b>	---	---	<b>0.0018</b>	---	---	> 0.25	---	1 - 3		
pH	Unidad de pH	---	7.81	---	7.68	---	---	7.38	5.0 - 8.5		6.5 - 8.0	4 - 9	6.7 - 8.5		
M.O. <sup>e</sup>	%	---	<b>11.12</b>	---	<b>11.66</b>	---	---	<b>7.53</b>	≥ 20		> 15	≥ 30	≥ 50	30 - 50	20 - 30
D.A.	g/cm <sup>3</sup>	---	<b>0.92</b>	---	<b>1.35</b>	---	---	<b>1.48</b>	0.7		---	---	---	---	---
T.P. <sup>f</sup>	mm	<b>6.3</b>	<b>6.3</b>	<b>6.3</b>	<b>6.3</b>	<b>6.3</b>	<b>6.3</b>	<b>6.3</b>	16		---	---	10	10 - 30	
Arena	%	---	81.00	---	77.00	---	---	75.00	---	---	---	---	---	---	---
Limo	%	---	11.00	---	13.00	---	---	17.00	---	---	---	---	---	---	---
Arcilla	%	---	8.00	---	10.00	---	---	8.00	---	---	---	---	---	---	---

Parámetro	Unidad	Punto							NCh 2880. Of 2004. <sup>a</sup>		NTEA-006- SMA-RS- 2006 <sup>b</sup>	NTC 5167 <sup>c</sup>	NMX-AA-180- SCFI-2018 <sup>d</sup>			
		A	B	C	D	E	F	G	Clase A	Clase B			I	II	III	
Tx <sup>g</sup>	Ad.	---	A.Fr.	---	Fr.A.	---	---	Fr.A.	---	---	---	---	---	---	---	---

*Nota.* Los valores resaltados en negrita incumplen alguno de los criterios. <sup>a</sup> Requisitos del producto compostado según la Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004. <sup>b</sup> Requisitos de los mejoradores de suelos según la Norma Mexicana Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006. <sup>c</sup> Requisitos específicos para el abono orgánico según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (Segunda Actualización). <sup>d</sup> Especificaciones por tipo de composta según Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018. <sup>e</sup> Calculado a partir del carbono orgánico total (C) según la ecuación 6. <sup>f</sup> Tamaño de partícula. <sup>g</sup> Para la clase textural, tomar en cuenta lo siguiente: A = Arena, A.Fr. = Arena Franca, Fr.A. = Franco Arenoso, Fr. = Franco, Fr.L. = Franco Limoso, L = Limoso, Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso, Fr.Ar. = Franco Arcilloso, Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso, Ar.A. = Arcillo Arenoso, Ar.L. = Arcillo Limoso, Ar. = Arcilloso.

#### **4.1.3.2.2 Material de construcción como subrasante o relleno**

Dado que el contenido de materia orgánica en la fracción fina se encontró en un rango de 7.53 % a 11.66 % (ver Tabla 41), su uso potencial como material de construcción como subrasante o relleno se dio por descartado ya que excedió el máximo permisible (5 %) de acuerdo a las normativas emitidas por diferentes entidades reguladoras internacionales, tales como el Departamento de Transporte de Indiana (INDOT), el Departamento de Transporte y Desarrollo de Luisiana (DOTD), el Departamento de Transporte de Texas (TxDOT), el Departamento de Transporte de California (Caltrans), el Departamento de Transporte y Carreteras Principales de Australia, el Ministerio de Transporte por Carretera y Autopistas de la India, y el Departamento de Transporte de Reino Unido.

## **4.2 Análisis y discusión**

### **4.2.1 Condiciones y composición de residuos enterrados**

#### **4.2.1.1 Espesor de capa de cobertura y densidad estabilizada de residuos**

De lo observado en la Tabla 21, el espesor promedio de la capa de cobertura de arcilla compactada en el área de estudio fue de 1.29 m. Al respecto, este valor es superior al mínimo recomendado (0.60 m para cobertura final) por las guías del Ministerio del Ambiente referentes a la operación y cierre de rellenos sanitarios (MINAM, 2011), lo cual sugiere un sobreuso de material de cobertura durante el tiempo de operación de la celda seleccionada como área de estudio, tanto para uso diario como para el cierre de celdas.

A su vez, este espesor sugiere también un uso más frecuente de maquinaria pesada, lo cual impactó directamente en la densidad estabilizada de los residuos enterrados. Según la Tabla 22, esta alcanzó un valor promedio de 1.34 Tn/m<sup>3</sup>, superior al rango recomendado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del

Ambiente (CEPIS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), el cual oscila entre 0.60 y 0.90 Tn/m<sup>3</sup>.

Los valores antes mencionados concuerdan con las características iniciales de los residuos sólidos encontrados en las excavaciones, los cuales presentaron una consistencia cohesiva, debido a su alto grado de compactación.

#### **4.2.1.2 Composición de residuos sólidos enterrados**

La composición de los residuos sólidos enterrados en el área de estudio se presentó en la Tabla 27 y Figura 39. Al respecto, el mayor componente presente en estos residuos fue la fracción fina (< 6.3 mm), con una contribución de  $26.67 \pm 1.43$  % al total de residuos enterrados, seguido por las siguientes fracciones en orden descendente: rocas ( $19.33 \pm 2.81$  %), residuales ( $17.89 \pm 2.45$  %), plástico ( $17.33 \pm 3.96$  %), textiles ( $5.23 \pm 0.94$  %), papel y cartón ( $2.56 \pm 0.63$  %), metales ( $2.44 \pm 0.55$  %), vidrios y cerámicos ( $2.39 \pm 0.53$  %), madera ( $2.31 \pm 0.52$  %), pañales ( $2.04 \pm 0.54$  %), materia orgánica ( $0.95 \pm 0.13$  %), caucho ( $0.67 \pm 0.09$  %), y otros (PVC y tecnopor) ( $0.20 \pm 0.05$  %). No obstante, si evaluamos la composición de los residuos enterrados teniendo en consideración la fracción combustible como una unidad, esta alcanzó un contenido porcentual de  $31.09 \pm 3.61$  %, mayor aún al alcanzado por la fracción fina (< 6.3 mm).

Cabe mencionar que, la cantidad porcentual de fracción combustible ( $31.09 \pm 3.61$  %) presente en el área de estudio se encontró por encima del límite superior del rango típico (20 % - 30 %) expresado por Zhou et al. (2015), siendo esta una cantidad favorable en miras a la posible ejecución de un proyecto de LFM. Por otra parte, el valor de  $26.67 \pm 1.43$  % correspondiente a la cantidad porcentual de la fracción fina (< 6.3 mm) se encontró por debajo de la proporción de 60 % encontrada por Jain et al. (2005), a pesar de emplear el mismo diámetro de partícula e investigar celdas de residuos de menor antigüedad (entre 3 a 8 años). De igual manera, este valor se encontró por debajo de los reportados por

diversos autores (Prechthai et al., 2008; Quaghebeur et al., 2013; Wolfsberger et al., 2014; Jani et al., 2016; Mönkäre et al., 2016; entre otros). No obstante, estos autores emplearon diámetros de partícula mayores, entre 10 mm a 50 mm. Al respecto, se debe tener en cuenta que, en el presente estudio se contó con una cantidad porcentual de 'residuales' de  $17.89 \pm 2.45 \%$ , los cuales estuvieron compuestos por restos de residuos (plásticos, vidrios, cerámicos, etc.) que no se pudieron clasificar mediante inspección visual; y que, en su mayoría, tuvieron un tamaño de partícula entre 6.3 mm a 20 mm. Esta fracción fue separada y clasificada como tal porque difirió significativamente en apariencia tanto de la fracción fina como de las demás fracciones de residuos; sin embargo, su composición individual no pudo ser determinada pues necesitaba de métodos más avanzados como la densimetría por aire o la Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIR, por sus siglas en inglés). Dicho esto, en caso se hubiese establecido un diámetro de partícula de 20 mm para el presente estudio, la fracción fina hubiese alcanzado una cantidad porcentual hipotética de  $44.56 \pm 2.86 \%$ , encontrándose así dentro del rango típico reportado. De cualquier modo, es importante precisar que, la composición de los residuos es variable entre cada infraestructura de disposición final, siendo esta influenciada por factores tales como su origen, edad, estado de degradación, tipo y composición de residuos dispuestos, entre otros (Jain et al., 2014).

Por otro lado, respecto al gran contenido de rocas ( $19.33 \pm 2.81 \%$ ) encontrado en las muestras de residuos, este se debió principalmente al material de cobertura empleado para el funcionamiento del relleno sanitario. De igual manera, el bajo contenido de materia orgánica ( $0.95 \pm 0.13 \%$ ) sugiere que esta matriz fue parcialmente descompuesta durante su tiempo de almacenamiento (9 - 10 años) y clasificada dentro de la fracción fina (< 6.3 mm). Esto concuerda con estudios previos como el realizado por Quaghebeur et al. (2013) en el relleno sanitario REMO en Houthalen, Bélgica; el cual confirmó la degradación de la fracción orgánica al interior de dicho relleno; y, de hecho, confirmó la inexistencia de esta fracción en los residuos enterrados tras un periodo de almacenamiento de 15 años.

Finalmente, es preciso añadir que, se pudo comprobar la homogeneidad de la composición de los residuos enterrados en el área de estudio, mediante el cálculo de los coeficientes de variación de las cantidades porcentuales de las fracciones individuales de residuos (ver Tablas 27, 29 y 32); los cuales, para todos los casos, fueron menores a 30 %. Esto confirmó la premisa inicial respecto al área de estudio, la cual consideró la inexistencia de variación espacial del tipo y composición de residuos dispuestos, debido al corto tiempo de operación de la celda seleccionada y al modelo conceptual desarrollado.

#### **4.2.2 Características de la fracción combustible**

La composición de la fracción combustible presente en los residuos enterrados en el área de estudio se presentó en la Tabla 32 y Figura 40. Al respecto, el mayor componente fueron los residuos plásticos, con una contribución de  $55.18 \pm 6.47$  % al total de residuos combustibles, seguido por las siguientes subfracciones en orden descendente: textiles ( $17.27 \pm 4.50$  %), papel y cartón ( $17.89 \pm 2.45$  %), madera ( $7.42 \pm 1.54$  %), pañales ( $6.57 \pm 1.70$  %), materia orgánica ( $3.09 \pm 0.43$  %), y caucho ( $2.19 \pm 0.47$  %).

##### **4.2.2.1 Propiedades fisicoquímicas y código de clase**

En la Tabla 42 se presenta un resumen de las propiedades fisicoquímicas más relevantes de la fracción combustible encontrada en el área de estudio, en comparación con los valores reportados en otros estudios recogidos en la literatura, los cuales se basaron en la producción de CSR y/o CDR a partir de residuos sólidos, sea a través de proyectos de LFM o directamente a partir de la segregación de estos residuos en la fuente de generación o posterior a la recolección; es decir, a través de la minería urbana.

**Tabla 42**

*Comparativo de las propiedades fisicoquímicas de los CSR del área de estudio con valores reportados en la literatura*

Contenido de humedad (%)	PCI (MJ/kg)	Cl (% b.s.)	Hg (mg/MJ)	Periodo de operación (Año)	Referencia
4.41 <sup>a</sup>	14.41 <sup>b</sup>	0.3829 <sup>c</sup>	0.026 <sup>d</sup>	2009 - 2010	Presente estudio
N.D. <sup>e</sup>	18.00	1.8000	0.043	1980 - 2000	Quaghebeur et al. (2013)
N.D.	13.30	0.0571	0.002	2004 - 2013	Passamani et al. (2016)
29.02	15.77	0.0600	0.006	N.A. <sup>f</sup>	Ranieri et al. (2017)
19.55	16.55	1.5000	N.D.	1988 - 2002	Rotheut & Quicker (2017)
N.D.	16.00	0.5850	N.D.	N.A.	Sakri et al. (2021)

*Nota.* <sup>a, b, c</sup> Se tomó la media aritmética. <sup>d</sup> Se tomó la mediana, solo para fines referenciales comparativos. <sup>e</sup> N.D.: No determinado. <sup>f</sup> N.A.: No aplica. Esto se da para aquellos estudios en los cuales se produjeron CSR a partir de residuos 'frescos'; es decir, que no fueron obtenidos por procesos de LFM, sino a través de minería urbana.

De acuerdo a lo descrito en la Tabla 42, los valores representativos de las propiedades fisicoquímicas de los CSR encontrados en el área de estudio se encontraron dentro de los rangos habituales descritos en la literatura. Es importante resaltar que, el contenido de humedad (%) se encontró muy por debajo de este rango. Esto se debió principalmente al proceso de secado (10 - 11 días) y a las altas temperaturas presentadas durante el periodo de la ejecución del presente estudio (ver Tabla 8). Al respecto, valores bajos de contenido de humedad en CSR son altamente recomendables; pues evitan consecuencias contraproducentes como el incremento del volumen de los gases de combustión producidos en la instalación y la reducción de la temperatura de combustión del proceso (Demirbas, 2004; WRAP, 2012).

Por otro lado, y en referencia al código de clase de los CSR obtenidos a partir de la fracción combustible, este tomó una nomenclatura final de PCI 4; Cl 2; Hg 2. Cabe indicar que, el presente código de clase solo determina la aceptación y calificación de la fracción combustible presente en el relleno sanitario como CSR en base al estándar europeo EN 15359, mas no su uso específico en alguna industria. Para tal fin, se optó por comparar las

propiedades fisicoquímicas de los CSR con normativas específicas para el uso de combustibles alternativos en actividades productivas.

#### **4.2.2.2 Determinación de uso potencial**

##### **4.2.2.2.1 Cumplimiento normativo**

El uso potencial de los CSR fue determinado en base a la compatibilidad de sus propiedades fisicoquímicas con las normas internacionales para uso de combustibles sustitutos en instalaciones industriales. Este comparativo fue presentado en las Tablas 38 y 39; y, a continuación se describe un breve resumen de dicho resultado.

- *Criterios EURITS para coincineración en hornos de cemento (EC, 2003)*

De acuerdo a la Tabla 38, las propiedades fisicoquímicas de los CSR obtenidos a partir de la fracción combustible presente en los residuos enterrados en el relleno sanitario se encontraron dentro de los límites máximos permitidos según los Criterios de EURITS para la coincineración de residuos en hornos de cemento, a excepción del parámetro de PCI en los puntos B y G (valores por debajo de 15) y un valor puntual atípico de Manganeseo (Mn) de 460 mg/kg en el punto G. Al respecto, es preciso mencionar que, la industria cementera considera que estos límites son muy restrictivos, en especial con referencia al valor mínimo del PCI (EC, 2003); por tal motivo, no se descarta en su totalidad la aceptación de estos CSR para su uso en la industria cementera. De hecho, el PCI de estos CSR podría ser mejorado mediante la mezcla de estos con residuos 'frescos' de alto poder calorífico, como el caucho, contribuyendo de manera efectiva a la valorización de estos últimos en el marco del Régimen Especial de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) aprobado por el Ministerio del Ambiente mediante Decreto Supremo N° 024-2021-MINAM.

- *Ordenanza de Incineración de Residuos (AVV) (BMLFUW, 2010)*

De acuerdo a la Tabla 39, las propiedades fisicoquímicas de los CSR obtenidos a partir de la fracción combustible presente en los residuos enterrados en el relleno sanitario se encontraron dentro de los valores límite para la coincineración de combustibles sustitutos producidos a partir de residuos sólidos según la Ordenanza de Incineración de Residuos (AVV). En ese sentido, se acepta su coincineración en plantas cementeras (a las partes de las instalaciones de producción de cemento en las que se quema el clínker de cemento, tales como el horno rotatorio, el precalentador de ciclón o de parrilla y el calcinador), centrales eléctricas (aplicable a las calderas que utilizan hulla o lignito y que se utilizan para generar electricidad y calefacción urbana, con un TRF máximo admisible de 15 %), y otras plantas de coincineración.

- *RAL-GZ 724 Quality Assurance of Solid Recovered Fuels (RAL, 2012)*

De acuerdo a la Tabla 39, las propiedades fisicoquímicas de los CSR obtenidos a partir de la fracción combustible presente en los residuos enterrados en el relleno sanitario se encontraron dentro de los valores límite para la coincineración de combustibles sólidos recuperados según la norma RAL-GZ 724 Quality Assurance of Solid Recovered Fuels. En ese sentido, se acepta su uso como combustible alternativo en plantas de coincineración, como en plantas de cemento, o centrales térmicas de carbón. Asimismo, y dado que cumplen los valores límite de esta norma en específico, los CSR obtenidos pueden ser denominados como SBS®.

- *Decreto Ministerial Nro. 22 (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2013)*

De acuerdo a la Tabla 38, las propiedades fisicoquímicas de los CSR obtenidos a partir de la fracción combustible presente en los residuos enterrados en el relleno sanitario cumplieron los criterios de valores límite para fin de residuos (End-of-Waste) para combustibles sólidos secundarios (CSS) según Decreto Ministerial Nro. 22 (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del

Mare, 2013). No obstante, y considerando que, para fines de este reglamento, solo podrá dejar de ser considerado residuo aquel CSS con PCI y CI en clases 1, 2, 3; y Hg, en clases 1 y 2, y sus combinaciones asociadas, los CSR obtenidos a partir de la fracción combustible presente en el área de estudio no podrán ser considerados en su totalidad como productos finales (o CSS - combustibles), principalmente debido a su PCI (Clase 4 según estándar EN 15359 en los puntos B y G). Sin perjuicio de lo anterior, y de acuerdo a lo descrito en ítems anteriores, esta propiedad podría ser mejorada mediante la mezcla de los CSR con residuos 'frescos' de alto poder calorífico, como el caucho; por lo cual, no se descarta la posibilidad de clasificar finalmente estos CSR como productos.

#### **4.2.2.2 Uso de la fracción combustible**

De acuerdo a los comparativos anteriores, se concluye que, los CSR obtenidos a partir de la fracción combustible presente en los residuos enterrados en el área de estudio, los cuales representan un  $31.09 \pm 3.61$  % del contenido total, pueden ser utilizados como combustibles sólidos alternativos en procesos de coincineración en plantas de producción de cemento, centrales eléctricas, entre otras plantas de coincineración. Al respecto, se elige como uso más adecuado la coincineración en plantas cementeras, dadas las múltiples ventajas que este conlleva (ver ítem 'Usos de los CSR'). Por otro lado, y en referencia al valor del PCI de estos CSR, es importante precisar que este parámetro puede ser mejorado mediante la adición de residuos de alto potencial calórico, como es el caso del caucho derivado de neumáticos fuera de uso, lo cual contribuiría de manera efectiva a alcanzar las metas de valorización establecidas en el marco del Régimen Especial de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) aprobado por el Ministerio del Ambiente mediante Decreto Supremo N° 024-2021-MINAM.

Finalmente, es importante añadir que, para definir los criterios específicos de uso de estos CSR en la industria cementera, es necesario llevar a cabo estudios adicionales

en la misma instalación donde estos combustibles serían coincinerados, con la finalidad de determinar parámetros específicos de operación tales como la dosis máxima de sustitución, el tamaño máximo de partícula, así como el TRF más idóneo para la planta, los cuales no afecten la calidad final del producto clínker ni alteren las emisiones atmosféricas. Ahora bien, en referencia al tamaño de partícula, durante el presente estudio se alcanzó un diámetro equivalente de partícula en el rango de 6.77 mm a 14.50 mm (ver Tabla 33). Al respecto, estos valores cumplen ampliamente con tamaños máximos de partícula establecidos en plantas de producción de cemento alrededor del mundo, como el caso de las plantas cementeras españolas en Asturias (100 mm) (Garcés, 2014) y Alicante (50 mm) (RETEMA, 2021), así como los requerimientos mínimos establecidos para el ENERFUEL® (4 cm), marca de CSR desarrollada por la empresa CEMEX (Puig, et al., 2012).

#### **4.2.3 Características de la fracción fina (< 6.3 mm)**

##### **4.2.3.1 Determinación de uso potencial**

###### **4.2.3.1.1 Compost**

El uso potencial de la fracción fina fue determinado en base a la compatibilidad de sus propiedades fisicoquímicas con las normas internacionales que establecen los requisitos mínimos para la calidad del compost y los mejoradores de suelos. Estos resultados comparativos se presentaron en la Tabla 41. Al respecto, y en referencia al contenido de metales, los valores reportados en los puntos de monitoreo (A - G) incumplieron, en su totalidad, los requisitos para la producción de los mejoradores de suelos elaborados a partir de residuos orgánicos según la Norma Mexicana Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006; así como las especificaciones por tipo de composta según la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018 de manera parcial (excedencias de Arsénico, Cadmio, Cobre, Cromo, Níquel, Plomo, y Zinc). No obstante, estos valores si cumplieron con los requisitos del producto compostado según la Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004 para compost Clase B: Producto de nivel intermedio de calidad (a excepción

del contenido de Arsénico en el punto D), así como los requisitos específicos para el abono orgánico según la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (Segunda Actualización). Por otro lado, y en referencia al contenido de macronutrientes primarios tales como el Nitrógeno Total (N), Fósforo (P) y Potasio (K) disponible, así como otras propiedades fisicoquímicas de la fracción fina como el contenido de carbono orgánico (C), capacidad de intercambio catiónico (CIC), y contenido de materia orgánica (M.O.), la mayoría de los valores reportados en los puntos de monitoreo B, D, y G, se encontraron fuera de los rangos admisibles según las normas antes mencionadas. Vistos los incumplimientos encontrados, se descarta el uso de la fracción fina (< 6.3 mm) como compost o mejorador de suelo.

Ahora bien, y en referencia a la calidad de esta fracción, de la Tabla 40 se puede observar que, los valores de Cadmio (Cd) reportados en los puntos de monitoreo (A - G), incumplieron, para todos los casos, el ECA-Suelo para uso agrícola. De igual manera, se reportaron valores de Plomo (Pb) en los puntos de monitoreo C, D y E, que excedieron el ECA-Suelo para los usos agrícola y residencial/parques (este último solo en el punto D). Al respecto, es necesario precisar que, las concentraciones de Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) en la fracción fina presentaron valores mayores a los suelos locales de la zona usados como material de cobertura. En la Tabla 43 se presenta la calidad de estos suelos en comparación a los ECA-Suelo. Asimismo, en las Figuras 45 y 46 se presentan las concentraciones de Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) en la fracción fina (< 6.3 mm), en comparación con las concentraciones de estos elementos presentes en los suelos locales de la zona.

**Tabla 43**

*Contenido de metales en los suelos locales en comparación con los ECA-Suelo*

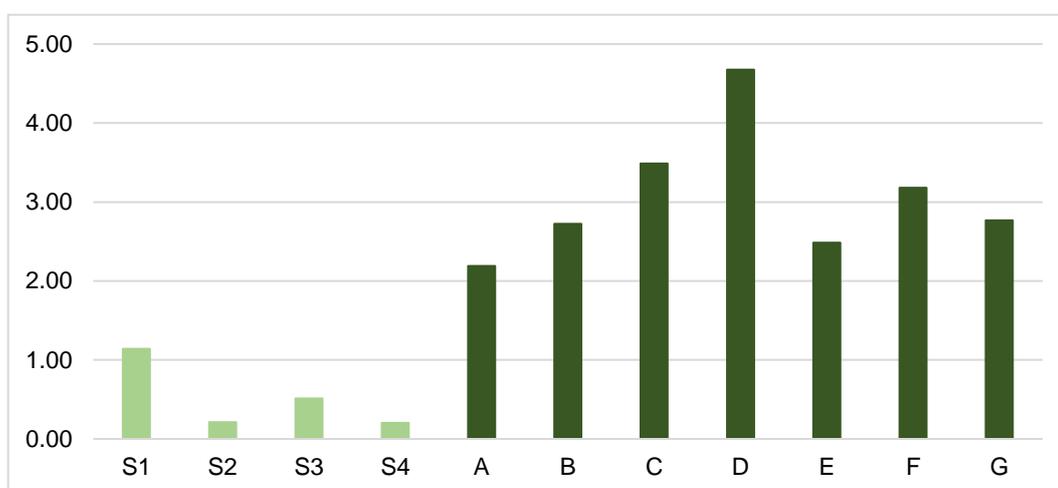
Metal	Concentración (mg/kg)				ECA-Suelo		
	S1	S2	S3	S4	Ag	R/P	Co//Ex
As	16.919	17.204	10.001	24.383	50	50	140
Ba	110.049	73.667	66.454	90.485	750	500	2000
Cd	1.141	0.212	0.513	0.204	1.4	10	22

Metal	Concentración (mg/kg)				ECA-Suelo		
	S1	S2	S3	S4	Ag	R/P	Co//Ex
Cr	13.382	10.127	11.007	8.893	N.A.	400	1000
Hg	0.064	< 0.0348	< 0.0348	< 0.0348	6.6	6.6	24
Pb	25.171	9.012	18.745	10.881	70	140	800

*Nota.* Adaptado de Decreto Supremo N° 011-2017 MINAM Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo, por Ministerio del Ambiente (MINAM), 2017.

**Figura 45**

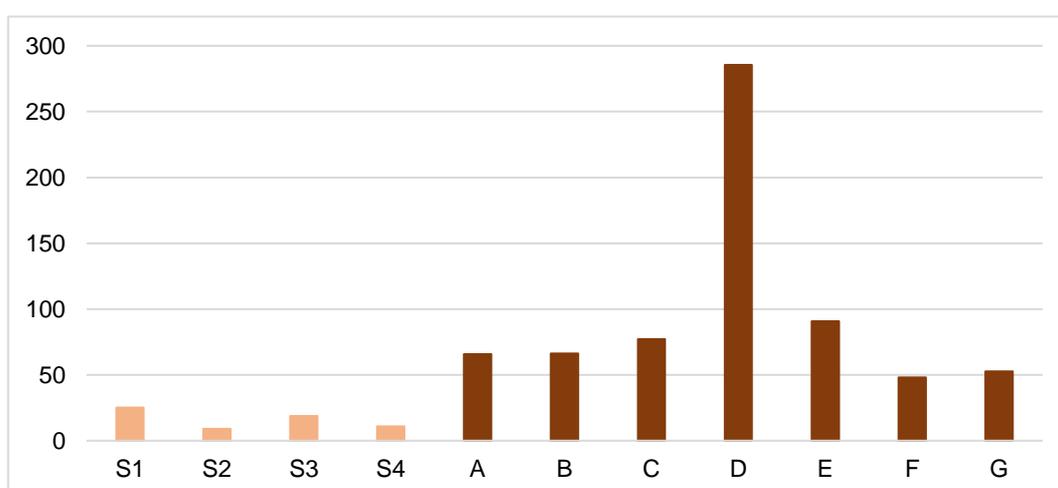
*Contenido de cadmio en la fracción fina y suelos locales*



*Nota.* Las concentraciones de cadmio en suelos locales fueron registradas en monitoreos realizados en 2018.

**Figura 46**

*Contenido de plomo en la fracción fina y suelos locales*



*Nota.* Las concentraciones de plomo en suelos locales fueron registradas en monitoreos realizados en 2018.

De la Tabla 43 se puede apreciar que, los suelos locales de la zona empleados como material de cobertura no exceden los ECA-Suelo vigentes para ningún uso de suelo, lo cual sugiere que el incremento en la concentración de estos metales en la fracción fina, en específico el cadmio y el plomo, responde a su presencia en los residuos sólidos dispuestos en el área de estudio y a los procesos de lixiviación y absorción ocurridos al interior del relleno sanitario. De hecho, elementos como el cadmio y el plomo son comúnmente utilizados como constituyentes para la pigmentación y estabilización de productos plásticos, por lo cual su presencia en los residuos sólidos dispuestos es altamente probable. Por otro lado, se tiene conocimiento que, estudios previos desarrollados en botaderos y rellenos sanitarios peruanos han confirmado el incremento en los niveles de estos metales en suelos circundantes a estas infraestructuras a causa de la lixiviación de residuos sólidos municipales (Rosario, 2020; Barreto & Colque, 2021).

Finalmente, cabe mencionar que, si bien el análisis realizado determinó que la fracción fina no puede ser usada directamente como compost o mejorador de suelo, esto no impide que esta fracción pueda ser usada para fines de revegetación o rehabilitación ambiental para la plantación de especies herbáceas y/o arbustivas. No obstante, para comprobar su aptitud en estos usos, se requerirán estudios adicionales con pruebas ecotoxicológicas.

#### **4.2.3.1.2 *Material de construcción como subrasante o relleno***

Este uso se da por descartado dado el alto contenido de materia orgánica en la fracción fina, con valores en el rango de 7.53 % a 11.66 %, el cual se encuentra por encima de lo máximo permitido por diferentes estándares internacionales.

#### **4.2.3.1.3 Otras alternativas de uso**

Dado que la fracción fina (< 6.3 mm) aún cumple con los Estándares de Calidad Ambiental para Suelo (ECA-Suelo) para uso de suelo Comercial/Industrial/Extractivo, esta podría ser empleada para cualquier actividad que cumpla dicho propósito. De hecho, podría mantener su uso como material de cobertura en el mismo emplazamiento para la disposición final de nuevos residuos sólidos, evitando así los gastos de la explotación de nuevas canteras de arcilla. Por otro lado, es importante considerar que, la alta cantidad porcentual de fracción combustible ( $31.09 \pm 3.61$  %) encontrada en el área de estudio presupone desde ya una recuperación de volumen, área, y espacio aéreo disponible para nuevos usos; los cuales, podrían ser 'reclamados' y habilitados, previa nivelación y conformación con esta fracción fina o 'suelo' apto para los propósitos antes mencionados, para nuevas actividades como el establecimiento y venta de lotizaciones industriales.

## Conclusiones

La composición de los residuos sólidos enterrados en el área de estudio tuvo como componente principal a la fracción combustible, la cual alcanzó una cantidad porcentual de  $31.09 \pm 3.61$  % respecto al contenido total de residuos; seguida por la fracción fina ( $< 6.3$  mm), con una cantidad porcentual de  $26.67 \pm 1.43$  %. Por otro lado, se encontraron cantidades altas de rocas ( $19.33 \pm 2.81$  %) y bajas de materia orgánica ( $19.33 \pm 2.81$  %). Al respecto, el alto contenido de rocas se debió principalmente al material de cobertura empleado para el funcionamiento del relleno sanitario; mientras que, el bajo contenido de materia orgánica sugirió que esta fue parcialmente descompuesta durante su tiempo de almacenamiento (9 - 10 años) y clasificada dentro de la fracción fina ( $< 6.3$  mm).

La fracción combustible representó un  $31.09 \pm 3.61$  % del total de residuos enterrados, siendo esta una cantidad favorable en miras a la posible ejecución de un proyecto de LFM. Esta fracción estuvo constituida, en su mayoría, por plásticos ( $55.18 \pm 6.47$  %), textiles ( $17.27 \pm 4.50$  %), y papel y cartón ( $17.89 \pm 2.45$  %). Respecto a sus características fisicoquímicas, presentó un Poder Calorífico Inferior (PCI) en el rango de 13.71 a 15.69 MJ/kg, un contenido de cloro (Cl) en el rango de 0.3601 a 0.4141 %, y un contenido de mercurio (Hg) en relación al PCI de 0.021 a 0.027 mg/MJ, lo cual permitió clasificarlo como Combustible Sólido Recuperado (CSR) de acuerdo al estándar europeo EN 15359, asignándole un código de clase PCI 4: Cl 2; Hg 2. Para determinar su uso potencial, se realizó un comparativo de sus propiedades fisicoquímicas con los valores límite fijados por diversas normas internacionales para el uso de combustibles sólidos alternativos, tales como la norma RAL-GZ 724 (Alemania), el Decreto Ministerial Nro. 22 (Italia), la Ordenanza de Incineración de Residuos (Austria), y los Criterios de EURITS para la Coincineración de Residuos en Hornos de Cemento, comprobándose que pueden ser utilizados como combustibles sólidos alternativos en procesos de coincineración en plantas de producción de cemento, centrales eléctricas, entre otras plantas de coincineración. Al

respecto, se eligió como uso más adecuado la coincineración en plantas cementeras, dadas sus múltiples ventajas económicas y ambientales. Es necesario precisar que, el PCI de los CSR obtenidos estuvo fuera del rango permitido por los Criterios EURITS y el Decreto Ministerial Nro. 22. Al respecto, hay que tener en consideración que, dicho parámetro tiene un carácter netamente económico, y podría ser mejorado mediante la adición de residuos 'frescos' de alto potencial calórico, como es el caso del caucho derivado de neumáticos fuera de uso.

La fracción fina representó un  $26.67 \pm 1.43$  % del total de residuos enterrados. Para definir su uso potencial, se realizó un comparativo de sus propiedades fisicoquímicas (contenido de metales, pH, conductividad eléctrica, Capacidad de Intercambio Catiónico, Nitrógeno total, Carbono Orgánico Total, entre otros) con los requisitos mínimos aceptables para la producción de compost según diversas normas internacionales como la Norma Chilena Oficial NCh 2880. Of 2004, la Norma Mexicana Técnica Estatal Ambiental NTEA-006-SMA-RS-2006, la Norma Técnica Colombiana NTC 5167, y la Norma Mexicana NMX-AA-180-SCFI-2018. Este comparativo determinó que, los finos no pueden ser usados como compost o abono, dadas las excedencias en parámetros como arsénico, cadmio, cobre, plomo; así como a contenidos insuficientes de macronutrientes primarios, carbono orgánico y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Por otro lado, el contenido de materia orgánica presente en la fracción fina (7.53 % - 11.66 %) descartó también su uso como material de construcción como subrasante o relleno, ya que excede el máximo permisible (5 %) establecido por diversas autoridades internacionales reguladoras de transporte. No obstante, y dado que la fracción fina cumplió con los ECA-Suelos para uso de suelo Comercial/Industrial/Extractivo, se propone mantener su uso como material de cobertura en el mismo emplazamiento para la disposición final de nuevos residuos sólidos, evitando así los gastos de la explotación de nuevas canteras de arcilla.

Finalmente, la alta cantidad de fracción combustible ( $31.09 \pm 3.61$  %) encontrada en los residuos excavados, sumada a sus características antes descritas, demuestran que, la minería de rellenos sanitarios (LFM) y la posterior producción de CSR para uso en la industria cementera representa una opción para el postcierre de los rellenos sanitarios peruanos, así como un método para extender su vida útil, y una opción adicional para la valorización de residuos no biodegradables. Por otro lado, dicha cantidad presupone una recuperación de volumen, área, y espacio aéreo disponible para nuevos usos; los cuales, podrían ser 'reclamados' y habilitados, previa nivelación y conformación de terreno con la fracción fina, abriendo el camino a nuevas actividades productivas y de servicios como el establecimiento y venta de lotizaciones industriales.

## Recomendaciones

Con la finalidad de definir los criterios específicos de uso de los CSR obtenidos en el presente estudio en la industria cementera, se recomienda llevar a cabo estudios adicionales en instalaciones industriales puntuales, para así determinar parámetros operacionales como la dosis máxima de sustitución y el TRF óptimo, de tal manera que no afecten la calidad final del clínker ni alteren las emisiones atmosféricas.

Se recomienda llevar a cabo estudios adicionales con pruebas ecotoxicológicas en la fracción fina ( $< 6.3$  mm) para evaluar su uso potencial en actividades de revegetación y rehabilitación ambiental.

Se recomienda llevar a cabo estudios adicionales con métodos avanzados de clasificación como la Espectroscopía de Infrarrojo Cercano (NIR, por sus siglas en inglés) en la fracción residual (compuesta por restos de residuos que no se pudieron clasificar mediante inspección visual, y con un tamaño de partícula  $6.3 \text{ mm} < \varnothing < 20 \text{ mm}$ ), con la finalidad de determinar su composición y orientar los ensayos analíticos en pro de la evaluación de su uso potencial.

Dado que el presente estudio se centró en el análisis y caracterización de la fracción fina ( $< 6.3$  mm) y la fracción combustible, se recomienda realizar estudios de caracterización y análisis de alternativas de uso de la fracción inerte, constituida principalmente por los metales, vidrios y cerámicos.

## Referencias bibliográficas

- Abu-Zeid, N., & Santarato, G. (2004). On the correspondence between resistivity and texture of loose sediments, saturated with salt water. *Near Surface Geophysics*, 2(3), 145–150. doi: 10.3997/1873-0604.2004012
- Agencia Pública de Residuos de Flandes (OVAM). (2006). *Decreto del 27 de octubre de 2006. Por lo cual se expiden medidas relativas sobre la rehabilitación y la protección de los suelos.*
- Andersen, M. S. (2007). An introductory note on the environmental economics of the circular economy. *Sustainability Science*, 2(1), 133–140. doi:10.1007/s11625-006-0013-6
- Aranda, A., López-Sabirón, A. M., Ferreira, G., & Llera, E. (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 242–260. doi: 10.1016/j.rser.2013.02.024
- Arroyo, J. (2016). Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, 16(1), 20–29. doi: 10.17163/ings.n16.2016.03
- ATRASOL (2018). *SWOT Analysis of landfills investigation methods* (Enhanced Landfill Inventory Framework Deliverable 3.1). RAWFILL. URL: <https://bit.ly/3BLi4Xk>
- Atuanya, E. I., Purohit, H. J., & Chakrabarti, T. (2000). Anaerobic and aerobic biodegradation of chlorophenols using UASB and ASG bioreactors. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 16(1), 95–98. doi:10.1023/a:1008957229070

- Ayala , E., Aparicio, A., & García, C. (2016). Revisión del cálculo de poder calorífico y punto de rocío del gas natural, y de la estimación de sus incertidumbres. *Revista ION*, 29(2), 87–99. doi: 10.18273/revion.v29n2-2016007
- BAFU (Swiss Federal Office for the Environment) (2009). *From a waste to a resource policy: on the way to a circular economy*. URL: <https://bit.ly/3hEmd8K>
- Barreto, R. & Colque, W. (2021). *Evaluación de la concentración de cromo VI, cadmio y plomo presentes en suelos agrícolas a causa del lixiviado proveniente del botadero municipal de la provincia de Espinar - Cusco 2021*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/11361>
- Bhatnagar, A., Kaczala, F., Burlakovs, J., Kriipsalu, M., Hogland, M., & Hogland, W. (2017). Hunting for valuables from landfills and assessing their market opportunities: A case study with Kudjape landfill in Estonia. *Waste Management & Research*, 35(6), 627–635. doi:10.1177/0734242x17697816
- Blott, S. J., & Pye, K. (2012). Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: Review and recommended procedures. *Sedimentology*, 59(7), 2071–2096. doi: 10.1111/j.1365-3091.2012.01335.x
- Bosmans, A., Vanderreydt, I., Geysen, D., & Helsen, L. (2013). The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. *Journal of Cleaner Production*, 55, 10–23. doi:10.1016/j.jclepro.2012.05.032
- Briggs, M. A., Campbell, S., Nolan, J., Walvoord, M. A., Ntarlagiannis, D., Day-Lewis, F. D., & Lane, J. W. (2016). *Surface Geophysical Methods for Characterising Frozen*

Ground in Transitional Permafrost Landscapes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(1), 52–65. doi: 10.1002/ppp.1893

Bryden, G. (2000). Factors influencing the feasibility of wood products landfill waste recovery for beneficial re-use. En *Proceedings of the 2000 TAAPI International Environmental Conference & Exhibit* (pp. 527–535). TAPPI Press

BSI (1990). *BS 1377. Methods of test for soils for civil engineering purposes - Part 2: Classification tests and determination of geotechnical properties.*

Buccella, M., Maisto, E., Perillo, G., Solino, G., & Zippo, A. (2018). Landfill mining intervention on municipal solid waste sites. En P. J. Casares, G. Passerini, & G. Perillo (Eds.), *Environmental Impact IV – WIT Transactions on Ecology and the Environment* (pp. 3–11). WIT Press. doi: 10.2495/EID180011

Cámara Argentina de Comercio y Servicios (CAC) (2017). *Informe sobre Economía Circular*. URL: <https://bit.ly/3WbtuMa>

Caprile, M. (2015, Noviembre). *Impacto Climático del uso de suelos destinados a relleno sanitario* [Presentación de poster]. IV Encuentro Argentino de Ciclo de Vida y III Encuentro de la Red Argentina de Huella Hídrica – ENARCIV 2015, Córdoba, Argentina

Caterina, D., Isunza, I., Inauen, C., Watlet, A., Dashwood, B., De Rijdt, R., Dumont, G., Chambers, J., & Nguyen, F. (2019). Contribution of geophysical methods to the study of old landfill: A case study in Onoz (Belgium). En R. Cossu, P. He, P. Kjeldsen, Y. Matsufuji, & R. Stegmann (Eds.), *Sardinia 2019 – 17th International Waste Management and Landfill Symposium Proceedings* (p. 15). CISA, Cagliari.

- CEMBUREAU (2016). *Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU*. ECOFYS. URL: [https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Ecofys\\_Report\\_Market\\_Opportunities\\_Coprocessing\\_20160501.pdf](https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/09/Ecofys_Report_Market_Opportunities_Coprocessing_20160501.pdf)
- Chen, D., Guan, Z., & Liu, G. et al. (2010). Recycling combustibles from aged municipal solid wastes (MSW) to improve fresh MSW incineration in Shanghai: Investigation of necessity and feasibility. *Front. Environ. Sci. Eng. China*, 4, 235–243. doi: 10.1007/s11783-010-0016-5
- Choi, Y.-S., Han, S., Choi, H.-S., & Kim, S.-J. (2012). Characterization of Korean solid recovered fuels (SRFs): an analysis and comparison of SRFs. *Waste Management & Research*, 30(4), 442–449. doi:10.1177/0734242x12441239
- Chongo, M., Christiansen, A. V., Fiandaca, G., Nyambe, I. A., Larsen, F., & Bauer-Gottwein, P. (2015). Mapping localised freshwater anomalies in the brackish paleo-lake sediments of the Machile–Zambezi Basin with transient electromagnetic sounding, geoelectrical imaging and induced polarisation. *Journal of Applied Geophysics*, 123, 81–92. doi: 10.1016/j.jappgeo.2015.10.002
- Çınar, H., Altundaş, S., Ersoy, E., Bak, K., & Bayrak, N. (2016). Application of two geophysical methods to characterize a former waste disposal site of the Trabzon-Moloz district in Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 75(1). doi: 10.1007/s12665-015-4839-z
- COCOON (2019). *Action Plan Flanders*. URL: <https://bit.ly/3j4sVFi>
- Cohen, L., & Speitel Jr., G. E. (2001). Kinetics of aerobic cometabolism of chlorinated solvents. *Biodegradation*, 12(2), 105–126. doi:10.1023/a:1012075322466

Congreso de la República del Perú. (2016). *Decreto Legislativo 1278 de 2016. Por lo cual expide la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos.*

Consejo Europeo. (1999). *Directiva 1999/31/CE del Consejo del 26 de abril de 1999. Por la cual se establecen Directivas relativas al vertido de residuos.*

Consejo Europeo. (2008). *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 19 de noviembre de 2008. Por la cual se establecen Directivas sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.*

Consonni, S., Giugliano, M., & Grosso, M. (2005). Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste – Part B: Emission and cost estimates. *Waste Management, 25(2)*, 137–148. doi:10.1016/j.wasman.2004.09.006

Comité Europeo de Normalización (2011). *Norma Europea EN 15359 de 2011. Por la cual se establecen especificaciones y clases para los Combustibles Sólidos Recuperados.*

Comité Europeo de Normalización (2011). *Norma Europea EN 15408 de 2011. Por la cual se establecen los métodos para la determinación de azufre (S), cloro (Cl), flúor (F) y bromo (Br) en Combustibles Sólidos Recuperados.*

Cossu R., Motzo G. M., & Laudadio, M. (1995): Preliminary study for a landfill mining project in Sardinia. En T.H. Christensen, R. Cossu & R. Stegmann (Eds.), *Sardinia 1995 Fifth International Waste Management and Landfill Symposium Proceedings* (pp. 841–850). CISA, Cagliari.

- Cossu, R., Hogland, W., & Salerni, E. (1996): Landfill mining in Europe and USA. In Moller, J. (Ed.). *The ISWA Yearbook* (pp. 107–114). International Solid Waste Association (ISWA)
- Danthurebandara, M., Van Passel, S., Machiels, L., & Van Acker, K. (2015). Valorization of thermal treatment residues in Enhanced Landfill Mining: environmental and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 99, 275–285. doi:10.1016/j.jclepro.2015.03.021
- Danthurebandara, M., Van Passel, S., Vanderreydt, I., & Van Acker, K. (2015). Assessment of environmental and economic feasibility of Enhanced Landfill Mining. *Waste Management*, 45, 434–447. doi:10.1016/j.wasman.2015.01.041
- Das, K. C., Smith, M. C., Gattie, D. K., & Hale Boothe, D. D. (2002). Stability and quality of municipal solid waste compost from a landfill aerobic bioreduction process. *Advances in Environmental Research*, 6(4), 401–409. doi: 10.1016/s1093-0191(01)00066-1
- Deckmyn, S. (2018). Circular Flanders: Adaptive Policy for a Circular Economy. In H. Lehmann (Eds.). *Factor X. Eco-Efficiency in Industry and Science* (vol 32, pp. 335–346). Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-50079-9\_23
- Defensoría del Pueblo (2019). ¿Dónde va nuestra basura?: Recomendaciones para mejorar la gestión de los residuos sólidos municipales (Informe Defensorial Nro. 181). URL: <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2019/11/INFORME-DEFENSORIAL-181.pdf>

- Demirbas, A. (2004). Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 803–815.  
doi: 10.1016/j.jaap.2003.10.008
- De Miguel, C., Martínez, K., Pereira, M., & Kohout, M. (2021). *Economía circular en América Latina y el Caribe: oportunidad para una recuperación transformadora*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)
- Dhar, A. (2015). *Landfill Mining - A Comprehensive Literature Review*. University of Texas at Arlington. doi: 10.13140/RG.2.2.31092.55687
- Diener, A., Kieckhäfer, K., & Spengler, T. (2013). A Material Flow-based Approach for the Economic Assessment of Alternative Landfill Mining Concepts. En J. Geldermann & M. Schumann (Eds.), *First International Conference on Resource Efficiency in Interorganizational Networks – ResEff 2013* (pp. 362– 373). University of Göttingen.
- EC (2003). *Refuse Derived Fuel, current practice and perspectives (Report CO5087-4)*.  
URL: <https://bit.ly/3WMIXTD>
- Esakku, S., Palanivelu, K., & Joseph, K. (2003). Assessment of heavy metals in a municipal solid waste dumpsite. En K. Joseph, R. Nagendran, K. Palanivelu & K. Thanasekaran (Eds.), *Proceedings of the Workshop on Sustainable Landfill Management* (pp. 139–145). Centre for Environmental Studies (CES), Anna University.
- Espaliat, M. (2017). *Economía Circular y Sostenibilidad: Nuevos enfoques para la creación de Valor*. CreateSpace

- Faitli, J., Nagy, S., Romenda, R., Gombkötő, I., Bokányi, L., & Barna, L. (2019). Assessment of a residual municipal solid waste landfill for prospective “landfill mining”. *Waste Management & Research*, 37(12), 1229-1239. doi:10.1177/0734242x19881197
- FAO (2013). *Manual de compostaje del agricultor*. URL: <https://bit.ly/3kOTejC>
- Ferraresi, G. & Niño, J. (2020). Co-procesamiento en la industria del cemento. In N. Niño , M. Valencia, & M. García (Eds.), *Sustentabilidad, Turismo y Educación TII* (pp. 13–23). ECORFAN. doi: 10.35429/h.2020.2.13.23.
- Field, J. A., Stams, A., Kato, M., & Schraa, G. (1995). Enhanced biodegradation of aromatic pollutants in cocultures of anaerobic and aerobic bacterial consortia. *Antonie van Leeuwenhoek*, 67(1), 47–77. doi: 10.1007/bf00872195
- Finnveden, G. (1996). Solid waste treatment within the framework of life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(2), 74–78. doi:10.1007/bf02978649
- Flores, C., & Flores, K. (2021). Pruebas para comprobar la normalidad de datos en procesos productivos: Anderson Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wilk y Kolmogórov-Smirnov. *Societas. Revista de Ciencias Sociales y Humanísticas*, 23(2), 83-97. URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/341/3412237018/index.html>
- Ford, S., Warren, K., Lorton, C., Smithers, R., Read, A., & Hudgins, M. (2013). *Feasibility and Viability of Landfill Mining and Reclamation in Scotland, Scoping Study, Final Report*. Zero Waste Scotland
- Fundación Ellen MacArthur (2015). *Hacia una economía circular : motivos económicos para una transición acelerada*. URL: <https://bit.ly/3BMMngf>

- Gallardo, A., Edo-Alcón, N., & Vargas, F. (2017). El combustible sólido recuperado: Producción y marco regulador. *Revista Técnica de Medio Ambiente – RETEMA*, 197, 8 –16.
- Garcés, D. (2014). *Análisis del aprovechamiento de diferentes fracciones de residuos generados en Asturias como CSR* [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/27993>
- García, C., Küppers, B., Clausen, A., & Pretz, T. (2018). Landfill Mining: A case study regarding sampling, processing and characterization of excavated waste from an Austrian landfill. *Detritus*, 2(1), 29. doi: 10.31025/2611-4135/2018.13664
- García, J., & Ballesteros, M. (2005). Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos. *Revista Colombiana de Química*, 34(2), 201-209. URL: <https://bit.ly/3wynLoK>
- González, R. (2016). *Cradle to Cradle: Re-diseño y Re-evolución*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (UPM)
- Gould, J. P., Cross, W. H., & Pohland, F.G. (1990). Factors influencing mobility of toxic metals in landfill operated with leachate recycle. En W. Tedder & F. G. Pohland (Eds.). *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management* (pp. 267–291). American Chemical Society (ACS). doi: 10.1021/bk-1990-0422.ch016
- Gregorio, J., Lanza, P., Churión, C., & Gómez, N. (2016). Comparación entre el método Kjeldahl tradicional y el método Dumas automatizado (N CUBE) para la determinación de proteínas en distintas clases de alimentos. *SABER. Revista*

*Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 28(2), 245-249. URL: <https://bit.ly/3XXkFGj>

Guerriero, R. J. (1996). Status of landfill reclamation and its applicability to solid waste management. En *Proceedings of the 17th Biennial Waste Processing Conference: Papers Presented at the 17th Biennial Waste Processing Conference* (pp. 283–287). ASME

Habert, G., Billard, C., Rossi, P., Chen, C., & Roussel, N. (2010). Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 820–826. doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.031

Hermann, R., Baumgartner, R. J., Sarc, R., Ragossnig, A., Wolfsberger, T., Eisenberger, M., ... Pomberger, R. (2014). Landfill mining in Austria: Foundations for an integrated ecological and economic assessment. *Waste Management & Research*, 32(9 suppl), 48–58. doi:10.1177/0734242x14541168

Hogland, W., Marques, M., & Thörneby, L. (1997). Landfill mining - space saving, material recovery and energy use. En Göran B. & William H. (Eds.), *Proceedings of the Seminar on Waste Management and the Environment* (pp. 339–355). University of Kalmar

Hogland, W. (2002). Remediation of an old landfill site. *Environmental Science and Pollution Research*, 9(S1), 49–54. doi:10.1007/bf02987426

Hogland, W., Marques, M., & Nimmermark, S. (2004). Landfill mining and waste characterization: a strategy for remediation of contaminated areas. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 6(2). doi:10.1007/s10163-003-0110-x

- Hogland, W., Hogland, M., & Marques, M. (2010). Enhanced Landfill Mining: Material recovery, energy utilisation and economics in the EU (Directive) perspective. En P. Jones & Y. Tielemans (Eds.), *Proceedings of the 1st International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining* (pp. 209–222). Haletra, Houthalen-Helchteren
- Hölzle, I. (2017). Contaminants in landfill soils – Reliability of prefeasibility studies. *Waste Management*, 63, 337–344. doi:10.1016/j.wasman.2016.08.024
- Hull, R. M., Krogmann, U., & Strom, P. F. (2005). Composition and Characteristics of Excavated Materials from a New Jersey Landfill. *Journal of Environmental Engineering*, 131(3), 478–490. doi:10.1061/(asce)0733-9372(2005)131:3(478)
- IPCC (2022). *Sexto informe de evaluación del IPCC: Cambio Climático 2022: impactos, adaptación y vulnerabilidad*. URL: [https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf)
- ISO (2002). *Norma ISO 14688. Investigación y ensayos geotécnicos. Identificación y clasificación de suelos - Parte 1: Identificación y descripción*.
- IWCS (2009). *Landfill reclamation demonstration project: Perdido Landfill, Escambia County Neighborhood and Community Services Bureau. Division of Solid Waste Management*. Escambia County
- Jain, P., Kim, H., & Townsend, T. G. (2005). Heavy metal content in soil reclaimed from a municipal solid waste landfill. *Waste Management*, 25(1), 25–35. doi:10.1016/j.wasman.2004.08.009

- Jain, P., Townsend, T. G., & Johnson, P. (2013). Case study of landfill reclamation at a Florida landfill site. *Waste Management*, 33(1), 109–116. doi:10.1016/j.wasman.2012.09.011
- Jain, P., Powell, J. T., Smith, J. L., Townsend, T. G., & Tolaymat, T. (2014). Life-Cycle Inventory and Impact Evaluation of Mining Municipal Solid Waste Landfills. *Environmental Science & Technology*, 48(5), 2920–2927. doi:10.1021/es404382s
- Jani, Y., Kaczala, F., Marchand, C., Hogland, M., Kriipsalu, M., Hogland, W., & Kihl, A. (2016). Characterisation of excavated fine fraction and waste composition from a Swedish landfill. *Waste Management & Research*, 34(12), 1292–1299. doi:10.1177/0734242x16670000
- Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS). URL: <https://redrrss.minam.gob.pe/material/20090128200240.pdf>
- Jones, P. T., Geysen, D., Rossy, A., & Bienge, K. (2010). Enhanced Landfill Mining (ELFM) and Enhanced Waste Management (EWM): essential components for the transition to Sustainable Materials Management (SMM). En P. Jones & Y. Tielemans (Eds.), *Proceedings of the 1st International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining* (pp. 19–35). Haletra, Houthalen-Helchteren
- Jones, P. T., Geysen, D., Tielemans, Y., Pontikes, Y., Blanpain, B., Mishra, B., & Apelian, D. (2012). Closing Material Loops: The Enhanced Landfill Mining Concept. *JOM*, 64(7), 743–744. doi:10.1007/s11837-012-0378-1
- Jones, P. T., Geysen, D., Tielemans, Y., Van Passel, S., Pontikes, Y., Blanpain, B., ... Hoekstra, N. (2013). Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery:

a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 55, 45–55.  
doi:10.1016/j.jclepro.2012.05.021

JonoB (2019). *Compromised landfills at risk during extreme weather*. Office of the Prime Minister's Chief Science Advisor. URL: <https://bit.ly/3BM0q5H>

Joseph, K., Nagendran, R., Palanivelu, K., Thanasekaran, K., & Visvanathan, C. (2004). *Dumpsite rehabilitation and landfill mining*. Centre for Environmental Studies (CES), Anna University.

Kaartinen, T., Sormunen, K., & Rintala, J. (2013). Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 55, 56–66. doi:10.1016/j.jclepro.2013.02.036

Karlık, G., & Kaya, M. A. (2001). Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta, Turkey. *Environmental Geology*, 40(6), 725–731. doi: 10.1007/s002540000232

Karstensen, K. (2008). Formation, release and control of dioxins in cement kilns. *Chemosphere*, 70(4), 543–560. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.06.081

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, Frank (2018). *Los desechos 2.0: Un panorama mundial de la gestión de desechos sólidos hasta 2050*. Banco Mundial. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>

Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., & Spliethoff, H. (2009). Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology*, 90(1), 21–50. doi: 10.1016/j.fuproc.2008.07.012

- Khan, M. M. H., Havukainen, J., & Horttanainen, M. (2020). Impact of utilizing solid recovered fuel on the global warming potential of cement production and waste management system: A life cycle assessment approach. *Waste Management & Research*, 39(4), 561–572. doi: 10.1177/0734242x20978277
- Konstantaki, L. A. (2016). *Imaging and characterization of heterogeneous landfills using geophysical* [Doctoral dissertation, TU Delft]. TU Delft Repositories. <https://doi.org/10.4233/uuid:f1034020-f996-458e-a614-85735dd03bf9>
- Kourgialas, N. N., Dokou, Z., Karatzas, G. P., Panagopoulos, G., Soupios, P., Vafidis, A., Manoutsoglou, E., & Schafmeister, M. (2015). Saltwater intrusion in an irrigated agricultural area: combining density-dependent modeling and geophysical methods. *Environmental Earth Sciences*, 75(1). doi: 10.1007/s12665-015-4856-y
- Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management*, 32(3), 513–520. doi:10.1016/j.wasman.2011.10.015
- Krook, J. (2021). Enhanced landfill mining, concept and challenges. *Field Actions Science Reports, Special Issue 23*, 20–21.
- Kurian, J., Esakku, S., Palanivelu, K., & Selvam, A. (2003). Studies on landfill mining at solid waste dumpsites in India. En T.H. Christensen, R. Cossu & R. Stegmann (Eds.), *Sardinia 2003 Ninth International Waste Management and Landfill Symposium Proceedings* (pp. 248–255). CISA, Cagliari.
- Lansink, A. (2018). Challenging Changes – Connecting Waste Hierarchy and Circular Economy. *Waste Management & Research*, 36(10), 872–872. doi: 10.1177/0734242x18795600

- Lorber, K. E., Sarc, R., & Aldrian, A. (2012). Design and quality assurance for solid recovered fuel. *Waste Management & Research*, 30(4), 370–380. doi: 10.1177/0734242x12440484
- Martinho, E., & Almeida, F. (2006). 3D behaviour of contamination in landfill sites using 2D resistivity/IP imaging: case studies in Portugal. *Environmental Geology*, 49(7), 1071–1078. doi: 10.1007/s00254-005-0151-7
- Masi, S., Caniani, D., Grieco, E., Lioi, D. S., & Mancini, I. M. (2014). Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites. *Waste Management*, 34(3), 702–710. doi:10.1016/j.wasman.2013.12.013
- MINAM (2011). *Guía de Diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario manual*. URL: <https://bit.ly/3ZQFRzz>
- MIANM (2011). *Guía para el Diseño Construcción, Operación, Mantenimiento y Monitoreo de Relleno Sanitario Mecanizado*. URL: <https://bit.ly/3WY3Ha0>
- MINAM (2013). *Cuarto Informe Nacional de Residuos Sólidos Municipales y No Municipales: Gestión 2010 - 2011*. URL: <https://bit.ly/3JFOuHu>
- MINAM (2014). *Guía para el muestreo de suelos*. URL: <https://bit.ly/3XlpC5Q>
- MINAM (2018). *Guía para la caracterización de residuos sólidos municipales*. URL: <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-guia-caracterizacion-residuos-solidos-municipales>
- MINAM (2018). *Indicador: Superficie degradadas por residuos sólidos municipales*. URL: <https://sinia.minam.gob.pe/indicador/1633>

- Minsley, B. J., Smith, B. D., Hammack, R., Sams, J. I., & Veloski, G. (2012). Calibration and filtering strategies for frequency domain electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics*, *80*, 56–66. doi: 10.1016/j.jappgeo.2012.01.008
- Morelli, J. (1992). *Town of Edinburg Landfill Reclamation Demonstration Project* (NYSERDA-92-4). New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA)
- Mönkäre, T. J., Palmroth, M. R. T., & Rintala, J. A. (2016). Characterization of fine fraction mined from two Finnish landfills. *Waste Management*, *47*, 34–39. doi:10.1016/j.wasman.2015.02.034
- Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J., Hurme, M., & Oinas, P. (2015). Elemental balance of SRF production process: solid recovered fuel produced from municipal solid waste. *Waste Management & Research*, *34*(1), 38–46. doi: 10.1177/0734242x15615697
- Nelson, H. (1995). Landfill reclamation projects on the rise. *Biocycle: Journal of composting and recycling*, *3*, 83–84.
- Nicholls, R. J., Beaven, R. P., Stringfellow, A., Monfort, D., Le Cozannet, G., Wahl, T., Gebert, J., Wadey, M., Arns, A., Spencer, K. L., Reinhart, D., Heimovaara, T., Santos, V. M., Enríquez, A. R., & Cope, S. (2021). Coastal landfills and rising sea levels: A challenge for the 21st century. *Frontiers in Marine Science*, *8*, 1–23. doi: 10.3389/fmars.2021.710342
- Ntarlagiannis, D., Robinson, J., Soupios, P., & Slater, L. (2016). Field-scale electrical geophysics over an olive oil mill waste deposition site: Evaluating the information content of resistivity versus induced polarization (IP) images for delineating the

spatial extent of organic contamination. *Journal of Applied Geophysics*, 135, 418–426. doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.01.017

Nyquist, J. E., & Doll, W. E. (1993). Comparison of surface and aerial geophysics for characterizing a hazardous waste site: a case study. En *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1993: 63rd Annual Meeting and International Exhibition* (pp. 468–471). Society of Exploration Geophysicists (SEG). doi: 10.1190/1.1822523

O’Ryan, J., & Riffo, M. (2007). *El compostaje y su utilización en agricultura*. Fundación para la Innovación Agraria - Universidad de Las Américas. Salviat Impresores URL: <https://bit.ly/3HfcRc6>

Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2015). *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. URL: <https://bit.ly/3PHgxav>

Orihuela, J. (2018). *Un análisis de la eficiencia de la gestión municipal de residuos sólidos en el Perú y sus determinantes*. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). URL: <https://bit.ly/3hEnH2O>

Orlando, L., & Marchesi, E. (2001). Georadar as a tool to identify and characterise solid waste dump deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 48(3), 163–174. doi: 10.1016/s0926-9851(01)00088-x

Ortner, M. E., Knapp, J., & Bockreis, A. (2014). Landfill mining: objectives and assessment challenges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 167(2), 51–61. doi:10.1680/warm.13.00012

Parlamento Europeo. (2015). *Resolución 2014/2208(INI) del Parlamento Europeo del 09 de julio de 2015. Por la cual se establecen medidas a la Comisión Europea en relación a la eficiencia de los recursos y la transición hacia una economía circular.*

Parrodi, J. C., Höllen, D., & Pomberger, R. (2018). Characterization of fine fractions from Landfill Mining: A review of previous investigations. *Detritus*, 2(1), 46–72. doi:10.31025/2611-4135/2018.13663

Passamani, G., Ragazzi, M., & Torretta, V. (2016). Potential SRF generation from a closed landfill in northern Italy. *Waste Management*, 47(B), 157–163. doi: 10.1016/j.wasman.2015.07.024

Polyexcel (2021). *¿Qué Son Los Pigmentos Para Plásticos Y Cuáles Son Los Principales?*  
URL: <https://polyexcel.com.br/es/productos/que-son-los-pigmentos-para-plasticos-y-cuales-son-los-principales/>

Porsani, J. L., Filho, W. M., Elis, V. R., Shimeles, F., Dourado, J. C., & Moura, H. P. (2004). The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 55(3-4), 199–209. doi: 10.1016/j.jappgeo.2003.11.001

Prechthai, T., Padmasri, M., & Visvanathan, C. (2008). Quality assessment of mined MSW from an open dumpsite for recycling potential. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(1-2), 70–78. doi:10.1016/j.resconrec.2008.09.002

Puig, I., Jofra, M. & Calaf, M. (2012). *Análisis económico-ambiental de la utilización de combustibles derivados de los residuos (CDR) en España.* Greenpeace.

- Quaghebeur, M., Laenen, B., Geysen, D., Nielsen, P., Pontikes, Y., Van Gerven, T., & Spooren, J. (2013). Characterization of landfilled materials: screening of the enhanced landfill mining potential. *Journal of Cleaner Production*, 55, 72–83. doi:10.1016/j.jclepro.2012.06.012
- Rada, E. C., & Andreottola, G. (2012). RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU. *Waste Management*, 32(6), 1059–1060. doi: 10.1016/j.wasman.2012.02.017
- Ragazzi, M., & Rada, E.C. (2012). RDF/SRF Evolution and MSW Bio-drying. En V. Povov, H. Itoh, & C.A. Brebbia (Eds.), *Waste Management and the Environment VI – WIT Transactions on Ecology and the Environment* (pp. 199–208). WIT Press. doi: 10.2495/WM120191
- Ranieri, E., Ionescu, G., Fedele, A., Palmieri, E., Ranieri, A. C., & Campanaro, V. (2017). Sampling, characterisation and processing of solid recovered fuel production from municipal solid waste: An Italian plant case study. *Waste Management & Research*, 35(8), 890–898. doi:10.1177/07342424x17716276
- RAWFILL (2021). *Landfill Miner Guide*. URL: <https://bit.ly/3Vaa9cQ>
- Reinhart, D.R., & Townsend, T.G. (1997). *Landfill Bioreactor Design and Operation*. Lewis Publishers & CRC Press
- Reynolds, J. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics* (2nd ed.). John Wiley & Sons
- RETEMA (2021). *Producción de combustible a partir de residuos para la industria cementera de Alicante*. URL: <https://www.retema.es/actualidad/produccion-de-combustible-partir-de-residuos-para-la-industria-cementera-de-alicante>

- Rong, L., Zhang, C., Jin, D., & Dai, Z. (2017). Assessment of the potential utilization of municipal solid waste from a closed irregular landfill. *Journal of Cleaner Production*, 142(1), 413–419. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.050
- Rosario, L. (2020). *Afectación del suelo por metales pesados: plomo, cadmio y cromo VI por la disposición de residuos sólidos municipales en el botadero de Carhuashjirca, en el distrito y provincia de Huaraz, departamento de Ancash, 2019*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio Institucional UNASAM. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/4621>
- Rosendal, R. (2009). *Landfill Mining – Process, Feasibility, Economy, Benefits and Limitations*. Copenhagen: RenoSam.
- Ross, H. P., MacKelprang, C. E., & Wright, P. M. (1990). Dipole-dipole electrical resistivity surveys at waste disposal study sites in Northern Utah. En Ward S. H. (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume II, Environmental and Groundwater* (pp. 145–152). Society of Exploration Geophysicists (SEG). doi: 10.1190/1.9781560802785.2.ch16
- Rotheut, M., & Quicker, P. (2017). Energetic utilisation of refuse derived fuels from landfill mining. *Waste Management*, 62, 101–117. doi:10.1016/j.wasman.2017.02.002
- Rovira, J., Mari, M., Nadal, M., Schuhmacher, M., & Domingo, J. L. (2010). Partial replacement of fossil fuel in a cement plant: Risk assessment for the population living in the neighborhood. *Science of The Total Environment*, 408(22), 5372–5380. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.060
- RPP (2022). *Casi el 40% de los peruanos arroja su basura en ríos, lagos o botaderos ilegales, afirma el Minam*. URL: <https://rpp.pe/peru/actualidad/casi-el-40-de-los->

[peruanos-arroja-su-basura-en-rios-lagos-o-botaderos-ilegales-noticia-1384769?ref=rpp](https://doi.org/10.1177/07342424x20982277)

Rubin, Y., & Hubbard, S. (2005). *Hydrogeophysics*. Water Science and Technology Library

Sakri, A., Aouabed, A., Nassour, A., & Nelles, M. (2021). Refuse-derived fuel potential production for co-combustion in the cement industry in Algeria. *Waste Management & Research*, 39(9), 1174–1184. doi: 10.1177/07342424x20982277

Sandoval, L. (2010). *Informe anual de residuos sólidos municipales y no municipales en el Perú, Gestión 2009*. Ministerio del Ambiente. URL: <https://bit.ly/3XM0j2H>

Sandoval, L. (2011). *Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario mecanizado*. Ministerio del Ambiente URL: <https://bit.ly/3ZQFRzz>

Sarra, A. (2018) Dioxinas y furanos derivados de la combustión. En *Perspectivas: Revista científica de la Universidad de Belgrano* (pp. 143–157). Universidad de Belgrano

Sarc, R., Seidler, I., Kandlbauer, L., Lorber, K., & Pomberger, R. (2019). Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry – Update 2019. *Waste Management & Research*, 37(9), 885-897. doi:10.1177/07342424x19862600

Savage, G. M., Golueke, C. G., & Von Stein, E. L. (1993). Landfill mining: past and present. *BioCycle*, 34(5), 58–61.

Savino, A., Solórzano, G., Quispe, C., & Correal, M. C. (2018). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)

- Scheu, M., & Bhattacharyya, J. K. (1997) Reuse of Decomposed Waste, Lessons from India in Solid Waste Management Ed., Adrian Coad, Department of International Development, UK Government.
- Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B., Roudier, S., & Delgado, L. (2013). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. European Commission (EC), European Union (EU)
- SENAMHI (2019). Descarga de datos Meteorológicos a nivel nacional. Recuperado el 10 de diciembre de 2019 de <https://bit.ly/3Wx14Me>
- SMART GROUND (2017). *Enhanced Landfill Toolkit for Municipal Solid Waste streams*. URL: <http://www.smart-ground.eu/>
- Solórzano, G. (2018). Economía circular y perspectivas de futuro. En P. Tello, D. Campani, & R. Sarafian (Eds.). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos* (pp. 172–177). Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)
- Somani, M., Datta, M., Ramana, G., & Sreekrishnan, T. (2018). Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India. *Waste Management & Research*, 36(8), 744–755. doi:10.1177/0734242x18782393
- Sormunen, K., Ettala, M., & Rintala, J. (2008). Detailed internal characterisation of two Finnish landfills by waste sampling. *Waste Management*, 28(1), 151–163. doi:10.1016/j.wasman.2007.01.003

- Soupios, P., Kourgialas, N., Dokou, Z., Karatzas, G., Panagopoulos, G., Vafidis, A., & Manoutsoglou, E. (2015). Modeling saltwater intrusion at an agricultural coastal area using geophysical methods and the FEFLOW model. En G. Lollino, M. Arattano, M. Rinaldi, O. Giustolisi, J. Marechal, & G. E. Grant (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 3* (pp. 249–252). Springer
- Soupios, P., & Ntarlagiannis, D. (2017). Characterization and Monitoring of Solid Waste Disposal Sites Using Geophysical Methods: Current Applications and Novel Trends. En D. Sengupta & S. Agrahari (Eds.), *Modelling Trends in Solid and Hazardous Waste Management* (75–103). Springer. doi: 10.1007/978-981-10-2410-8\_5
- Spooren, J., Nielsen, P., Quaghebeur, M., & Tielemans, Y. (2012, October). *Characterisation study of landfilled materials with a particular focus on the fines and their potential in enhanced landfill mining* [Paper presentation]. 18th Conference of the Greening of Industry Network (GIN 2012), Linköping, Sweden
- Strange, K. (2010). *Landfill Mining. Preserving Resources through Integrated Sustainable Management of Waste*. Environmental Alternatives. URL: <http://www.enviroalternatives.com/landfill.html>
- Tello, P., Campani, D., & Sarafian, D. (2018). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*. Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS)
- The World Resource Foundation (1997). *WRF Technical Brief: Landfill mining* (SDMS Doc ID 277818). URL: <https://semspub.epa.gov/work/01/277818.pdf>
- Tielemans, Y., & Laevers, P. (2010). Closing the Circle, an Enhanced Landfill Mining case study. En P. Jones & Y. Tielemans (Eds.), *Proceedings of the 1st International*

*Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining* (p. 16). Haletra, Houthalen-Helchteren

Tom, A. P., Pawels, R., & Haridas, A. (2016). Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content. *Waste Management*, 49, 64–72. doi: 10.1016/j.wasman.2016.01.004

Tsourlos, P., Vargemezis, G. N., Fikos, I., & Tsokas, G. N. (2014). DC geoelectrical methods applied to landfill investigation: case studies from Greece. *First Break*, 32(8), 81–89. doi: 10.3997/1365-2397.32.8.76968

United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (1997). *Landfill Reclamation* (EPA 530-F-97-001)

United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2017). *Hurricane Harvey 2017*. On-scene Coordinator, US Environmental Protection Agency. URL: [https://response.epa.gov/site/site\\_profile.aspx?site\\_id=12353](https://response.epa.gov/site/site_profile.aspx?site_id=12353)

USDA (1993). *Soil Survey Manual*. URL: <https://bit.ly/3XTqRPv>

Van Passel, S., Dubois, M., Eyckmans, J., de Gheldere, S., Ang, F., Tom Jones, P., & Van Acker, K. (2013). The economics of enhanced landfill mining: private and societal performance drivers. *Journal of Cleaner Production*, 55, 92–102. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.024

Viganò, F., Consonni, S., Ragazzi, M., & Rada, E. C. (2011). A Model for Mass and Energy Balances of Bio-Drying. En *Proceedings of the 19th Annual North American Waste-to-Energy Conference* (pp. 63–70). ASME. doi: 10.1115/nawtec19-5457

- Vollprecht, D., Parrodi, J. C., Lucas, H., & Pomberger, R. (2020). Case study on Enhanced Landfill Mining at Mont-Saint-Guibert Landfill in Belgium Mechanical processing, physico-chemical and mineralogical characterisation of fine fractions < 4.5 mm. *Detritus*, 10(1), 26–43. doi: 10.31025/2611-4135/2020.13940
- Wagner, T. P., & Raymond, T. (2015). Landfill mining: Case study of a successful metals recovery project. *Waste Management*, 45, 448–457. doi: 10.1016/j.wasman.2015.06.034
- Werellagama, D. & Samarakoon, S. (2007). Manufacture and sale of landfill compost – a Sri Lankan case study. En K. Joseph, R. Nagendran, & K. Thanasekaran (Eds.), *Proceedings of International Conference on Sustainable Solid Waste Management* (pp. 320–326). Centre for Environmental Studies (CES), Anna University
- Wille, E. (2018). Flooding risks at old landfill sites: linear economy meets climate change. En P. T. Jones & L. Machiels (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Enhanced Landfill Mining* (pp. 361–365). SIM KU Leuven, i-Cleantech Vlaanderen
- Winterstetter, A., Laner, D., Rechberger, H., & Fellner, J. (2015). Framework for the evaluation of anthropogenic resources: A landfill mining case study – Resource or reserve? *Resources, Conservation and Recycling*, 96, 19–30. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.01.004
- Wolfsberger, T., Höllen, D., Sarc, R., Aldrian, A., Budischowsky, A., Zöschner, A., Pomberger, R., & Lorber, K. E. (2014, September) *Landfill mining – Case study: Characterization and treatment of excavated waste from Austrian sanitary landfill sites and estimation of the resource potential* [Paper presentation]. ISWA World Congress 2014, Sao Paulo, Brazil

WRAP (2012). *A classification scheme to define the quality of Waste Derived Fuels*.

Yannah, M., Martens, K., Van Camp, M., & Walraevens, K. (2017). Geophysical exploration of an old dumpsite in the perspective of enhanced landfill mining in Kermt area, Belgium. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 55–67. doi: 10.1007/s10064-017-1169-2

Yaque, A. (2013). *Combustibles Sólidos Recuperados y Combustibles Derivados de Residuos* [Trabajo Final de Máster, Universidad de Sevilla]. Repositorio e-REdING. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70450>

Zhao, Y., Song, L., Huang, R., Song, L., & Li, X. (2007). Recycling of aged refuse from a closed landfill. *Waste Management & Research*, 25(2), 130–138. doi:10.1177/0734242x07074053

Zhou, C., Fang, W., Xu, W., Cao, A., & Wang, R. (2014). Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 80, 80–86. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.083

Zhou, C., Xu, W., Gong, Z., Fang, W., & Cao, A. (2015). Characteristics and Fertilizer Effects of Soil-Like Materials from Landfill Mining. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 43(6), 940–947. doi: 10.1002/clen.201400510

## Anexos

	Pág.
Anexo 1: Registros de excavación .....	1
Anexo 2: Informes de laboratorio .....	4

**Anexo 1**

*Registros de excavación*

REGISTRO DE EXCAVACIÓN				Código: RT-01 Versión: 01
Fecha:	16 de noviembre de 2019	Hora inicio:	10: 22 a.m.	
Tipo de Maquinaria:	Retroexcavadora CAT 420F	Hora fin:	11: 37 a.m.	
Operador:	[Redacted]	Punto de muestreo:	A	
Firma:	[Signature]			
Datos de la excavación				
Coordenadas	Datum:	WGS 84	Este (m):	[Redacted]
	Zona:	18S	Norte (m):	[Redacted]
Profundidad de resellado (m):	1.40	Profundidad inicial de muestreo (m):		3.00
		Profundidad final de muestreo (m):		4.00

Nombres y Firmas

[Signature]  
Alvaro Reyes Figueroa  
DNI. 72674297

[Signature]  
80231732

REGISTRO DE EXCAVACIÓN				Código: RT-01 Versión: 01
Fecha:	16 de noviembre de 2019	Hora inicio:	1: 43 p.m.	
Tipo de Maquinaria:	Retroexcavadora CAT 420F	Hora fin:	2: 35 p.m.	
Operador:	[Redacted]	Punto de muestreo:	B	
Firma:	[Signature]			
Datos de la excavación				
Coordenadas	Datum:	WGS 84	Este (m):	[Redacted]
	Zona:	18S	Norte (m):	[Redacted]
Profundidad de resellado (m):	1.10	Profundidad inicial de muestreo (m):		3.00
		Profundidad final de muestreo (m):		4.00

Nombres y Firmas

[Signature]  
Alvaro Reyes Figueroa  
DNI. 72674297

[Signature]  
80231732

REGISTRO DE EXCAVACIÓN				Código: RT-01 Versión: 01
Fecha:	23 de noviembre de 2019	Hora inicio:	10: 18 a.m.	
Tipo de Maquinaria:	Retroexcavadora CAT 420F	Hora fin:	11: 16 a.m.	
Operador:	[Redacted]	Punto de muestreo:	C	
Firma:	[Signature]			
Datos de la excavación				
Coordenadas	Datum:	WGS 84	Este (m):	[Redacted]
	Zona:	18S	Norte (m):	[Redacted]
Profundidad de resellado (m):	1.20	Profundidad inicial de muestreo (m):		3.00
		Profundidad final de muestreo (m):		4.00

Nombres y Firmas

[Signature]  
Alvaro Reyes Figueroa  
DNI. 72674297

[Signature]  
80231732

REGISTRO DE EXCAVACIÓN				Código: RT-01 Versión: 01
Fecha:	23 de noviembre de 2019	Hora inicio:	11:31 a.m.	
Tipo de Maquinaria:	Retroexcavadora CAT 420F	Hora fin:	12:20 p.m.	
Operador:	[Redacted]	Punto de muestreo:	D	
Firma:	[Signature]			
Datos de la excavación				
Coordenadas	Datum:	WGS84	Este (m):	[Redacted]
	Zona:	18S	Norte (m):	[Redacted]
Profundidad de resellado (m):	1.20	Profundidad inicial de muestreo (m):		3.00
		Profundidad final de muestreo (m):		4.00

Nombres y Firmas

[Signature]  
Alvaro Reyes Figueroa  
DNI: 72674297

[Signature]  
80231732

REGISTRO DE EXCAVACIÓN				Código: RT-01 Versión: 01
Fecha:	25 de noviembre de 2019	Hora inicio:	3:38 p.m.	
Tipo de Maquinaria:	Retroexcavadora CAT 420F	Hora fin:	4:22 p.m.	
Operador:	[Redacted]	Punto de muestreo:	G	
Firma:	[Signature]			
Datos de la excavación				
Coordenadas	Datum:	WGS84	Este (m):	[Redacted]
	Zona:	18S	Norte (m):	[Redacted]
Profundidad de resellado (m):	1.50	Profundidad inicial de muestreo (m):		3.00
		Profundidad final de muestreo (m):		4.00

Nombres y Firmas

[Signature]  
Alvaro Reyes Figueroa  
DNI: 72674297

[Signature]  
80231732

REGISTRO DE EXCAVACIÓN				Código: RT-01 Versión: 01
Fecha:	26 de noviembre de 2019	Hora inicio:	1:52 p.m.	
Tipo de Maquinaria:	Retroexcavadora CAT 420F	Hora fin:	2:40 p.m.	
Operador:	[Redacted]	Punto de muestreo:	E	
Firma:	[Signature]			
Datos de la excavación				
Coordenadas	Datum:	WGS84	Este (m):	[Redacted]
	Zona:	18S	Norte (m):	[Redacted]
Profundidad de resellado (m):	1.30	Profundidad inicial de muestreo (m):		3.00
		Profundidad final de muestreo (m):		4.00

Nombres y Firmas

[Signature]  
Alvaro Reyes Figueroa  
DNI: 72674297

[Signature]  
80231732

REGISTRO DE EXCAVACIÓN				Código: RT-01 Versión: 01
Fecha:	26 de noviembre de 2019	Hora inicio:	3:17 p.m.	
Tipo de Maquinaria:	Retroexcavadora 420F CAT	Hora fin:	4:00 p.m.	
Operador:	[REDACTED]	Punto de muestreo:	F	
Firma:	[REDACTED]			
<b>Datos de la excavación</b>				
Coordenadas	Datum:	WGS84	Este (m):	[REDACTED]
	Zona:	18S	Norte (m):	[REDACTED]
Profundidad de resellado (m):	1.30	Profundidad inicial de muestreo (m):	3.00	
		Profundidad final de muestreo (m):	4.00	

Nombres y Firmas

*ccdy*  
 Alvaro Reyes Requena  
 DNI: 72674293

*Disel*  
 90231732

## **Anexo 2**

*Informes de laboratorio*



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO – TGA (PROXIMAL)  
LER – BIOMASA 003 – 2020

**Solicitante** : Sr. Álvaro Reyes Izquierdo  
**Atención** : Sr. Álvaro Reyes Izquierdo  
**Muestra** : Residuos varios (Residuos de diferentes tipos, como papel, cartón, textiles, materia orgánica, madera, en proporciones distintas)  
**Procedente de** : ██████████  
**Fecha Recepción** : 03/01/2020  
**Norma:** : ASTM D7582

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE HUMEDA			
		CONTENIDO DE HUMEDAD (%)	MATERIA VOLÁTIL (%)	CENIZAS (%)	CARBONO FIJO (%)
UBE-(01/2020)-0001	B	3.48	---	---	---
UBE-(01/2020)-0002	D	6.19	---	---	---
UBE-(01/2020)-0003	G	3.55	---	---	---

**NOTA:**

- El análisis se realizó con las muestras en base húmeda (La base húmeda se refiere al análisis de las muestras sin tratamiento previo).
- Las muestras tienen composición heterogénea.



José Calle Maraví, Ph. D.  
Jefe del Laboratorio de Energías Renovables



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA  
LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
Unidad de Biomasa Energética

REPORTE DE ANÁLISIS DE PODER CALÓRICO  
(CALORÍMETRO)  
LER – BIOMASA 004– 2020

**Solicitante** : Sr. Álvaro Reyes Izquierdo  
**Atención** : Sr. Álvaro Reyes Izquierdo  
**Muestra** : Residuos varios (Residuos de diferentes tipos, como papel, cartón, textiles, materia orgánica, madera, en proporciones distintas)  
**Procedente de** : XXXXXXXXXX  
**Fecha Recepción** : 03/01/2020  
**Norma:** : ASTM D5865 – 13

N. LABORATORIO	CÓDIGO DE CAMPO	BASE SECA	BASE HÚMEDA
		PCS (Cal/g)	PCI (Cal/g)
UBE-(01/2020)-0001	B	3425.47	3306.33
UBE-(01/2020)-0002	D	3996.31	3749.00
UBE-(01/2020)-0003	G	3397.12	3276.50

**NOTA:**

- Las muestras fueron analizadas en base seca (las muestras tal como se recibieron fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C).
- El PCI se obtiene por cálculo a partir del PCS determinado sobre la muestra analizada. El cálculo del PCI exige el conocimiento del contenido de humedad de la muestra analizada.
- Las muestras tienen composición heterogénea.



Laboratorio de  
Energías Renovables

José Calle Maraví, Ph. D.  
Jefe del Laboratorio de  
Energías Renovables

## INFORME DE ENSAYO N° ENE1050.R20

<b>SOLICITANTE :</b>	ALVARO REYES IZQUIERDO
<b>DOMICILIO LEGAL :</b>	Calle Armando Orozco No. 156-158, Urbanización Rosario de Villa Chorrillos, Lima
<b>SOLICITADO POR :</b>	Alvaro Reyes Izquierdo
<b>SOLICITUD DE SERVICIO AMBIENTAL:</b>	Cadena de Custodia N° 02-20/CERTIMIN
<b>REFERENCIA :</b>	<div style="background-color: black; width: 200px; height: 15px; margin-bottom: 5px;"></div> Servicio de Analisis de Residuos Solidos
<b>FECHA DE MUESTREO :</b>	2019/11/28 al 2019/12/05
<b>MUESTRA TOMADA POR :</b>	EL CLIENTE
<b>PROTOCOLO :</b>	--
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Residuos Sólidos (CDR Combustible Derivado de Residuos)
<b>NÚMERO DE MUESTRAS :</b>	2
<b>PRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS :</b>	Bolsas Selladas
<b>CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS : RECEPCIONADAS</b>	Muestras en buenas condiciones para los análisis solicitados.
<b>FECHA DE RECEPCIÓN :</b>	jueves, 02 de Enero de 2020
<b>IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS :</b>	Según se indica
<b>FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO :</b>	2020-01-02 al 2020-01-13
<b>FECHA DE REPORTE :</b>	lunes, 13 de Enero de 2020
<b>PERIODO DE CUSTODIA :</b>	Hasta un mes. De acuerdo a las recomendaciones de la metodología o norma empleada.

**EDGAR NINA VELÁSQUEZ**  
**Jefe Ambiental**  
**CQP. 729**

Lima, 13 de Enero de 2020



**INFORME DE ENSAYO  
N° ENE1050.R20**

**RESULTADOS**

Muestras		Elementos			
N°	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección LD	MON0000 Fecha Monitoreo	MON0000 Tipo Muestra	MA0370 Hg mg/Kg PS 0.01	MA0738 Cl- mg/Kg PS
1	B	2019-11-28 14:20	Compost	0.37	34536
2	D	2019-12-05 14:10	Compost	0.40	38143



**INFORME DE ENSAYO  
N° ENE1050.R20**

**CONTROL DE CALIDAD**

N°	Muestras QC		Elementos	
	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección ID	MA0370 Hg mg/Kg PS 0.01	MA0738 Cl- mg/Kg PS	
1	Adición (% Recup.)	105.0	--	--
2	Adición (% Recup.)	110.0	--	--
3	Adición Rango (%)	80.0 - 120.0	--	--
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	106.9	105.0	
5	STD - Rango (%)	91.7-108.3	91.0-109.0	
6	B (Original)	--	34536	
7	B (Dup)	--	34535	
8	D (Original)	0.40	--	
9	D (Dup)	0.41	--	
10	Blanco	<0.01	--	



**INFORME DE ENSAYO  
N° ENE1050.R20**

**METODOS DE ENSAYO Y CODIGOS DE SERVICIO**

N°	Descripción	
Analito	Denominación	Cod. Serv (1) Norma o Referencia
1	Mercurio	MA0370 EPA Method 7471 B, Rev 2, 2007. Mercury in Solid or Semisolid Waste ( Manual Cold Vapor Technique ).
2	Cloruro	MA0738 NOM-021-RECNAT -2000- Especificaciones de Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreros y Analisis. Sección 7.2.7 Determinación de Aniones Solubles en el Extracto de Saturación.

(1) SMEIWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

APHA : American Public Health Association.

AWWA: American Water Works Association.

WEF : Water Environment Federation.

EPA : Environmental Protection Agency.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

ISO: International Organization for Standardization.

NTP: Norma Técnica Peruana.

NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A."

"Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce". Los resultados corresponden a las muestras indicadas

## INFORME DE ENSAYO N° ENE1055.R20

<b>SOLICITANTE :</b>	ALVARO REYES IZQUIERDO
<b>DOMICILIO LEGAL :</b>	Calle Armando Orozco 156-158, Urbanización Rosario de Villa Chorrillos, Lima
<b>SOLICITADO POR :</b>	Alvaro Reyes Izquierdo
<b>SOLICITUD DE SERVICIO AMBIENTAL:</b>	Cadena de Custodia N° 07-20/CERTIMIN
<b>REFERENCIA :</b>	[REDACTED] Servicio de Analisis de Residuos Solidos
<b>FECHA DE MUESTREO :</b>	2019/12/06
<b>MUESTRA TOMADA POR :</b>	EL CLIENTE
<b>PROTOCOLO :</b>	--
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Residuos Sólidos (CDR Combustible Derivado de Residuos)
<b>NÚMERO DE MUESTRAS :</b>	1
<b>PRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS :</b>	Bolsas Selladas
<b>CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS : RECEPCIONADAS</b>	Muestras en buenas condiciones para los análisis solicitados.
<b>FECHA DE RECEPCIÓN :</b>	viernes, 03 de Enero de 2020
<b>IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS :</b>	Según se indica
<b>FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO :</b>	2020-01-03 al 2020-01-13
<b>FECHA DE REPORTE :</b>	lunes, 13 de Enero de 2020
<b>PERIODO DE CUSTODIA :</b>	Hasta un mes. De acuerdo a las recomendaciones de la metodología o norma empleada.

**EDGAR NINA VELÁSQUEZ**  
**Jefe Ambiental**  
**CQP. 729**

Lima, 13 de Enero de 2020



**INFORME DE ENSAYO  
N° ENE1055.R20**

**RESULTADOS**

Muestras		Elementos			
N°	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección LD	MON0000 Fecha Monitoreo	MON0000 Tipo Muestra	MA0370 Hg mg/Kg PS 0.01	MA0738 Cl- mg/Kg PS
1	G	2019-12-06 14:30	Compost	0.29	40036



**INFORME DE ENSAYO  
N° ENE1055.R20**

**CONTROL DE CALIDAD**

N°	Muestras QC		Elementos	
	Codigo de Servicio	Elemento	MA0370	MA0738
	Unidad		Hg	Cl-
	Limite de Detección ID		mg/Kg PS	mg/Kg PS
1	Adición (% Recup.)		115.0	--
2	Adición (% Recup.)		110.0	--
3	Adición Rango (%)		80.0 - 120.0	--
4	STD - Recuperación Obtenido (%)		96.9	105.0
5	STD - Rango (%)		91.7-108.3	91.0-109.0
6	G (Original)		0.29	40036
7	G (Dup)		0.28	40036
8	Blanco		<0.01	--



**INFORME DE ENSAYO  
N° ENE1055.R20**

**MÉTODOS DE ENSAYO Y CODIGOS DE SERVICIO**

N°	Descripción	
Analito	Denominación	Cod. Serv
1	Mercurio	MA0370
2	Cloruro	MA0738

(1) SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.  
 APHA : American Public Health Association.  
 AWWA: American Water Works Association.  
 WEF : Water Environment Federation.  
 EPA : Environmental Protection Agency.  
 ASTM: American Society for Testing and Materials.  
 ISO: International Organization for Standardization.  
 NTP: Norma Técnica Peruana.  
 NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A."  
 "Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce". Los resultados corresponden a las muestras indicadas

## INFORME DE ENSAYO N° SEP1028.R20

<b>SOLICITANTE :</b>	ALVARO REYES IZQUIERDO
<b>DOMICILIO LEGAL :</b>	Jr. Manuel Iribarren 1280 Edif. 5, Cond. Jardines de Aramburu II Surquillo, Lima
<b>SOLICITADO POR :</b>	Alvaro Reyes Izquierdo
<b>SOLICITUD DE SERVICIO AMBIENTAL:</b>	Cadena de Custodia N° 842-20/CERTIMIN
<b>REFERENCIA :</b>	--
<b>FECHA DE MUESTREO :</b>	--
<b>MUESTRA TOMADA POR :</b>	EL CLIENTE
<b>PROTOCOLO :</b>	--
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Residuos Solidos
<b>NÚMERO DE MUESTRAS :</b>	3
<b>PRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS :</b>	Bolsas selladas.
<b>CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS : RECEPCIONADAS</b>	Muestras en buenas condiciones para los análisis solicitados.
<b>FECHA DE RECEPCIÓN :</b>	martes, 01 de Setiembre de 2020
<b>IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS :</b>	Segun se indica.
<b>FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO :</b>	2020-09-01 al 2020-09-08
<b>FECHA DE REPORTE :</b>	martes, 08 de Setiembre de 2020
<b>PERIODO DE CUSTODIA :</b>	Hasta un mes. De acuerdo a las recomendaciones de la metodología o norma empleada.



**EDGAR NINA VELÁSQUEZ**  
**Jefe Ambiental**  
**CQP. 729**

Lima, 14 de Setiembre de 2020



**INFORME DE ENSAYO  
N° SEP1028.R20**

**RESULTADOS**

Muestras		Elementos														
N°	Codigo de Servicio Ensayo Unidad Limite de Detección LD	MON0000 Tipo Muestra	MA1124 Ag mg/Kg PS	MA1124 Al mg/Kg PS	MA1124 As mg/Kg PS	MA1124 B mg/Kg PS	MA1124 Ba mg/Kg PS	MA1124 Be mg/Kg PS	MA1124 Bi mg/Kg PS	MA1124 Ca mg/Kg PS	MA1124 Cd mg/Kg PS	MA1124 Co mg/Kg PS	MA1124 Cr mg/Kg PS	MA1124 Cu mg/Kg PS	MA1124 Fe mg/Kg PS	MA1124 K mg/Kg PS
1	B (CSR)	Residuos Solidos	<0.2	2170	3.5	26.1	96	<0.4	<5	26285	0.69	2.17	27.2	60.5	8466	5745
2	D (CSR)	Residuos Solidos	<0.2	1192	3.8	23.5	41	<0.4	<5	34941	0.45	2.55	46.5	43.3	4300	3634
3	G (CSR)	Residuos Solidos	0.9	1629	5.5	21.4	237	<0.4	<5	42841	0.59	3.23	40.2	44.3	11052	5575

LD: Limite de Detección (Limite Reportable) que es tomado en base al Limite de Cuantificación del Método LCM.

P.S.: Peso Seco.

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A."

"Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce". Los resultados corresponden a las muestras indicadas



**INFORME DE ENSAYO  
N° SEP1028.R20**

Muestras		Elementos														
N°	Codigo de Servicio Ensayo Unidad Limite de Detección LD	MA1124 Mg mg/Kg PS 100	MA1124 Mn mg/Kg PS 2	MA1124 Mo mg/Kg PS 0.09	MA1124 Na mg/Kg PS 100	MA1124 Ni mg/Kg PS 1	MA1124 P mg/Kg PS 100	MA1124 Pb mg/Kg PS 0.3	MA1124 Sb mg/Kg PS 5	MA1124 Se mg/Kg PS 0.9	MA1124 Sn mg/Kg PS 10	MA1124 Sr mg/Kg PS 0.5	MA1124 Ti mg/Kg PS 0.03	MA1124 V mg/Kg PS 2	MA1124 Zn mg/Kg PS 0.5	
1	B (CSR)	1709	167	3.29	5959	<1	981	28.7	<5	<0.9	27	50.4	<100	0.40	6	211
2	D (CSR)	1011	119	2.53	4302	<1	1274	20.5	<5	<0.9	19	58.1	<100	0.23	4	365
3	G (CSR)	2157	460	4.70	6062	9	912	30.3	9	<0.9	<10	91.4	<100	0.16	6	263

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A."

"Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce". Los resultados corresponden a las muestras indicadas



**INFORME DE ENSAYO  
N° SEP1028.R20**

**CONTROL DE CALIDAD**

N°	Codigo de Servicio Ensayo Unidad Limite de Detección LD	Elementos															
		MA1124 Ag mg/Kg PS 0.2	MA1124 Al mg/Kg PS 100	MA1124 As mg/Kg PS 0.2	MA1124 B mg/Kg PS 2.5	MA1124 Ba mg/Kg PS 1	MA1124 Be mg/Kg PS 0.4	MA1124 Bi mg/Kg PS 5	MA1124 Ca mg/Kg PS 100	MA1124 Cd mg/Kg PS 0.36	MA1124 Co mg/Kg PS 0.04	MA1124 Cr mg/Kg PS 0.3	MA1124 Cu mg/Kg PS 0.5	MA1124 Fe mg/Kg PS 100	MA1124 K mg/Kg PS 100		
1	Adición (% Recup.)	104	90.5	101	106	89.0	101	--	107	86.1	97.4	84.8	95.8	91.5	93.5		
2	Adición (% Recup.)	101	109	102	106	86.5	91.2	--	108	88.5	96.6	86.4	95.3	109	86.0		
3	Adición Rango (%)	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	--	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0		
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	102	23.9	100.0	102	101	98.6	--	103	100	98.1	101	98.2	96.5	99.3		
5	STD - Rango (%)	97.5-102.5	23.7-176.3	97.5-102.5	97.4-102.6	97.8-102.2	97.9-102.1	--	97.1-102.9	97.7-102.3	97.5-102.5	97.7-102.3	97.7-102.3	96.0-104.0	97.2-102.8		
6	D (CSR) (Original)	<0.2	1192	3.8	23.5	41	<0.4	<5	34941	0.45	2.55	46.5	43.3	4300	3634		
7	D (CSR) (Dup)	<0.2	1199	3.7	23.4	41	<0.4	<5	35037	0.45	2.56	46.4	43.1	4300	3634		
8	Blanco	<0.2	<100	<0.2	<2.5	<1	<0.4	<5	<100	<0.36	<0.04	<0.3	<0.5	<100	<100		

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A."  
"Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce". Los resultados corresponden a las muestras indicadas



**INFORME DE ENSAYO  
N° SEP1028.R20**

Muestras QC		Elementos													
N°	Codigo de Servicio Ensayo Unidad Limite de Detección ID	MA1124 Mg mg/Kg PS 100	MA1124 Mn mg/Kg PS 2	MA1124 Mo mg/Kg PS 0.09	MA1124 Na mg/Kg PS 100	MA1124 Ni mg/Kg PS 1	MA1124 P mg/Kg PS 1.00	MA1124 Pb mg/Kg PS 0.3	MA1124 Sb mg/Kg PS 5	MA1124 Se mg/Kg PS 0.9	MA1124 Sn mg/Kg PS 10	MA1124 S mg/Kg PS 0.5	MA1124 Ti mg/Kg PS 100	MA1124 Tl mg/Kg PS 0.03	MA1124 V mg/Kg PS 2
1	Adición (% Recup.)	101	101	88.8	93.5	90.5	--	107	101	107	99.1	83.0	--	86.9	86.5
2	Adición (% Recup.)	109	105	88.8	108	113	--	110	103	101	97.7	82.3	--	95.8	102
3	Adición Rango (%)	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	--	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0	--	80.0 - 120.0	80.0 - 120.0
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	99.5	103	99.1	98.5	101	99.0	102	102	103	104	99.5	--	100	100.0
5	STD - Rango (%)	96.4-103.6	96.2-103.8	97.7-102.3	97.0-103.0	97.5-102.5	90.5-109.5	97.6-102.4	79.0-121.0	96.8-103.2	95.5-104.5	96.7-103.3	--	97.1-102.9	98.2-101.8
6	D (CSR) (Original)	1011	119	2.53	4302	<1	1274	20.5	<5	<0.9	19	58.1	<100	0.23	4
7	D (CSR) (Dup)	1011	109	2.53	4302	<1	1274	20.5	<5	<0.9	19	58.1	<100	0.23	4
8	Blanco	<100	<2	<0.09	<100	<1	<100	<0.3	<5	<0.9	<10	<0.5	<100	<0.03	<2

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A."

"Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce". Los resultados corresponden a las muestras indicadas



**INFORME DE ENSAYO**  
**N° SEP1028.R20**

Muestras QC		Elementos
N°	Codigo de Servicio Ensayo Unidad Limite de Detección ID	MA1124 Zn mg/Kg PS 0.5
1	Adición (% Recup.)	116
2	Adición (% Recup.)	119
3	Adición Rango (%)	80.0 - 120.0
4	STD - Recuperación Obtenido (%)	100
5	STD - Rango (%)	97.4-102.6
6	D (CSR) (Original)	365
7	D (CSR) (Dup)	365
8	Blanco	<0.5



**INFORME DE ENSAYO**  
N° SEP1028.R20

**METODOS DE ENSAYO Y CODIGOS DE SERVICIO**

N°	Descripción		
	Ensayo	Denominación	Cod.Serv
1	Metales Por ICP MS/ICP OES	Metales Por ICP MS/ICP OES	MA1124

- (1) SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.  
 APHA : American Public Health Association.  
 AWWA: American Water Works Association.  
 WEF : Water Environment Federation.  
 EPA : Environmental Protection Agency.  
 ASTM: American Society for Testing and Materials.  
 ISO: International Organization for Standardization.  
 NTP: Norma Técnica Peruana.  
 NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A."  
 "Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce". Los resultados corresponden a las muestras indicadas



## INFORME DE ENSAYO: 44491/2020

**Alvaro Reyes Izquierdo**

Calle Armando Orozco Nro. 156 Urbanización Rosario de Villa Chorrillos Lima Lima

### Muestreo de Calidad de Agua Septiembre 2020

**Emitido por: Karin Zelada Trigoso**

**Fecha de Emisión: 02/11/2020**

Karin Zelada Trigoso

CQP: 830

Personal Signatario - Químico

División - Medio Ambiente

Pág. 1 de 4



# INFORME DE ENSAYO: 44491/2020

## RESULTADOS ANALITICOS

Muestras del ítem: 1

Nº ALS LS						371352/2020-1.0
Fecha de Muestreo						10/09/2020
Hora de Muestreo						15:25:00
Tipo de Muestra						Aguas Superficiales
Identificación						UBE-030 (B-CSR)-0103
Parámetro	Ref. Mét.	Fecha de Ensayo	Unidad	LD	LQ	Resultado
003 ENSAYOS FISICOQUÍMICOS - Aniones por Cromatografía Ionica						
Cloruros, Cl-	8100	13/09/2020	mg/L	0,061	0,200	20,44
Bromuro, Br-	8100	13/09/2020	mg/L	0,004	0,025	< 0,004
Fluoruros, F-	8100	13/09/2020	mg/L	0,002	0,006	0,059
Fosfatos (como P)	8100	13/09/2020	mg PO4-3-P/L	0,004	0,025	0,264
Nitratos, (como N)	8100	13/09/2020	mg NO3-N/L	0,002	0,005	37,34
Nitritos, (como N)	8100	13/09/2020	mg NO2-N/L	0,004	0,010	0,141
Sulfatos, SO4-2	8100	13/09/2020	mg/L	0,050	0,200	9,883

Nº ALS LS						371353/2020-1.0
Fecha de Muestreo						10/09/2020
Hora de Muestreo						15:51:00
Tipo de Muestra						Aguas Superficiales
Identificación						UBE-031 (D-CSR)-0103
Parámetro	Ref. Mét.	Fecha de Ensayo	Unidad	LD	LQ	Resultado
003 ENSAYOS FISICOQUÍMICOS - Aniones por Cromatografía Ionica						
Cloruros, Cl-	8100	13/09/2020	mg/L	0,061	0,200	29,31
Bromuro, Br-	8100	13/09/2020	mg/L	0,004	0,025	< 0,004
Fluoruros, F-	8100	13/09/2020	mg/L	0,002	0,006	0,146
Fosfatos (como P)	8100	13/09/2020	mg PO4-3-P/L	0,004	0,025	< 0,004
Nitratos, (como N)	8100	13/09/2020	mg NO3-N/L	0,002	0,005	64,96
Nitritos, (como N)	8100	13/09/2020	mg NO2-N/L	0,004	0,010	< 0,004
Sulfatos, SO4-2	8100	13/09/2020	mg/L	0,050	0,200	14,75

Nº ALS LS						371354/2020-1.0
Fecha de Muestreo						10/09/2020
Hora de Muestreo						16:30:00
Tipo de Muestra						Aguas Superficiales
Identificación						UBE-032 (G-CSR)-0103
Parámetro	Ref. Mét.	Fecha de Ensayo	Unidad	LD	LQ	Resultado
003 ENSAYOS FISICOQUÍMICOS - Aniones por Cromatografía Ionica						
Cloruros, Cl-	8100	13/09/2020	mg/L	0,061	0,200	27,82
Bromuro, Br-	8100	13/09/2020	mg/L	0,004	0,025	< 0,004
Fluoruros, F-	8100	13/09/2020	mg/L	0,002	0,006	0,118
Fosfatos (como P)	8100	13/09/2020	mg PO4-3-P/L	0,004	0,025	< 0,004
Nitratos, (como N)	8100	13/09/2020	mg NO3-N/L	0,002	0,005	49,43
Nitritos, (como N)	8100	13/09/2020	mg NO2-N/L	0,004	0,010	0,142
Sulfatos, SO4-2	8100	13/09/2020	mg/L	0,050	0,200	9,639



## INFORME DE ENSAYO: 44491/2020

N° ALS LS	371355/2020-1.0					
Fecha de Muestreo	10/09/2020					
Hora de Muestreo	17:00:00					
Tipo de Muestra	Aguas Superficiales					
Identificación	BLANCO					
Parámetro	Ref. Mét.	Fecha de Ensayo	Unidad	LD	LQ	Resultado
003 ENSAYOS FISICOQUÍMICOS - Aniones por Cromatografía Ionica						
Cloruros, Cl-	8100	13/09/2020	mg/L	0,061	0,200	0,454
Bromuro, Br-	8100	13/09/2020	mg/L	0,004	0,025	< 0,004
Fluoruros, F-	8100	13/09/2020	mg/L	0,002	0,006	< 0,002
Fosfatos (como P)	8100	13/09/2020	mg PO4-3-P/L	0,004	0,025	< 0,004
Nitratos, (como N)	8100	13/09/2020	mg NO3-N/L	0,002	0,005	0,013
Nitritos, (como N)	8100	13/09/2020	mg NO2-N/L	0,004	0,010	< 0,004
Sulfatos, SO4-2	8100	13/09/2020	mg/L	0,050	0,200	0,280

### Observaciones

- LD: Límite de detección.
- LQ: Límite de cuantificación.
- Ref. Mét.: Código interno que referencia a la metodología de análisis.
- Las fechas de ejecución del análisis para los ensayos en campo realizados por ALS LS Perú S.A.C., se refiere a las fechas indicadas como fecha de muestreo. No Aplica para datos proporcionados por el cliente.

### DESCRIPCION Y UBICACION GEOGRAFICA DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO

Estación de Muestreo	Resp.del Muestreo	Tipo de Muestra	Fecha de Recepción	Fecha de Muestreo	Ubicación Geográfica UTM WGS84	Zona	Condición de la muestra	Descripción de la Estación de Muestreo
UBE-030 (B-CSR)-0103	Cliente	Aguas Superficiales	11/09/2020	10/09/2020	---	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente
UBE-031 (D-CSR)-0103	Cliente	Aguas Superficiales	11/09/2020	10/09/2020	---	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente
UBE-032 (G-CSR)-0103	Cliente	Aguas Superficiales	11/09/2020	10/09/2020	---	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente
BLANCO	Cliente	Aguas Superficiales	11/09/2020	10/09/2020	---	---	Proporcionado por el cliente	Reservado por el cliente

### REFERENCIA DE LOS METODOS DE ENSAYO

Ref. Mét.	Sede	Parámetro	Método de Referencia	Descripción
8100	LME	Aniones por Cromatografía Ionica	EPA METHOD 300.1 Rev. 1, 1997 (Validado).2015	Determination of Inorganic Anions in Drinking Water by Ion Chromatography

### CÓDIGOS DE AUTENTICIDAD DEL INFORME DE ENSAYO

ALS LS Perú S.A.C. asegura a sus clientes una completa autenticidad del Informe de Ensayo 44491/2020, para que este informe pueda ser verificado en su totalidad. Para comprobar la autenticidad de los mismos en la base de datos de ALS LS Perú S.A.C., visitar el sitio Web [www.alsglobal.com](http://www.alsglobal.com) e introducir los siguientes códigos de autenticidad que se detallan a continuación:

Estación de Muestreo	N° ALS LS	Código único de Autenticidad
UBE-030 (B-CSR)-0103	371352/2020-1.0	qppnoms&3253173
UBE-031 (D-CSR)-0103	371353/2020-1.0	rppnoms&3353173
UBE-032 (G-CSR)-0103	371354/2020-1.0	sppnoms&3453173
BLANCO	371355/2020-1.0	tpnoms&3553173

ALS LS Perú S.A.C. asegurando la marca y prestigio de su empresa.



## INFORME DE ENSAYO: 44491/2020

### COMENTARIOS

**LME:** Av. Argentina 1859 - Cercado - Lima

**"EPA":** U.S. Environmental Protection Agency.

**"SM":** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

**"ASTM":** American Society for Testing and Materials.

El presente documento es redactado íntegramente en ALS LS Perú S.A.C., su alteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales de la materia, queda prohibida la reproducción parcial del presente informe, salvo autorización escrita de ALS LS Perú S.A.C.; sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe.

El lote de muestras que incluye el presente informe será descartado a los 30 días calendarios de haber ingresado la muestra al laboratorio.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

ALS LS Perú S.A.C. deslinda responsabilidad de la información proporcionada por el cliente.

Si ALS LS Perú S.A.C. no realizó el muestreo, los resultados se aplicaran a la muestra tal cómo se recibió.

**INFORME DE ENSAYO N° 1-20217/19**

Pág.1/3

Solicitante : **REYES IZQUIERDO, ALVARO**  
 Domicilio legal : Calle Armando Orozco N° 156 Urb. Rosario de Villa - Chorrillos - Lima  
 Producto declarado : **SUELO**  
 Cantidad de Muestras para el Ensayo : 7 muestras x 1 kg  
**Muestra proporcionada por el solicitante**  
 Identificación de la muestra : Según se indica  
 Forma de Presentación : En bolsa de polietileno cerrada y refrigerada  
 Fecha de recepción : 2019 - 12 - 23  
 Fecha de inicio del ensayo : 2019 - 12 - 26  
 Fecha de término del ensayo : 2019 - 12 - 30  
 Ensayo realizado en : Laboratorio ICP-AA  
 Identificado con : **H/S 19014613 (EXMA-22059-2019)**  
 Validez del documento : Este documento es válido solo para las muestras descritas

Ensayo	LD	Unidad	Resultados					
			A	B	C	D	E	
Metales por ICP-MS	Aluminio (Al)	0,050	mg/Kg	4 498	6 634	7 039	6 432	6 911
	Antimonio (Sb)	0,020	mg/Kg	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020
	Arsénico (As)	0,050	mg/Kg	8,314	11,32	12,09	24,06	9,587
	Bario (Ba)	0,015	mg/Kg	78,66	77,58	81,00	109,2	128,8
	Berilio (Be)	0,015	mg/Kg	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
	(*) Bismuto (Bi)	0,050	mg/Kg	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
	(*) Boro (B)	1,00	mg/Kg	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00	<1,00
	Cadmio (Cd)	0,020	mg/Kg	2,189	2,723	3,489	4,675	2,485
	Calcio (Ca)	5,00	mg/Kg	25 996	35 775	28 890	23 897	26 467
	Cobalto (Co)	0,030	mg/Kg	5,125	6,040	8,320	7,037	5,268
	Cobre (Cu)	0,030	mg/Kg	77,71	63,76	63,02	274,8	128,8
	Cromo (Cr)	0,050	mg/Kg	56,92	43,96	180,0	85,96	39,46
	(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/Kg	<0,0250	<0,0250	<0,0250	<0,0250	<0,0250
	(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/Kg	72,94	103,5	71,59	92,52	69,16
	(*) Fósforo (P)	1,00	mg/Kg	1 938	2 763	2 627	2 082	2 370
	Hierro (Fe)	1,00	mg/Kg	15 105	20 155	22 791	26 131	21 986
	(*) Litio (Li)	0,025	mg/Kg	5,72	6,09	6,53	7,43	4,97
	Magnesio (Mg)	1,00	mg/Kg	3 115	4 672	4 776	4 667	5 199
	Manganeso (Mn)	0,025	mg/Kg	454,7	278,6	346,5	527,1	383,3
	Mercurio (Hg)	0,010	mg/Kg	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
	(*) Molibdeno (Mo)	0,020	mg/Kg	6,319	1,487	1,495	5,518	1,888
	Niquel (Ni)	0,035	mg/Kg	11,64	11,14	9,429	26,28	7,454
	Plata (Ag)	0,005	mg/Kg	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
	Plomo (Pb)	0,020	mg/Kg	65,82	66,34	77,07	285,6	90,84
Potasio (K)	1,00	mg/Kg	3 483	4 166	3 153	3 464	2 956	
Selenio (Se)	0,050	mg/Kg	0,6938	1,007	0,9749	1,096	0,7320	



INFORME DE ENSAYO N° 1-20217/19

Pág.2/3

Ensayo	LD	Unidad	Resultados				
			A	B	C	D	E
(*) Silicio (Si)	1	mg/Kg	27,56	26,04	35,17	41,04	62,91
Sodio (Na)	1	mg/Kg	2 390	3 434	2 672	2 157	2 389
Talio (Tl)	0,025	mg/Kg	<0,0250	<0,0250	<0,0250	<0,0250	<0,0250
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/Kg	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/Kg	173,7	168,9	214,6	150,0	197,8
(*) Uranio (U)	0,005	mg/Kg	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050	<0,0050
Vanadio (V)	0,05	mg/Kg	18,36	23,96	28,95	24,26	25,78
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/Kg	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
Zinc (Zn)	0,05	mg/Kg	244,69	318,71	415,60	1 028,03	463,94

LD: Límite de detección

(\*) "Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA"

Ensayo	LD	Unidad	Resultados	
			F	G
Aluminio (Al)	0,050	mg/Kg	8 151	9 826
Antimonio (Sb)	0,020	mg/Kg	<0,020	<0,020
Arsénico (As)	0,050	mg/Kg	11,72	7,394
Bario (Ba)	0,015	mg/Kg	101,9	88,34
Berilio (Be)	0,015	mg/Kg	<0,015	<0,015
(*) Bismuto (Bi)	0,050	mg/Kg	<0,050	<0,050
(*) Boro (B)	1,00	mg/Kg	<1,00	<1,00
Cadmio (Cd)	0,020	mg/Kg	3,181	2,767
Calcio (Ca)	5,00	mg/Kg	23 947	17 702
Cobalto (Co)	0,030	mg/Kg	7,664	6,227
Cobre (Cu)	0,030	mg/Kg	95,88	118,9
Cromo (Cr)	0,050	mg/Kg	30,95	42,89
(*) Estaño (Sn)	0,025	mg/Kg	<0,0250	<0,0250
(*) Estroncio (Sr)	0,045	mg/Kg	64,01	58,26
(*) Fósforo (P)	1,00	mg/Kg	2 971	1 371
Hierro (Fe)	1,00	mg/Kg	28 859	32 704
(*) Litio (Li)	0,025	mg/Kg	5,16	4,96
Magnesio (Mg)	1,00	mg/Kg	5 331	6 106
Manganeso (Mn)	0,025	mg/Kg	387,8	533,0
Mercurio (Hg)	0,010	mg/Kg	<0,010	<0,010
(*) Molibdeno (Mo)	0,020	mg/Kg	1,253	1,878
Niquel (Ni)	0,035	mg/Kg	10,56	9,826
Plata (Ag)	0,005	mg/Kg	<0,0050	<0,0050
Plomo (Pb)	0,020	mg/Kg	48,01	52,68
Potasio (K)	1,00	mg/Kg	2 253	3 186
Selenio (Se)	0,050	mg/Kg	1,571	1,046
(*) Silicio (Si)	1	mg/Kg	75,63	71,26
Sodio (Na)	1	mg/Kg	1 688	2 138
Talio (Tl)	0,025	mg/Kg	<0,0250	<0,0250
(*) Telurio (Te)	0,05	mg/Kg	<0,050	<0,050

Metales Totales ICP-Masa



**INFORME DE ENSAYO N° 1-20217/19**

Pág. 3/3

Ensayo	LD	Unidad	Resultados	
			F	G
(*) Titanio (Ti)	0,05	mg/Kg	231,2	248,5
(*) Uranio (U)	0,005	mg/Kg	<0,0050	<0,0050
Vanadio (V)	0,05	mg/Kg	31,38	25,50
(*) Wolframio (W)	0,05	mg/Kg	<0,050	<0,050
Zinc (Zn)	0,05	mg/Kg	340,02	265,55

LD: Limite de detección

(\*) "Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA"

**MÉTODOS**

**Metales por ICP-MS:** EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

(\*) **Metales por ICP-MS (Bismuto, Boro, Estaño, Estroncio, Fosforo, Litio, Molibdeno, Silicio, Telurio, Titanio, Wolframio):** EPA METHOD 6020A. Revision 1. 2007. Inductively coupled plasma-mass spectrometry (Preparación de muestra EPA: Method 3051A. Microwave assisted acid digestion of Sediments, sludges, soils, and oils)

**OBSERVACIONES**

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 02 de enero de 2020  
AA

**CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.**

ING. ROSA PALOMINO LOO  
C.I.P. 40302  
COORDINADOR DE LABORATORIOS

**"Los ensayos acreditados del presente informe, al estar en el marco de la acreditación del INACAL-DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC"**

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"



# INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : ALVARO REYES IZQUIERDO

PROCEDENCIA : [REDACTED]

REFERENCIA : [REDACTED]  
[REDACTED]

FECHA : 7/01/2020

Número Muestra		P ppm	K ppm	N %	C %	Relación C/N
Lab	Claves					
1984	Punto B, Matriz fino, RT-03	56.10	2600.00	0.43	3.36	7.81
1985	Punto D, Matriz fino, RT-04	48.10	2360.00	0.51	3.84	7.53
1986	Punto G, Matriz fino, RT-05	65.30	1752.00	0.36	2.40	6.67

## **Metodologías empleadas:**

- Fósforo disponible: Método de Olsen modificado, extracción con  $\text{NaHCO}_3$  0.5N, pH 8.5.
- Potasio disponible: Extracción con acetato de amonio y lectura por espectrofotometría de absorción atómica.
- Carbono orgánico: Método de Walkley y Black o del Dicromato de Potasio, oxidación del carbono orgánico con Dicromato de Potasio.
- Nitrógeno total: Método de Kjeldahl.

*Ing. Braulio La Torre Martínez*  
*Jefe del Laboratorio*