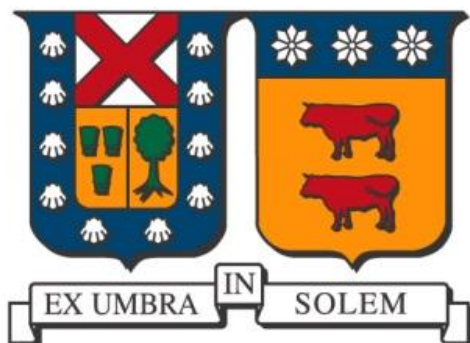


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO - CHILE



**“EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD PARA LA
CONTINUIDAD OPERACIONAL DEL RELLENO
SANITARIO SAN PEDRO”**

CATALINA ANASTASIA GONZÁLEZ PIZARRO

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL AMBIENTAL**

Profesor Guía: Daniel Ramírez
Profesora Correferente: Pamela Bonert

Enero – 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de prefactibilidad para la continuidad operacional del relleno sanitario San Pedro

Nombre del candidato(a): Catalina Anastasia González Pizarro

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Ambiental

Campus: Casa Central Valparaíso

Departamento: Ingeniería Química y Ambiental

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Daniel Ramirez Livingston, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 19 de Marzo 2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 18 de marzo 2026 Firma: 

DEDICATORIA

Agradezco enormemente a mi mamá Ximena y a mi abuela Dominga, por educarme, cuidarme, guiar mis pasos y siempre darme todas las facilidades para poder estudiar.

A mis amigos Cata y Pablo, gracias por ser mis compañeros durante todo el periodo universitario, por todos los trabajos que hicimos juntos, por siempre escucharme y apoyarme, y por los lindos momentos compartidos en toda la vida universitaria.

A mi pololo Diego, le agradezco por sus consejos, por siempre motivarme a confiar en mis capacidades, explicarme las cosas que no entiendo y por acompañarme en incontables madrugadas de estudio.

Y también a mi perrito Gastón, por subirse a mis piernas cada vez que me sentaba a estudiar.

Gracias a todos por estar presentes y por siempre desear lo mejor para mí.

RESUMEN

El presente trabajo de título desarrolla la evaluación de prefactibilidad técnica y económica para la continuidad operacional del Relleno Sanitario San Pedro, ubicado en la comuna de Quillota. El proyecto surge ante la necesidad de asegurar una solución para la disposición final de residuos sólidos domiciliarios para la provincia, considerando el próximo agotamiento de la vida útil de las celdas actuales.

En el ámbito técnico, se diseñó una ampliación con un horizonte de 20 años, proyectando una recepción máxima de 221.555 [ton/año] su etapa inicial y posteriormente 186.150 [ton/año]. El proyecto se desarrollará en tres etapas progresivas que comprenden un área basal de 247.947 [m²] para la disposición de las celdas de residuos que serán construidas utilizando un método mixto. El diseño contempla el cumplimiento del D.S. N°189, integrando los sistemas de impermeabilización, manejo de lixiviados y sistema de control de biogás.

La evaluación económica se realizó construyendo un flujo de caja con una tasa de descuento del 6%. Los resultados muestran una alta rentabilidad financiera, con un VAN de \$19.249.723.735 y un TIR del 32%. El modelo incorpora un costo de cierre y clausura asegurando la protección ambiental al término de la operación.

La implementación de este proyecto significa una solución eficiente que garantiza la continuidad de un servicio básico esencial.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	8
OBJETIVOS.....	9
Objetivo General	9
Objetivos Específicos.....	9
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	10
1.1 ¿Qué es un relleno sanitario?	10
1.2 Relleno sanitario San Pedro	11
CAPÍTULO 2: ESTUDIO DE MERCADO.....	14
2.1 Análisis de demanda	14
2.1.1 Cobertura geográfica	14
2.1.2 Habitantes por comuna	14
2.1.3 Generación de residuos.....	15
2.2 Análisis de oferta	18
2.3 Análisis de precios	19
CAPÍTULO 3: ESTUDIO TÉCNICO.....	21
3.1 Tamaño del proyecto.....	21
3.1.1 Proyección de producción de residuos	21
3.1.2 Volumen de celda requerido.....	24
3.2 Ubicación del proyecto	24
3.2.1 Disponibilidad Territorial.....	25
3.2.2 Ubicación de nuevas instalaciones	26
3.3 Proceso de producción	27
3.3.1 Método de relleno	27
3.3.2 Formación de la celda.....	27

3.3.3 Capacidad de las etapas	30
3.4 Especificaciones de construcción	30
3.4.1 Sistema de impermeabilización	31
3.4.2 Sistema de control de lixiviados	31
3.4.3 Manejo de biogás	32
3.5 Programa de producción y generación de emisiones	33
3.5.1 Cantidad de residuos	33
3.5.2 Generación de biogás	33
3.5.3 Generación de lixiviados	36
3.6 Equipamiento necesario	37
3.7 Layout	38
CAPÍTULO 4: LEGISLACIÓN APLICABLE	39
4.1 Marco regulatorio principal	39
4.2 Marco regulatorio específico	39
4.3 Instrumento de planificación territorial	39
4.4 Ingreso al SEIA	39
CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO	40
5.1 Definición de parámetros	40
5.2 Inversión inicial (CAPEX)	40
5.3 Costos de operación (OPEX)	41
5.4 Flujo de caja	41
5.5 Indicadores de rentabilidad y análisis	42
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación de un relleno sanitario	10
Figura 2: Ubicación del relleno sanitario San Pedro	11
Figura 3: Emplazamiento proyectos Plan de Cierre y Relleno Sanitario	12
Figura 4: Generación de residuos a nivel nacional	16
Figura 5: Sitios por tipo de instalación.....	19
Figura 6: Zonificación ZRV	24
Figura 7: Distribución de áreas en el predio	26
Figura 8: Distribución de las etapas del proyecto	27
Figura 9: Celda diaria para 605 [ton/día]	28
Figura 10: Celda diaria para 513 [ton/día]	29
Figura 11: Vista corte relleno sanitario	29
Figura 12: Sello basal del relleno sanitario	31
Figura 13: Sistema de captación de lixiviados	32
Figura 14: Chimenea de ventilación pasiva	33
Figura 15: Distribución triángulo equilátero	34
Figura 16: Layout del proyecto	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características del relleno sanitario San Pedro	13
Tabla 2: Número de habitantes por comuna.....	15
Tabla 3: Proyecciones de habitantes por comuna	15
Tabla 4: Producción de residuos per-cápita (Chile)	16
Tabla 5: Producción de residuos per-cápita (región de Valparaíso)	17
Tabla 6: Toneladas de residuos depositados en el relleno sanitario San Pedro	17
Tabla 7: Estimación de producción de residuos anual [ton/año]	17
Tabla 8: Metas de recolección y valorización de residuos de envases y embalajes domiciliarios	18
Tabla 9: Sitios de disposición final en la región de Valparaíso	19
Tabla 10: Costos por habitante por servicios de aseo 2022	20
Tabla 11: Costos por tonelada por Servicios de Aseo 2022.....	20
Tabla 12: Producción de residuos por habitante	22
Tabla 13: Proyección de población y residuos a 20 años.....	23
Tabla 14: Área ocupada y disponible.....	25
Tabla 15: Capacidad volumétrica por etapas	30
Tabla 16: Años de operación por etapa	33
Tabla 17: Detalle de operación anual	35
Tabla 18: Materiales a utilizar.....	37
Tabla 19: Planilla de costos de inversión	40
Tabla 20: Costos de operación	41
Tabla 21: Flujo de caja	41

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos es una consecuencia intrínseca de la actividad humana y el desarrollo económico. En Chile, la producción de residuos sólidos es de magnitudes significativas alcanzando niveles cercanos a los 19 millones de toneladas anuales lo que se traduce en una producción per cápita que promedió 1,25 [kg/hab./día] en 2022 (Ministerio del Medio Ambiente, 2024).

Ante esta realidad, el Estado ha impulsado iniciativas como la Ley N°20.920 (Ley REP), que busca fomentar el reciclaje y la valorización para disminuir la carga de sobre los sitios de disposición final. Sin embargo, a pesar de las metas de reducción, la disposición segura de los residuos que no son valorizados sigue siendo un pilar crítico para el desarrollo y la salud pública.

A nivel nacional, la infraestructura de disposición final enfrenta desafíos estructurales: para el año 2023 se registraron 103 sitios operativos, de los cuales solo un 33% corresponde a rellenos sanitarios que cumplen estrictamente con las condiciones sanitarias y de seguridad del D.S. N°189 (SUBDERE, 2024). El resto de la oferta se distribuye en vertederos y basurales que no garantizan el control adecuado de emisiones.

En particular, la región de Valparaíso cuenta con cuatro sitios para atender la demanda de gran parte de sus comunas. Uno de estos recintos es el Relleno Sanitario San Pedro, ubicado en Quillota, que actualmente sirve a siete comunas de gran densidad entre las que destacan Quillota, Quilpué y Villa Alemana. A pesar de ser un sitio de gran importancia en la gestión de residuos, sus proyecciones técnicas indican que la vida útil de las instalaciones culminará en 2037.

La interrupción de las operaciones en este recinto no puede ocurrir, pues significaría una inminente crisis sanitaria para la población beneficiada, que, según estimaciones para ese año, podría alcanzar los 567.000 habitantes.

Bajo este contexto, el presente trabajo desarrolla una “Evaluación de prefactibilidad para la continuidad operacional del Relleno Sanitario San Pedro” que permita garantizar una cobertura de la disposición final de residuos sólidos domiciliarios por 20 años.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la prefactibilidad ambiental, operativa y económica de un proyecto de continuidad para el Relleno Sanitario San Pedro que permita satisfacer la demanda de disposición de residuos sólidos domiciliarios por un periodo de 20 años.

Objetivos Específicos

- Analizar la demanda actual y proyectada de residuos sólidos domiciliarios en las comunas servidas.
- Establecer la capacidad volumétrica y la vida útil del sitio considerando la expansión, las especificaciones de los sistemas de control de emisiones (lixiviados y biogás) e impermeabilización según la normativa sanitaria.
- Determinar la pertinencia de ingreso al SEIA identificando las condiciones para presentar una DIA o EIA.
- Determinar la factibilidad económica del proyecto mediante un análisis de costos.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

1.1 ¿Qué es un relleno sanitario?

Según lo definido en el Artículo 4° el D.S. N°189, un relleno sanitario es un sitio de disposición final para residuos sólidos domiciliarios y asimilables a domiciliarios cuya operación está diseñada para minimizar los riesgos a la salud de la población y daños al medioambiente.

Para cumplir dicho objetivo existen una serie de parámetros de diseño indicados en el Decreto Supremo 189/2005 del Ministerio de Salud donde se indica el “Reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básicas en los rellenos sanitarios”.

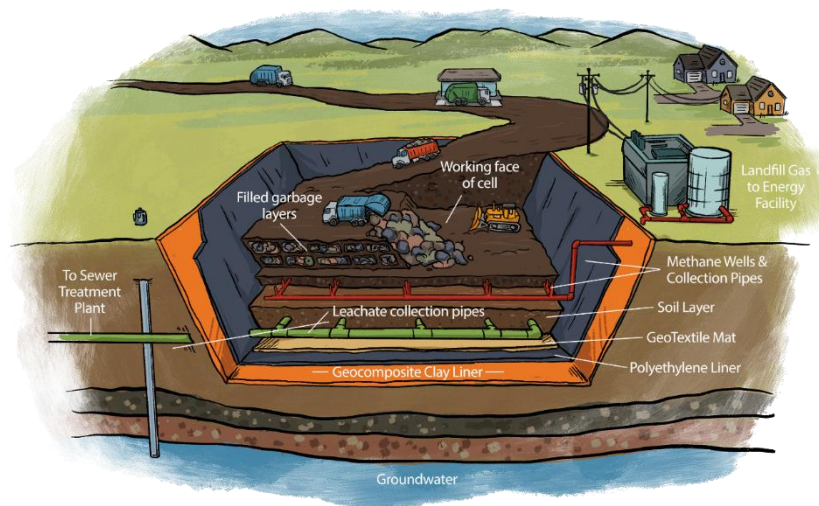


Figura 1: Representación de un relleno sanitario

Fuente: Wasatch Integrated

En el contenido del decreto se especifican las siguientes exigencias para las instalaciones de un relleno sanitario ordenadas desde la parte inferior (cercano a aguas subterráneas) hacia la exterior (superficie):

- **Sistema de impermeabilización:** su función es proteger el suelo y evitar filtraciones de lixiviados hacia aguas subterráneas. Su composición es variable y depende de la cantidad de población a sanear, por ejemplo, para una población servida superior a 100.000 habitantes su composición mínima es membrana-arcilla-suelo o doble membrana-suelo considerando:
 - **Suelo:** puede ser natural, de material puro o mezcla de baja permeabilidad, como arcilla, limo u otros con un coeficiente de conductividad hidráulica equivalente de máximo 10^{-5} [cm/s]. La distancia entre el fondo del relleno y el nivel freático debe ser de mínimo 3 [m] (Ministerio de Salud, 2005).
 - **Arcilla:** una capa de 60 [cm] de espesor y coeficiente de conductividad hidráulica máxima de 10^{-7} [cm/s] (Ministerio de Salud, 2005).

- **Membrana:** de composición sintética, como polietileno o polipropileno, de mínimo 0,75 [mm] y 1,52 [mm] en el caso de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) (Ministerio de Salud, 2005).
- **Control de lixiviados:** instalación de tuberías que permitan coleccionar y transportar el lixiviado producido por la descomposición de residuos e infiltración de aguas lluvias. Este líquido, según las condiciones del relleno, podrá ser almacenado en piscinas, enviarse a plantas de tratamiento o recircular a la masa de residuos.
- **Control de biogás:** el biogás se produce por la descomposición anaerobia de la materia orgánica presente en los desechos. Para evitar su acumulación, se colecta utilizando pozos horizontales y verticales que transportan el gas para ser utilizado como energía. En caso de no contar con esta infraestructura, se deben construir chimeneas de drenaje de gases.
- **Depósito de residuos:** al ingresar al relleno se debe registrar la cantidad de residuos en peso o volumen para luego ser descargados en el frente de trabajo.
 - **Celda:** corresponde a la basura depositada diariamente en el relleno sanitario. Para reducir su volumen se debe compactar utilizando maquinaria pesada y al finalizar la jornada se cubre.
 - **Capas de cobertura:** tierra compactada de mínimo 15 [cm] de grosor con la que se deben cubrir las celdas formadas diariamente. Su coeficiente de conductividad hidráulica es de máximo 10^{-4} [cm/s] (Ministerio de Salud, 2005). Se utilizan con el objetivo de evitar emanación de olores y biogás, infiltraciones de aguas lluvias y origen de vectores sanitarios.

1.2 Relleno sanitario San Pedro

El relleno sanitario San Pedro está ubicado en la comuna de Quillota, región de Valparaíso.



Figura 2: Ubicación del relleno sanitario San Pedro

Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth

Este sitio de disposición final operó inicialmente como vertedero autorizado desde 1996 para recibir desechos de hasta 68.000 habitantes pertenecientes a las comunas de Quillota, Nogales, La Calera, Hijuelas, La Cruz y Papudo. La autorización estuvo a cargo del Servicio de Salud Viña del Mar-Quillota, sin embargo, en 2013 esta entidad dejó de ser competente, por lo que, sumado a las nuevas exigencias del D.S 189/2005, se realiza una conversión de vertedero a relleno sanitario que empieza a operar el 2017.

La adecuación del sitio de disposición final a la normativa vigente implicó someter el proyecto al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) donde se presentaron y aprobaron dos Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA):

- “*Plan de Cierre, Sellado y Reconversión a Relleno Sanitario Sitio de Disposición Final San Pedro*” ingresado en marzo de 2010 y aprobado en diciembre de 2012.
- “*Modificación a la Tasa de Tratamiento Máxima de Residuos Para el Proyecto Plan de Cierre, Sellado y Reconversión a Relleno Sanitario Sitio de Disposición Final, San Pedro*” ingresado en agosto de 2016 y aprobado en septiembre de 2017.

Las obras del relleno sanitario comenzaron en mayo de 2015 con la excavación del vaso y construcción de piscinas, luego se realizaron las labores de impermeabilización e instalaciones para captación de lixiviados y biogás. Durante el periodo de construcción, los residuos se siguieron depositando en el vertedero el cual fue sellado en totalidad una vez que el relleno sanitario estuvo habilitado.

La etapa de operación del relleno sanitario está planificada a 20 años. En ellos se contempla que las celdas alcancen el nivel del vertedero y que continúen construyéndose, tomando parte de la superficie del vertedero, hasta alcanzar la cota de proyecto. Lo descrito anteriormente se representa en la siguiente imagen:

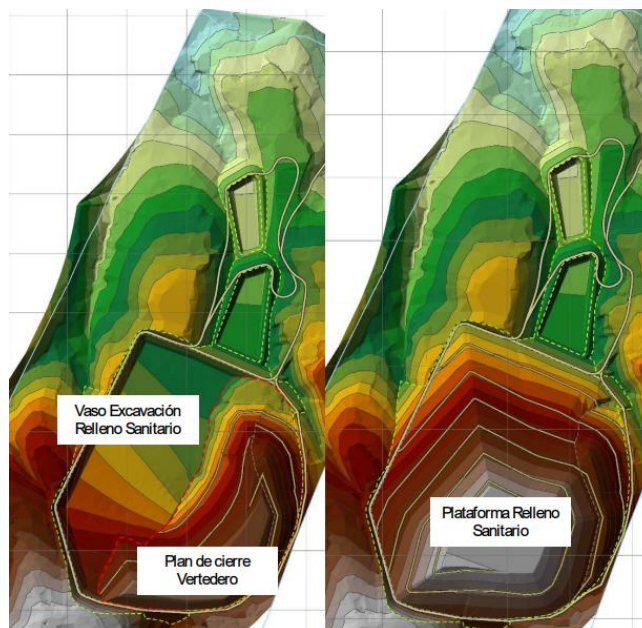


Figura 3: Emplazamiento proyectos Plan de Cierre y Relleno Sanitario

Fuente: Adenda del proyecto

A continuación, se presentan las características principales de la operación actual del relleno sanitario San Pedro obtenidas desde las Declaraciones de Impacto Ambiental:

Tabla 1: Características del relleno sanitario San Pedro
Fuente: Elaboración propia con información de la DIA del proyecto

Capacidad Instalada	500 [ton/día]
Residuos Acumulados	Estimado en 1.828.639 [ton] al noveno año de operación (2024).
Sistema de Impermeabilización Basal	Suelo natural compactado, arcilla sintética, geomembrana HDPE de 1,5 [mm] de espesor, geomalla HDPE de 5 [mm] de espesor recubierta con geotextil antipunzonamiento, capa de material granular y capa operativa.
Manejo de lixiviados	Recolección utilizando tuberías HDPE perforadas ubicadas en la capa granular que conectan cada 60 [m] con cámaras de acumulación verticales. Desde allí se bombea el líquido a las piscinas de acumulación para luego ser recirculado a la masa de residuos.
Manejo de biogás	16 chimeneas de ventilación pasiva construidas utilizando tambores metálicos rellenos con bolones. No se contempla una planta de tratamiento de biogás.
Autorización	RCA favorable y Resolución Sanitaria emitida por la SEREMI de Salud.
Fiscalización	Superintendencia del Medio Ambiente y SEREMI de Salud.
Término de vida útil	2037

Ante el próximo término de la vida útil de la instalación, es necesario realizar las modificaciones que permitan aumentar la capacidad instalada y mantener una operación continua para suplir la demanda de la población. Es decir, se debe implementar un proyecto de continuación para el relleno sanitario San Pedro.

CAPÍTULO 2: ESTUDIO DE MERCADO

2.1 Análisis de demanda

En el caso de los rellenos sanitarios, la demanda dependerá de los desechos a disponer. Esto se define a partir de la cobertura geográfica, la población que habita en ella y la cantidad de residuos que produce.

2.1.1 Cobertura geográfica

Corresponde a las comunas de procedencia de los residuos las cuales pueden variar dependiendo de la capacidad operacional y los contratos establecidos con los municipios que requieren el servicio.

En el caso del relleno sanitario San Pedro se han realizado las siguientes modificaciones:

■ Comunas iniciales (Empresas Santa Teresita C y S, 2011):

- Quillota
- Nogales
- La Calera
- Hijuelas
- La Cruz
- Papudo

■ Comunas actuales (SUBDERE, 2024):

- Puchuncaví
- Quintero
- Quillota
- Hijuelas
- Quilpué
- Limache
- Villa Alemana

2.1.2 Habitantes por comuna

A continuación, se presenta la cantidad de habitantes que residen en las comunas que han sido parte de la cobertura geográfica y otras susceptibles de ser consideradas. Además, se muestra el total para la región de Valparaíso:

Tabla 2: Número de habitantes por comuna

Fuente: Censos de población y vivienda, Instituto Nacional de Estadísticas

Comuna	Censo 1992	Censo 2002	Censo 2017	Censo 2024
Puchuncaví	10.661	12.954	18.546	22.539
Quintero	17.796	21.174	31.923	35.754
Papudo	3.896	4.608	6.356	7.561
Zapallar	4.554	5.659	7.339	7.980
Quillota	67.007	75.916	90.517	96.753
Calera	45.776	49.503	50.554	50.631
Hijuelas	13.938	16.014	17.988	19.286
La Cruz	10.771	12.851	22.098	24.939
Nogales	18.669	21.633	22.120	22.136
Quilpué	104.203	128.578	151.708	162.559
Limache	34.839	39.219	46.121	56.145
Olmué	12.603	14.105	17.516	19.778
Villa Alemana	71.672	95.623	126.548	139.571
Total regional	1.384.336	1.539.852	1.815.902	1.896.053

También, el Instituto Nacional de Estadística, ha realizado proyecciones de habitantes por comuna hasta el año 2035:

Tabla 3: Proyecciones de habitantes por comuna

Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas

Comuna	2025	2030	2035
Puchuncaví	21.490	22.714	23.860
Quintero	39.170	41.688	43.768
Papudo	6.492	6.745	6.993
Zapallar	8.454	8.855	9.238
Quillota	101.729	105.214	108.188
Calera	53.945	54.120	54.327
Hijuelas	19.537	19.827	20.010
La Cruz	28.505	31.351	33.843
Nogales	23.665	23.734	23.733
Quilpué	175.095	182.440	189.824
Limache	52.099	54.049	55.986
Olmué	20.480	21.639	22.818
Villa Alemana	149.327	158.617	167.754
Total regional	2.040.166	2.106.331	2.162.052

2.1.3 Generación de residuos

La generación de residuos a nivel nacional presenta pequeñas variaciones a lo largo de los años, siendo la mayor parte de ellos residuos no peligrosos cuyos sitios de disposición final son los rellenos sanitarios:

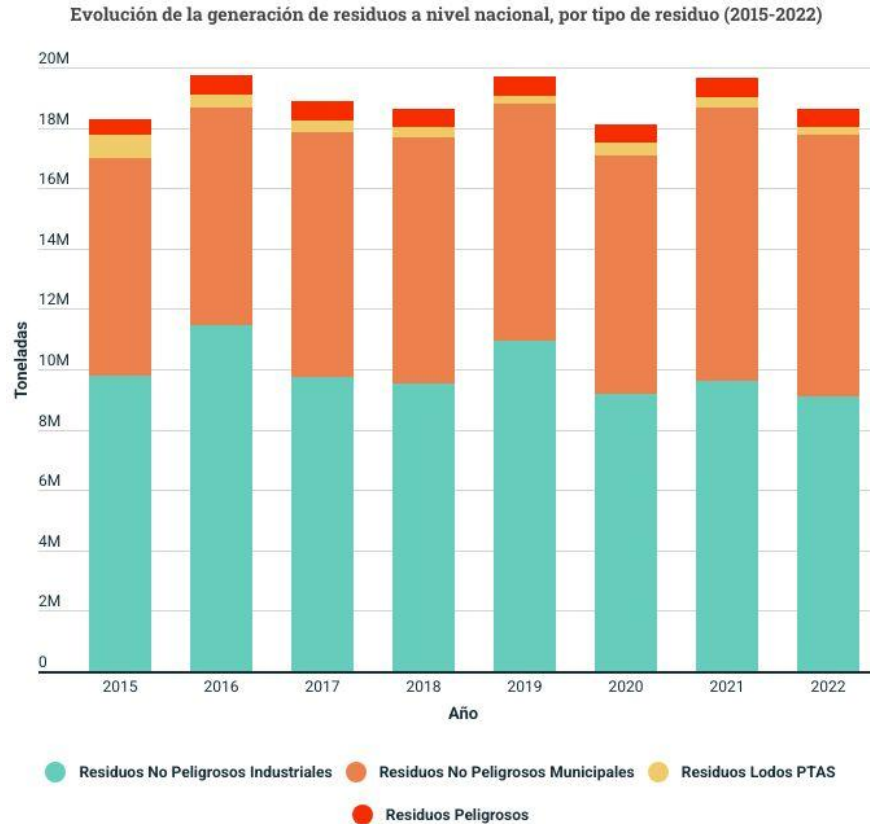


Figura 4: Generación de residuos a nivel nacional

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente

– *Producción per-cápita*

Corresponde a un valor representativo de la cantidad de residuos generados por una persona en un día. Dependerá de la masa de los desechos producidos en una zona específica durante un periodo de tiempo y la cantidad de residentes en ella. A continuación, se presentan los valores a nivel nacional y para la región de Valparaíso:

Tabla 4: Producción de residuos per-cápita (Chile)

Fuente: Elaboración propia con información de los “Reportes del estado del Medio Ambiente”

Año	[kg/hab./día]
2018	1,19
2019	1,13
2020	0,97
2021	2,25
2022	1,25
2023	1,09

Tabla 5: Producción de residuos per-cápita (región de Valparaíso)

Fuente: Elaboración propia con información de los “Reportes del estado del Medio Ambiente”

Año	[kg/hab./día]
2020	1,15
2021	2,09
2022	1,18

– Residuos en relleno sanitario San Pedro

A lo largo de los años, los desechos han sido depositados en el relleno sanitario San Pedro. La cantidad se encuentra en el Registro de Emisiones y Transferencias Contaminantes (RETC) y también se estima en la DIA del proyecto:

Tabla 6: Toneladas de residuos depositados en el relleno sanitario San Pedro

Fuente: Elaboración propia con información del RETC

Comuna	Año 2020 [ton]	Año 2021 [ton]	Año 2022 [ton]	Año 2023 [ton]
Hijuelas	4.687	9.198	8.364	6.740
Limache	22.360	21.420	21.810	22.479
Puchuncaví	11.474	1.139	8.955	4.041
Quillota	35.924	45.532	43.057	51.174
Quintero	17.019	18.274	15.160	13.090
Villa Alemana	59.929	8.706	62.175	19.962
Quilpué	74.890	Sin información	73.869	72.454
TOTAL	226.282	104.269	233.391	189.940

Tabla 7: Estimación de producción de residuos anual [ton/año]

Fuente: Modificado desde la DIA del proyecto

Año 1	180.000	Año 6	208.669	Año 11	241.905	Año 16	280.434
Año 2	185.400	Año 7	214.929	Año 12	249.162	Año 17	288.847
Año 3	190.962	Año 8	221.377	Año 13	256.637	Año 18	297.513
Año 4	196.691	Año 9	228.019	Año 14	264.336	Año 19	306.438
Año 5	202.592	Año 10	234.859	Año 15	272.266	Año 20	315.631

– **Ley 20.920**

Conocida como Ley REP (Responsabilidad Extendida del Productor) y de Fomento al Reciclaje, busca disminuir la generación de residuos y fomentar su valorización. Para ello, se obliga a los fabricantes de productos prioritarios a hacerse cargo de los residuos derivados de estos una vez terminen su vida útil. Los productos prioritarios son:

- Aceites lubricantes
- Aparatos eléctricos y electrónicos
- Baterías
- Envases y embalajes
- Neumáticos
- Pilas

Considerando que al relleno sanitario no pueden ingresar residuos peligrosos y que, además, los residuos sólidos domiciliarios tienen una composición de aproximadamente un 11% papel y un 13% plásticos (SUBDERE, 2024), el producto prioritario de interés es envases y embalajes. Las metas de valorización para dicha categoría se presentan a continuación:

Tabla 8: Metas de recolección y valorización de residuos de envases y embalajes domiciliarios

Fuente: Decreto Supremo N°12/2020

		Subcategoría				
		Cartón para líquidos	Metal	Papel y cartón	Plástico	Vidrio
Año	Primer año	5%	6%	5%	3%	11%
	Segundo año	8%	9%	9%	6%	15%
	Tercer año	11%	12%	14%	8%	19%
	Cuarto año	15%	15%	18%	11%	22%
	Quinto año	19%	17%	23%	14%	26%
	Sexto año	23%	21%	28%	17%	31%
	Séptimo año	27%	25%	34%	20%	37%
	Octavo año	31%	29%	39%	23%	42%
	Noveno año	36%	32%	45%	27%	47%
	Décimo año	40%	36%	50%	30%	52%
	Undécimo año	50%	45%	60%	37%	58%
	A contar del duodécimo año	60%	55%	70%	45%	65%

2.2 Análisis de oferta

Corresponde a la disponibilidad de sitios de disposición final para los residuos generados. En Chile, existían 160 sitios operativos para el año 2012, 128 en el 2017 y 103 en el 2023 (SUBDERE, 2024). La distribución según tipo de instalación se observa en el siguiente gráfico:

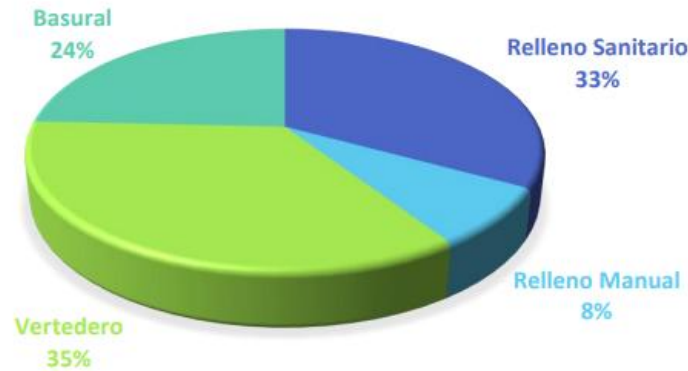


Figura 5: Sitios por tipo de instalación

Fuente: Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo

A partir del gráfico, se concluye que solo un 41% de los sitios de disposición final cumplen con la reglamentación del D.S N°189.

En la zona continental de la región de Valparaíso hay 4 sitios de disposición final. En ellos se disponen residuos de 27 de las 36 comunas que la componen (SUBDERE, 2024). Las comunas restantes deposita sus residuos en el relleno sanitario Loma Los Colorados, ubicado en Tiltill, región Metropolitana.

Tabla 9: Sitios de disposición final en la región de Valparaíso

Fuente: Diagnóstico y catastro regional de residuos sólidos domiciliarios, SUBDERE

Nombre del sitio	Clasificación	Ubicación/Comuna	RCA
Relleno Sanitario El Molle	Relleno Sanitario	Valparaíso	Si
Vertedero Cabildo	Vertedero	Cabildo	No
Relleno Sanitario San Pedro	Relleno Sanitario	Quillota	Si
CTI La Hormiga	Relleno Sanitario	San Felipe	Si

En cuanto al sistema de recolección y transporte, la mayoría de las comunas utilizan un servicio privado, mientras que en las otras se realiza de forma municipal o mixta.

2.3 Análisis de precios

Los costos del manejo de residuos sólidos domiciliarios se pueden dividir en recolección+transporte y disposición final. Además, el valor se puede expresar por habitante y por tonelada de residuos.

Durante el año 2017 en la región de Valparaíso, el costo por tonelada recolectada y transportada fue de \$37.139, mientras que la disposición tuvo un costo de \$7.472 por tonelada. En términos de habitantes, el valor del servicio completo corresponde a \$19.889 por persona (SUBDERE, 2018).

En la siguiente tabla, se muestran los valores al año 2022 para la región y algunas comunas.

Tabla 10: Costos por habitante por servicios de aseo 2022

Fuente: Diagnóstico y catastro regional de residuos sólidos domiciliarios, SUBDERE

Comuna	Recolección y Transporte/hab. (\$)	Costo Disposición Final/hab. (\$)	Costo Total/hab. (\$)
Puchuncaví	32.624	8.910	41.534
Quintero	12.217	3.644	15.861
Quillota	14.245	4.866	19.111
Hijuelas	13.828	3.573	17.401
Quilpué	26.929	4.651	31.580
Limache	9.059	3.943	13.003
Villa Alemana	18.664	3.187	21.850
Región	19.957	7.205	27.162

Tabla 11: Costos por tonelada por Servicios de Aseo 2022

Fuente: Diagnóstico y catastro regional de residuos sólidos domiciliarios, SUBDERE

Comuna	Recolección y Transporte/ton (\$)	Costo Disposición Final/ton (\$)	Costo Total/ton. (\$)
Puchuncaví	49.594	13.544	63.138
Quintero	30.172	9.000	39.172
Quillota	27.397	9.359	36.756
Hijuelas	41.693	10.775	52.468
Quilpué	69.579	12.017	81.596
Limache	21.131	9.198	30.328
Villa Alemana	55.017	9.394	64.411
Región	47.646	17.203	64.849

CAPÍTULO 3: ESTUDIO TÉCNICO

En este capítulo se definirán el tamaño, tecnologías y equipamiento necesario para el desarrollo del proyecto de continuación al relleno sanitario San Pedro.

3.1 Tamaño del proyecto

Para dimensionar el relleno sanitario es fundamental conocer la totalidad de residuos a disponer durante el periodo de operación. Esto dependerá de la población a sanear y la cantidad de desechos que producen. Debido a que el actual relleno sanitario tiene vida útil hasta 2037, los cálculos se realizarán a 20 años considerando esa fecha.

Se ha definido un horizonte de evaluación de 20 años siguiendo las recomendaciones del Ministerio de Desarrollo Social para proyectos de ingeniería sanitaria compleja. Con un horizonte más extenso se pueden ver alterados significativamente los supuestos base, como las tasas de generación y composición de residuos. Por el contrario, un tiempo menor no resultaría técnicamente eficiente debido a los costos y plazos asociados a la gestión para iniciar el proyecto.

3.1.1 Proyección de producción de residuos

La población base corresponde al total de habitantes de las comunas que actualmente depositan sus residuos en el relleno (Quillota, Hijuelas, Quilpué, Villa Alemana, Puchuncaví, Quintero, Limache) añadiendo un margen de seguridad de 5.000 personas. Este valor optimiza la capacidad volumétrica disponible, equilibrando la demanda proyectada con la vida útil del sitio. Operacionalmente, actúa como holgura de diseño ante incrementos inesperados en la generación de residuos. Según los datos del Censo 2024 de la *Tabla 2*, la población base corresponde a 537.607 personas.

El Instituto Nacional de Estadísticas, en su base de datos, contempla la proyección de la tasa de crecimiento a nivel país hasta 2050. La proyección de población para cada año (i) se calculará tomando como supuesto que la tasa se aplica por igual a todo el territorio nacional.

Debido a las iniciativas impulsadas en el país para aumentar el reciclaje, como por ejemplo la Ley REP, el Ministerio del Medio Ambiente establece en la “Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040” que una de las metas es reducir la generación de residuos por habitante en un 10% al 2030 y en un 25% al 2040 (Ministerio del Medio Ambiente, 2021). A partir de la tasa de producción de residuos per cápita diaria del año 2022 en la región de Valparaíso, la tasa para los siguientes años, en [kg/hab./día], corresponderá a:

Tabla 12: Producción de residuos por habitante

Fuente: Elaboración propia

2022	2030	2040
1,25	1,06	0,89

Finalmente, la cantidad de residuos producidos por año se obtiene considerando la información anterior según la siguiente ecuación:

$$Residuos_i \left[\frac{ton}{año} \right] = Población_i * PPC_i * \frac{365 \left[\frac{día}{año} \right]}{1000 \left[\frac{kg}{ton} \right]}$$

Ecuación 1: Cantidad de residuos a disponer por año

En la siguiente tabla se presentan los resultados de la proyección de la población y residuos a 20 años:

Tabla 13: Proyección de población y residuos a 20 años

Fuente: Elaboración propia

Año de operación	Año	Tasa de crecimiento	Población Saneada	Residuos [ton/año]	Residuos acumulados [ton]
1	2037	0,0025	566.973	219.362	219.362
2	2038	0,0023	568.277	219.867	439.229
3	2039	0,0021	569.471	220.328	659.557
4	2040	0,0019	570.553	220.747	880.304
5	2041	0,0017	571.523	185.659	1.065.963
6	2042	0,0015	572.380	185.938	1.251.901
7	2043	0,0013	573.124	186.179	1.438.080
8	2044	0,0011	573.755	186.384	1.624.464
9	2045	0,0009	574.271	186.552	1.811.016
10	2046	0,0007	574.673	186.683	1.997.699
11	2047	0,0005	574.960	186.776	2.184.474
12	2048	0,0004	575.190	186.851	2.371.325
13	2049	0,0002	575.305	186.888	2.558.213
14	2050	0,0002	575.420	186.925	2.745.138
15	2051	0,0002	575.535	186.963	2.932.101
16	2052	0,0002	575.651	187.000	3.119.101
17	2053	0,0002	575.766	187.037	3.306.139
18	2054	0,0002	575.881	187.075	3.493.213
19	2055	0,0002	575.996	187.112	3.680.326
20	2056	0,0002	576.111	187.150	3.867.476

3.1.2 Volumen de celda requerido

Se proyecta que tras 20 años de operación la cantidad de residuos acumulada sea de 3.867.476 [ton]. En un relleno sanitario mecanizado, la densidad de los desechos es variable entre 700 y 1000 [kg/m³] dependiendo de su composición, por lo que se considerará un valor intermedio de 850 [kg/m³]. Además, el material de cobertura requerido es del orden del 20% de los residuos (Ministerio de Desarrollo Social, 2013). Considerando lo anterior, el volumen de celda total necesario para disponer los residuos es:

$$V_{celda} = V_{residuos} + V_{cobertura}$$

Ecuación 2: Volumen total de celda

$$V_{celda} = \frac{Residuos_{20}}{\rho_{compactación}} + V_{cobertura}$$

$$V_{celda} = \frac{3.867.476 \text{ [ton]}}{0,85 \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right]} + \left(0,2 * \frac{3.867.476 \text{ [ton]}}{0,85 \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right]} \right)$$

$$V_{celda} = 5.459.965 \text{ [m}^3\text{]}$$

3.2 Ubicación del proyecto

El nuevo relleno sanitario se ubicará en la comuna de Quillota, sector San Pedro, en el mismo lugar del antiguo vertedero y actual relleno sanitario.

Respecto al uso de suelos, el terreno se encuentra clasificado como una Zona de Restricción por Vertederos (ZRV) desde el 2007 según lo establecido en el Plan Regulador Intercomunal de Valparaíso - Satélite Quillota.



Figura 6: Zonificación ZRV

Fuente: Plan Regulador Intercomunal Valparaíso – Satélite Quillota

3.2.1 Disponibilidad Territorial

El predio designado como ZRV tiene una superficie total de 64,4 [ha]. Sin embargo, su capacidad operativa se ve restringida debido a las siguientes condiciones físicas y normativas:

- **Infraestructura existente:** el actual relleno sanitario ocupará un área de 126.999 [m²] al final de su operación y su piscina de lixiviados comprende 6.580 [m²] aproximadamente. Esta área se considera como base para el acoplamiento vertical de la nueva celda. Además, existe una antigua celda de vertedero que comprende alrededor de 26.000 [m²].
- **Línea de transmisión eléctrica:** el terreno es atravesado por la línea de transmisión eléctrica San Luis – Agua Santa de 220 [kV]. Según el Pliego Técnico Normativo N°07 de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC), se debe designar una franja de seguridad donde no pueden existir construcciones que presenten riesgos para la línea. Se considerará una distancia de 30 [m] como franja de seguridad, lo que resulta en una superficie cercana a 4 [ha]. En esta área no se podrán disponer residuos, pero se considerará para las obras de vialidad del proyecto (FELVAL S.A., 2025).
- **Receptores:** se identifican 3 viviendas colindantes al sitio que, de acuerdo con el D.S N°189, proyectan una zona de protección de 300 [m] que inutiliza gran parte del terreno correspondiente a ZRV. Para que esta zona sea operativa, es necesario realizar expropiaciones de estos receptores bajo el Decreto Ley 2186, pues este proyecto de saneamiento ambiental representa una causa de utilidad pública. Una de las viviendas comprende 13.284 [m²] y se encuentra dentro del predio, por lo que sus instalaciones se destinarán a labores administrativas y bodegas.

Tabla 14: Área ocupada y disponible

Fuente: Elaboración propia

Zona	Área [m ²]
ZRV	644.000
Actual relleno sanitario	126.999
Piscina de lixiviados	6.580
Antiguo vertedero	26.000
Línea de transmisión	40.000
Vivienda	13.284
Disponible	431.137

En la *Figura 7* se observa la distribución de las áreas restringidas descritas anteriormente:

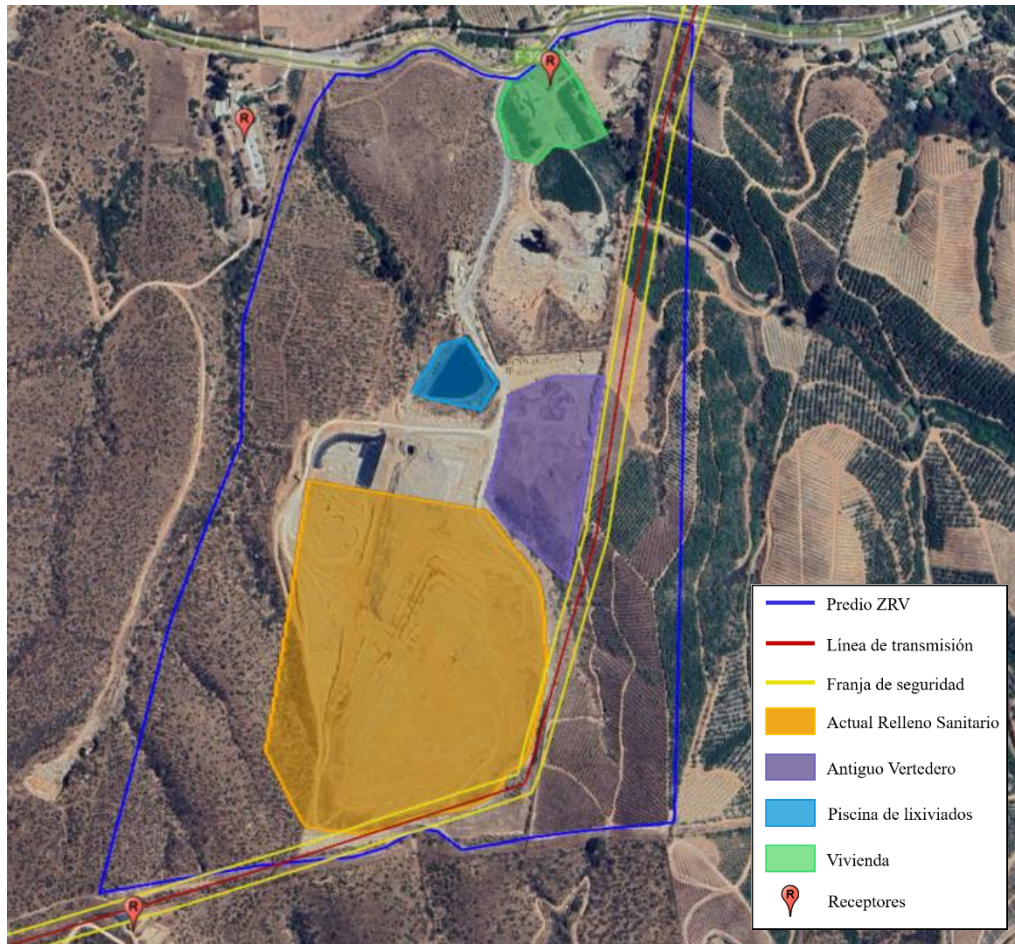


Figura 7: Distribución de áreas en el predio
Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth

3.2.2 Ubicación de nuevas instalaciones

Considerando el terreno disponible, el proyecto se dividirá en 3 etapas, las cuales ocurrirán secuencialmente durante el periodo 2037-2056. Cada una de ellas contará con su propia celda de residuos impermeabilizada, un sistema de manejo de biogás y un pozo de acumulación de lixiviados en el punto más bajo del vaso. Además, considerando la pendiente natural del terreno, se contempla un sector para piscinas de lixiviados.

La distribución de las etapas se define por la morfología del terreno, la cercanía con el acceso principal y la ubicación de la franja de seguridad. Se comienza en la zona sur del predio con la Etapa 1 para aprovechar un relieve más plano que facilita la instalación. Posteriormente, se continúa con la Etapa 2, cuya topografía permitirá la extracción de material de cobertura y acoplamiento vertical sobre el relleno actual. El proceso finaliza con la Etapa 3 cercana al acceso principal y al sector de piscinas:



Figura 8: Distribución de las etapas del proyecto
Fuente: Elaboración propia utilizando Google Earth

3.3 Proceso de producción

3.3.1 Método de relleno

Considerando las características del terreno se emplearán diferentes métodos de operación. En la Etapa 2, debido a su topografía, se utilizará el método de ladera que permite aprovechar la pendiente del cerro para el soporte de la masa de residuos. En las Etapas 1 y 3 se combinarán los métodos de zanja y área, es decir, se realiza una excavación del vaso para obtener material de cobertura seguido de la elevación con la construcción de celdas. Para respetar la distancia con el nivel freático la profundidad máxima será de 4 [m]. Además, el fondo de todas las celdas contará con una pendiente mínima del 2% para asegurar que los lixiviados drenen hacia los pozos de acumulación mediante gravedad.

3.3.2 Formación de la celda

La celda corresponde a la unidad diaria de acumulación de residuos que es compactada con maquinaria pesada y cubierta con una capa de al menos 15 [cm] de material de suelo extraído desde el mismo predio. Al culminar la operación de cada etapa se dispondrá de una capa de cobertura final del mismo material, pero de al menos 60 [cm] de espesor.

Considerando las toneladas de residuos producidas anualmente que se detallan en la *Tabla 13*, se define que los primeros 4 años las celdas se formarán para recibir aproximadamente 605 [ton/día] y luego alrededor de 513 [ton/día].

Para la geometría de las celdas, los taludes siguen una inclinación segura de 1V:3H, según lo indicado en el D.S N°189. Con el objetivo de que varios camiones puedan descargar simultáneamente, el frente de trabajo se define en 27 y 24 [m] por tipo de celda. Los detalles del diseño se muestran a continuación:

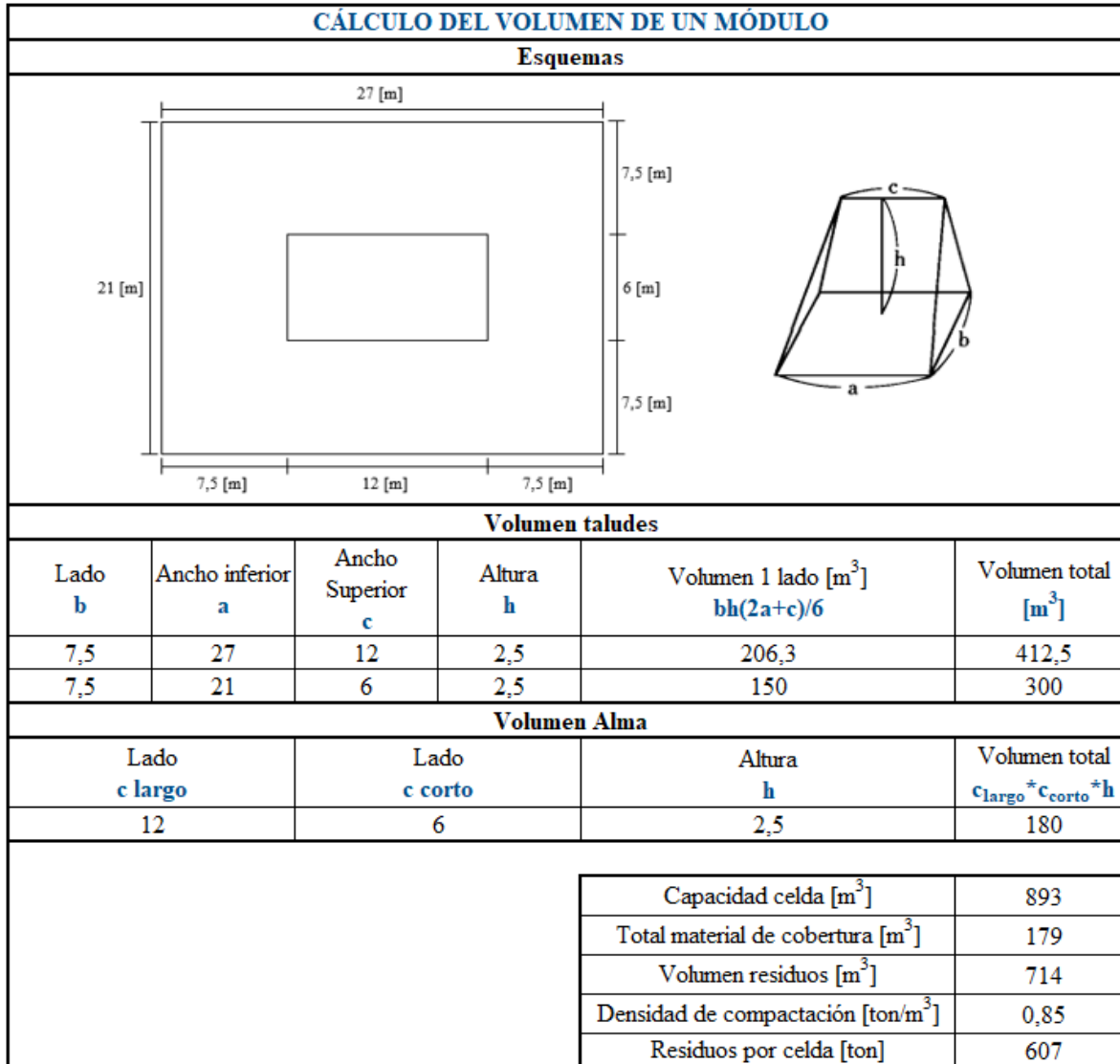


Figura 9: Celda diaria para 605 [ton/día]

Fuente: Elaboración propia utilizando el formato del Ministerio de Desarrollo

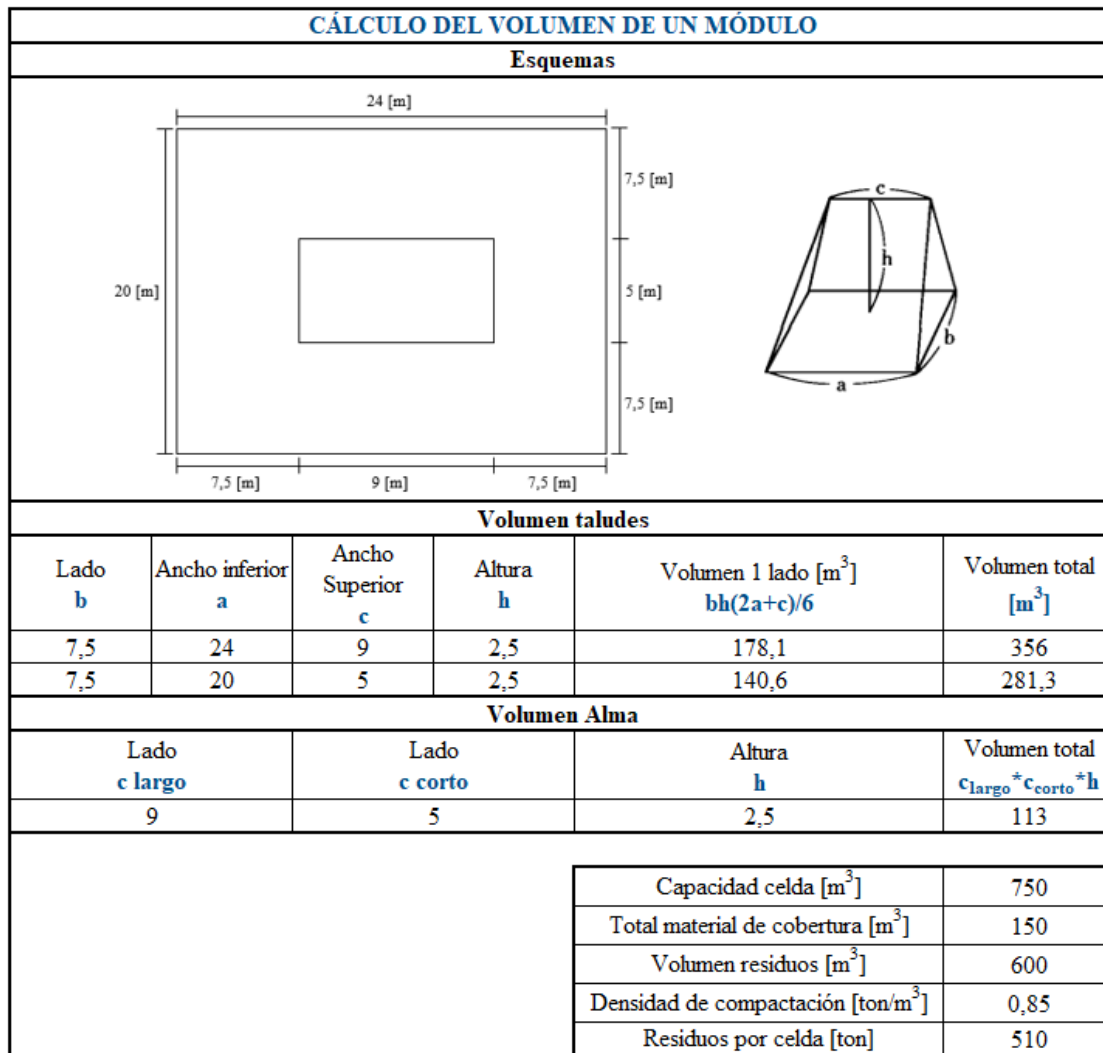


Figura 10: Celda diaria para 513 [ton/día]

Fuente: Elaboración propia utilizando el formato del Ministerio de Desarrollo

El avance en la construcción de celdas dará como resultado una vista de sección similar a:

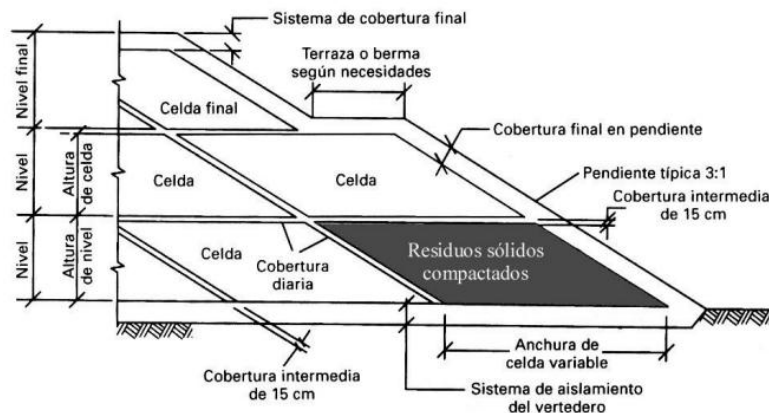


Figura 11: Vista corte relleno sanitario

Fuente: George Tchobanoglous, 1996

3.3.3 Capacidad de las etapas

Que el proyecto cumpla con la demanda proyectada dependerá de la capacidad volumétrica de cada etapa. Se utilizará el mismo método de cálculo de las celdas diarias, pero para una altura de 25 [m] y talud (b) de 75 [m]. Las dimensiones de largo y ancho serán aproximadas, pues se conoce la forma de la superficie que permite obtener valores representativos utilizando el mapa. Además, para el volumen del vaso la profundidad es de 4[m].

Para el cálculo del volumen de los acoplamientos se utiliza la geometría de un prisma de base triangular. En la unión entre la Etapa 2 y el actual relleno, se considera la altura de la masa existente (15 [m]) y la proyección horizontal de su talud (45 [m]) para una longitud de contacto de 500 [m]. Asimismo, existirá un acoplamiento entre las Etapas 2 y 3 basado en la altura de diseño de 25 [m] y una proyección de talud de 75 [m] para una longitud de contacto de 90 [m]. La capacidad volumétrica de cada etapa se presenta en la *Tabla 15*:

Tabla 15: Capacidad volumétrica por etapas
Fuente: Elaboración propia

Etapas	Área [m²]	Volumen Vaso [m³]	Volumen de celda [m³]	Volumen total [m³]	Residuos [ton]
1	72.573	290.292	1.106.250	1.396.542	989.217
2	87.284	349.136	1.289.625	1.638.761	1.160.789
Acoplamiento actual relleno	-	-	337.500	337.500	239.063
Acoplamiento Etapas 2 y 3	-	-	168.750	168.750	119.531
3	88.090	352.360	1.575.000	1.927.360	1.365.213
Total	247.947	991.788	4.477.125	5.468.913	3.873.813

La capacidad total del proyecto es de 5.468.913 [m³] lo cual permite satisfacer la demanda de 5.459.965 [m³] dejando un margen de 8.948 [m³].

3.4 Especificaciones de construcción

La construcción del proyecto mantendrá las especificaciones técnicas que utiliza el actual relleno sanitario según su Declaración de Impacto Ambiental.

3.4.1 Sistema de impermeabilización

Para asegurar la protección del suelo y aguas subterránea, se define un sistema basal de doble capa de acuerdo con lo exigido en el D.S N°189:

- **Capa principal:** geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1,52 [mm] de espesor. Sobre esta capa se instala el sistema de drenaje de lixiviados.
- **Capa secundaria:** geotextil de arcilla sintética con baja conductividad hidráulica ($k \leq 10^{-11}$ [cm/s]) (BPM GEOSYNTHETICS, 2025).
- **Suelo natural:** corresponde a la base del vaso excavado que debe ser compactado y nivelado.

La siguiente imagen muestra la distribución de las capas del fondo del relleno incluyendo el sistema de control de lixiviados:

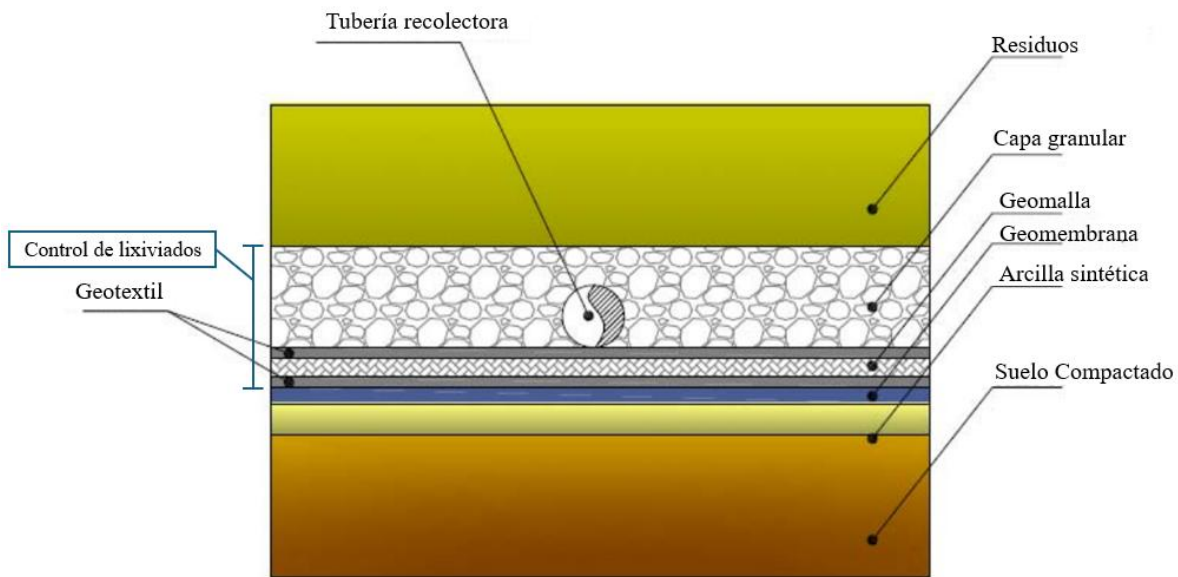


Figura 12: Sello basal del relleno sanitario

Fuente: Modificado desde la DIA del relleno actual

3.4.2 Sistema de control de lixiviados

El drenaje de lixiviados se ubica sobre el sistema de impermeabilización, asegurando la conducción, almacenamiento y recirculación del líquido:

- **Capa drenante:** geomalla de HDPE de 5 [mm] de espesor con alta conductividad hidráulica que permite que el lixiviado circule. Cubierta de geotextil antipunzonamiento absorbente que distribuye el líquido producido.

- **Capa operativa:** permite el flujo del lixiviado a la capa drenante mediante 30 [cm] de material granular. Al final del material granular se contará con tubos HDPE de 6" de diámetro perforados en la parte superior que conectan con cámaras de inspección y conducen el lixiviado a pozos de acumulación ubicados en el punto más bajo de cada etapa.
- **Transporte y almacenamiento:** desde los pozos de acumulación el lixiviado es impulsado mediante bombas hasta las piscinas de regulación, las cuales cuentan con un sistema de impermeabilización igual al de la base del relleno.
- **Recirculación:** el líquido es bombeado desde la piscina a los pozos de recirculación, de 8 [m] de profundidad y 4 [m] de ancho, rellenos con bolones de máximo 4". Esta estructura permite una inyección homogénea en la masa de residuos.

La representación el sistema de manejo de lixiviados se presenta en la siguiente imagen:

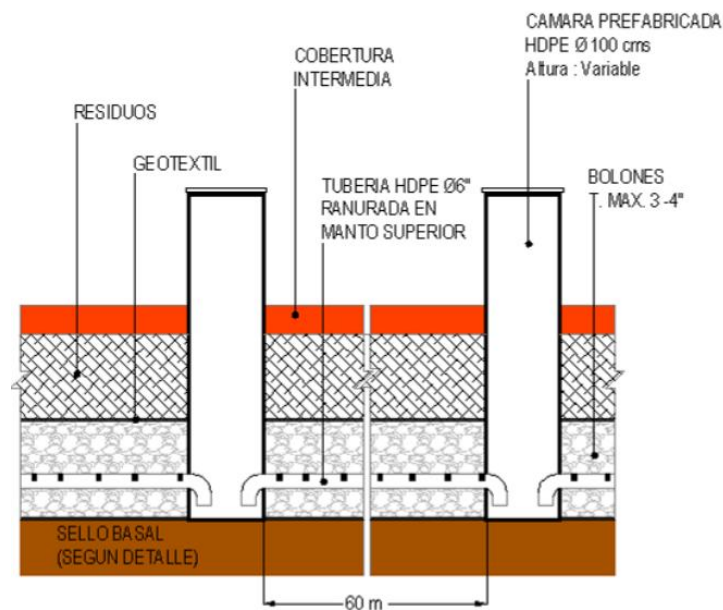


Figura 13: Sistema de captación de lixiviados

Fuente: DIA del relleno actual

3.4.3 Manejo de biogás

Se utilizarán chimeneas de ventilación pasiva construidas verticalmente utilizando listones de madera y una malla de alambre para construir una estructura cilíndrica que se rellena con material granular y, por el centro, lleva una tubería HDPE de 6" de diámetro perforada. La chimenea debe pasar la cobertura intermedia en mínimo 2 [m] como se muestra a continuación:

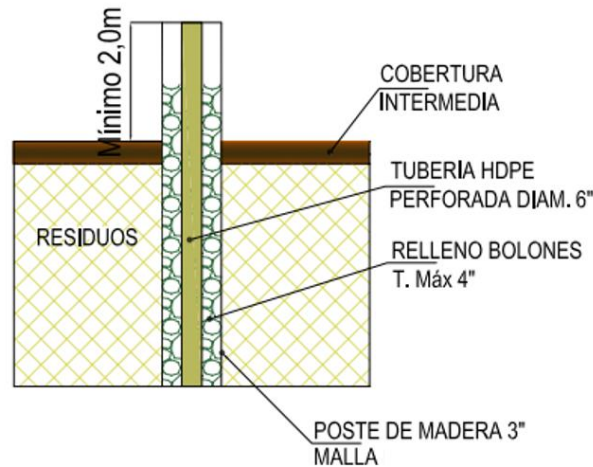


Figura 14: Chimenea de ventilación pasiva

Fuente: DIA del relleno actual

3.5 Programa de producción y generación de emisiones

3.5.1 Cantidad de residuos

El proyecto se divide en 3 etapas operacionales diseñadas para gestionar una demanda total de 3.867.476 [ton]. Considerando los residuos acumulados proyectados en la *Tabla 13*, los años de operación aproximados para cada etapa serán:

Tabla 16: Años de operación por etapa

Fuente: Elaboración propia

Etapas	Años	Capacidad de residuos [ton]
1	1 a 5 (2037-2041)	989.217
2 (incluye acoples)	5 a 13 (2041-2049)	2.508.600
3	13 a 20 (2049-2056)	3.873.813

Además, con la capacidad de las celdas diarias, se determina el volumen de residuos acumulados en el relleno cada año. El detalle se encuentra en la *Tabla 17*.

3.5.2 Generación de biogás

El número de chimeneas de ventilación pasiva dependerá de la relación entre el área de influencia de una unidad y el área total del sitio. En este proyecto la superficie de las 3 etapas suma 247.947 [m²] y el radio de influencia de cada chimenea será de 25 [m], es decir, un área de influencia de 1.963,5 [m²]. Por lo tanto, se deben construir mínimo 127 chimeneas de ventilación pasiva. Considerando un margen del 10%, se construirán 140 chimeneas.

La distribución de los puntos de ventilación se diseña utilizando un triángulo rectángulo donde cada vértice es una chimenea. Para el proyecto los puntos de ventilación se encontrarán a 43,3 [m] de distancia.

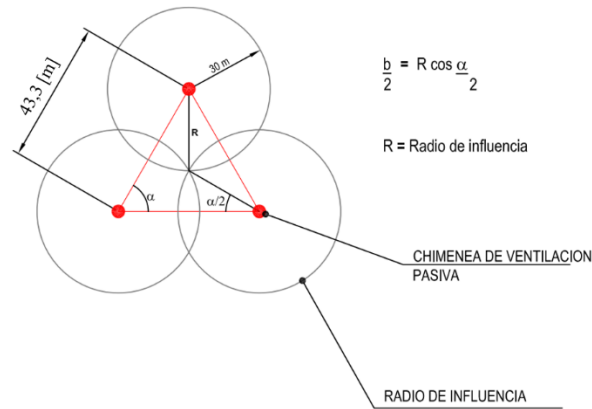


Figura 15: Distribución triángulo equilátero
Fuente: DIA del relleno actual

Para estimar la producción de biogás se utilizará el modelo LandGEM (Landfill Gas Emissions Model) desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA):

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k * L_0 * \left[\frac{M_i}{10} \right] * e^{-kt_{ij}}$$

Ecuación 3: Generación de metano
Fuente: EPA

Donde:

- Q_{CH_4} : generación anual de metano en el año de cálculo [$m^3/año$]
- i: 1 año de incremento
- j: 0,1 año de incremento
- n: año de cálculo-año inicial de recepción de residuos
- k: tasa de generación de metano [$año^{-1}$]
- L_0 : capacidad potencial de generación de metano [m^3/ton]
- M_i : masa de residuos aceptados en el año i [ton]
- t_{ij} : edad de la j sección de residuos aceptados en el año i

Para efectos de cálculo se asume que la relación biogás/metano es 2. Además, L_0 tiene un valor de 90 [m^3/ton] (Empresas Santa Teresita C y S, 2011) obtenido desde la caracterización de residuos del relleno actual y k es 0,04 [$año^{-1}$] (SCS Engineers) según lo recomendado por la EPA.

Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 17: Detalle de operación anual

Fuente: Elaboración propia

Año de operación	Año	Residuos [ton/año]	Residuos acumulados [ton]	Metano [m³/año]	Biogás [m³/año]
1	2037	221.555	221.555	783.421	1.566.843
2	2038	221.555	443.110	1.536.124	3.072.249
3	2039	221.555	664.665	2.259.313	4.518.627
4	2040	221.555	886.220	2.954.146	5.908.292
5	2041	186.150	1.072.370	3.496.541	6.993.082
6	2042	186.150	1.258.520	4.017.668	8.035.337
7	2043	186.150	1.444.670	4.518.362	9.036.725
8	2044	186.150	1.630.820	4.999.424	9.998.847
9	2045	186.150	1.816.970	5.461.622	10.923.244
10	2046	186.150	2.003.120	5.905.698	11.811.396
11	2047	186.150	2.189.270	6.332.361	12.664.722
12	2048	186.150	2.375.420	6.742.294	13.484.589
13	2049	186.150	2.561.570	7.136.154	14.272.308
14	2050	186.150	2.747.720	7.514.570	15.029.141
15	2051	186.150	2.933.870	7.878.149	15.756.297
16	2052	186.150	3.120.020	8.227.471	16.454.942
17	2053	186.150	3.306.170	8.563.096	17.126.192
18	2054	186.150	3.492.320	8.885.561	17.771.122
19	2055	186.150	3.678.470	9.195.382	18.390.764
20	2056	186.150	3.864.620	9.493.055	18.986.109

3.5.3 Generación de lixiviados

Para estimar el caudal medio de lixiviados se utilizará el Método Suizo. Este modelo entrega una aproximación general, pues se basa en la precipitación media anual. Durante 2025, en la estación meteorológica Quillota, se registraron 336,8 [mm] de lluvia (DGAC, 2025).

$$Q = \frac{P * A * K}{t}$$

Ecuación 4: Caudal de lixiviados por método suizo

Fuente: Instituto de Información Científica y Tecnológica

Donde:

Q: Caudal medio de lixiviado [l/s]

P: Precipitación media anual [mm/año]

A: Área superficial del relleno sanitario [m²]

t: Segundos en un año

K: Coeficiente que representa la parte de la precipitación que se convierte en lixiviado. Para una compactación de 0,7 [ton/m³] o más, K toma valores entre 0,15 y 0,25 (Pozo, García, & Vázquez, 2020).

Para obtener el caudal en metros cúbicos anuales la ecuación cambia a:

$$Q = P * A * K * \frac{1 [m]}{1000 [mm]} = 336,8 [mm/año] * 247.947 [m^2] * 0,25 * \frac{1 [m]}{1000 [mm]}$$
$$Q = 20.877,14 [m^3/año]$$

El diseño de las piscinas de lixiviados debe garantizar de que en meses lluviosos el líquido se encuentre confinado. Considerando que las precipitaciones anuales se concentran en un periodo de 4 meses, el volumen mínimo para la acumulación de lixiviados será de 6959 [m³]. Además, por exigencias del D.S N°189, se debe considerar una capacidad de seguridad del 30%, por lo que el volumen final mínimo es de 9941,4 [m³].

Las piscinas serán dos y tendrán iguales dimensiones. La superficie superior será de 45 x 36,5 [m], mientras que la inferior será de 27 x 18,5 [m]. La profundidad máxima es de 4 [m] incluyendo 1 [m] de revancha de seguridad, lo que da como resultado un volumen de 5.063[m³] por piscina.

Para evitar filtraciones, la base y laterales de las estructuras contarán con un sistema de impermeabilización de igual configuración que la protección basal del relleno sanitario.

Para la recolección de lixiviados se seguirá el diseño de un sistema de drenaje en espina de pescado, es decir, un colector principal a lo largo de la celda y ramas secundarias dispuestas cada 60 [m]. Esta configuración permite evacuar los líquidos hacia un eje central aprovechando la pendiente basal para conducir los efluentes mediante gravedad al pozo de acumulación.

3.6 Equipamiento necesario

Los principales materiales y equipos que se requieren para llevar a cabo el proyecto son:

Tabla 18: Materiales a utilizar

Fuente: Elaboración propia

Maquinaria/Material	Función	Cantidad
Compactador	Compactación mecánica de desechos depositados	1
Bulldozer	Esparcido de residuos y capas de cobertura	1
Excavadora	Excavación de vasos de vertido	1
Camión aljibe	Suministro de agua para la humectación de caminos	1
Cobertura diaria	Barrera sanitaria entre los residuos y el ambiente	50.000 [m ³ /año]
Geomembrana	Barrera primaria de impermeabilización basal	277.000 [m ²]
Geotextil	Barrera secundaria de impermeabilización basal	277.000 [m ²]
Geomalla recubierta	Red de drenaje para conducción de lixiviados	273.000 [m ²]
Material granular	Medio drenante del gas y lixiviado hacia su salida	2000 [m ³]
Tubo HDPE 6"	Ducto para el transporte del lixiviado y biogás	2500 [m]
Bombas	Impulsión del lixiviado desde y hacia las piscinas	4
Tubo HDP 100"	Cámara de inspección de nivel de lixiviado	108 [m]
Listones de madera	Estructura para chimeneas	2.085 [m]
Malla de alambre	Contención del material granular en las chimeneas	6500 [m ²]

3.7 Layout

A continuación, se presenta el plano de emplazamiento de la estructura crítica que permitirá la operación del proyecto:



Figura 16: Layout del proyecto

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4: LEGISLACIÓN APLICABLE

4.1 Marco regulatorio principal

- **Decreto Supremo N°189, 2005, Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básica en Rellenos Sanitarios, Ministerio de Salud:** valida técnicamente el diseño y la operación de todo el proyecto
- **Decreto Supremo N°594, 1999, Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo, Ministerio de Salud:** aplica a las instalaciones administrativas, mantenimiento de maquinarias y personal en obra
- **Ley N°19.300, 1994, Bases Generales del Medio Ambiente, Ministerio Secretaría General de la Presidencia:** define el marco legal para el ingreso del proyecto al SEIA, la evaluación de sus impactos ambientales y facultades de fiscalización.

4.2 Marco regulatorio específico

- **Decreto Ley N°2186, 1978, Ley orgánica de procedimiento de expropiaciones, Ministerio de Justicia:** regula los procedimientos de adquisición de terrenos necesarios para garantizar la operación.
- **Decreto con Fuerza de Ley N°4/20.018, 2006, Ley General de Servicios Eléctricos, Ministerio de Economía:** establece las distancias de seguridad y restricciones de construcción respecto a la línea de transmisión eléctrica presente en el predio.

4.3 Instrumento de planificación territorial

- **Plan Regulador Intercomunal (PRI):** el proyecto se emplaza en un área regulada por PRI de Valparaíso - Satélite Quillota y es compatible con el uso de suelos.

4.4 Ingreso al SEIA

El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) es un instrumento de gestión ambiental encargado de determinar si el impacto de un proyecto se ajusta a las normas vigentes.

A diferencia del relleno actual, este proyecto se considera una continuación de un proyecto ya existente, lo que generará un cambio significativo en la cantidad de residuos a disponer y en las emisiones que estos producen, por lo que se pueden generar nuevos riesgos a la salud o al medio ambiente.

De acuerdo con el Artículo 10, literal o) de la Ley N°19.300, el proyecto debe ingresar al SEIA al ser una planta de residuos sólidos de origen domiciliario. Asimismo, por lo establecido en el Artículo 11 de dicha Ley, se determina que el ingreso debe ser mediante un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) por presentar riesgos potenciales para la salud de la población (literal a), impactos sobre el suelo, agua subterránea y calidad del aire (literal b).

CAPÍTULO 5: ESTUDIO ECONÓMICO

En este capítulo se evaluará la viabilidad financiera del proyecto considerando la inversión inicial, los costos operacionales y depreciación.

5.1 Definición de parámetros

- **Horizonte de evaluación:** el proyecto tiene una vida útil de 20 años.
- **Tasa de descuento:** se utiliza la tasa del 6% establecida por el Ministerio de Desarrollo Social para proyectos de interés social.
- **Impuestos:** se considera una tasa de impuesto a la renta del 27%.
- **Depreciación:** representa la pérdida de valor de los activos. Para este caso, se considera lineal y corresponde a la inversión inicial dividida en los años de evaluación.
- **Ingresos:** corresponde al costo por disposición que será igual a las toneladas recibidas anualmente por el costo por tonelada promedio (*Tabla 11*).

5.2 Inversión inicial (CAPEX)

En la siguiente tabla se detalla la estimación de la inversión inicial necesaria para el proyecto:

Tabla 19: Planilla de costos de inversión

Fuente: Elaboración propia

Ítem	Cantidad	Total Estimado
Estudio de Impacto Ambiental	1	\$100.000.000
Diseño de Ingeniería	1	\$20.000.000
Terreno	1	\$0
Movimiento de tierras	277.000 [m ²]	\$4.000.000.000
Impermeabilización basal	277.000 [m ²]	\$3.000.000.000
Sistema de lixiviados	1	\$350.000.000
Sistema de biogás	1	\$167.000.000
Piscinas de regulación	2	\$180.000.000
Compactadora	1	\$100.000.000
	Total	\$7.917.000.000

5.3 Costos de operación (OPEX)

Los costos de operación se calcularán en base anual e incluye principalmente los sueldos de trabajadores, combustible, electricidad, repuestos y monitoreo ambiental.

Tabla 20: Costos de operación

Fuente: Elaboración propia

Ítem	Cantidad	Total Estimado
Personal	10	\$84.000.000
Insumos y Mantenimiento	Variable	\$140.000.000
Monitoreos Ambientales	4	\$40.000.000
	Total	\$264.000.000

5.4 Flujo de caja

El flujo de caja es un balance entradas y salidas de dinero durante los años de operación del proyecto expresado en pesos chilenos

Tabla 21: Flujo de caja

Fuente: Elaboración propia

	Año 0	Años 1 - 4	Años 5 - 19	Año 20
Ingresos		3.811.410.665	3.202.338.450	3.202.338.450
OPEX		-264.000.000	-264.000.000	-264.000.000
Depreciación		-395.850.000	-395.850.000	-395.850.000
Utilidad		3.151.560.665	2.542.488.450	2.542.488.450
Impuestos		-850.921.380	-686.471.882	-686.471.882
Utilidad Neta		2.300.639.285	1.856.016.569	1.856.016.569
Depreciación (reversa)		395.850.000	395.850.000	395.850.000
CAPEX	-7.917.000.000			-650.000.000
Flujo de caja neto	-7.917.000.000	2.696.489.285	2.251.866.569	1.601.866.569

5.5 Indicadores de rentabilidad y análisis

Tras realizar el flujo de caja neto los indicadores toman los siguientes valores:

- **VAN:** \$19.249.723.735
- **TIR:** 32%
- **Payback:** 3 años

A partir del análisis económico se determina que el proyecto es viable y robusto. La inversión se recupera en un muy corto periodo de tiempo permitiendo que se generen excedentes durante su vida útil.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño propuesto para la ampliación del Relleno Sanitario San Pedro asegura una capacidad adecuada para la recepción de los residuos sólidos domiciliarios de las comunas saneadas por un periodo de 20 años. Además, la infraestructura asociada garantiza el cumplimiento de la normativa vigente (D.S. N°189).

La continuidad del Relleno Sanitario San Pedro se traduce en una solución para la gestión de residuos sólidos domiciliarios a nivel provincial, pues evita el traslado de los desechos a sitios distantes, optimizando costos y emisiones asociadas al transporte.

Debido a la cantidad de biogás producida, se recomienda que, tras los primeros años de operación, se evalúe la transición de un sistema de ventilación pasiva a uno de extracción forzada (chimeneas) con el fin de mitigar la potencial percepción de olores que podría afectar a viviendas cercanas al sitio. Bajo este mismo criterio, se sugiere evaluar la factibilidad de implementar una planta de valorización energética del biogás, lo cual además de reducir las emisiones de metano, permitiría la generación de energía eléctrica.

Desde la perspectiva económica, los indicadores ratifican la viabilidad del proyecto. El VAN y el TIR demuestran que la ampliación genera excedentes significativos por sobre el costo de inversión que además permite cubrir los costos de cierre y clausura.

La ampliación del Relleno Sanitario San Pedro es fundamental para la estructura sanitaria de la región, logrando equilibrar la eficiencia económica con la protección del entorno y el bienestar de las comunidades en la provincia de Quillota.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BPM GEOSYNTHETICS. (24 de Junio de 2025). *Análisis de los 7 mejores revestimientos de arcilla geosintética*. Obtenido de BPM GEOSYNTHETICS: <https://es.bpmgeosynthetics.com/the-7-best-geosynthetic-clay-liner-review/>
- DGAC. (2025). *Informe anual de agua caída*. Obtenido de Dirección General de Aeronáutica Civil: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/aguaCaídaAnual/320096/2025>
- Empresa Santa Teresita C y S. (23 de Agosto de 2016). *DIA "Modificación a la Tasa de Tratamiento Máxima de Residuos Para el Proyecto Plan de Cierre, Sellado y Reconversión a Relleno Sanitario Sitio de Disposición Final, San Pedro"*. Obtenido de Servicio de Evaluación Ambiental (SEA): https://seia.sea.gob.cl/archivos/2016/08/05/DIA_Completa.pdf
- Empresas Santa Teresita C y S. (1 de Diciembre de 2011). *Adenda N°1*. Obtenido de Servicio de Evaluación Ambiental (SEA): https://seia.sea.gob.cl/archivos/ADENDA_SAN_PEDRO_final.pdf
- Empresas Santa Teresita C y S. (23 de Marzo de 2011). *DIA "Plan de Cierre, Sellado y Reconversión a Relleno Sanitario Sitio de Disposición Final San Pedro"*. Obtenido de Servicio de Evaluación Ambiental (SEA): https://seia.sea.gob.cl/archivos/CAPITULO_01_DESCRIPCION_DEL_PROYECTO_DIA_SAN_PEDRO_REV05.pdf
- FELVAL S.A. (15 de Julio de 2025). *Franja de Seguridad en Líneas de Transmisión de Energía Eléctrica y su relación con la Servidumbre Eléctrica*. Obtenido de Felval Consulting Group: <https://felval.cl/index.php/2025/07/15/franja-de-seguridad-en-lineas-de-transmision-de-energia-electrica-y-su-relacion-con-la-servidumbre-electrica/>
- INE. (2017). *Proyecciones de población*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>
- INE. (2019). *Proyección base 2017*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>
- INE. (2024). *Censos de Población y Vivienda*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>

- Ministerio de Desarrollo Social. (2013). *METODOLOGÍA DE PREPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS Y ASIMILABLES*. Obtenido de <https://sni.gob.cl/storage/docs/Residuos-Solidos-2013.pdf>
- Ministerio de Justicia. (2 de Octubre de 1992). *BCN: Ley Chile*. Obtenido de Decreto Ley 2186: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=6848>
- Ministerio de Salud. (18 de Agosto de 2005). *Decreto 189*. Obtenido de BCN: Ley Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=268137>
- Ministerio del Medio Ambiente. (1 de Junio de 2016). *Ley 20920*. Obtenido de BCN: Ley Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894&idParte=9705130&idVersion=2016-06-01>
- Ministerio del Medio Ambiente. (16 de Marzo de 2021). *Decreto 12*. Obtenido de BCN: Ley Chile: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1157019>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2021). *HOJA DE RUTA PARA UN CHILE CIRCULAR AL 2040*. Obtenido de Economía Circular MMA: <https://economiecircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/HOJA-DE-RUTA-PARA-UN-CHILE-CIRCULAR-AL-2040-ES-VERSION-ABREVIADA.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2023). *Generación municipal de residuos no peligrosos*. Obtenido de RETC: <https://datosretc.mma.gob.cl/dataset/generacion-municipal-de-residuos-no-peligrosos>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2024). *Informe del Estado del Medio Ambiente*. Obtenido de <https://iema.mma.gob.cl>
- Pozo, J., García, J., & Vázquez, Y. (10 de Enero de 2020). *Estimación del caudal medio de lixiviados generados en el vertedero de Viñales, Pinar del Río*. Obtenido de Instituto de Información Científica y Tecnológica: <https://www.redalyc.org/journal/6378/637869117002/html/>
- SCS Engineers. (s.f.). *Fundamentos del Biogás de Rellenos Sanitarios*. Obtenido de SUBDERE: https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/documentos/2_-_gmi_-_fundamentos_sobre_biogas.pdf
- SEC. (10 de Septiembre de 2020). *PLIEGO TÉCNICO NORMATIVO RPTD N° 07*. Obtenido de SEC: <https://www.sec.cl/sitio-web/wp-content/uploads/2020/09/Pliego-Técnico-Normativo-RPTD-N°07-Franja-y-distancia-seguridad.pdf>

- SEREMI de Vivienda y Urbanismo. (2006). *DIA "Plan Regulador Intercomunal de Valparaíso Satélite Quillota"*. Obtenido de SEIA: https://seia.sea.gob.cl/archivos/Plano_PIV_SQ.jpg
- SUBDERE. (2018). *Línea Base Diagnóstico y Catastro de RSD año 2017*. Obtenido de Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo: https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/4.7_region_de_valparaiso_agosto_2018.pdf
- SUBDERE. (2024). *Diagnóstico y catastro nacional de residuos sólidos domiciliarios*. Obtenido de Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo: https://proactiva.subdere.gov.cl/handle/123456789/635?_ga=2.169701668.463009909.1751988271-1974659957.1738252439
- SUBDERE. (Enero de 2024). *Diagnóstico y catastro regional de residuos sólidos domiciliarios*. Obtenido de Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo: https://www.subdere.gov.cl/sites/default/files/V%20Región%20de%20Valparaíso%20RSD%20Marzo_2024_0.pdf
- SUBDERE. (2024). *Estudio de caracterización de los residuos sólidos domiciliarios y asimilables generados a nivel municipal en Chile*. Obtenido de Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo: <https://proactiva.subdere.gov.cl/handle/123456789/649>
- Tchobanoglous, G. (1996). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. New York: McGraw-Hill.
- WASATCH. (s.f.). *Davis Landfill*. Obtenido de WASATCH Integrated: <https://www.wasatchintegrated.gov/davis-landfill/>