



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y  
MATERIALES

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO: PROPUESTA Y  
EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

CATALINA FERNANDA ASTORGA DEL CANTO

PROFESOR GUÍA:

FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

PABLO CORTÉS DÍAZ

MELANIE COLET LAGRILLE

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil Química  
POR: Catalina Fernanda Astorga del Canto  
FECHA: 14 de marzo de 2018  
PROFESOR GUÍA: Felipe Díaz Alvarado

## **TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO: PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE HUMEDALES ARTIFICIALES**

El creciente desarrollo de las poblaciones y la sociedad humana, están estrechamente relacionados con el consumo humano, lo que se ve reflejado en la continua generación de residuos. En Chile, la gestión de residuos sólidos se limita, principalmente, a la recolección y disposición final de éstos en rellenos sanitarios, lo que puede generar una serie de impactos ambientales. Un relleno sanitario corresponde básicamente a un reactor bioquímico, cuyas principales entradas son residuos y agua, mientras que sus salidas corresponden a lixiviados y biogás. Los lixiviados son producto de la transferencia de agua a través de los residuos y de la lixiviación de componentes desde el sólido al líquido. Son considerados un residuo líquido con gran impacto ambiental, por su significativa concentración de contaminantes.

Este trabajo tiene como objetivo proponer y evaluar un sistema de aprovechamiento de lixiviados de un relleno sanitario. El caso de estudio a analizar corresponde al Relleno Sanitario Loma Los Colorados, operado por la empresa KDM Tratamiento en la comuna de Til Til, Región Metropolitana. Este relleno cuenta actualmente con una planta de tratamiento de lixiviados con un sistema biológico, pero el líquido sale contaminado según el D.S. N° 90/00.

La alternativa propuesta consiste en un sistema de humedales artificiales que depuran el líquido a través de las plantas y el medio granular, al igual que los humedales naturales. El sistema consiste en dos humedales de flujo subsuperficial, es decir, que el líquido fluye por medio del soporte, sin contacto con la atmósfera. En el primero, los lixiviados ingresan de manera vertical y en el segundo de manera horizontal.

Se dimensionaron dos alternativas para el sistema: un caso sustituto, capaz de tratar todos los lixiviados generados por día, con un caso base igual a 620 [m<sup>3</sup>/día] y otro complementario, capaz de tratar el efluente generado por la planta de tratamiento actual, con un caso base igual a 290 [m<sup>3</sup>/día]. Sin embargo, dado que la planta no puede detener su funcionamiento y el efluente actual se encuentra fuera de norma, se diseñó el sistema sustituto para tratar la totalidad de los lixiviados generados por el relleno sanitario, pero estará ubicado a la salida del tratamiento biológico actual, con un *by-pass* desde la salida del relleno sanitario. El sistema final de tratamiento consistirá en dos humedales artificiales en serie, uno vertical de área aproximada 4.500 [m<sup>2</sup>] y uno horizontal de 20.200 [m<sup>2</sup>]. Los costos de inversión de este proyecto se estiman en 654.000.000 [CLP], de los que un 50% corresponde al medio granular, mientras que los costos de operación corresponden a 12.000.000 [CLP/año].

El proyecto es inviable económicamente, dado que no se consideran los beneficios sociales ni ambientales, que tienen relación principalmente con la recirculación de lixiviados. Además, es un proceso completamente natural que se adapta al entorno en el que se sitúa. Es importante destacar que la empresa tiene un rol activo dentro de la sociedad en la que está inmersa, por lo que, debe trabajar bajo una visión que aporte a la comunidad, integrando a todos los grupos sociales en la toma de decisiones.

## AGRADECIMIENTOS

A quienes han hecho que todo esto sea posible, mis padres, María Fernanda y Omar, por darme la vida y la fuerza para creer en mí; por enseñarme que, aunque el camino se torne difícil, siempre encontraré la solución; por guiarme y acompañarme; porque, gracias a ustedes, soy quien soy en estos momentos. Gracias por permitirme ser su orgullo día a día.

A mi familia, incluyendo, obviamente, a mi Nanita, quienes siempre tienen una sonrisa para entregarme. En especial a mi hermano, Nicolás, quien ha sido mi compañero y amigo hace 23 años. Gracias por el apoyo, las conversaciones y confidencias, por las travesuras y logros, porque de ti, aprendo todos los días.

A Rodrigo, quien ha sido mi pilar fundamental en el camino universitario. Si bien, nunca tuvimos un curso juntos, eso no nos detuvo para aprender uno del otro, nuestra compañía era todo lo que necesitábamos. Gracias por contenerme, abrazarme y amarme, por todas las aventuras compartidas, por ser tal y como eres.

A las dos grandes amigas que conocí en estos años, la Diana y la Samy. Gracias por la confianza, la compañía y el apañe. Y, aunque la vida nos separe o nos dejemos estar, que el cariño y la amistad sigan intactos y los reencuentros entrañables.

A los amigos que hice durante estos años, en Plan Común, en el DIQBT y de todo Beauchef. Gracias por las risas, los relajos, las fiestas y los recuerdos, por las tardes de estudio, por enseñarme y ayudarme cuando lo necesitaba.

A los amigos de la vida, Verito, Nicolet, Santi, Mati B., Mari, mis amigas del colegio y varios más. Gracias por cuidarme, por compartir momentos que no fueron de la universidad, pero aun así escucharme. Por estar en las buenas y en las malas, porque amigos como ustedes no se encuentran todos los días. Gracias a la vida por ponerlos en mi camino.

A Diseño Sustentable, un grupo humano hermoso, que marcó profundamente mi enseñanza. Gracias por esas reuniones que nos distraían de la rutina, sacaban risas y aligeraban la carga del semestre. Gracias por luchar por un futuro e ingeniería más respetuosa y sensible.

Al Equipo de Difusión. Gracias por las enseñanzas humanas y profesionales. En especial, a la Pili y la Mane, quienes demuestran que con fuerza y corazón todo es posible.

A la Gina. Gracias por ayudarme y apoyarme con todos los temas administrativos, por ser una persona tan acogedora y recibir mis cientos de dudas siempre con una sonrisa.

A mi comisión, por la retroalimentación y sugerencias. Gracias por la ayuda en la revisión de este trabajo. En particular, gracias a Pablo, por recibirme y confiar en mí para idear este proyecto que logró transformarse en algo muy interesante. Gracias por el apoyo.

A Felipe, mi profesor guía. Gracias por portar a mi educación de manera transversal, de ti me llevo grandes aprendizajes. Gracias por hacerme ser parte y aprender de todo este mundo de la sustentabilidad, que se convirtió en mi pasión. Gracias por ser un profesor único.

Finalmente, gracias a todos los que estuvieron en esta etapa de mi vida. Continúo mi vida más madura, con otra visión y, espero que lo que se venga para adelante sea tan especial como ha sido hasta ahora.

# Tabla de Contenido

Índice de Tablas.....	v
Índice de Figuras.....	vii
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Disposición de residuos.....	1
1.3. Rellenos sanitarios.....	2
1.4. Lixiviados.....	3
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo general.....	5
1.5.2. Objetivos específicos.....	5
1.6. Alcances.....	5
2. Caso de estudio.....	6
2.1. Sistema de tratamiento actual de los lixiviados.....	7
2.2. Caracterización de los lixiviados.....	9
3. Alternativas de tratamiento de lixiviados.....	11
3.1. Sistemas fisicoquímicos.....	11
3.2. Sistemas de membranas.....	15
3.3. Sistemas naturales.....	17
4. Comparación de los sistemas de tratamiento.....	18
5. Sistema propuesto.....	22
6. Humedales artificiales.....	24
6.1. Ciclos funcionales en un humedal artificial.....	24
6.2. Mecanismos de separación de contaminantes.....	25
6.2.1. Separación de sólidos suspendidos.....	26
6.2.2. Separación de DBO <sub>5</sub> .....	27
6.2.3. Separación de nitrógeno.....	27
6.2.4. Separación de fósforo.....	28
6.2.5. Separación de metales pesados.....	28
6.3. Clasificación de humedales artificiales.....	28
6.4. Consideraciones para la construcción de un humedal artificial.....	31
6.4.1. Medio granular.....	31
6.4.2. Plantas.....	32
7. Configuración y dimensionamiento del sistema propuesto.....	35
7.1. Caso base.....	35
7.2. Dimensionamiento del sistema.....	37
8. Evaluación económica.....	45
8.1. Costos de inversión.....	45
8.1.1. Sustrato.....	45
8.1.2. Plantas.....	45
8.1.3. Geomembranas.....	46
8.1.4. Construcción.....	46
8.1.5. <i>Piping</i> .....	47
8.2. Costos de operación.....	48
8.3. Flujo de caja.....	49
9. Evaluación ambiental.....	51

10.	Evaluación social .....	54
10.1.	Conciencia social.....	54
10.2.	Reflexión crítica.....	55
10.3.	Integración .....	55
10.4.	Creatividad.....	56
10.5.	Desarrollo .....	57
10.6.	Bien común .....	58
11.	Discusión general .....	60
12.	Conclusiones.....	62
13.	Referencias.....	63
14.	Anexos.....	69
14.1.	Anexo A: Caracterización de los lixiviados .....	69
14.2.	Anexo B: Estimación de costos de las alternativas de tratamiento .....	70
14.3.	Anexo C: Datos caso base .....	73
14.4.	Anexo D: Dimensionamiento del sistema.....	74
	D.1. Definición de las ecuaciones utilizadas .....	74
	D.2. Ejemplo de cálculo.....	78
	D.3. Concentraciones finales para cada área .....	81
14.5.	Anexo E: Evaluación económica.....	82
	E.1. Costos de inversión .....	82
	E.2. Costos de operación .....	86
	E.3. Flujo de caja.....	87
14.6.	Anexo F: Evaluación ambiental.....	89

## Índice de Tablas

Tabla 1: Caracterización del lixiviado (Adaptado de [13]).....	4
Tabla 2: Valores promedio del año 2016 medidos en el laboratorio interno del RSLLC en el sumidero y en la salida de los sedimentadores, para estos no se consideran los datos de noviembre y diciembre 2016. Se incluye comparación con los valores del D.S. n° 90/00.....	10
Tabla 3: Comparación técnica de las alternativas de tratamiento estudiadas [45]. .....	18
Tabla 4: Costos de inversión y operación calculados para cada alternativa de tratamiento a un caudal de 100 [m <sup>3</sup> /día] [24, 28, 31, 33, 35, 37, 39, 42]. .....	19
Tabla 5: Condiciones de operación para las alternativas de coagulación-floculación y humedales artificiales.....	20
Tabla 6: Parámetros de operación para las alternativas de coagulación-floculación y humedales artificiales.....	21
Tabla 7: Clasificación de los humedales artificiales. ....	29
Tabla 8: Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial. ....	29
Tabla 9: Medio granular seleccionado para la construcción del sistema de humedales artificiales.....	32
Tabla 10: Flujos del caso base para cada propuesta de estudio.....	35
Tabla 11: Parámetros de diseño para humedales SSF.....	40
Tabla 12: Concentraciones en el fondo para la DBO <sub>5</sub> y los SST. ....	40
Tabla 13: Concentraciones finales requeridas para los contaminantes en estudio.....	40
Tabla 14: Porcentaje de remoción deseado para el humedal VSSF para cada contaminante [48]. ....	41
Tabla 15: Porcentajes de remoción de cada humedal para cada el caso1.....	41
Tabla 16: Porcentajes de remoción de cada humedal para el caso 2. ....	41
Tabla 17: Constantes de velocidad y áreas obtenidas para cada humedal en cada caso propuesto.....	42
Tabla 18: Áreas finales para cada caso. ....	42
Tabla 19: Concentraciones finales de cada contaminante utilizando las áreas del caso 1 como sistema complementario, es decir, luego de los sedimentadores.....	43
Tabla 20: Largo y ancho de cada los humedales del sistema.....	44
Tabla 21: Costos de inversión de los sustratos. ....	45
Tabla 22: Costos de inversión de las plantas.....	46
Tabla 23: Costos de inversión de las geomembranas.....	46
Tabla 24: Costos de inversión de la construcción de los humedales artificiales.....	47
Tabla 25: Costo de inversión del piping para cada humedal artificial.....	47
Tabla 26: Costo de inversión final.....	47
Tabla 27: Ahorro de costos asociados a la implementación del sistema propuesto.....	49
Tabla 28: Indicador de impacto ambiental generado por la situación actual y la situación con proyecto.....	53
Tabla 29: Valores medidos en junio de 2016 por el laboratorio externo. Se incluye comparación con el D.S. n° 90/00.....	69
Tabla 30: Producción de lixiviados del RSLLC, balance hídrico 2016. ....	73
Tabla 31: Efluente de la planta de tratamiento del RSLLC, balance hídrico 2016.....	73
Tabla 32: Concentraciones finales de cada contaminante calculadas para cada área obtenida. En rojo aquellas que se encuentran fuera de lo estipulado en el D.S. n° 90. ....	81

Tabla 33: Volumen ocupado por cada sustrato en los humedales artificiales. ....	82
Tabla 34: Costos de inversión de los sustratos, a excepción de la zeolita.....	82
Tabla 35: Costos para la zeolita. ....	82
Tabla 36: Costos de inversión de las plantas.....	83
Tabla 37: Costos de inversión de las geomembranas.....	83
Tabla 38: Detalle de la cotización para la construcción del humedal VSSF.....	84
Tabla 39: Detalle de la cotización de la construcción del humedal HSSF.....	85
Tabla 40: Costo de inversión del piping para cada humedal artificial.....	85
Tabla 41: Costos de operación anuales asociados al sistema de tratamiento con humedales artificiales.....	86
Tabla 42: Flujo de caja del proyecto sin financiamiento. Los valores se encuentran en pesos chilenos [CLP].....	88
Tabla 43: Flujo de caja del proyecto con financiamiento. Los valores se encuentran en pesos chilenos [CLP].....	89
Tabla 44: Indicador de impacto ambiental de la situación actual. ....	90
Tabla 45: Indicador de impacto ambiental de la situación con proyecto.....	91

## Índice de Figuras

Figura 1: Estrategia jerarquizada de residuos. Adaptada del Informe del Estado del Medio Ambiente, 2011 [1].	2
Figura 2: Esquema del relleno sanitario con las entradas y salidas del balance de agua [10].	4
Figura 3: Vista aérea del Relleno Sanitario Loma Los Colorados.	6
Figura 4: Diagrama de bloques de la planta de tratamiento de lixiviados del RSLLC.	9
Figura 5: Esquema del tratamiento de flotación [23].	12
Figura 6: Esquema del tratamiento de coagulación – floculación [27].	13
Figura 7: Esquema del tratamiento de adsorción con carbón activado [29].	14
Figura 8: Esquema del tratamiento de filtración por membranas [34].	15
Figura 9: Esquema del tratamiento de osmosis inversa [38].	16
Figura 10: Esquema del tratamiento con un humedal artificial de flujo libre [44].	17
Figura 11: Gráfico comparativo de los costos de inversión de las diferentes alternativas (Basado en información de [24, 28, 31, 33, 35, 37, 39, 42]).	19
Figura 12: Gráfico comparativo de los costos de operación de las diferentes alternativas (Basado en información de [24, 28, 31, 33, 35, 37, 39, 42]).	20
Figura 13: Caso 1 del sistema propuesto.	22
Figura 14: Caso 2 del sistema propuesto.	22
Figura 15: Esquema de los mecanismos involucrados en la reducción de contaminantes dentro de un humedal artificial. Adaptado de [47].	25
Figura 16: Procesos de depuración de los humedales artificiales. Basado en información de [49].	26
Figura 17: a) Humedal con flujo subsuperficial horizontal. b) Humedal con flujo subsuperficial vertical.	29
Figura 18: Diagrama de bloques del sistema de tratamiento por humedales artificiales.	31
Figura 19: Vegetación típica para humedales artificiales. (a) <i>Phragmites australis</i> (b) <i>Thypha latifolia</i> (c) <i>Scirpus lacustris</i> .	33
Figura 20: Flujos diarios de generación de lixiviados en el año 2016.	36
Figura 21: Flujos diarios de la producción de la planta de tratamiento actual del RSLLC en el año 2016.	36
Figura 22: Precipitaciones diarias en el Fundo Las Bateas en el año 2016 [60].	38
Figura 23: Esquema del sistema de tratamiento propuesto.	40
Figura 24: Esquema del sistema de tratamiento final con humedales artificiales.	43
Figura 25: Distribución de los costos de inversión.	48



# 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes

En la naturaleza no existe el concepto de basura ni residuo, ya que todo es reincorporado al ecosistema a través de las cadenas tróficas y los ciclos biogeoquímicos. Se generan residuos, sólo frente a la presencia de agentes antrópicos.

El Ministerio de Medio Ambiente, en su “Informe del Estado del Medio Ambiente”, define de manera general que los residuos son aquellas sustancias u objetos que habiendo llegado al final de su vida útil se desechan, procediendo a tratarlos mediante valorización o eliminación [1].

De acuerdo a la información disponible en el país y a la segregación de origen, los residuos sólidos se clasifican en residuos sólidos industriales y residuos sólidos urbanos. Los primeros provienen de todas aquellas actividades económicas del país, como el sector agrícola y silvícola, el sector minero y cantera, sector manufacturero, sector de producción de energía, sector de distribución y purificación de aguas y sector de construcción. Los segundos, corresponden a los generados en los hogares y sus asimilables, como los residuos generados en vías públicas, el comercio, oficinas, edificios públicos, instituciones educacionales, además de podas y limpiezas de calle [2].

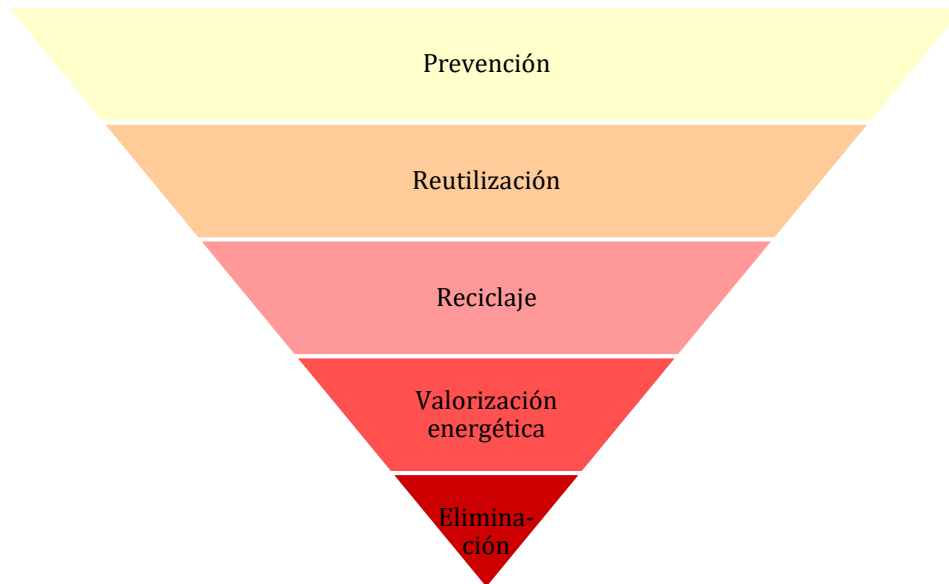
El desarrollo de las poblaciones y la sociedad humana, como el aumento de riqueza y bienestar, están estrechamente relacionados con el consumo humano, lo que se ve reflejado en la continua generación de residuos [3].

En los países de ingresos altos, las industrias, los servicios y domiciliarios, generan entre 1 a 2 toneladas de residuos per cápita por año [3]. En Chile, el promedio ronda los 456 [kg] de basura por persona en un año, haciendo del país el mayor generador de residuos per cápita en Latinoamérica [4, 5]. Se generan 21 mil toneladas de residuos al año, de las que aproximadamente el 38,5% corresponden a residuos municipales [2]. La Región Metropolitana, genera el mayor flujo, debido a que concentra alrededor del 50% de la población nacional.

## 1.2. Disposición de residuos

Existe una estrategia jerarquizada para el manejo de residuos, definida por diferentes leyes y decretos, siendo la principal la ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente [6]. La jerarquía considera las siguientes etapas [1], y se ilustran en la Figura 1:

- **Prevención:** acciones o medidas destinadas a evitar o reducir la generación de residuos, disminuir la presencia de sustancias peligrosas o contaminantes en ellos, y minimizar los impactos significativos sobre el medio ambiente o la salud de las personas que éstos generen.
- **Reutilización:** acción consistente en el uso de un material o producto previamente utilizado como insumo en el proceso productivo que le dio origen.
- **Reciclaje:** acciones de valorización mediante las cuales los residuos son transformados en nuevos productos, excluyendo la valorización energética.
- **Valorización energética:** empleo de un residuo como combustible en un proceso productivo.
- **Eliminación:** acciones que tienen por objeto disponer en forma definitiva los residuos en lugares autorizados para ello en conformidad a la normativa vigente.



*Figura 1: Estrategia jerarquizada de residuos. Adaptada del Informe del Estado del Medio Ambiente, 2011 [1].*

Pese a lo anterior, en Chile, la gestión de residuos sólidos se limita, principalmente, a la recolección y disposición final de éstos, sin mayor atención en alternativas de valorización [1].

La disposición final de los residuos sólidos puede generar una serie de impactos ambientales, por ejemplo: alteración en la calidad de las aguas, alteración en la vegetación y fauna, alteración en las propiedades de los suelos, emisión de gases tóxicos, impactos paisajísticos, entre otros [1].

En Chile, los residuos domiciliarios son dispuestos principalmente en rellenos sanitarios. Entre los años 2010-2011, el 96% de los residuos domiciliarios fueron dispuestos en rellenos sanitarios, mientras que el 4% se recuperó de alguna forma. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), al año 2016, Chile es el segundo en la lista de países que disponen en rellenos sanitarios entre los 34 países que la conforman [7].

### 1.3. Rellenos sanitarios

Según el D.S. n° 189/05 [8], un relleno sanitario corresponde a una instalación de eliminación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población, y daños para el medio ambiente, en la cual los residuos son compactados en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente.

En Chile existen 8 rellenos sanitarios activos, que abastecen a las principales ciudades del país, concentrándose principalmente en la zona central [4].

Previo a la disposición de los residuos, debe realizarse una modificación del drenaje existente: la instalación de un sistema de captación de las corrientes líquidas y un sistema de impermeabilización basal del terreno para evitar la contaminación de las napas subterráneas, consistente en una serie de capas de diferentes materiales, tales como, arcilla, geotextiles, gravilla, entre otros.

Luego de la construcción, los residuos son vertidos en celdas, que corresponden a la unidad básica de los rellenos sanitarios, donde la basura es descargada diariamente y es debidamente compactada, para evitar derrumbes. Sobre ella, al final de la jornada – o si es necesario, más veces – se cubre con el fin de evitar la llegada de animales. La cobertura consiste en tierra del mismo sitio, constituyendo una capa de al menos 15 [cm] de espesor. Un relleno está conformado por una o más celdas. La idea es que la basura esté confinada en un área lo más estrecha posible [8, 9]. El conjunto horizontal de celdas que cubre la superficie global del relleno se denomina nivel. Una vez completado el primer nivel, se continúa con uno superior, y así sucesivamente, hasta completar el número de niveles del diseño [8].

Dentro de un relleno sanitario se genera una serie de procesos bioquímicos, debido a la descomposición anaeróbica de la materia orgánica putrescible de los residuos. Se forma, además de lixiviados, biogás, constituido principalmente por metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de agua y, en menor medida, sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ) [8]. La composición del biogás depende de la masa de residuos depositada, la composición y tipo de residuo orgánico y de las condiciones del medio [9].

Es importante que el biogás no se emita a la atmósfera, ya que corresponden principalmente a gases de efecto invernadero, una importante fuente de contaminación ambiental y, además, comprometen la seguridad dentro del recinto, debido a que son inflamables y foco de incendio en el relleno sanitario. Para ello, a medida que se completan los niveles de éste, se instalan tubos que succionan el fluido para su posterior tratamiento, provocando la desgasificación del relleno sanitario [8, 10].

Por otro lado, debido a la compactación, los residuos liberan agua y líquidos que se filtran a través del relleno sanitario, generándose un proceso de lixiviación. Esta mezcla de corrientes líquidas contiene gran variedad de compuestos contaminantes, y se denominan lixiviados [9, 10].

En consecuencia, un relleno sanitario, corresponde a un reactor bioquímico, cuyas principales entradas son residuos y agua (precipitaciones), mientras que sus salidas son lixiviados (percolados) y biogás [9].

#### 1.4. Lixiviados

Dentro de un relleno sanitario, los lixiviados son producto de la transferencia de agua a través de los residuos sólidos y de la lixiviación de componentes desde el sólido al líquido. Son considerados como un residuo líquido con un gran impacto ambiental, por su significativa concentración de amonio, materia orgánica y sales. Sin embargo, la composición de estos varía dependiendo de la naturaleza de los residuos, características del suelo, patrones de lluvia y, en gran parte, a la edad del relleno [11].

Para calcular la generación de lixiviados dentro de un relleno sanitario, se debe realizar un balance de masa del agua: las entradas corresponden al agua filtrada superiormente, agua aportada por los residuos y por el material de cobertura, mientras que las salidas corresponden a pérdidas por la parte inferior, agua consumida en la formación de gases, pérdidas por vapor de agua y evaporación a la atmósfera (Figura 2) [12].

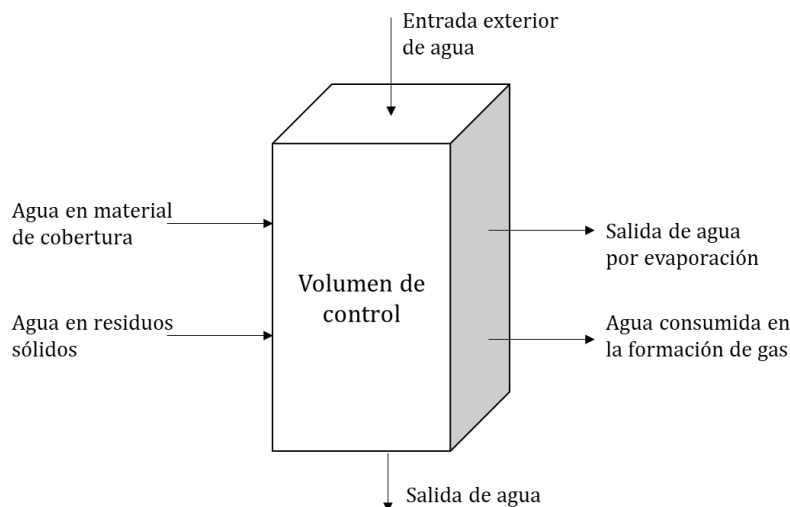


Figura 2: Esquema del relleno sanitario con las entradas y salidas del balance de agua [10].

Para poder acotar la variabilidad de estos líquidos se pueden clasificar como Tipo I (Jóvenes), II (Intermedio) y III (Viejo) (Tabla 1). Los lixiviados jóvenes tienen una alta concentración de materia orgánica biodegradable (ácidos grasos volátiles), que disminuye conforme aumenta la edad del relleno, debido a la descomposición anaeróbica. Además, poseen altas demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y demanda química de oxígeno (DQO), que determinan el índice de biodegradabilidad (DBO<sub>5</sub>/DQO) del lixiviado [13].

A medida que los ácidos grasos volátiles disminuyen y aumenta la edad de los lixiviados, la materia orgánica es dominada por compuestos inorgánicos refractarios, que resisten altas temperaturas sin descomponerse. Asimismo, la concentración de amoníaco aumenta junto con la edad del relleno, debido a la fermentación de la materia orgánica. [11, 13].

Tabla 1: Caracterización del lixiviado (Adaptado de [13]).

Tipo de lixiviado	Joven	Intermedio	Viejo
Edad (años)	<5	5 - 10	>10
pH	<6,5	6,5 - 7,5	>7,5
DBO <sub>5</sub> /DQO	>0,5	0,1 - 0,5	<0,1
DQO	>15.000	5.000 - 15.000	<5.000
N - NH <sub>3</sub> [mg/L]	<400	-	>400
Metales pesados [mg/L]	>2	<2	<2

Generalmente, el tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario presenta grandes problemas técnicos, debido a la alta DQO, concentración de ión amonio y, a la presencia de compuestos tóxicos de origen orgánico e inorgánico. Se deben complementar métodos de tratamiento químico, físicos y biológicos, debido a que es muy difícil obtener resultados satisfactorios utilizando sólo uno de estos métodos [14].

Flotación, coagulación, adsorción y filtración por membranas son los métodos fisicoquímicos más comunes para el tratamiento de lixiviados. Por otro lado, los tratamientos biológicos (aerobios, anaerobios y anóxicos), son muy utilizados para remover los compuestos

biodegradables. Además, se complementan con métodos químicos avanzados para remover compuestos no biodegradables. A su vez, la recirculación, es el procedimiento más utilizado para mejorar la estabilidad del relleno, ya que ayuda al aumento de humedad del lixiviado, aumenta la producción de  $CH_4$ , subsidencia de residuos y disminuye la concentración de metales pesados [14, 15].

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo general

El objetivo general de esta memoria de título consiste en proponer y evaluar un proceso para el aprovechamiento de lixiviados de un relleno sanitario.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar técnicamente el contexto de generación y almacenamiento de lixiviados.
- Analizar alternativas de tratamiento de lixiviados.
- Comparar distintas alternativas de tratamiento de lixiviados.
- Seleccionar un sistema de aprovechamiento de lixiviados en base a criterios técnicos y económicos.
- Dimensionar el sistema seleccionado para el caso de estudio.
- Evaluar económica, ambiental y socialmente el proyecto.

## 1.6. Alcances

Este trabajo, busca el aprovechamiento de lixiviados de un relleno sanitario. Como caso de estudio, se analizarán las condiciones y características del relleno sanitario Loma Los Colorados, ubicado en la comuna de Til Til, Región Metropolitana, perteneciente a la empresa KDM.

Esta propuesta, contempla el diseño de un sistema para obtener una corriente líquida con agua. Se incluirán los dimensionamientos respectivos junto con una evaluación económica, ambiental y social del proyecto a nivel de ingeniería conceptual, por lo tanto, este trabajo estará enmarcado dentro de la etapa de prefactibilidad del proyecto.

Se busca obtener un flujo de agua libre de contaminantes que se encuentre dentro de los estándares de calidad para su uso en regadío, que pueda ser utilizada en la vegetación cercana al recinto del relleno sanitario. No se evaluará la obtención de agua potable.

Se espera que los resultados sean una base para generar un proyecto dentro de la empresa. Para ello, se deberán realizar las pruebas necesarias de factibilidad, las que tampoco están contempladas dentro de este trabajo.

## 2. Caso de estudio

El caso de estudio a analizar corresponde al Relleno Sanitario Loma Los Colorados (RSLLC), diseñado y operado por KDM Tratamiento, filial de KDM Empresas. Se encuentra ubicado a 63,5 kilómetros al norte de la ciudad de Santiago por la Ruta 5 norte, a 3 kilómetros de la localidad de Montenegro, en el fundo Las Bateas, comuna de Til Til, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana. En la siguiente figura se muestra una vista área del recinto.



*Figura 3: Vista aérea del Relleno Sanitario Loma Los Colorados.*

El RSLLC comenzó su funcionamiento en el año 1996. El terreno total consta de 800 hectáreas, de las cuales, 240 están destinadas a la construcción de celdas para la disposición de residuos, consolidándose como el relleno sanitario más grande a nivel nacional. El proyecto total está dividido en dos etapas de explotación, contemplando una vida útil hasta el año 2055. Actualmente, se encuentra en la primera etapa, con un total de 94 hectáreas habilitadas para la disposición.

Los residuos que llegan al RSLLC, provienen de 24 comunas de la Región Metropolitana, los que son transportados por camiones recolectores hacia la Estación de Transferencia de Quilicura, donde son descargados y compactados en silos contenedores, para ser enviados por trenes a las dependencias del relleno sanitario. Además, se envían residuos en camiones y provenientes de las comunas de Llay-Llay, Zapallar, Rinconada de Los Andes, La Ligua, Olmué y Nogales.

Diariamente, llegan 8 a 9 trenes con 27 silos cada uno, lo que implica la recepción diaria de 5.000 a 6.000 toneladas de residuos sólidos urbanos. En el patio de transferencia del relleno, los silos son traspasados a un camión que los transporta al frente de trabajo, donde los residuos son acomodados y compactados. A la fecha, hay aproximadamente 35 millones de toneladas de residuos dispuestos.

Por otro lado, las comunas de Vitacura y Ñuñoa poseen una gestión de reciclaje de sus residuos, los que son enviados de forma segregada al RSLLC, dónde hay una planta de reciclaje en la que son ordenados y enfardados para luego ser vendidos como materia prima, con un promedio total de 700 toneladas por mes.

Por su parte, KDM Energía, otra filial de KDM empresas, se dedica a la generación de energías renovables no convencionales (ERNC) y reducción de emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Sustenta su producción eléctrica a partir del aprovechamiento energético del biogás proveniente de la materia orgánica biodegradable presente en los residuos. El biogás es captado mediante un sistema de pozos verticales en la superficie del relleno. Posteriormente, es transportados por tuberías a la Central Eléctrica Loma Los Colorados, dónde es aprovechado para la generación de energía eléctrica que es inyectada al Sistema Interconectado Central.

Por otro lado, los lixiviados son transportados a una planta de tratamiento, para luego ser recirculados a las áreas del relleno que se encuentran impermeabilizadas. A continuación, se relata cómo es el funcionamiento de este sistema.

## 2.1. Sistema de tratamiento actual de los lixiviados

El sistema de tratamiento de lixiviados ha sufrido numerosos cambios desde el comienzo del relleno sanitario hasta su proceso actual. Inicialmente, los lixiviados sólo eran recirculados al relleno desde las piscinas de almacenamiento, sin ningún tratamiento previo, lo que estaba permitido por la normativa, mientras no afectara la estabilidad estructural del relleno ni causara aparición de fluidos en los taludes de la instalación.

Luego, en el año 2001, se aprueba la instalación de un sistema de tratamiento biológico, que permitía la obtención de un efluente que cumplía con las características señaladas en el D.S. n° 90/00 de descarga de residuos líquidos a aguas marinas y superficiales, de esta manera, el lixiviado era descargado a una quebrada cercana.

Posteriormente, en el 2006, se aprueban modificaciones en el sistema de tratamiento de lixiviados, que permitían la descarga al alcantarillado, según el D.S. n° 609/98, donde el líquido era transportado por trenes a una cámara de descarga ubicada en la comuna de Estación Central. Además, se incorporó un sistema de terciario, que incluía un filtro de carbón activado seguido por una etapa de osmosis inversa. Esta alternativa no prosperó por resultar muy costosa para la empresa, y actualmente se encuentra en desuso. Sin embargo, existen planes para volver a utilizarla.

Actualmente, la planta de tratamiento de lixiviados generados en el RSLLC posee un tratamiento biológico que incorpora un reactor anaeróbico, uno aeróbico y finaliza con una etapa de sedimentación. Asimismo, se cuenta con cuatro piscinas de acumulación (P1, P2, P3 y P4), una piscina de maduración y dos piscinas de carguío, donde se acumula el lixiviado tratado para ser cargado en los camiones aljibe que los recirculan al relleno.

Previo al proceso de tratamiento, el lixiviado “crudo” es enviado por un sistema de tuberías a un sumidero, desde donde se transporta a dos de las piscinas de acumulación, una por bombeo (P1) y otra por gravedad (P2).

Luego, desde la P2 el lixiviado se dirige por bombas y una red de tuberías a la piscina anaeróbica para iniciar el tratamiento biológico. El líquido permanece un tiempo de residencia hidráulica

entre 20 a 45 días dependiendo de las características del líquido ingresante y el caudal. Esto permite disminuir la concentración de materia orgánica (DBO<sub>5</sub>, DQO y sólidos suspendidos totales). Asimismo, como se recircula efluente tratado, se genera un medio ideal para bacterias desnitrificantes, que en ausencia de oxígeno y presencia de nitrito y nitratos (NO<sub>2</sub> y NO<sub>3</sub>) generan nitrógeno gas (N<sub>2</sub>).

Posteriormente, el líquido es ingresado a la piscina aeróbica (reactor aeróbico), donde se produce la mayor oxidación de la materia orgánica, en este proceso se genera agua, tejidos celulares y gases en pequeñas cantidades, los que quedan suspendidos en el lixiviado. El oxígeno requerido para esta etapa es inyectado mediante una conexión de tuberías en el fondo de la piscina, alimentadas por una serie de sopladores de aire.

El líquido de mezcla generado es enviado a dos sedimentadores secundarios. En este punto, los sedimentos generados anteriormente, decantan y se depositan en el fondo del estanque como lodos. Según requerimiento, una fracción de estos lodos es recirculada al reactor aeróbico, mientras que otra pasa por una etapa de floculación para aumentar la concentración de lodos, produciéndose una fracción líquida que es enviada al reactor biológico. El lodo floculado se transporta a un tanque de acumulación desde donde son bombeados a un filtro de bandas para luego ser acumulado en una tolva abierta para acelerar el secado y ser dispuesto en el relleno sanitario como residuo sólido no peligroso.

Por otro lado, el efluente obtenido de los sedimentadores es enviado a una piscina de maduración o directamente a las piscinas de carguío. En la primera, aumenta el tiempo de residencia del líquido, obteniendo una etapa extra de desnitrificación reduciendo los niveles de nitrógeno.

Los lixiviados tratados son recirculados al relleno para humectación. El líquido es transportado por camiones aljibes que lo toman desde las piscinas de carguío. Cabe destacar que la tasa de recirculación depende de la disponibilidad de camiones, por lo que una parte importante se acumula en las piscinas. Sin embargo, la principal corriente de agua que aporta a la generación de lixiviados corresponde a las precipitaciones en la zona, por lo que la recirculación sólo aporta a la generación de estos con mayor concentración de contaminantes.

En consecuencia, resulta atractivo idear formas para disminuir la concentración de contaminantes en los lixiviados, así como reducir el volumen que se recircula y aprovechar el agua contenida en ellos, considerando la escasez de este recurso en la zona y, toda el agua que se requiere para el funcionamiento del relleno sanitario, tanto en las instalaciones, como en el riego de caminos y vegetación, la que es traída en camiones aljibe desde localidades cercanas.

En la Figura 4 se esquematiza el funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados del RSLLC.



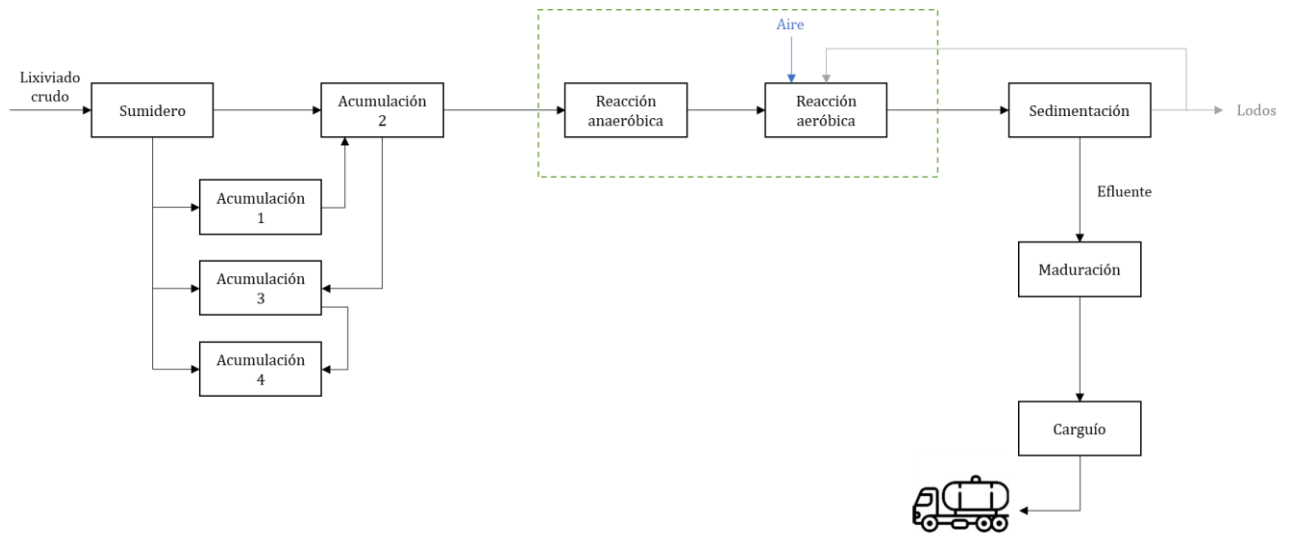


Figura 4: Diagrama de bloques de la planta de tratamiento de lixiviados del RSLLC.

## 2.2. Caracterización de los lixiviados

La planta de tratamiento de lixiviados del RSLLC, cuenta con un laboratorio interno donde se realizan análisis a los lixiviados que ingresan y salen del sistema (sumidero y sedimentadores), para controlar la eficiencia del proceso.

Asimismo, se realiza un monitoreo mediante un laboratorio externo que compara los parámetros medidos con los establecidos en el D.S. n° 90/00. Sin embargo, este no aplica, debido a que no se están descargando efluentes a cuerpos superficiales de agua, sino que el líquido es recirculado al relleno, por ende, no existe un sistema de aprovechamiento donde se le retire algún componente de valor, como por ejemplo el agua, la cual, puede ser ocupada para regar sectores no impermeabilizados. La Norma Chilena Oficial n° 1.333 [16] establece los requisitos que debe cumplir el agua destinada a regadío, pero ésta no hace mención de nitrógeno ni materia orgánica, que son los principales contaminantes presentes en los lixiviados, sino sólo de elementos químicos, cuyos parámetros son similares a los establecidos en el D.S. n° 90/00, por ende, se utilizan los parámetros de este último a modo de comparación, al igual que lo hace el laboratorio interno de la empresa.

A finales del 2016, se detuvo el tratamiento biológico debido a fallas de funcionamiento, por lo que el último monitoreo externo se realizó en junio de dicho año.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en promedio el año 2016 en el laboratorio interno de la empresa. En el Anexo A se encuentran los parámetros obtenidos por el laboratorio externo, junto con la comparación con el D.S. n° 90/00. En rojo se señalan los parámetros que no cumplen con la norma. Además, se presentan los porcentajes de remoción deseados para que los contaminantes en rojo cumplan con la norma mencionada al finalizar el tratamiento.

Tabla 2: Valores promedio del año 2016 medidos en el laboratorio interno del RSLLC en el sumidero y en la salida de los sedimentadores, para estos no se consideran los datos de noviembre y diciembre 2016. Se incluye comparación con los valores del D.S. n° 90/00.

Contaminante	Unidad	Sumidero	Salida Sedimentadores	Valor máximo estipulado por el D.S. n° 90/00	% de remoción desde el sumidero
<b>pH</b>	[]	7,95	8,3	6,0 - 8,5	-
<b>Temperatura</b>	[°C]	24,88	19,1	35	-
<b>SST<sup>1</sup></b>	[mg/L]	185,13	642,84	80	57%
<b>SSV<sup>1</sup></b>	[mg/L]	-	431,42	N.A.	-
<b>Volatilidad</b>	%	-	67,58	N.A.	-
<b>Cl<sup>-</sup></b>	[mg/L]	5952,35	6978,94	400	93%
<b>DBO<sub>5</sub></b>	[mg/L]	1206,02	344,22	35	97%
<b>DQO</b>	[mg/L]	6069,8	6213,19	N.A.	-
<b>N<sub>T</sub><sup>1</sup></b>	[mg/L]	2098,17	1589,11	50	98%
<b>NH<sub>3</sub></b>	[mg/L]	2772,36	1890,6	N.A.	-
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	[mg/L]	69	107,37	N.A.	-
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	[mg/L]	61,11	35,46	N.A.	-
<b>P<sub>s</sub></b>	[mg/L]	20,12	21,11	10*	50%
<b>Conductividad</b>	[mS/cm]	29,5	29,93	N.A.	-
<b>Alcalinidad</b>	[mg/CaCO <sub>3</sub> /L]	9078,49	7132,49	N.A.	-

\*Límite para el fósforo total. N.A.: No Aplica.

<sup>1</sup> SST: Sólidos suspendidos totales. SSV: Sólidos suspendidos volátiles. N<sub>T</sub>: Nitrógeno Total Kjeldahl

### 3. Alternativas de tratamiento de lixiviados

El tratamiento de lixiviados es clave para evitar la potencial contaminación de aguas subterráneas, y se pueden categorizar de acuerdo a varias características, como por ejemplo, a los niveles de tratamiento que se logre, o al contaminante que se desee remover [17].

Se han realizado vastas investigaciones en busca de tratamientos adecuados para los lixiviados; sin embargo, debido a la heterogeneidad en su composición y a la variabilidad de los volúmenes generados, no se pueden extrapolar directamente los resultados obtenidos con tratamientos de un lixiviado a otro. Por lo tanto, cada lixiviado proveniente de un relleno sanitario debe ser evaluado individualmente para encontrar el sistema de tratamiento adecuado para su manejo [18].

Asimismo, dada la complejidad de su composición, no existe un tratamiento único que asegure cumplir con las normas de descarga de aguas. Es por ello que siempre es necesaria una combinación de sistemas de tratamiento, los que se pueden dividir según el medio de eliminación de contaminantes: recirculación al relleno, evaporación, tratamiento biológico, tratamiento fisicoquímicos, sistemas de membranas y tratamientos naturales [10, 17].

Para escoger el sistema de tratamiento, es importante la edad del lixiviado, debido a la biodegradabilidad que estos poseen. Así, para lixiviados jóvenes, se prefieren usar sistemas biológicos, mientras que para lixiviados viejos, dada su baja biodegradabilidad, es preferible el uso de sistemas fisicoquímicos [19].

Por otro lado, los sistemas de tratamiento se pueden categorizar según el nivel de depuración que se logre, dividiéndose en: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

A continuación, se expondrá una reseña de los principales sistemas de tratamiento para lixiviados, luego se compararán económicamente y, se procederá a ahondar en el elegido. Debido a que el caso de estudio ya posee un sistema biológico de tratamiento completo (anaeróbico y aeróbico), esta alternativa no se estudiará.

#### 3.1. Sistemas fisicoquímicos

Entre los procesos físicos y químicos están: la reducción de sólidos en suspensión, partículas coloidales, material flotante, color y compuestos tóxicos por flotación, la coagulación-floculación, adsorción y oxidación química. Los tratamientos fisicoquímicos para lixiviados de un relleno sanitario se utilizan en combinación dentro de la línea de tratamiento (pretratamiento o última purificación), o para tratar un contaminante específico [20]. La flotación y la coagulación-floculación, son tratamientos que van orientados a la separación de partículas suspendidas dentro de los lixiviados mediante la adición de sustancias químicas (coagulantes), mientras que por los procesos de adsorción y oxidación química se pueden remover tanto sólidos suspendidos como disueltos [18, 20].

Los lixiviados a los que se les realiza este tipo de tratamiento son en general viejos, por su baja biodegradabilidad [18].

##### 3.1.1. Flotación

La flotación es un proceso que se utiliza para separar partículas sólidas o líquidas de baja densidad de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo pequeñas burbujas de

gas (aire) al fluido. Las burbujas se adhieren a las partículas y, gracias a la fuerza ascendente que se genera en el conjunto partícula – burbuja, éstas suben a la superficie y su remoción es más sencilla (Figura 5) [21].

Existen tres procesos de flotación, sin embargo, el más utilizado en el tratamiento de aguas residuales es la flotación por aire disuelto (DAF), donde el aire se inyecta a presión y posteriormente se procede a la liberación de la presión hasta alcanzar la presión atmosférica [21].

Normalmente, se suelen añadir determinados reactivos químicos para facilitar este proceso, ya que crean una estructura o superficie que permite absorber o atrapar rápidamente las burbujas [21].

Este proceso ha sido estudiado ampliamente para el tratamiento de diferentes aguas residuales, como los de industria farmacéutica, metalúrgica, petroquímica, aguas residuales, etc. Sin embargo, ha sido poco estudiado para el tratamiento de lixiviados [21].

Diversos estudios demuestran que este proceso posee en promedio 34% de remoción de DQO, 39% de SST y 30% de ST [18, 21, 22].

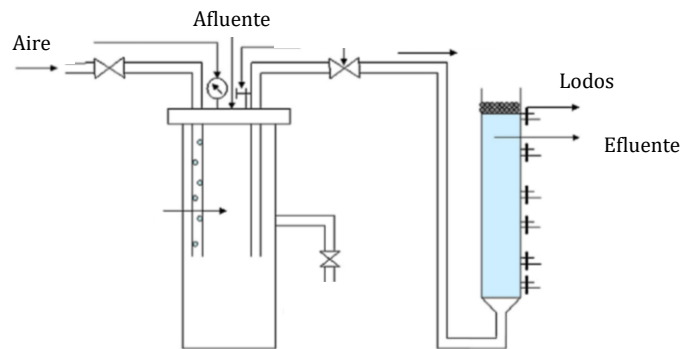


Figura 5: Esquema del tratamiento de flotación [23].

Los costos de este proceso son altos respecto a otros tratamientos, debido al consumo del reactante químico. Además, se generan lodos provenientes de la adición de las partículas, lo que aumenta los costos de operación [18]. Para tratar aguas residuales con un caudal de 10 [m<sup>3</sup>/h], el costo de inversión es de 30.000 [USD], mientras que para la operación son de 0,51 [USD/m<sup>3</sup>] [24].

### 3.1.2. Coagulación – Floculación

Este tipo de tratamiento utiliza reactivos químicos para separar las partículas sólidas y disueltas. Es útil para tratar lixiviados viejos, se utiliza como tratamiento previo a los procesos biológicos, osmosis inversa, o como una etapa final, con el fin de eliminar compuestos no biodegradables [18, 20].

La coagulación es el proceso por el que los componentes de una suspensión o disolución son desestabilizados por superación de fuerzas que mantienen su estabilidad. Mientras que la floculación es el proceso por el que las partículas desestabilizadas se unen para formar grandes partículas estables o aglomerados, los que finalmente sedimentan (Figura 6) [25].

Como coagulantes se suelen utilizar sales de aluminio o hierro, cal y polímeros denominados polielectrolitos, que desestabilizan los coloides presentes en el agua. Como floculantes, se suelen emplear polímeros catiónicos, aniónicos o no iónicos para favorecer la formación de flóculos a partir de las partículas coaguladas previamente [20, 26].

Con este sistema se pueden eliminar hasta un 75% de los sólidos en suspensión, pero es menos eficaz para la remoción de materia orgánica que los otros sistemas físicoquímicos, alrededor de un 40%. Junto con esto, tiene remoción directa de nitrógeno, fósforo, color, turbidez, cationes y aniones en general. Además, se generan grandes volúmenes de lodo, lo que implica un gasto extra en reactivos y en la gestión de los residuos generados, al igual que en el sistema anterior [20, 26].

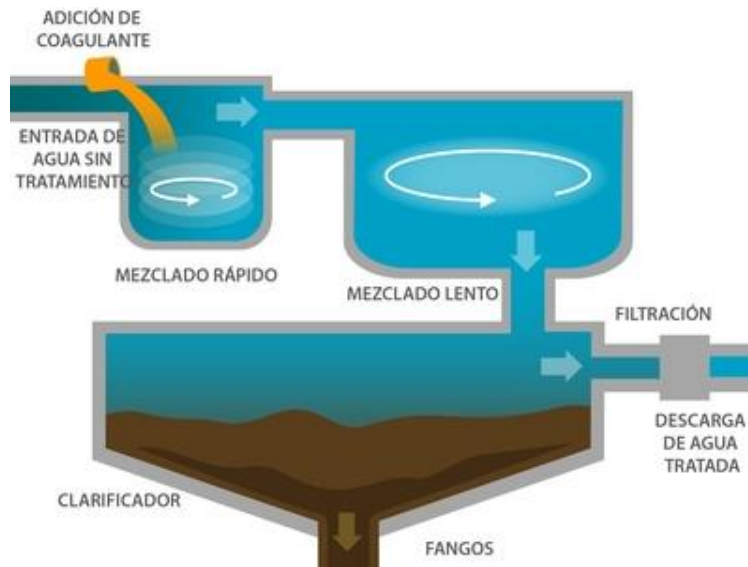


Figura 6: Esquema del tratamiento de coagulación - floculación [27].

En el caso de tratamientos de aguas residuales, los costos de inversión de coagulación química están en el orden de 48.000 [USD] para un caudal de 30 [m<sup>3</sup>/h], mientras que los costos de operación son de 0,1 [USD/m<sup>3</sup>] [28].

### 3.1.3. Adsorción

Los procesos de adsorción consisten en la utilización de una superficie sólida (adsorbente), para separar un contaminante soluble en un fluido (Figura 7). En diversos estudios se emplea carbón activado como adsorbente. Este tratamiento normalmente se utiliza combinado con otros procesos para la eliminación de moléculas orgánicas de tamaño intermedio [26].

En estos sistemas, la eficiencia disminuye de manera progresiva en el proceso, ya que, el adsorbente tiene disponible cierta área para poder adsorber y, conforme se adsorben los contaminantes, los poros se van colmando. Se genera eficiencia de remoción de DQO que van disminuyendo de 60 a 30% mediante aumenta el tiempo de contacto [18]. Además, hay remoción directa de DBO<sub>5</sub>, compuestos orgánicos, color, olor, cloro y bromo.

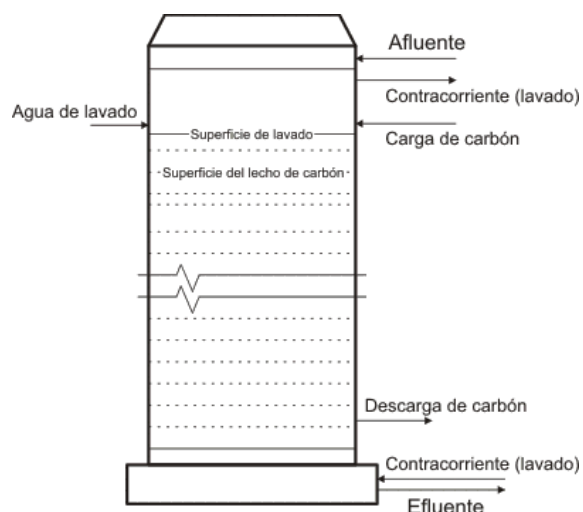


Figura 7: Esquema del tratamiento de adsorción con carbón activado [29].

No obstante, resulta un proceso costoso debido a la necesidad de regenerar el carbón activado mediante un proceso de desorción. El costo de una torre de adsorción con carbón activado con dimensiones de 2 [m] de alto y 1 [m] de largo, son de 4.500 USD, sin considerar el proceso de desorción [18, 30]. Para el tratamiento de aguas residuales, el costo de inversión está en el orden de 89.000 [USD], para un caudal de 250 [m<sup>3</sup>/día], con un costo de tratamiento de 0,47 [USD/m<sup>3</sup>] [31].

#### 3.1.4. Oxidación química

Los procesos de oxidación son aquellos en los que una sustancia pierde o dona electrones. Suelen utilizarse como tratamientos terciarios, para eliminar materia orgánica residual, sustancias solubles no biodegradables y/o tóxicos orgánicos en RILes [26, 32].

Entre los oxidantes más utilizados para tratamiento de RILes, se encuentran: permanganato potásico, cloro, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno, ozono, etc., y dan como resultado la eliminación de un 20 a 50% de DQO, así como la remoción del índice de fenol y compuestos orgánicos [26].

Sin embargo, los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) han sido propuestos como una alternativa para la mineralización de compuestos orgánicos recalcitrantes en los lixiviados. El propósito principal de los POA es mejorar la eficiencia de oxidación química mediante el aumento de radicales hidroxilo. La mayoría de ellos, excepto la ozonización (O<sub>3</sub>), utilizan una combinación de oxidantes fuertes, por ejemplo, O<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la irradiación con rayos ultravioleta, ultrasonidos, haz de electrones y catalizadores. En ellos se suele combinar la adición de reactivos oxidantes, como el reactivo Fenton, con procesos de ozonización o de radiación ultravioleta lo que permite eliminar del lixiviado DQO, compuestos orgánicos y refractarios [26].

Cuando la oxidación con ozono se realiza de forma independiente, no es muy eficaz. Debido a la complejidad del lixiviado, se requieren dosis de ozono altas y la reacción toma un tiempo largo. En cambio, en combinación con otros métodos (biológico, coagulación), el ozono incrementa la eficiencia de disminución de DQO del 54% al 94% [32].

Para tratamiento de RILes, el costo de inversión es aproximadamente de 90.400 [USD] y de operación es de 2,6 [USD/m<sup>3</sup>], para un caudal de 10 [m<sup>3</sup>/día] [33].

### 3.2. Sistemas de membranas

Al igual que los anteriores, los sistemas de membranas corresponden a tecnologías extraídas desde los procesos de tratamiento de aguas. La aplicación de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y osmosis inversa ha sido ampliamente estudiada en la literatura, y en general se utilizan acopladas a otros sistemas [17]. La principal desventaja de estas tecnologías frente a otras, son sus altos costos de inversión, operación y mantenimiento.

Los sistemas de microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración son métodos de filtración de flujo transversal, similares a la osmosis inversa, pero con presiones más bajas, en las que se utiliza una membrana para separar partículas del líquido. La diferencia entre los métodos corresponde al tamaño de los poros (Figura 8).

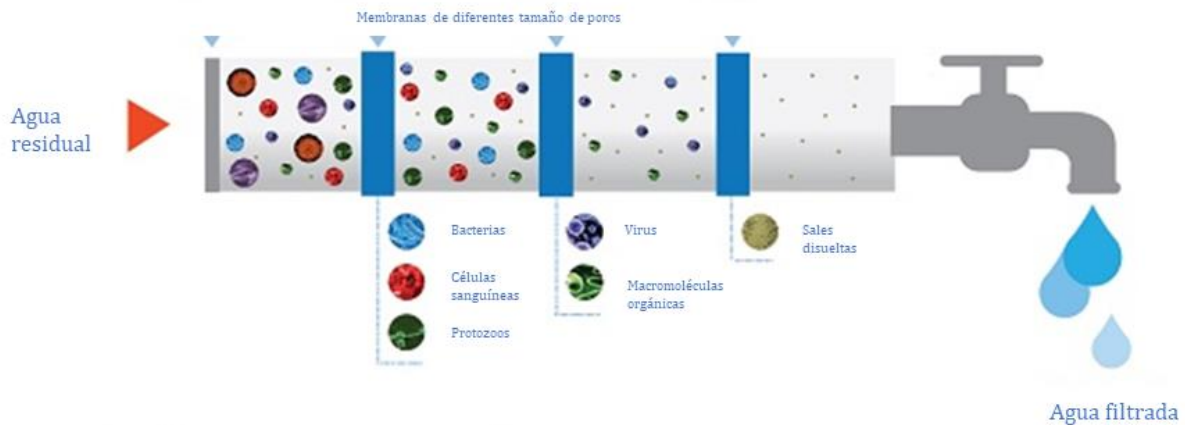


Figura 8: Esquema del tratamiento de filtración por membranas [34].

Además, estos procesos comúnmente van acoplados después de otros sistemas de tratamientos para que las membranas no se saturen con tanta rapidez.

#### 3.2.1. Microfiltración

Para tratamiento de lixiviados, la microfiltración se utiliza en procesos biológicos de tratamiento aeróbico, en reemplazo de los sedimentadores, para la reducción de DBO<sub>5</sub>, SST, microorganismos, turbidez y color [17]. Esta tecnología posee membranas con tamaño de poros de entre 0,04 a 0,1 [μm], y se pueden remover bacterias, coloides y partículas en suspensión. [13, 20].

Para un sistema de tratamiento de aguas, con un caudal de 17 [L/s], la inversión es de 1.700.000 [USD] con un costo de operación de 0,6 [USD/m<sup>3</sup>] [35].

#### 3.2.2. Ultrafiltración

Es un proceso útil para eliminar macromoléculas, como materia orgánica y SST, sin embargo, la funcionalidad de esta tecnología depende fuertemente del tipo de material con el que esté constituida la membrana. El tamaño de sus poros está entre 0,01 – 0,02 [μm] [13, 36].

Al igual que para la microfiltración, en un sistema de tratamiento de aguas, el costo de inversión es de 1.700.000 [USD] con un caudal de 17 [L/s] y un costo de operación de 0,6 [USD/m<sup>3</sup>] [35].

### 3.2.3. Nanofiltración

Esta tecnología, ofrece un sistema versátil para cumplir con múltiples objetivos de calidad de aguas, como el control de contaminantes orgánicos, inorgánicos y microbianos. Este tipo de membranas está compuesto generalmente, de películas poliméricas. Sin embargo, la aplicación exitosa de la tecnología de nanofiltración, requiere un control eficaz de la incrustación de las membranas. Gran variedad de compuestos pueden contribuir al ensuciamiento de la membrana, como por ejemplo, sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas, partículas coloidales y en suspensión [13, 20]. Los poros de estas membranas son de un tamaño entre  $5 \times 10^{-3}$  -  $5 \times 10^{-2}$  [μm] [36].

Al igual que para las membranas anteriores, para un sistema de tratamiento de aguas tiene un costo de inversión de 1.900.000 [USD] para un caudal de 17 [L/s] con costo de operación de 0,6 [USD/m<sup>3</sup>] [37].

### 3.2.4. Osmosis inversa

La osmosis inversa es una técnica, que, a diferencia de las anteriores, utiliza una presión alta para traspasar el líquido por la membrana (Figura 9). Parece ser uno de los métodos más prometedores y eficientes entre los nuevos procesos de tratamiento de lixiviados en rellenos sanitarios, ya que posee gran eficiencia para la remoción de la mayoría de los contaminantes. Sin embargo, las aplicaciones estudiadas, corresponden a lixiviados viejos o pretratados, que poseen relativamente bajas concentraciones de DBO<sub>5</sub>. Además, requiere bajos costos energéticos si se compara con otro tipo de tecnologías, pero requiere altos costos de operación y mantenimiento, por la necesidad de realizar limpiezas y reemplazos continuos a las membranas [13, 17].

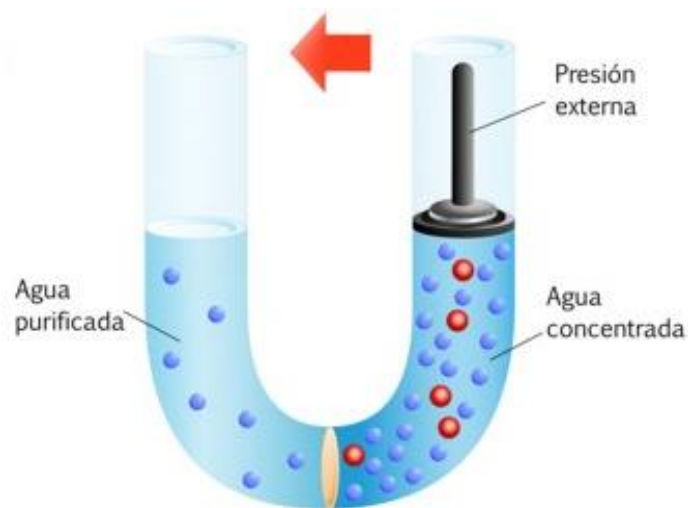


Figura 9: Esquema del tratamiento de osmosis inversa [38].

Para plantas de tratamiento de aguas, con un caudal de 17 [L/s], se requiere un costo de inversión de 1.900.000 [USD] y un costo de operación de 0,62 [USD/m<sup>3</sup>], los que están asociados a la mantención de las membranas [39].



### 3.3. Sistemas naturales

Los sistemas naturales, como lagunas y humedales artificiales, emulan procesos físicos, químicos y biológicos que se dan en la naturaleza. En el tratamiento de lixiviados, tienen la ventaja de ser sistemas con operación muy simple. Además, existe la posibilidad de lograr diferentes niveles de tratamiento [20, 40].

Al igual que los sistemas anteriores, los humedales artificiales tienen sus inicios en el tratamiento de aguas municipales en Europa, con el principal propósito de disminuir la carga orgánica de los líquidos, así como disminuir los SST, nitrógeno, fósforo, color y turbidez [41, 42].

Los humedales artificiales realizan procesos de degradación de contaminantes mediante los mismos mecanismos que los humedales naturales, por lo cual, crean condiciones anaeróbicas o aeróbicas. Se categorizan dependiendo de la configuración del flujo con el que se trabaje, pueden ser de flujo superficial o libre, sobre la tierra o, subsuperficial, bajo la tierra. Sus principales componentes son: agua, sustrato (medio de soporte), vegetación y microorganismos (Figura 10) [43].

La principal desventaja que se tiene con estos sistemas es el área de terreno que requiere para localizar los procesos. Sin embargo, por la naturaleza misma de los diseños de los rellenos sanitarios, que presentan la necesidad de tener áreas de amortiguamiento visual, de ruido, y de olores, la superficie del humedal podría cumplir estas tareas [17].

La eficiencia y calidad de este sistema es exponencial en el tiempo, debido a que una vez establecidos y adaptados los microorganismos y especies vegetales en el terreno, serán capaces de desarrollarse por sí solas [42].

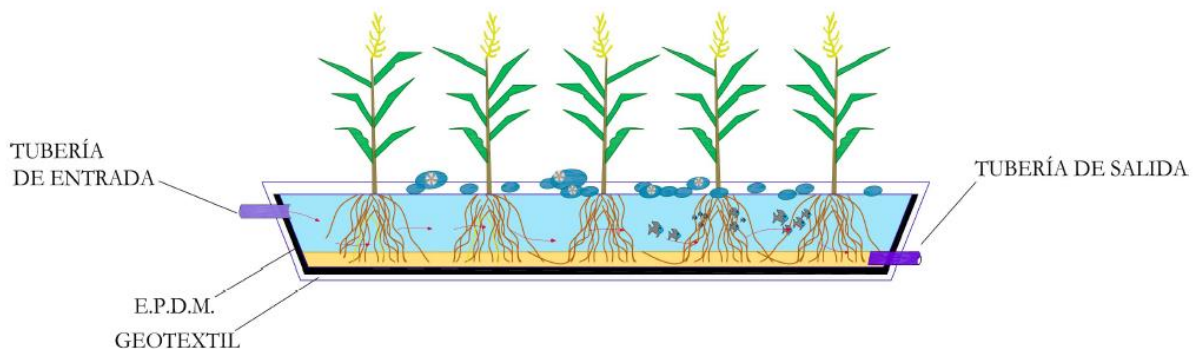


Figura 10: Esquema del tratamiento con un humedal artificial de flujo libre [44].

Presenta altas ventajas comparativas respecto a otros sistemas, debido a la facilidad y bajos costos de operación y mantenimiento, así como bajo consumo de energía eléctrica. En aplicaciones donde el costo de del terreno no es muy alto, o donde las zonas de amortiguamiento del relleno sanitario se pueden usar en el proceso [17].

Para el tratamiento de aguas residuales, con un caudal de 2 [m<sup>3</sup>/día], el costo de inversión es de 13.000 [USD] con un costo de operación de 0,0525 [USD/m<sup>3</sup>] [42].

## 4. Comparación de los sistemas de tratamiento

Debido a que los sistemas de tratamiento de lixiviados suelen trabajarse en diferentes configuraciones, y generalmente, acoplados unos a otros, no se puede realizar una comparación en base a la caracterización del lixiviado final, ya que depende de la configuración de los sistemas, que puede ser muy variada. Por lo que, se realizará una comparación en base a datos económicos.

Sin embargo, resumiendo los estudios del capítulo 3, en la Tabla 3 se realiza una breve comparación técnica que permite diferenciar las alternativas de tratamiento y si aplican frente a los contaminantes que se encuentran fuera de norma, señalados en la Tabla 2, con el fin de analizar los sistemas que cumplen para este caso de estudio.

Tabla 3: Comparación técnica de las alternativas de tratamiento estudiadas [45].

Alternativas de tratamiento	DBO <sub>5</sub>	SST	N <sub>T</sub>	P <sub>s</sub>	Cl <sup>-</sup>
<b>Flotación</b>	×	○	×	×	×
<b>Coagulación-Floculación</b>	×	○	○	○	×
<b>Adsorción</b>	○	○	×	×	○
<b>Oxidación química</b>	○	×	×	×	×
<b>Microfiltración</b>	×	○	×	×	×
<b>Ultrafiltración</b>	○	○	×	×	×
<b>Nanofiltración</b>	○	○	○	○	×
<b>Osmosis inversa</b>	○	○	○	○	×
<b>Humedales artificiales</b>	○	○	○	○	×

○: Aplica. ×: No Aplica

En base a la Tabla 3, se aprecia que las alternativas de tratamiento que se ajustan mejor técnicamente al caso de los lixiviados del RSLLC son: la coagulación – floculación, nanofiltración, osmosis inversa y humedales artificiales, ya que son tecnologías capaces de remover la mayoría de los contaminantes que posee este efluente. Cabe destacar que el cloro es un contaminante que pocos sistemas pueden remover. En general, a nivel mundial se utiliza una técnica de decoloración con dióxido de azufre [45].

En 2010, Fundación Chile realizó un informe de estimación de costos de abatimiento de contaminantes en residuos líquidos [45] para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), donde obtuvieron funciones de costo para diferentes alternativas de tratamiento de residuos líquidos, las cuales fueron estimadas a partir de estudios bibliográficos y recopilación de datos, con correlaciones lineal, exponencial, logarítmica y potencial, y seleccionaron la que tuviese mejor correlación.

Cabe destacar, que los valores presentados en el capítulo 3 corresponden a valores que ejemplifican el uso de estas ecuaciones. En el Anexo B se especifican las ecuaciones utilizadas.

A continuación, se muestra la comparación realizada para un caudal de 100 [m<sup>3</sup>/día] y los costos asociados.

Tabla 4: Costos de inversión y operación calculados para cada alternativa de tratamiento a un caudal de 100 [m<sup>3</sup>/día] [24, 28, 31, 33, 35, 37, 39, 42].

		Costos de Inversión [USD]	Costo de Operación [USD/m <sup>3</sup> ]
<b>Sistemas Físicoquímicos</b>	Flotación	\$ 13.600	\$ 0,88
	Coagulación - Floculación	\$ 9.800	\$ 0,06
	Adsorción	\$ 51.500	\$ 0,88
	Ox. Química	\$ 360.000	\$ 0,93
<b>Sistemas de membrana</b>	Microfiltración	\$ 335.000	\$ 0,67
	Ultrafiltración	\$ 335.000	\$ 0,67
	Nanofiltración	\$ 380.400	\$ 0,73
	Osmosis inversa	\$ 380.400	\$ 0,76
<b>Sistemas naturales</b>	Humedales Artificiales	\$ 207.500	\$ 0,01

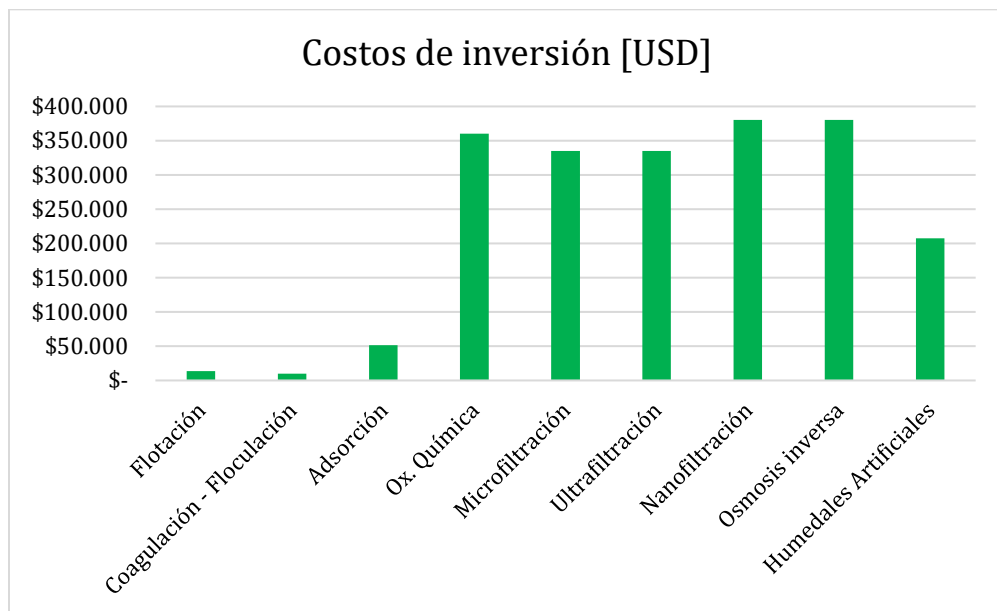


Figura 11: Gráfico comparativo de los costos de inversión de las diferentes alternativas (Basado en información de [24, 28, 31, 33, 35, 37, 39, 42]).



Figura 12: Gráfico comparativo de los costos de operación de las diferentes alternativas (Basado en información de [24, 28, 31, 33, 35, 37, 39, 42]).

De los gráficos anteriores (Figura 11 y 12), se aprecia que la alternativa más económica corresponde a la coagulación-floculación. Sin embargo, también se analizará el sistema por humedales artificiales, dado que dentro del costo de inversión de estos, el mayor porcentaje corresponde al costo del terreno y, como se proyecta el nuevo sistema al interior de las instalaciones del relleno sanitario, no sería necesario este costo de inversión [46].

Por lo tanto, se realizará una comparación técnica más profunda en base a las condiciones de operación que requiere cada una de estas alternativas, para seleccionar la que mejor se adecúa al caso de estudio (Tablas 5 y 6) [28, 42].

Tabla 5: Condiciones de operación para las alternativas de coagulación-floculación y humedales artificiales.

Condiciones operativas	Coagulación-floculación	Humedales artificiales
<b>Tipo de operación</b>	Continua	Continua con tiempo de retención de 15 a 20 días
<b>Selectividad</b>	No es selectivo	No es selectivo
<b>Pretratamiento</b>	No requiere	En general, filtrado previo
<b>Consumo de reactivos</b>	Requiere coagulantes y floculantes*	No requiere

\* Las dosis de reactivos son calculadas según el tipo y concentración de contaminante.

Tabla 6: Parámetros de operación para las alternativas de coagulación-floculación y humedales artificiales.

Parámetros operativos	Coagulación-floculación	Humedales artificiales
Temperatura	No definida **	Ambiente: 5 – 40 °C
Caudal de operación	No tiene limitaciones ***	Hasta 1.000 [m <sup>3</sup> /día]
DBO <sub>5</sub> entrada	-	Bajo 13.000 [mg/L]
pH entrada	-	5,5 – 9
SST entrada	-	Bajo 200 [mg/L]
Vida útil	20 años ****	15 a 20 años

\*\* Sólo es requerido que el lixiviado se encuentre en estado líquido, sobre el punto de congelamiento y bajo el punto de ebullición.

\*\*\* El caudal máximo de operación está definido por el diseño y costos de los reactivos.

\*\*\*\* Vida útil referida a los equipos con adecuado manejo de mantención.

Se aprecia que ambas medidas sirven para tratar los lixiviados del caso de estudio, ya que reducen prácticamente los mismos contaminantes, sin embargo, como se aprecia en la Tabla 3, la coagulación – floculación no aplica para la separación de DBO<sub>5</sub>, pero, por otro lado, disminuye los cationes y aniones presentes en el líquido [28, 42].

Considerando esto, el sistema por humedales artificiales resulta prometedor. Sin embargo, se aprecia, que el costo de inversión de estos es bastante mayor, lo que se debe, principalmente, al costo del terreno, que corresponde a la mayoría de la inversión [46]. Pero, hay que considerar que en el RSLLC existen zonas de amortiguamiento factibles para la instalación de un humedal artificial, por lo que no se incurriría en este gasto. Por ende, el costo de inversión de esta tecnología disminuiría significativamente. Si bien, las demás tecnologías también poseen un costo de terreno, éste no es significativo, por lo que, seguramente, no se reduciría tanto la inversión.

Por otro lado, el sistema de coagulación-floculación requiere de la utilización constante de reactivos, por lo que se deberían construir o habilitar zonas de almacenamiento de insumos industriales, generando costos extras. Asimismo, este sistema produce lodos que pueden ser peligrosos debido a la toxicidad del líquido a tratar, lo que requeriría de planes de tratamiento y gestión de éstos que también aumentarían el capital de trabajo.

A partir de lo anterior, se opta por tratar los lixiviados mediante un sistema de humedales artificiales.

## 5. Sistema propuesto

Se propone un sistema adicional de tratamiento para los lixiviados que permita la obtención de una corriente líquida con menor carga contaminante para que pueda ser utilizada como agua de riego. Se analizarán y evaluarán dos casos que permitan disminuir el volumen de líquido que se acumula en las piscinas:

1. Caso 1: proceso sustituto al tratamiento actual, utilizando la totalidad del lixiviado crudo que ingresa al sumidero.
2. Caso 2: proceso complementario al tratamiento actual, utilizando la totalidad del efluente tratado que genera la planta, es decir, lo que sale de los sedimentadores.

A continuación, se aprecia el humedal artificial en las dos configuraciones mencionadas.

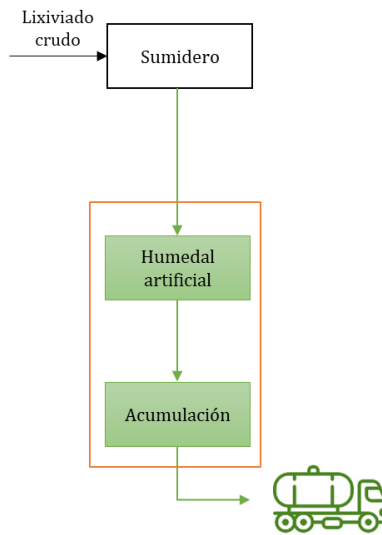


Figura 13: Caso 1 del sistema propuesto.

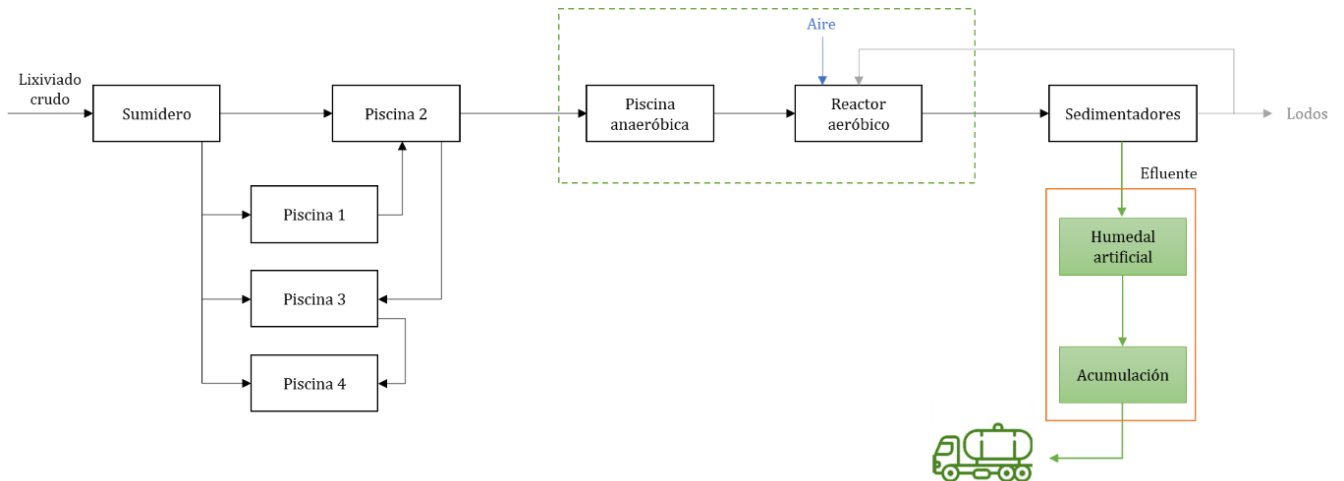


Figura 14: Caso 2 del sistema propuesto.

KDM Tratamiento, tiene la obligación de tratar sus lixiviados según lo estipulado en el D.S. n° 189/01 donde se señala que: **“Artículo 24.** Se deberá asegurar que el sistema de manejo de

*lixiviados se mantendrá operativo durante toda la vida útil del proyecto, así como durante su etapa de cierre. Además, el diseño de dicho sistema deberá permitir su inspección o control, así como su mantenimiento”.*

En consecuencia, frente a organismos regulatorios, no es factible la detención de la planta de tratamiento, por lo tanto, en circunstancias de mal funcionamiento, debiese existir un sistema alternativo paralelo, que respalde el procesamiento del líquido contaminante. A partir de ello, se evalúa el caso 1 (Figura 13) y, si resulta factible, podría convertirse en la principal operación del sistema de tratamiento, para asegurar un efluente dentro de la norma.

Por otro lado, el sistema actual no logra la obtención de un efluente bajo la normativa existente (D.S. n° 90/00), lo que justifica la adición de operaciones unitarias al proceso, como es en el caso 2 (Figura 14).

Asimismo, continuando esta línea, resulta interesante analizar el caso en que la planta de tratamiento se detuviese por problemas de funcionamiento. El líquido entrante sería similar al de salida, esto implica que al humedal artificial entraría lixiviado crudo, lo que transformaría al caso 2 en el caso 1.

Por ende, si el caso 1 resulta factible, se puede justificar la existencia de un *by-pass* del sumidero al humedal artificial en el caso 2 cuando el tratamiento biológico no funcione, por lo que se podría instalar el humedal dimensionado en el caso 1, al finalizar el tratamiento biológico.

## 6. Humedales artificiales

Los humedales artificiales, están diseñados para emular los procesos biológicos, físicos y químicos que ocurren en los humedales naturales. Consisten en el desarrollo de un cultivo de plantas (macrófitas) enraizadas sobre un lecho de grava (sustrato) impermeabilizado (membrana) [44].

La acción de las plantas permite una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el líquido afluente es depurado lenta y progresivamente. En forma general, el sistema consta de tres etapas: recogida, tratamiento y evacuación [44].

### 6.1. Ciclos funcionales en un humedal artificial

Existen varios patrones cíclicos dentro de un humedal artificial que contribuyen a la remoción de contaminantes [47].

La radiación solar impulsa la fotosíntesis y, por consiguiente, los procesos vegetativos, en un ciclo anual. Así, el ciclo biogeoquímico es responsable de la absorción de algunos contaminantes. Además, la radiación solar puede influir en la temperatura del agua y del medio de soporte, que puede absorber contaminantes [47].

La lluvia y la evapotranspiración (ET) – proceso conjunto de evaporación del agua y transpiración de las plantas – cambian con las estaciones del año e influyen en el flujo del agua que ingresa a los humedales y, por lo tanto, en la eficiencia de absorción [47].

Muchos humedales artificiales reciben flujos de entrada relativamente estables desde la fuente, pero a veces tienen una fuerte variabilidad estacional. En el caso de los lixiviados provenientes de un relleno sanitario, existe un alza en el flujo durante los inviernos, debido a las precipitaciones. Asimismo, las concentraciones de contaminantes pueden mostrar variabilidad estacional a la entrada de los humedales [47].

Los cambios meteorológicos, como los días soleados o nublados, impulsan el equilibrio energético de los humedales, lo que a su vez determina la temperatura del agua en éstos [47].

Muchos contaminantes sufren transformaciones a través de procesos microbianos, los que dependen fuertemente de la temperatura del agua, creando así patrones estacionales en las transformaciones microbianas, que básicamente corresponden a reacciones de los contaminantes [47].

Respecto a las precipitaciones, el impacto de la lluvia en promedio puede ser relativamente pequeño, pero los eventos individuales pueden tener grandes efectos en la calidad del agua. Es necesario poseer datos de varias décadas para eliminar la variabilidad estocástica en un año dado, asimismo, varía dependiendo de la localidad presente [47].

Por otro lado, se ha demostrado que la evapotranspiración está directamente relacionada con la radiación solar. Hay un ciclo diario para este proceso, en el que la pérdida máxima de fluido es a medio día, y la pérdida mínima es cercana a media noche [47].

Con respecto a las plantas en un humedal, éstas pueden acumular contaminantes en sus raíces y hojas. Poseen un ciclo de vida y muerte, en otoño se encuentra la mayor tasa de biomasa muerta en el humedal. Es conveniente desde el punto de vista operacional separar la biomasa muerta, que, además, almacena contaminantes [47].



Existe un mecanismo, denominado acreción, por el que los residuos no descompuestos, es decir, aquellos que sólo fueron acumulados, tienen una eliminación sostenida del contaminante desde el humedal. Por ejemplo, la reducción de fósforo se debe completamente a este mecanismo y se mencionará más adelante. Este mecanismo, consiste básicamente en un proceso de sedimentación y filtración dentro del humedal [47].

En consecuencia, el humedal artificial corresponde a un biorreactor en el que ocurren diferentes mecanismos de transferencia de contaminantes. Cada contaminante tiene un proceso diferente dentro del biorreactor, pero se pueden generalizar en: reacciones con microorganismos, sedimentación, absorción en plantas y suelo. Así, el balance de masa general para un contaminante está dado por la siguiente ecuación:

$$\{ \text{Entrada} \}_{ \text{al sistema} } - \{ \text{Salida} \}_{ \text{del sistema} } = \{ \text{Consumo o reacción} \}_{ \text{dentro del sistema} } + \{ \text{Sedimentación} \}_{ \text{dentro del sistema} } + \{ \text{Acumulación} \}_{ \text{en planta} } + \{ \text{Acumulación en el medio granular} \} \quad (6.1)$$

Esquemáticamente, la ecuación 6.1 se puede visualizar a través de la Figura 15, donde se aprecian todos los procesos que ocurren dentro de un humedal y están asociados a la reducción de contaminantes, tanto directos como indirectos, además, se señala el flujo axial que recorre el fluido dentro del humedal.

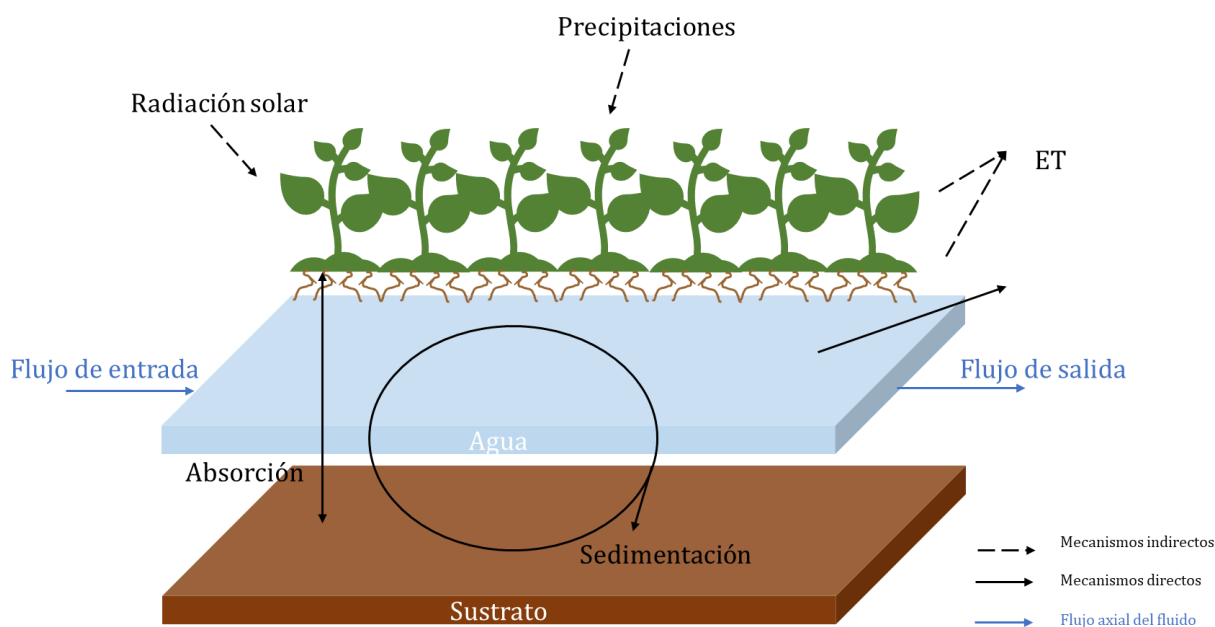


Figura 15: Esquema de los mecanismos involucrados en la reducción de contaminantes dentro de un humedal artificial. Adaptado de [47].

## 6.2. Mecanismos de separación de contaminantes

El mecanismo de reducción varía considerablemente entre los diferentes contaminantes, depende de la carga orgánica, el régimen hidráulico, el tiempo de retención hidráulico, el modo de operación, la presencia de vegetación y la especie de las plantas [48].

En el tratamiento con humedales artificiales, ocurren diferentes procesos de remoción de contaminantes, como: sedimentación, filtración, precipitación, volatilización, adsorción, absorción por plantas y varios procesos microbianos (Figura 16). En general, de forma directa

o indirecta, son influenciados por las condiciones del entorno, como la temperatura, la lluvia y la evapotranspiración [48].

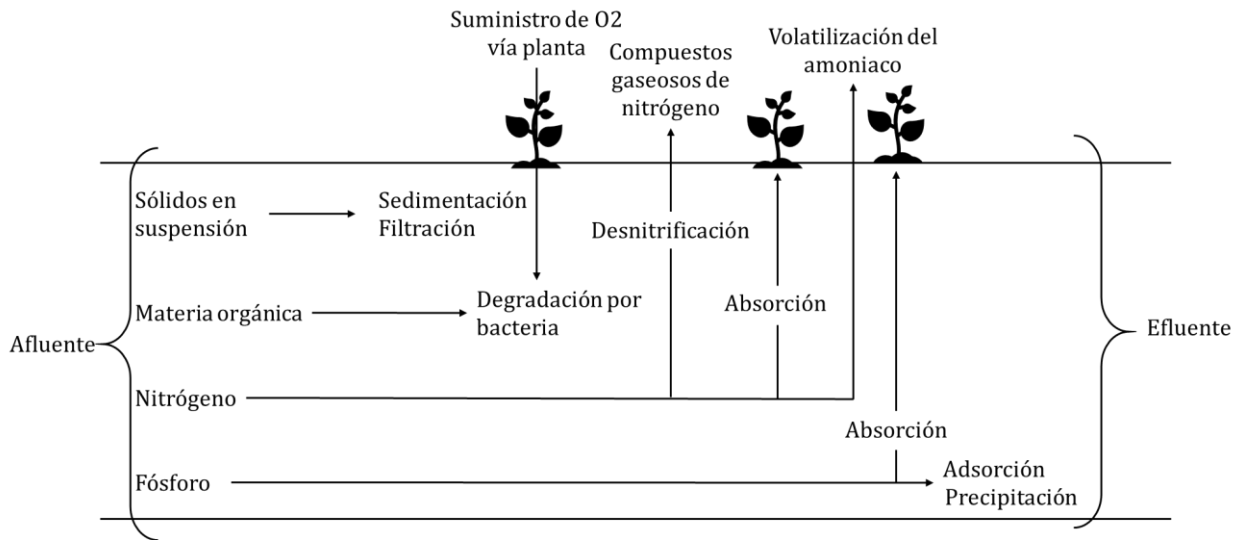


Figura 16: Procesos de depuración de los humedales artificiales. Basado en información de [49].

Inicialmente, los humedales artificiales fueron construidos para disminuir la concentración de cargas orgánicas y sólidos suspendidos en aguas residuales, sin embargo, se descubrió que también sirven para disminuir la concentración de nitrógeno, fósforo e incluso metales pesados [44].

Con este sistema de tratamiento, se pueden reducir los principales contaminantes que se encuentran fuera de norma en el caso de estudio, a excepción de los cloruros, los que, además, pueden ser muy dañinos para el crecimiento de las plantas. Es crucial que la empresa realice un estudio ahondado sobre estos contaminantes, o bien, un pilotaje para analizar el impacto real que tienen sobre las plantas. Por otro lado, un sistema por adsorción podría disminuir la concentración de cloruros de los lixiviados [45]. La empresa cuenta con una columna de adsorción con carbón activado, que se encuentra en desuso, podría evaluarse la reincorporación de ésta a la planta con el único fin de disminuir estos contaminantes, previo al ingreso al sistema natural, lo que, como señala la Tabla 3, sería beneficioso, también, para la remoción de DBO<sub>5</sub> y SST.

### 6.2.1. Separación de sólidos suspendidos

La remoción de SST se logra principalmente por un mecanismo físico de sedimentación en el medio granular, así como de filtración, los que no son sensibles a los cambios de temperatura. Hay casos en los que pueden ser producidos dentro del humedal, debido a la muerte de invertebrados, producción de plancton o microorganismos o la formación de precipitados químicos [50].

Comúnmente, los valores de remoción de SST se encuentran entre 85 – 95%, dependiendo principalmente del patrón de flujo. La mayor retención se logra en el primer tercio del humedal, y la concentración disminuye exponencialmente a lo largo de la instalación [44]. Esto puede deberse a que el humedal funciona como un reactor de flujo pistón, por lo que la concentración disminuye exponencialmente a lo largo del biorreactor.

### 6.2.2. Separación de DBO<sub>5</sub>

La DBO<sub>5</sub> es una medida de la masa de oxígeno que requieren organismos aeróbicos para degradar la materia orgánica en el agua. La unidad estándar para este parámetro se expresa en miligramos de oxígeno consumido por litro de muestra durante 5 días de incubación a 20 °C. Puede encontrarse de manera disuelta o en suspensión. En consecuencia, es una medida de la concentración de materia orgánica biodegradable dentro del reactor [44, 50].

La reducción de materia orgánica biodegradable en solución se produce por conversión biológica por efecto de bacterias aerobias, facultativas y anaerobias que crecen en la superficie de las plantas (raíces, tallos y hojas). Mientras que la particulada se elimina por absorción, filtración o sedimentación al medio granular (Figura 16) [49, 50].

Estos procesos son dependientes de la temperatura, por lo que la actividad biológica se reduce en climas más fríos. Sin embargo, la significancia de las variaciones, depende de la configuración del humedal y la fluidodinámica, así como de la actividad microbiana, ya que existen microorganismos que pueden descomponer aún en bajas temperaturas [48].

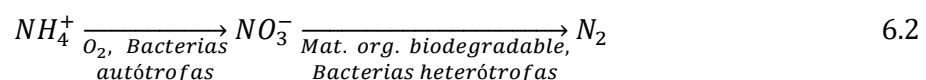
### 6.2.3. Separación de nitrógeno

Varios procesos biológicos y fisicoquímicos en los humedales son importantes en la transformación de nitrógeno a una forma biológicamente útil. Además, las plantas que ocupan nitrógeno para su crecimiento juegan un rol activo en la remoción de este contaminante, que en los lixiviados de relleno sanitario es particularmente importante, ya que excesivos niveles de este contaminante afectan significativamente la calidad del agua [41, 50].

Al momento que ingresa el afluente al humedal artificial, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio ( $NH_4^+$ ) o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio [44].

Los mecanismos que ocurren dentro de los humedales artificiales para la remoción de nitrógeno son múltiples e incluyen: volatilización, reacción a amonificación, adsorción, absorción por plantas y nitrificación/desnitrificación por bacterias, siendo esta última la más importante, ya que depende fuertemente de la actividad microbiana que ocurre en las raíces de las macrófitas. Estos mecanismos se encuentran esquematizados en la Figura 16 [48].

La nitrificación es un proceso microbiológico en el que el amonio es oxidado por bacterias autótrofas a nitrato en presencia de oxígeno y carbono orgánico, luego, este nitrato es reducido por bacterias heterótrofas a nitrógeno molecular gas en ausencia de oxígeno y presencia de carbono orgánico en un proceso llamado desnitrificación, como se muestra en la siguiente reacción [48].



La nitrificación es considerada como un proceso dependiente de las condiciones climáticas en humedales artificiales, está reportado que se inhibe en el agua a temperaturas próximas a los 10 °C, se debe a que se utiliza oxígeno para este mecanismo, al igual que para la remoción de materia orgánica, que es generado durante el día por la fotosíntesis de las plantas. Por otro lado, si existen alimentaciones intermitentes, los poros del sustrato se llenan de aire, lo que favorece la nitrificación [41].

Asimismo, la desnitrificación, que depende de la presencia de nitrato, nitrógeno y carbono orgánico, puede ser inhibida por la falta de sustrato orgánico. Además, el pH, temperatura y área superficial para actividad microbiana, también afectan este mecanismo. Sin embargo, la falta de carbono no es un problema considerable dentro de los humedales artificiales, ya que las plantas, a través de las raíces y hojas, lo liberan continuamente al sistema [41].

#### 6.2.4. Separación de fósforo

El fósforo es uno de los nutrientes más importantes para la eutrofización en los lagos. Las plantas absorben el fósforo durante su crecimiento, pero es devuelto al agua durante la descomposición cuando mueren [50].

La remoción de fósforo dentro de los humedales se realiza mediante procesos físicos como la sedimentación, químicos como la adsorción y desorción en el suelo (Figura 16), y por transformaciones biológicas. Se logran porcentajes de remoción entre 40% a 60% [41, 50].

Las macrófitas son las principales responsables de la remoción de este contaminante, ya que la actividad bacteriana y la absorción de las plantas permite captar el fosfato presente en el lixiviado, a través de las raíces. Es un proceso estacional, ya que durante la temporada de crecimiento las plantas absorben el fósforo y luego cuando mueren es devuelto al sistema. Esto explica las variaciones estacionales en la absorción de fósforo, ya que durante el invierno la basura y la biomasa microbiana se descomponen, y el fósforo es liberado de los precipitados, resultando en la solubilización del fósforo en agua. En climas fríos, la eliminación de fósforo es indirectamente afectada por la disponibilidad de oxígeno que influye en los niveles de redox, y la regresión representa una menor eficiencia de eliminación de fósforo total [48, 50].

Por otro lado, una insuficiente concentración de fósforo en los lixiviados, puede limitar el crecimiento de biomasa y, en consecuencia, la eficiencia del tratamiento [41].

#### 6.2.5. Separación de metales pesados

Los procesos de remoción de metales pesados dentro de un humedal artificial son muy complejos e incluyen una combinación de factores bióticos y abióticos como: sedimentación, floculación, adsorción, precipitación, co-precipitación, intercambio catiónico y aniónico, oxidación y reducción, actividad microbiana y absorción por plantas [41].

Los metales no pueden ser destruidos, sin embargo, sus características químicas y físicas son modificadas [41].

Al existir gran variedad de metales pesados, es difícil suponer un solo proceso para cada contaminante, ya que varían, además, con la interacción entre sí [41].

### 6.3. Clasificación de humedales artificiales

Los humedales artificiales se clasifican en dos según la configuración del flujo de entrada: superficial (el agua se vierte en la superficie del terreno) o subsuperficial (el agua se infiltra de manera subterránea) (Tabla 7, Figura 10 y 17) [50].

Tabla 7: Clasificación de los humedales artificiales.

Humedales artificiales					
<b>Configuración del flujo</b>	Flujo superficial o flujo libre			Flujo subsuperficial	
<b>Plantas</b>	Flotantes	Sumergidas	Emergentes	Emergentes	
<b>Entrada del flujo</b>	Horizontal			Horizontal	Vertical
<b>Dirección</b>				Ascendente	Descendente

La Tabla 8 resume las principales ventajas y desventajas de ambas configuraciones [50].

Tabla 8: Ventajas y desventajas de los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial.

	Humedales de flujo superficial	Humedales de flujo subsuperficial
<b>Ventajas</b>	Menores costos de instalación y operación.	Requiere menor superficie.
	Buena integración al paisaje.	Flujo de agua no visible.
	Beneficio de vida acuática, pero más expuestas a contaminación.	Mayor tolerancia al frío.
	Menor tiempo de adaptación de las plantas.	Reduce olores y problemas de insectos.
<b>Desventajas</b>	Menor tolerancia al frío.	No atractivo para vida silvestre.
	Requiere mayor superficie.	

Debido a las características del líquido a tratar, este estudio considerará sólo humedales artificiales del flujo subsuperficial – SSF por sus siglas en inglés – debido a que disminuyen la presencia de olores e insectos, así como la posibilidad de contacto del contaminante con las personas y animales, ya que el lixiviado se transporta debajo del medio de soporte a través de las raíces de las plantas y no entra en contacto con la atmósfera. Además, puede haber menor tiempo de retención dentro del humedal, debido a que se inyecta el afluente directamente en el medio granular, otorgando menor tiempo de llegada al contacto con los medios depuradores (soporte granular y raíces de las plantas).

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según la configuración de entrada del flujo, pudiendo ser horizontal (HSSF) o vertical (VSSF), como se aprecia en la Figura 17.

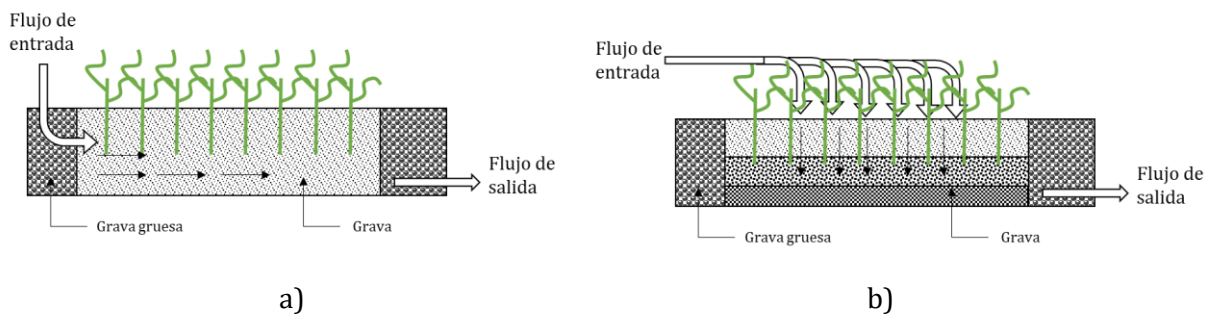


Figura 17: a) Humedal con flujo subsuperficial horizontal. b) Humedal con flujo subsuperficial vertical.

Los HSSF comúnmente consisten en una cama rectangular, donde el afluente ingresa por uno de los extremos superiores del humedal y pasa lentamente a través del medio de filtración debajo de la superficie del lecho en una trayectoria más o menos horizontal. Funcionan permanentemente inundados para que el oxígeno sea el limitante. Por otro lado, en los VSSF el flujo es inyectado de manera intermitente por la parte superior, para que decante y luego salga por el extremo inferior. La inyección intermitente, permite una mayor oxigenación del líquido y por ende, facilita la degradación de la materia orgánica [51, 52].

En climas fríos, los humedales HSSF exhiben altas eficiencias de reducción para SST (81,4%), DBO<sub>5</sub> (83,9%) y DQO (70,3%). Y aunque los VSSF presentan una mayor reducción de SST (93,4%), presentan eficiencias relativamente bajas de reducción para DBO<sub>5</sub> (41,9% - 99,9%) y DQO (55,2% - 98,9%)[48], esto puede ocurrir debido a que la existencia de un flujo continuo en el sistema horizontal, otorga un medio de cultivo menos estresante para las bacterias que degradan la materia orgánica biodegradable.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de nitrificación/desnitrificación, es el mejor mecanismo para la reducción de nitrógeno, ya que se obtiene nitrógeno gaseoso a partir de ion amonio. Los sistemas verticales tienen la capacidad de reducir la concentración de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> más eficientemente que los horizontales, ya que la alimentación intermitente y vertical, permite una mayor transferencia de oxígeno en los poros del medio granular y, por ende, promueve un ambiente más oxidante que favorece la nitrificación. Por otro lado, los sistemas horizontales poseen mayor eficiencia para la desnitrificación, debido a las condiciones anaeróbicas, ya que, al haber un flujo de entrada continuo, los poros del medio granular se saturan, desfavoreciendo la transferencia de oxígeno, lo que genera un medio adecuado para el trabajo de las bacterias anaeróbicas [48].

Las tasas de reducción de fósforo son bastante bajas en climas fríos, sin embargo, se registran porcentajes de 64,9% para sistemas horizontales y 73,4% para verticales, debido a que los humedales VSSF, al tener el flujo principal en el eje vertical, favorecen la sedimentación que es uno de los principales procesos de reducción de fósforo, como se mencionó anteriormente [41, 48].

Estos tipos de humedales artificiales muchas veces derivan en sistemas híbridos o combinados, donde las ventajas de ambas configuraciones (horizontal y vertical) se combinan para complementarse entre sí. Estos sistemas derivan del Sistema de Seidel, diseño que consta de dos etapas de varios humedales VSSF paralelos ("camas de filtración") seguidos por dos o tres humedales HSSF ("camas de eliminación") en serie y, las plantas que se utilizan varían en cada humedal [53].

Los sistemas híbridos, se utilizan principalmente para la eliminación mejorada de nitrógeno, debido a que los diversos tipos de ambientes de humedales proporcionan diferentes condiciones redox que son adecuadas para nitrificación y desnitrificación. Como se mencionó anteriormente, los humedales HSSF pueden proporcionar buenas condiciones anaeróbicas para la desnitrificación, dado que no se encuentra favorecida la transferencia de oxígeno y, en consecuencia, la capacidad de nitrificar el amonio es muy limitada, ya que la reacción requiere presencia de oxígeno. En contraste, los humedales VSSF pueden reducir NH<sub>4</sub><sup>+</sup> con éxito debido a la condición aerobia adecuada, ya que se favorece la transferencia de oxígeno en esta configuración, y por esto mismo, la desnitrificación apenas ocurre en estos sistemas. A este

respecto, entonces, se pueden combinar varios tipos de humedales artificiales con el fin de aprovechar la fuerza de cada tipo de sistema individual [48].

Para potenciar las características mencionadas de cada tipo de humedal artificial, se optará por diseñar un proceso que posea un humedal VSSF seguido de un HSSF, como se muestra en la Figura 18.

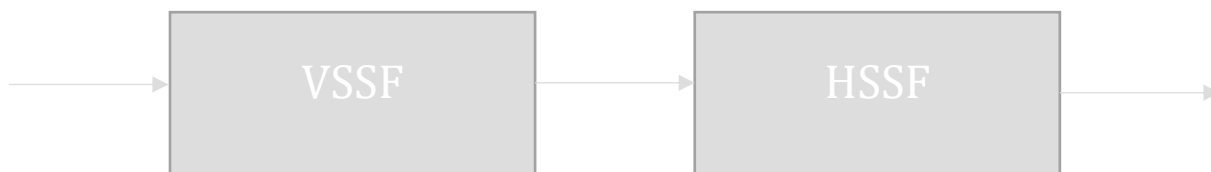


Figura 18: Diagrama de bloques del sistema de tratamiento por humedales artificiales.

De esta manera, se obtendrán los siguientes beneficios:

- Se favorecerán las reacciones de nitrificación en el humedal VSSF y luego la desnitrificación en el HSSF, potenciando la reducción de la concentración de ion amonio.
- Se favorecerá inicialmente la separación de SST y fósforo gracias al proceso de sedimentación que ocurre en el humedal VSSF, lo que provoca menor concentración de entrada de estos contaminantes al HSSF. Entonces, a lo largo del sistema, la concentración de SST y fósforo en el fluido disminuye exponencialmente, al igual que en el medio granular, ya que se genera la mayor transferencia al inicio a través de la sedimentación.

## 6.4. Consideraciones para la construcción de un humedal artificial

### 6.4.1. Medio granular

El medio granular o sustrato es el medio de soporte en el que se encuentran instaladas las plantas. La elección del medio granular es un aspecto crítico en el diseño de un humedal artificial, ya que proporciona un medio de cultivo adecuado para las plantas, junto con permitir el movimiento exitoso del líquido a tratar. Además, puede tener un papel importante en la reducción de ciertos contaminantes como los SST y el fósforo [54].

La selección de los sustratos considera la conductividad hidráulica, que representa la movilidad de un fluido bajo tierra, y la capacidad de absorber contaminantes. Una conductividad hidráulica deficiente daría lugar a la obstrucción de los sistemas, disminuyendo severamente la efectividad del sistema [54].

Los soportes frecuentemente utilizados incluyen principalmente material natural, medios artificiales y subproductos industriales, están compuestos por: grava, arena, arcilla, calcita, mármol, vermiculita, escoria, ceniza volante, bentonita, dolomita, piedra caliza, concha, zeolita, entre otros. En general, se utilizan materiales naturales para que las plantas no se estresen y se adapten fácilmente al terreno [54].

Existen muchos estudios experimentales que prueban la efectividad de diferentes configuraciones de medios granulares para diversos tipos de efluentes. En este caso, el trabajo considerará los sustratos comunes que se han estudiado, utilizando aquellos que han obtenido

buenos resultados para el tratamiento de lixiviados con humedales artificiales de flujo subsuperficial [41, 55].

En la Tabla 9 se señalan los diferentes materiales que se utilizarán en los sustratos de cada humedal especificando el tamaño que se requiere de cada uno.

Este tipo de humedales deben tener profundidades entre 30 a 90 [cm] debido a que ese es el crecimiento promedio de las raíces, comúnmente se utiliza una profundidad de 60 [cm] con pendientes de 1 – 8% para que el fluido escurra [56].

Tabla 9: Medio granular seleccionado para la construcción del sistema de humedales artificiales.

<b>Humedal artificial</b>	<b>Medio [mm]</b>	<b>Espesor [cm]</b>
<b>VSSF</b>	Arena (0 - 7)	20
	Zeolita (0,8 - 2)	10
	Grava (7 - 15)	15
	Grava (15 - 30)	15
<b>HSSF</b>	Grava (7 - 15)	60

Las zeolitas fueron seleccionadas, dado a que tienen una afinidad por los iones de amonio y otros cationes, gracias a un intercambio catiónico en la superficie de la zeolita. Los lixiviados de rellenos sanitario contienen altas concentraciones de amonio y metales pesados catiónicos y, se ha demostrado que el uso de zeolita (clinoptilolita) en los humedales artificiales aumenta la eficiencia de remoción de estos contaminantes, frente a humedales que no poseen este material [41].

Por otro lado, la zeolita es capaz de adsorber amonio de los lixiviados, lo que puede verse reducido por la presencia de iones como  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , sin embargo, la remoción de amonio es un proceso que se ve beneficiado bajo otros mecanismos, como se mencionó anteriormente, por lo que, se espera que la presencia de iones no afecte significativamente a este proceso.

Además, las zeolitas han recibido una gran atención debido a su atractiva selectividad para ciertos iones de metales pesados como plomo, zinc, cadmio, níquel, hierro y manganeso [41]. Y según los valores medidos por el laboratorio externo en junio de 2016, algunos de estos contaminantes estaban fuera de norma, en particular, el manganeso y el níquel, por lo que la zeolita podría favorecer la disminución de estas concentraciones. Así, no sólo se reducen los principales contaminantes mencionados en este trabajo, sino también, hay efectos en otros.

Es importante destacar que el sustrato debe cambiarse cada 10 – 15 años, ya que queda totalmente obstruido por los lodos y residuos [56].

#### 6.4.2. Plantas

En el lecho de los humedales artificiales, se requerirá plantar, debido a que no son óptimos para la germinación [57].

Las plantas acuáticas más grandes que crecen en los humedales generalmente se llaman macrófitas. El término incluye plantas vasculares acuáticas (angiospermas y helechos), musgos acuáticos y algunas algas más grandes que tienen tejidos que son fácilmente visibles. Aunque los helechos como *Salvinia* y *Azalia* y las grandes algas como la *Cladophora* están diseminadas



en los humedales, generalmente son las plantas con flores (es decir, las angiospermas) las que dominan. Los macrófitas, como todos los demás organismos fotoautótrofos, utilizan la energía solar para asimilar el carbono inorgánico de la atmósfera para producir materia orgánica, que posteriormente proporciona la fuente de energía para los heterótrofos (animales, bacterias y hongos). Como resultado del amplio suministro de luz, agua y nutrientes en los humedales, se generan altas productividades en los ecosistemas dominados por estas plantas, encontrándose entre las más altas registradas en el mundo. Asociado a esta alta productividad, generalmente hay una alta actividad heterotrófica, es decir, una alta capacidad para descomponer y transformar la materia orgánica y otras sustancias [58].

Para los humedales artificiales, la especie de planta que se utiliza comúnmente es la *Phragmites australis* (caña común, carrizo o “cola de zorro”). Esta especie tiene rápida tasa de crecimiento, desarrollo de raíces y tolerancia a las condiciones del suelo saturado, por lo que, se adapta rápidamente al sistema. También, existen otras dos especies comúnmente usadas: *Typha latifolia* (espadañas o totora) y *Scirpuslacustris* (juncos) (Figura 19) [57].

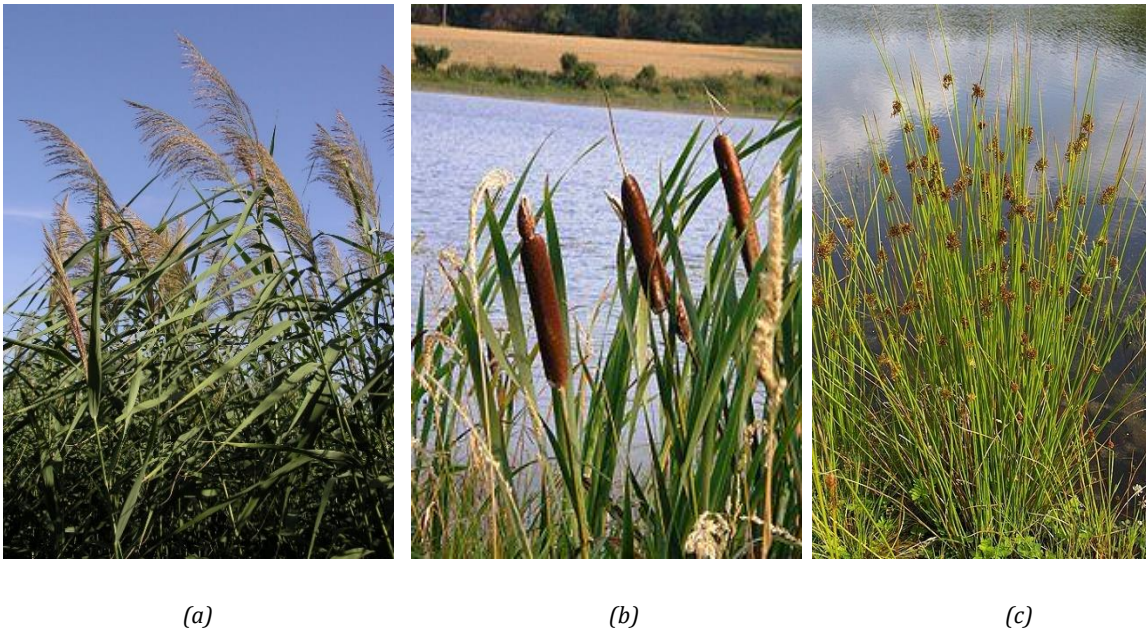


Figura 19: Vegetación típica para humedales artificiales. (a) *Phragmites australis* (b) *Typha latifolia* (c) *Scirpuslacustris*.

Las *Phragmites australis* se plantan usando rizomas, plantas de semillero o cosechados en el campo. Todas estas técnicas son efectivas si las plantas son saludables y adecuadas (pero no excesivas), la humedad del suelo se mantiene durante el establecimiento de la planta. Normalmente se recomiendan densidades de plantación entre 2 y 6 por metro cuadrado (20,000 a 60,000 por hectárea). Las características de plantación para *Typha latifolia* y *Scirpuslacustris* son típicamente de 1 o 2 por metro cuadrado [57].

Las plantas en un humedal artificial se someten a un ciclo de vida y muerte. Es conveniente desde el punto de vista operacional separar la biomasa dentro del humedal entre viva, muerta en pie y descartable [47]. Sin embargo, es recomendable no cosechar las *Phragmites australis* para evitar daños en los rizomas y en la compactación del suelo causada por los equipos de recolección. De todas maneras, se debe manejar y hacer uso de la biomasa, ya que se puede

transformar en un problema; se puede incorporar como fertilizante al mismo sistema o bien, usar las fibras para la fabricación de cartón, producción de combustible, etc [56].

Este trabajo considerará el uso de *Phragmites australis* en el humedal VSSF y *Thypha latifolia* en el HSSF, dado que estos tipos de plantas son las que se utilizan comúnmente en estos sistemas para el tratamiento de lixiviados [48].

En Chile, existen plantas nativas de las familias de las Gramíneas (*Phragmites*) y Tifáceas (*Thypha*). Para este estudio se recomienda utilizar las especies *Thypha angustifolia* y *Phragmites australis*, que son plantas cosmopolitas, se encuentran en casi todo el planeta y en casi todo el territorio chileno, formando manchones o totorales en pantanos o charcos, habitan desde el extremo norte hasta Aysén - Chiloé, evitando con ello introducir nuevas especies a los suelos chilenos [56, 59].

## 7. Configuración y dimensionamiento del sistema propuesto

### 7.1. Caso base

El caso base está definido a partir de un balance de masa que se realiza diariamente al lixiviado que ingresa a la planta de tratamiento, y al efluente que se genera. Los datos utilizados corresponden a los flujos diarios del año 2016; los meses de noviembre y diciembre no fueron considerados dentro del valor promedio generado por la planta, debido a que en esa fecha se encontraba detenida por mal funcionamiento del sistema. En el Anexo C se presentan los flujos detallados.

Como se mencionó anteriormente, se analizarán dos casos, uno sustituto y otro complementario al sistema de tratamiento actual; cabe destacar, que la primera opción se dimensionará considerando la inexistencia de este, es decir, como si fuese capaz de procesar todo el lixiviado que sale del relleno.

En la Tabla 10 se encuentran los flujos involucrados en la definición del caso base.

Tabla 10: Flujos del caso base para cada propuesta de estudio.

<b>Caso</b>	<b>Flujo [m<sup>3</sup>/d]</b>
<b>Caso 1: Sistema sustituto (Flujo de salida del sumidero)</b>	620
<b>Caso 2: Sistema complementario (Flujo generado por la planta de tratamiento actual)</b>	290

Desde la salida del sumidero, existen ciertos *peaks* que acontecen principalmente en los meses de invierno, debido a las precipitaciones, tal como se aprecia en la Figura 20. Se trabajará con un valor promedio (línea azul), dado que estas fluctuaciones no demuestran una estacionalidad marcada y los *peaks* no representan el comportamiento común de la generación de lixiviados.

Por otro lado, si se dimensiona el sistema utilizando el peor valor (mayor flujo) para que éste nunca falle, la capacidad no se vería superada, pero se sobredimensionarían los humedales, operando a una capacidad muy baja la mayor parte del año. Asimismo, al sobredimensionar el sistema, los costos de inversión aumentarían.

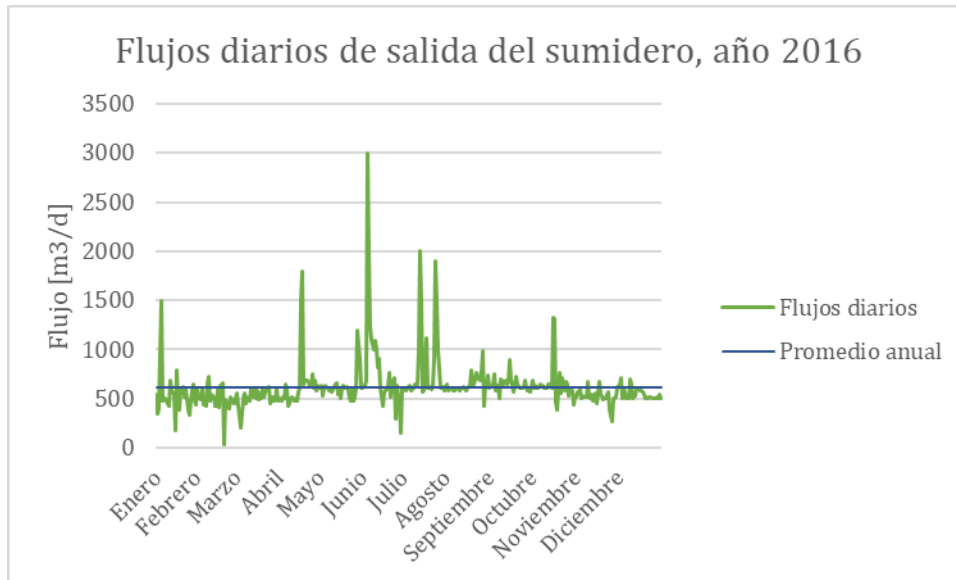


Figura 20: Flujos diarios de generación de lixiviados en el año 2016.

En cambio, en los efluentes de la planta de tratamiento, se espera que las fluctuaciones no sean tan marcadas, ya que la planta tiene una capacidad aproximada de 300 [m<sup>3</sup>/d]. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 21, la producción de ésta varía considerablemente a lo largo del año, lo que puede deberse a malas acciones de operación, es decir, que se operó a baja capacidad o bien, se excedió en ésta, lo que, en ninguno de los casos, es una acción adecuada en ingeniería, ya que puede resultar en datos incorrectos, como se aprecia en el gráfico, o en fallas de la planta al sobrexceder su capacidad, que es lo que pudo haber provocado la detención de la planta en los meses de noviembre y diciembre de 2016. De todas maneras, se utilizará el valor promedio de los flujos, ya que es muy cercano a la capacidad de la planta, que, en teoría, es cómo debiese funcionar habitualmente.

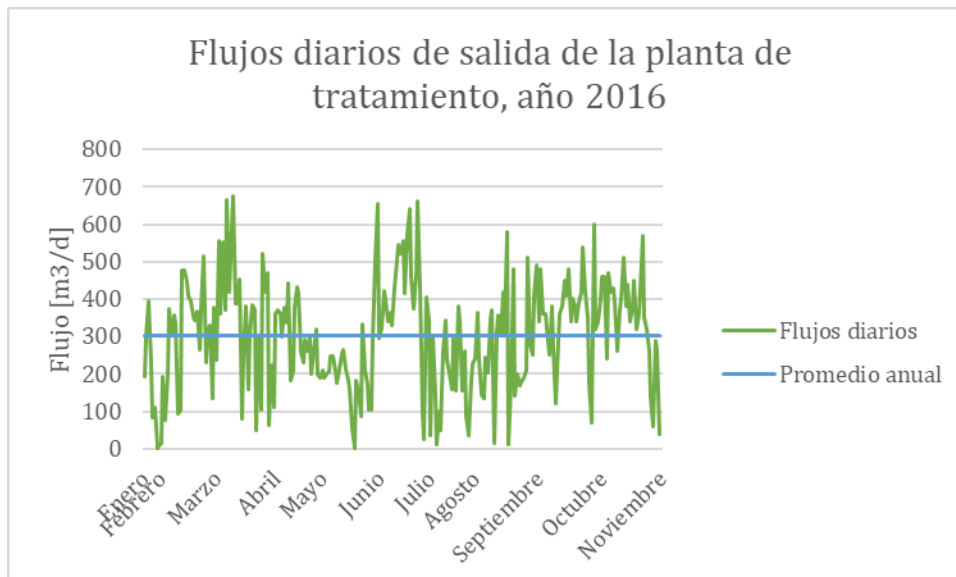


Figura 21: Flujos diarios de la producción de la planta de tratamiento actual del RSLLC en el año 2016.

## 7.2. Dimensionamiento del sistema

El diseño y descripción del tratamiento por humedales artificiales posee dos principales características: hidráulica y remoción de contaminantes.

Kadlec y Knight (1996) presentaron un modelo general para el diseño de humedales artificiales, que proporciona un enfoque simplificado, pero cuantitativo, para predecir el tamaño del humedal capaz de reducir la concentración de entrada de un contaminante a una concentración de salida con un caudal conocido. La ecuación 7.1 representa este modelo de diseño, el que se utiliza para un contaminante independiente, y toma su forma desde la cinética química por una ecuación de primer orden para condiciones de operación estables [47, 57].

La ecuación 7.1 se determina a partir de un análisis teórico de la distribución de tiempos de residencia (DTR), la que se puede utilizar para determinar el grado de reducción de contaminantes en el humedal. El detalle de la ecuación 7.1 se encuentra en el Anexo D.1.

$$A = \left(\frac{Q}{k_A}\right) \ln\left(\frac{C_i - C^*}{C_f - C^*}\right) \quad (7.1)$$

donde:  $A$  = Área del humedal [m<sup>2</sup>]  
 $Q$  = Caudal [m<sup>3</sup>/d]  
 $k_A$  = Constante de velocidad basada en área [m/d]  
 $C_i$  = Concentración de entrada [mg/L]  
 $C_f$  = Concentración de salida [mg/L]  
 $C^*$  = Concentración en el fondo [mg/L]

Para los humedales artificiales, el balance de masa del fluido está dado por la ecuación 7.2, con las entradas y salidas, incluyendo las precipitaciones y la evapotranspiración [57].

$$Q = Q_i + (P - ET) \cdot W \cdot x \quad (7.2)$$

Donde:  $Q_i$  = Caudal de entrada al humedal [m<sup>3</sup>/d]  
 $P$  = Precipitaciones [m/d]  
 $ET$  = Evapotranspiración [m/d]  
 $W$  = Ancho del humedal [m]  
 $x$  = Distancia desde la entrada [m]

Con condición de borde:  $Q(x = 0) = Q_i$

Debido a que el sistema cuenta con humedales de flujo subsuperficial, es decir, que van bajo tierra, se asume que las precipitaciones y la evapotranspiración no afectan mayormente al flujo dentro del humedal, y, por ende, el caudal de entrada es el mismo de salida. Además, no se cuenta con valores referenciales de estos fenómenos y, como se muestra en la Figura 22, los días de lluvia son situaciones aisladas en el sector del RSLLC.

Sin embargo, es importante analizar lo que ocurre durante los meses de invierno, ya que, puede verse afectado significativamente el rendimiento del sistema de humedales artificiales, dado que, las precipitaciones implican un flujo adicional de agua en el reactor, reduciendo las concentraciones de contaminantes en el líquido y aumentando el flujo de salida de agua. Lo anterior modifica los equilibrios provocando que la fijación de contaminantes sea más lenta, pero, por otro lado, reduce la concentración de salida. Además, al haber más masa dentro del

reactor, se aletarga el movimiento del fluido dentro del reactor, dando lugar a la obstrucción del sistema, disminuyendo severamente su efectividad.

Por otro lado, operacionalmente, pueden tomarse medidas preventivas para disminuir el impacto que puedan tener las lluvias. El flujo de agua en el sistema fluye de manera subterránea, entonces, para que la lluvia afecte significativamente al caudal, el agua debiese percolar el medio granular. Esto puede evitarse mediante la instalación de cañerías superficiales que, gracias a la misma pendiente que tienen los humedales, puedan transportar el flujo adicional de agua y que no se mezcle con el de operación.

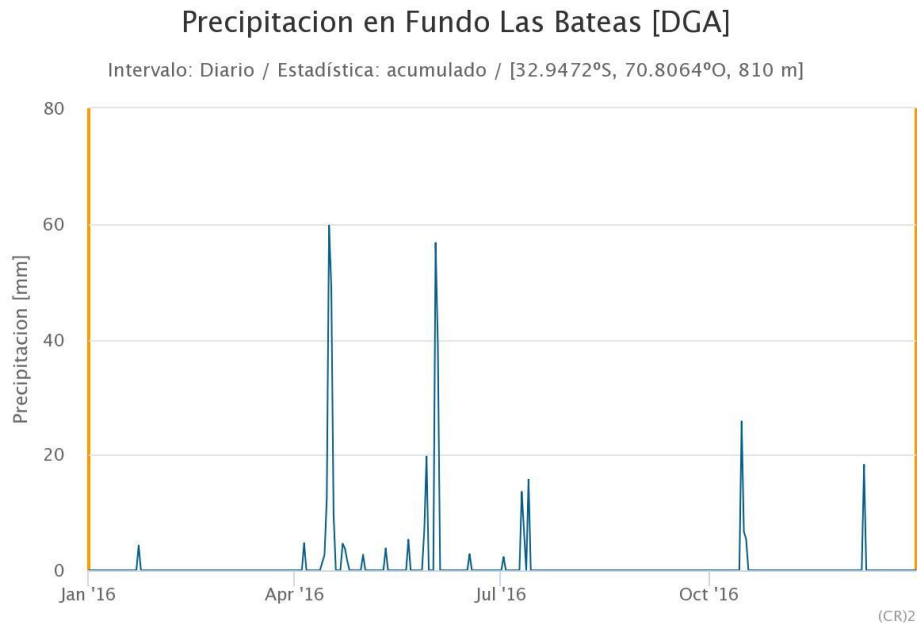


Figura 22: Precipitaciones diarias en el Fundo Las Bateas en el año 2016 [60].

Continuando con el dimensionamiento, las constantes de velocidad de la ecuación 7.1 son determinadas a partir de datos para los que se conoce el grado de no idealidad del flujo. Esto significa que la constante de velocidad debe haberse derivado de un humedal probado con trazadores, con tiempo de residencia conocido. En este punto del desarrollo de la tecnología de humedales, una gran cantidad de casos han producido datos sobre las reducciones de contaminantes, pero una proporción muy pequeña ha sido probada con trazadores. Es recomendable realizar un pilotaje para analizar el tiempo de residencia a través de un trazador y determinar las constantes para diferentes contaminantes dados sus cambios de concentraciones, utilizando la ecuación de Arrhenius [57], es decir, se realizan pruebas experimentales, registrando las concentraciones de entrada y salida de un contaminante en un intervalo de tiempo. Al graficar los datos, se puede determinar una ecuación que represente la variación de la concentración del contaminante, que puede utilizarse para obtener los valores aproximados de las constantes de velocidad.

Primeramente, al no poder realizar las pruebas experimentales, las constantes de velocidad pueden corregirse de acuerdo a la temperatura a través de la ecuación 7.3, la cual proviene de la ecuación de Arrhenius, utilizando datos de bibliografía. Está establecido que la temperatura

de referencia es a 20 [°C], entonces, la constante de velocidad se corrige en torno a esta referencia utilizando la constante de velocidad a esta temperatura [47, 57].

$$k_A = k_{A,20} \theta^{T-T_{Ref}} \quad (7.3)$$

donde:  $k_{A,20}$  = Constante de velocidad a 20 [°C] [m/d]  
 $\theta$  = Coeficiente de temperatura  
 $T$  = Temperatura del fluido [°C]  
 $T_{Ref}$  = Temperatura de referencia, es igual a 20 [°C]

Por otro lado, la ecuación 7.1 no diferencia entre los humedales verticales y horizontales, lo cual debiese verse expresado en la constante de velocidad, considerando que existen diferentes mecanismos de depuración en cada configuración. Además, se utilizó un promedio anual de la temperatura para el cálculo de las constantes de velocidad. La zona de Til Til tiene marcados extremos de temperatura dadas las estaciones del año. Sin embargo, al ser humedales de flujo subsuperficial, las plantas pueden funcionar como aislante, viéndose desfavorecida la transferencia de calor hacia el fluido, haciendo que los cambios de temperatura de éste sean menos variables. Lo anterior justifica la elección de un promedio para simplificar el cálculo de las constantes de velocidad.

Teóricamente, según la ecuación 7.3, al disminuir la temperatura, disminuye la constante de velocidad, y, por ende, la eficiencia del sistema. Si se realizara el dimensionamiento para el peor caso, es decir, para la menor temperatura, el diseño tendría que suplir el letargo de la remoción entregando valores de áreas mayores, lo que a su vez implica un aumento en los costos, que puede ser significativo y no necesariamente fundamentado. Por otro lado, como la temperatura varía considerablemente durante el día, en especial en verano, se podría analizar esto como un símil a un equipo industrial que se “prende” en horas de mayor calor, y se “apaga” durante la noche en horas más frías, esto podría realizarse mediante la instalación de válvulas a la entrada de los humedales, para así, controlar el flujo y en horas frías, disminuir el caudal para mantener la eficiencia.

Además, si se analiza la ecuación 7.3, cuantitativamente, la temperatura afecta sólo en coeficiente de temperatura. Según los datos de la Tabla 11, la temperatura sólo afectará en la constante de velocidad del nitrógeno, dado que en los demás contaminantes, independiente de la diferencia entre la temperatura del fluido y la referencial, el valor siempre será 1.

Kadlec (1997) [61], determinó estos valores a partir del estudio de comportamiento de diferentes humedales artificiales, asegurando que algunos procesos y algunos flujos y concentraciones entrantes varían estacionalmente, y esas influencias pueden confundirse con los efectos de la temperatura. Esta complejidad indica que los datos del ecosistema son la única fuente segura de información sobre la influencia de la temperatura en las reducciones de contaminantes de los humedales. Además, es importante el hecho de que la inclusión de un coeficiente de temperatura en el análisis de datos representa muy poco de la varianza en los datos.

Cabe preguntarse si en la práctica esto es verídico, dado que la lógica hace pensar que la temperatura es un factor importante dentro de las reacciones, como en la actividad biológica, la adsorción en plantas y suelo, etc. Es por ello, que es de gran importancia realizar pruebas

experimentales a través de pilotajes para analizar los diferentes factores que pueden determinar el funcionamiento del sistema.

Dado que no se poseen datos particulares del caso de estudio, se utilizarán los datos de Kadlec para humedales SSF, los que se identifican en la Tabla 11. Son preliminares y corresponden al promedio de estimaciones realizadas en diversos humedales alrededor del mundo [57].

Tabla 11: Parámetros de diseño para humedales SSF.

	<b>DBO<sub>5</sub></b>	<b>SST</b>	<b>N<sub>T</sub></b>	<b>P<sub>s</sub></b>
<b><math>k_{A,20}</math></b>	180	3.000	27	12
<b><math>\theta</math></b>	1	1	1,05	1
<b><math>C^*</math></b>	$3,5 + 0,053 \cdot C_i$	$7,8 + 0,063 \cdot C_i$	1,5	0,02

Para la DBO<sub>5</sub> y los SST, la concentración en el fondo depende de la concentración de entrada, por ende, se debe calcular para cada caso propuesto, obteniendo los valores presentados en la Tabla 12.

Tabla 12: Concentraciones en el fondo para la DBO<sub>5</sub> y los SST.

	<b>DBO<sub>5</sub> Caso 1</b>	<b>DBO<sub>5</sub> Caso 2</b>	<b>SST Caso 1</b>	<b>SST Caso 2</b>
<b><math>C^*</math></b>	67,4	21,7	19,4	48,3

Para dimensionar el sistema se consideró el uso de los dos humedales seleccionados instalados en los dos escenarios propuestos. El esquema del tratamiento es el mostrado en la Figura 23.

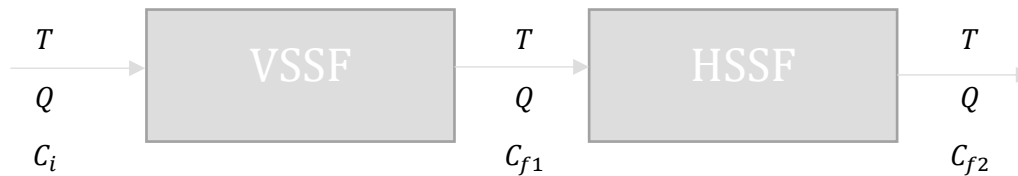


Figura 23: Esquema del sistema de tratamiento propuesto.

donde:  $C_i$  = Concentración de entrada al sistema [mg/L].  
 $C_f$  = Concentración de salida del sistema [mg/L].

Al finalizar el tratamiento, se requiere que las concentraciones del efluente se encuentren dentro de lo estipulado en el D.S. n° 90 (Tabla 13), debido a que es el decreto por el que se rige la empresa para evaluar sus efluentes.

Tabla 13: Concentraciones finales requeridas para los contaminantes en estudio.

<b>Contaminante</b>	<b><math>C_{f2}</math> según el D.S. n° 90</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	35
<b>SST</b>	80
<b>N<sub>T</sub></b>	50
<b>P<sub>s</sub></b>	10



Para el humedal vertical, la concentración de salida está determinada por el porcentaje de reducción que se desea obtener en esa etapa. Se utilizarán los porcentajes mínimos de remoción encontrados en bibliografía, de manera de obtener un área evaluada en una cota inferior [48]. Éstos se encuentran en la Tabla 14.

Tabla 14: Porcentaje de remoción deseado para el humedal VSSF para cada contaminante [48].

<b>Contaminante</b>	<b>% de remoción del humedal VSSF</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	40%
<b>SST</b>	50%
<b>N<sub>T</sub></b>	50%
<b>P<sub>s</sub></b>	40%

El porcentaje de remoción del humedal HSSF está determinado a partir de la diferencia entre las concentraciones iniciales y finales que se requieren, estipuladas en el D.S. n° 90. Entonces, al ser un sistema en serie, las conversiones de cada humedal se encuentran señaladas en las Tablas 15 y 16.

Tabla 15: Porcentajes de remoción de cada humedal para cada el caso1.

<b>Contaminante</b>	<b>% remoción del humedal VVSF</b>	<b>% remoción del humedal HSSF</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	40%	97%
<b>SST</b>	50%	57%
<b>N<sub>T</sub></b>	50%	98%
<b>P<sub>s</sub></b>	40%	50%

Tabla 16: Porcentajes de remoción de cada humedal para el caso 2.

<b>Contaminante</b>	<b>% remoción del humedal VVSF</b>	<b>% remoción del humedal HSSF</b>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	40%	90%
<b>SST</b>	50%	88%
<b>N<sub>T</sub></b>	50%	97%
<b>P<sub>s</sub></b>	40%	53%

A partir de todo lo anterior, se obtuvieron las áreas reportadas en la Tabla 17 para cada contaminante y caso propuesto (Anexo D).

Tabla 17: Constantes de velocidad y áreas obtenidas para cada humedal en cada caso propuesto.

<b>Caso 1: Sistema Paralelo</b>			<b>Caso 2: Sistema Complementario</b>		
<b>DBO<sub>5</sub></b>			<b>DBO<sub>5</sub></b>		
$k_A$	[m/d]	0,5	$k_A$	[m/d]	0,5
$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	690,8	$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	329,7
$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	-	$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	1.560,2
<b>SST</b>			<b>SST</b>		
$k_A$	[m/d]	8,2	$k_A$	[m/d]	8,2
$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	61,5	$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	27,6
$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	14,2	$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	76,5
<b>N<sub>T</sub></b>			<b>N<sub>T</sub></b>		
$k_A$	[m/d]	0,1	$k_A$	[m/d]	0,1
$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	4.586,7	$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	2.832,2
$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	20.231,8	$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	11.402,1
<b>P<sub>s</sub></b>			<b>P<sub>s</sub></b>		
$k_A$	[m/d]	0,03	$k_A$	[m/d]	0,03
$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	9.616,5	$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	4.542,9
$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	3.546,8	$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	2.102,9

Las áreas obtenidas en la Tabla 17 corresponden a aquellas que son capaces de disminuir la concentración inicial del contaminante a las deseadas.

El área del humedal VSSF en el caso 1 para la DBO<sub>5</sub> no se pudo calcular, debido a que la concentración en el fondo es mayor a la de salida (Valores en las Tablas 12 y 13, respectivamente), lo que significaría que no está ocurriendo transferencia de masa, por ende, no se contaría con el abatimiento deseado, no es una opción factible y se descarta de inmediato.

Para determinar si las áreas obtenidas son eficientes para el sistema, se calculan las concentraciones finales que se obtienen por cada área. Se elige aquella con la que todas las concentraciones finales de los contaminantes se encuentren bajo lo estipulado por el D.S. n° 90/00. Los resultados se muestran en el Anexo D.3.

Se obtuvo que las áreas del nitrógeno cumplieron con esta condición en ambos casos, por ende, son las seleccionadas.

Tabla 18: Áreas finales para cada caso.

<b>Áreas del caso 1</b>			<b>Áreas del caso 2</b>		
$k_A$	[m/d]	0,1	$k_A$	[m/d]	0,1
$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	4.568,7	$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	2.832,2
$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	20.231,8	$A_H$	[m <sup>2</sup> ]	11.402,1

Ahora, se debe recordar que el caso 1 corresponde al sistema sustituto y el caso 2 al complementario y, cabe preguntarse: ¿Qué sucederá si se instala un sistema con las áreas obtenidas en el caso 1 como sistema complementario? ¿Funcionará?

Para ello, se utilizan los datos de la salida del sumidero y las áreas del caso 2 para calcular concentraciones finales y, viceversa. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19: Concentraciones finales de cada contaminante utilizando las áreas del caso 1 como sistema complementario, es decir, luego de los sedimentadores.

	$C_{f1}$ [mg/L]	$C_{f2}$ [mg/L]
<b>DBO<sub>5</sub></b>	21,8	21,7
<b>SST</b>	48,3	48,3
<b>N<sub>T</sub></b>	519,7	5,1
<b>P<sub>s</sub></b>	11,7	1,2

Entonces, la Tabla 19 se encuentran las concentraciones de salida de los humedales artificiales al instalar un sistema con áreas de 4.500 [m<sup>2</sup>] para el vertical y 20.200 [m<sup>2</sup>] para el horizontal, a la salida de los sedimentadores. Se aprecia que las concentraciones cumplen con lo estipulado en el D.S. n° 90/00 (Tabla 13).

A partir de los resultados anteriores, se decide que el sistema final de tratamiento consistirá en dos humedales artificiales en serie, uno vertical de área aproximada 4.500 [m<sup>2</sup>] y uno horizontal de 20.200 [m<sup>2</sup>] ubicados luego de los sedimentadores del sistema de tratamiento biológico que tiene actualmente la empresa KDM Tratamiento, con un *by-pass* desde el sumidero. Esto permitirá tratar el efluente de la planta de tratamiento que no cumple con la norma, y en casos de mal funcionamiento, se podrán tratar los lixiviados desde el sumidero, cumpliendo con el D.S n° 189/01, tal como se muestra en la Figura 24. Asimismo, y, eventualmente, este sistema también permitiría tratar los lixiviados acumulados en las piscinas.

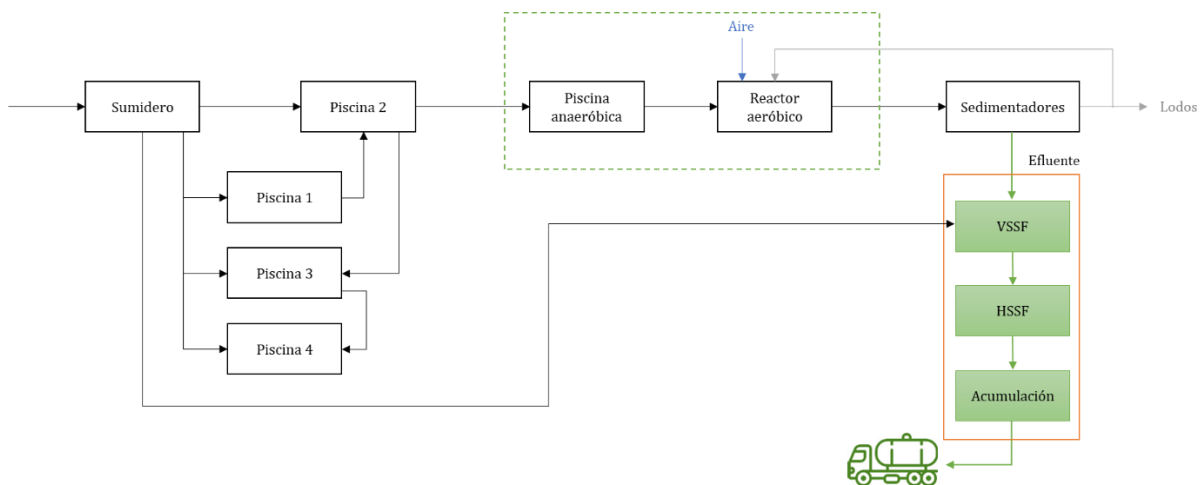


Figura 24: Esquema del sistema de tratamiento final con humedales artificiales.

Las dimensiones de largo y ancho de los humedales se encuentran determinadas por la relación:  $L:W = 1,5:1$ , con  $L = \text{Largo}$  y  $W = \text{Ancho}$ , por ende, las de cada humedal se presentan en la Tabla 20 [57]:

Tabla 20: Largo y ancho de cada los humedales del sistema.

Humedal VSSF		Humedal HSSF	
$L_V$ [m]	82,8	$L_H$ [m]	116,1
$W_V$ [m]	55,2	$W_H$ [m]	174,2

Estas dimensiones son apropiadas para los flujos tratados y terreno que posee KDM Tratamiento, debido a que son similares a la superficie de algunas piscinas de acumulación de lixiviados.

Cabe mencionar que, al instalar el sistema en esta configuración, se espera que los humedales no operen al máximo de su capacidad. Sin embargo, como se ve en la Figura 21, los *peaks* de la producción de la planta de tratamiento actual rondan los 600 [m<sup>3</sup>/d], por ende, este sistema podrá funcionar bajo estas circunstancias, lo cual, no significa que sea recomendable, dado que, se podría gestionar la operación para que los humedales no funcionen a su máximo, pero puedan sustentar parte de los lixiviados acumulados para ir disminuyendo su volumen, ya que, eventualmente, si la empresa cumple con un estricto manejo de sus RILes, se podrían utilizar en regadío de zonas no correspondientes a la recirculación, lo que implicaría la reducción en la generación de lixiviados, ya que la recirculación aporta gran volumen a éstos.

## 8. Evaluación económica

Este capítulo contempla la estimación de costos calculados para el sistema de tratamiento de lixiviados propuesto en el capítulo anterior. Esto incluye: los costos de inversión, costos de operación y un flujo de caja proyectado a 15 años, cuyos datos fueron obtenidos desde bibliografía y proporcionados por la empresa.

La estimación de costos se realizó principalmente a través de cotizaciones puntuales online. Cabe destacar que todos son presupuestos nacionales. Además, al realizarse a través de una persona natural, puede ser que los costos difieran de los finales, debido a que la empresa como tal, puede tener sus propios proveedores y contactos, por lo que los precios pueden variar.

### 8.1. Costos de inversión

Esta categoría de costos corresponde al capital que se requiere en la construcción e instalación del sistema de tratamiento.

Cabe destacar, que este sistema al no ser automatizado no cuenta con costos de instrumentación y control, sin embargo, se incluirá una estimación del *piping* por el cual se trasportará el fluido.

De esta manera, este análisis contempla los costos necesarios para adquirir el sustrato, las plantas y las geomembranas, además, de la construcción y el *piping* antes mencionado.

#### 8.1.1. Sustrato

La estimación de costos asociados a la adquisición de los sustratos se realizó a través de búsqueda bibliográfica, a excepción de la zeolita que fue por cotizaciones con la empresa Andes Zeolites [62].

En la Tabla 21 se muestran los costos totales de los diferentes sustratos utilizados en cada humedal. En el Anexo E.1 se desarrolla la obtención de éstos.

Tabla 21: Costos de inversión de los sustratos.

Humedal	Medio [mm]	Costo total [CLP]	Referencia
VSSF	Arena (0 - 7)	18.000.000	[63]
	Zeolita (0,8 - 2)	130.000.000	[62]
	Grava (7 - 15)	9.000.000	[63]
	Grava (15 - 30)	9.000.000	[63]
HSSF	Grava (7 - 15)	164.000.000	[63]

Por ende, el costo total asociado a la adquisición del sustrato corresponde a 330.000.000 [CLP].

#### 8.1.2. Plantas

La estimación de los costos asociados a las plantas se realizó mediante búsqueda bibliográfica. Estas especies (*Phragmites australis* y *Typha angustifolia*) no se venden de manera industrial, por lo que su compra debe ser mediante viveros o criaderos especializados.

Como se mencionó en la sección 6.4.2, cada humedal requiere de un número específico de plantas por metro cuadrado. Dadas las características contaminantes del afluente, se requiere gran acción de las plantas en el tratamiento del lixiviado, por lo que se considerará la cota

superior para el asentamiento de las plantas, es decir, 4 plantas por metro cuadrado en el humedal VSSF y de 2 plantas por metro cuadrado en el humedal HSSF. Entonces, los costos de estas plantas se encuentran señalados en la Tabla 22. En el Anexo E.1 se encuentra detallada la obtención de estos.

Tabla 22: Costos de inversión de las plantas.

<b>Humedal</b>	<b>Especie</b>	<b>Costo total [CLP]</b>	<b>Referencia</b>
<b>VSSF</b>	<i>Phragmites australis</i>	55.000.000	[64]
<b>HSSF</b>	<i>Typha angustifolia</i>	121.000.000	[65]

Por ende, la inversión en plantas es de 176.000.000 [CLP].

Cabe destacar que, si se ocupa 1 planta por metro cuadrado en el humedal HSSF, la inversión total en plantas disminuye a 115.000.000 [CLP]. Se recomienda evaluar el rendimiento de la *Typha angustifolia* al plantar 1 o 2 por metro cuadrado, para determinar experimentalmente cuantas se requerirán efectivamente.

Para este análisis económico, los cálculos se mantendrán bajo el supuesto de usar 2 plantas por metro cuadrado dadas las características fuertemente contaminantes del líquido a tratar, de esta manera, las plantas no se saturarían tan rápidamente.

### 8.1.3. Geomembranas

Se requiere de la instalación de una membrana en el fondo de los humedales para impermeabilizar el terreno y evitar que se filtre el lixiviado a los suelos subterráneos.

Se utilizarán geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1 mm de espesor, similares a las que se utilizan en el relleno sanitario para impermeabilizar los suelos de las piscinas acumuladoras de lixiviado.

Para obtener los costos asociados a este ítem, se realizó una cotización en la empresa Geosintéticos [66]. En la tabla siguiente, se muestran los costos de las geomembranas para cada humedal y, en el Anexo E.1, se encuentra el detalle de estos.

Tabla 23: Costos de inversión de las geomembranas.

<b>Humedal</b>	<b>Costo total [CLP]</b>	<b>Referencia</b>
<b>VSSF</b>	6.000.000	[66]
<b>HSSF</b>	27.000.000	[66]

Por ende, la inversión de las geomembranas es de 33.000.000 [CLP].

### 8.1.4. Construcción

Para construir los humedales artificiales, se requiere realizar una excavación que cuente con las medidas de cada uno. Es por ello que la estimación de costos se realizó a través de una cotización con la empresa de Ingeniería y Construcción Elimaq [67].

El presupuesto considera la excavación y carguío de excedentes mediante retroexcavadora, el retiro de estos y el relleno de los humedales, así como la mano de obra. A continuación, se muestra el costo de construcción para cada humedal. En el Anexo E.1, se detalla cada ítem de estos costos.

Tabla 24: Costos de inversión de la construcción de los humedales artificiales.

Humedal	Costo de construcción [CLP]
VSSF	19.000.000
HSSF	76.000.000

Por ende, el costo de inversión asociado a la construcción corresponde a 96.000.000 [CLP].

#### 8.1.5. Piping

Para calcular el costo de inversión del *piping*, se supone que esto corresponde a un 3% de la inversión total, dado que este sistema de tratamiento no cuenta con una cantidad significativa de cañerías y bombas. Entonces, los costos para el *piping* de cada humedal artificial se resumen en la Tabla 25.

Cabe destacar que la entrada del humedal vertical requiere de mayor cantidad de cañerías, dada la configuración de entrada. Por otro lado, hay que analizar la ubicación del humedal, ya que, si se construye en una zona con pendiente, no es necesaria la instalación de bombas, debido a que el líquido fluiría por acción de la gravedad.

Tabla 25: Costo de inversión del *piping* para cada humedal artificial.

Humedal	Factor	Costo Total [CLP]
VSSF	3%	8.000.000
HSSF	3%	12.000.000

Por lo tanto, los costos de inversión totales para el *piping* son de 20.000.000 [CLP].

Finalmente, se tiene un costo de inversión total de 654.000.000 [CLP], cuyos ítemes se resumen en la Tabla 26.

Tabla 26: Costo de inversión final.

Ítem	Costo de inversión [CLP]	Porcentaje de la inversión
Plantas	176.000.000	27%
Geomembranas	33.000.000	5%
Sustrato	330.000.000	50%
Construcción	95.000.000	15%
<i>Piping</i>	20.000.000	3%
<b>TOTAL</b>	<b>654.000.000</b>	<b>100%</b>

En el gráfico de la Figura 25, se muestra cómo se distribuyen los costos de inversión de los diferentes ítemes.

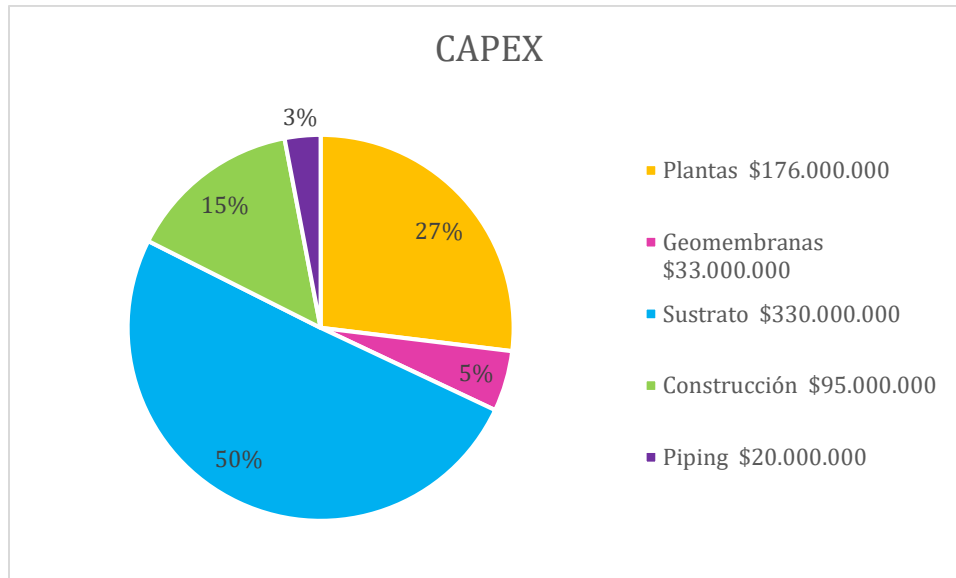


Figura 25: Distribución de los costos de inversión.

De acuerdo a esta estimación preliminar, el principal costo de inversión se asocia al medio granular (50%), lo que era de esperarse dada la gran cantidad de volumen que se debe utilizar para rellenar los humedales artificiales.

No se consideró el costo del terreno, dado que no debe ser adquirido por la empresa, sin embargo, éste efectivamente correspondería al mayor porcentaje de la inversión. Se cotizó un terreno cercano al RSLLC con las especificaciones técnicas requeridas, 30.000 [m<sup>2</sup>], teniendo un costo aproximado de 900.000.000 [CLP], lo que equivaldría al 58% de la inversión total [68].

Por otro lado, si bien, el costo de inversión es elevado, esto se debe a la capacidad para el que está diseñado el sistema de humedales artificiales. La empresa cuenta con otro proyecto futuro de tratamiento a través de energía solar [10], que tiene un valor aproximado de 220.000.000 [CLP], pero su capacidad es de 120 [m<sup>3</sup>/d]. Si se realiza una estimación a través de un ajuste por capacidad (regla de los seis décimos) para un caudal de 620 [m<sup>3</sup>/d], el costo de inversión rondaría los 600.000.000 [CLP], lo que se encuentra dentro del rango de magnitud del valor obtenido para el sistema con humedales artificiales.

## 8.2. Costos de operación

Estos costos corresponden a los que demanda la operación del sistema de humedales artificiales anualmente y se deben sumar a los costos de operación que posee el actual sistema de tratamiento.

Es importante destacar ciertos puntos referentes a la operación de un humedal artificial. Estos no requieren de riego, ya que es el mismo lixiviado que entrega las condiciones necesarias para el crecimiento de las plantas. El sistema no necesita bombas, debido a que se debe construir en pendiente para que el lixiviado fluya solo. Las mantenciones que se requieren son principalmente de poda de plantas, lo que depende del crecimiento de éstas y son esporádicas. La operación puede ser llevada a cabo por un solo operario, ya que no se presentan condiciones riesgosas ni complicadas de manejar.



Es por ello, que la estimación de los costos de operación anuales para el sistema propuesto incluye sólo la mano de obra de un operario, lo que corresponde a 12.000.000 [CLP/año].

Sin embargo, se puede realizar un cálculo de estos costos tomando como referencia los costos de operación por metro cúbico del sistema actual de tratamiento, que corresponde a 480 [CLP/m<sup>3</sup>], y considera la mantención y reparación de la piscinas y equipos, análisis de laboratorio, insumos, entre otros, junto con el salario de un operario que trabaje como mano de obra exclusiva para el sistema propuesto [10]. Entonces, para el caudal considerado a tratar, los costos de operación para el sistema de humedales artificiales ascenderían a 118.000.000 [CLP/año]. El detalle se encuentra en el Anexo E.2.

Cabe destacar, que los costos de operación de la empresa que se utilizaron como referencia incluyen varios parámetros que no son representativos para el sistema de humedales, como, por ejemplo, la mantención y reparación de equipos, dado que este sistema no cuenta con grandes equipos automatizados.

Se pueden analizar los costos de operación al considerar sólo un porcentaje de los costos actuales. Por ejemplo, si se considera que corresponden al 50% de los costos de operación por metro cúbico del sistema actual de tratamiento, el OPEX se estimaría en aproximadamente 65.000.000 [CLP/año], o bien, si se considera un 10%, el OPEX sería aproximado de 22.000.000 [CLP/año]. Por ende, esta variable afecta en la rentabilidad anual del proyecto. Sin embargo, los valores más representativos del escenario real corresponden a aquellos que posean menores ítems dentro de los costos de operación, dada la baja complejidad que posee el manejo de humedales.

Para la confección del flujo de caja, se utilizará el escenario que considera los costos de operación como sólo la mano de obra, debido a que es más cercano a la realidad.

### 8.3. Flujo de caja

En el caso de la instalación de este sistema de tratamiento, no existen ingresos por ventas ni otras acciones, sin embargo, pueden considerarse ahorros de costos.

Si con este nuevo sistema se tratan todos los lixiviados y cumplen con la norma de calidad de agua para riego, no sería necesario realizar la recirculación al relleno sanitario, que en promedio es de 13.800 [m<sup>3</sup>/mes]. Además, se supliría la compra y uso de agua potable para el riego de caminos no impermeabilizados, donde se ocupan aproximadamente 460 [m<sup>3</sup>/mes] y provienen de localidades cercanas a través de camiones aljibe. Asimismo, se puede usar el afluente para el lavado de camiones, que en promedio es de 180 [m<sup>3</sup>/mes]. Todas estas acciones conllevarían ahorro de costos y con el efluente obtenido, se puede cubrir la totalidad de la demanda. En la Tabla 27 se resumen estos ahorros.

*Tabla 27: Ahorro de costos asociados a la implementación del sistema propuesto.*

Ítem	[CLP/año]
<b>Ahorro de compra de agua potable para regadío</b>	12.200.000
<b>Ahorro de agua para el lavado de camiones</b>	4.900.000
<b>Ahorro de costos por la recirculación del efluente</b>	23.900.000

Con estos datos, se elaboró un flujo de caja con un horizonte de evaluación a 15 años, el que entrega un VAN de - 500.000.000 [CLP]. Junto con esto, se confeccionó uno con financiamiento, ya que, en general un grado de apalancamiento suele ser beneficioso para que se tenga una mayor viabilidad económica. Se consideró un crédito que cubre el 70% de la inversión fija - basándose en una recomendación de la empresa -, con cuota fija de 10 años y tasa de interés al 6%. Se obtuvo un VAN de - 355.000.000 [CLP].

Si bien, a la empresa le conviene pedir un préstamo, ambos indicadores, señalan que el proyecto no es viable económicamente en el horizonte de tiempo planteado, además, no se recupera la inversión. Cabe destacar, que no se incluye un valor residual por activos, debido a que no se pueden vender las partes de la inversión, considerándose un costo hundido.

Además, no se están considerando los beneficios sociales ni ambientales que el proyecto puede generar. Es por esto, que debiese haber un interés por parte del gobierno por licitar el proyecto, para que así, la industria privada tenga un incentivo económico para la implementación del sistema, debido a las externalidades positivas que posee. Por lo tanto, en la evaluación deben considerarse otros criterios, como beneficios sociales, que son discutidos más adelante.

En el Anexo E.3 se detallan los supuestos y confección de los flujos de caja.

## 9. Evaluación ambiental

Desde hace décadas que el mundo se ha visto en un creciente estado de degradación ambiental, debido al aumento del desarrollo humano y económico. Es por ello, que mundialmente se ha impulsado un proceso de cambio en el pensamiento global y la forma en que se analiza la interacción entre la sociedad y la naturaleza. Entonces, para remediar los efectos negativos sobre el ambiente producidos por la intervención humana, se requiere la aplicación de diversas acciones que permitan identificar y analizar de manera temprana los factores que puedan generar un impacto negativo en el medio ambiente, con el propósito de adelantarse a potenciales impactos producidos por el desarrollo de un proyecto. La evaluación ambiental es una herramienta de análisis técnico que permite predecir, identificar e interpretar los potenciales impactos negativos que genera el desarrollo de una actividad, describiendo las acciones que se deben ejecutar para impedir o minimizar sus efectos [6, 69].

Con esta evaluación se busca identificar potenciales impactos positivos y negativos asociados al desarrollo del sistema propuesto, así como aquellos asociados al manejo actual del efluente.

La situación actual, conlleva una importante recirculación del efluente hacia el relleno sanitario. Esto tiene ciertos beneficios, como la estabilización y humectación del terreno, existiendo entradas adicionales de fluido y, que, gracias a la actividad biológica y procesos fisicoquímicos, se presenta un aumento en la producción de biogás. Sin embargo, existen problemas asociados a la recirculación.

El agua que llega al relleno sanitario es retenida por los residuos y por el material de cobertura. El volumen de agua que puede ser retenido, sometido a la acción de la gravedad, se conoce como capacidad de campo. En consecuencia, el contenido de agua que supere la capacidad de campo se traduce en la producción de lixiviados, por lo que, el volumen de lixiviado que se genera, tiene directa relación con los flujos de entrada al relleno sanitario [10].

Un potencial impacto ambiental, sería el aumento de los flujos de lixiviado crudo, el que se genera a causa de la superación de la capacidad de campo. Según datos de la empresa, el volumen del lixiviado crudo ha aumentado con los años, así como la concentración de contaminantes, por ende, es de esperarse un aumento continuo en los flujos de recirculación, lo que además involucra el uso de camiones para el transporte, que conlleva el uso de energía no renovable y emisión de gases de efecto invernadero.

Asimismo, si la capacidad de recolección de los lixiviados se ve superada, se pueden acumular dentro del relleno sanitario pudiendo aflorar por otras superficies, como taludes o zonas no impermeabilizadas, generando focos de contaminación ambiental y riesgo en la salud humana. Además, al no estar la masa uniformemente distribuida, puede provocar una desestabilización del terreno, generando sitios factibles de derrumbe, al haber exceso de lixiviados al interior del relleno sanitario. De todas maneras, con el nuevo sistema de tratamiento, éste se puede regar controlando el flujo de líquido que ingresa para evitar los efectos antes mencionados.

Por otro lado, es indiscutible los malos olores que se generan dentro de un relleno sanitario, provenientes principalmente de la descomposición de los residuos y emisiones de biogás, los que ven incrementados por la actividad biológica, perjudicando a trabajadores y comunidades aledañas al recinto. Entonces, si aumenta el volumen de lixiviados, aumenta la actividad

biológica y, los olores, que están compuestos principalmente por estireno, tolueno, xileno, entre otros, y son dañinos para la salud de las personas [70].

Con el sistema propuesto, se pueden disminuir considerablemente los flujos de recirculación, ya que, al tener un fluido dentro de la norma, puede utilizarse con otro propósito, lo que implicaría la disminución del volumen de lixiviado que se genera actualmente y los problemas que ello conlleva.

En los humedales artificiales, cuando las plantas reducen las cargas contaminantes de los lixiviados, pueden liberarlas como gases de efecto invernadero. Las mayores emisiones corresponden a dióxido de carbono y metano, siendo insignificantes las emisiones de óxido nitroso. Sin embargo, las emisiones de los compuestos orgánicos son bajas, especialmente en las zonas abundantes de plantas, debido a ocupan los contaminantes orgánicos como fuente de carbono para los microorganismos desnitrificantes, favoreciendo la eliminación del nitrógeno [71, 72].

Por otro lado, el agua potable que se utiliza en el regadío de camino no impermeabilizados es transportado por camiones aljibe desde tres localidades próximas al recinto, la más cercana se encuentra a aproximadamente a 22 [km], mientras que la más lejana está a 78 [km]. Es por esto, que el transporte de agua tiene asociado un impacto ambiental relacionado a los gases de efecto invernadero que genera este transporte. En Chile, el sector del transporte genera cerca del 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero, es por esto, que en 2009 la Comisión Nacional de Energía, a través del Programa País de Eficiencia Energética (PPEE), implementó el programa “Cambia tu Camión”, para sacar de circulación a aquellos con más de 25 años de antigüedad, reemplazándolos por vehículos con tecnología de punta y alto desempeño energético y ambiental. Esta campaña, sumado al nuevo sistema de humedales artificiales, otorga a KDM Tratamiento, una muy buena oportunidad para mitigar su impacto ambiental en el sector de transportes, efectos que se verían al mediano y largo plazo [73].

Respecto al suelo, con la utilización de piscinas de acumulación, existe un constante riesgo de que las geomembranas fallen al romperse y se filtren los lixiviados a los suelos o napas subterráneas, esto arrastraría un daño ambiental irreparable, considerando la gran cantidad de fluido que contienen, y repararlas es un trabajo difícil y costoso, ya que, se deben vaciar las piscinas, lo que genera una desestabilización en el funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados. Además, si el sistema de humedales artificiales logra funcionar a su máximo de capacidad, se podrían tratar los efluentes de la planta de tratamiento y los lixiviados de las piscinas de acumulación, y eventualmente, podrían disminuir sus volúmenes y en el mejor de los casos, desaparecer por completo. Los humedales también están impermeabilizados por una geomembrana, por lo que, existe el peligro a que éstas se rompan, sin embargo, el fluido llegaría al suelo con un menor grado de contaminación que en el caso de las piscinas, ya que, gracias al sustrato, aún se genera un proceso de descontaminación, sin embargo, esto no significa que el daño ambiental sería bajo.

Con la implementación de la alternativa propuesta, existiría una modificación en el paisaje, dada la introducción de especies vegetales, que es de gran cantidad. Esto tendría efectos positivos directos en los trabajadores, que van desde felicidad y creatividad hasta el aumento de productividad. Existen estudios que demuestran que la exposición a espacios verdes está asociada con una mejor salud mental y física, dada la afinidad instintiva de los seres humanos

con la naturaleza [74]. Por otro lado, como se mencionó en la sección 6.4, las especies consideradas para este proyecto son cosmopolitas, es decir, que son nativas de todo el mundo, por ende, no existiría un daño ecológico significativo en esta plantación.

Debido a la presencia de las piscinas de acumulación, se han dado casos en que animales cercanos al terreno del relleno sanitario, han llegado a tomar “agua”, cayendo abruptamente a los lixiviados. Si bien, el terreno está completamente cercado, esto no imposibilita que los animales lleguen en busca de alimento, además, dentro del recinto hay presencia de perros y muchas aves. Con la introducción de nuevas plantas, existiría la posibilidad de que lleguen más animales a la zona, atraídos por este nuevo “alimento”. Es recomendable, evaluar la situación y prever la instalación de un cerco que evite la irrupción de animales. Si bien, no existen estudios determinantes que demuestren la toxicidad de las plantas y el efecto que tengan en la nutrición de la fauna, es de suma importancia realizar estudios que caractericen los contaminantes que éstas posean luego de su participación en el sistema de tratamiento. Además, dado a que el sistema está diseñado con un flujo subsuperficial, no existirán corrientes de agua en contacto con la atmósfera, por lo que, se evita la presencia de biota acuática en el terreno.

Por otro lado, al analizar la fuerza de trabajo, la mano de obra no varía significativamente entre el escenario actual y el sistema de humedales artificiales, debido a que se está considerado sólo un operario extra, por lo que este impacto se considera neutro. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, existe un impacto positivo en el bienestar de los trabajadores al poseer mayores espacios visuales de zonas naturales.

Se realizó una matriz de interacción para cuantificar los impactos anteriores mediante diferentes componentes ambientales que se encuentran señalados en el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, como: la calidad del aire, la geología y geomorfología, los recursos hídricos, el suelo, el paisaje, la flora y fauna, la biota acuática, el medio humano y la infraestructura vial [75]. Se construyó un indicador de impacto ambiental a través de tres parámetros: la magnitud, la temporalidad y la naturaleza del impacto, esto, para cada escenario: la situación actual y la situación con proyecto. Mientras mayor sea el indicador, implica que el impacto ambiental es más beneficioso para la situación. En el Anexo F se encuentra el detalle de la confección de este indicador y los resultados en la Tabla 28.

*Tabla 28: Indicador de impacto ambiental generado por la situación actual y la situación con proyecto.*

<b>Situación</b>	<b>Indicador de impacto ambiental</b>
<b>Situación actual</b>	-21
<b>Situación con proyecto</b>	19

De los resultados anteriores, se rescata que el proyecto beneficia ambientalmente la situación actual, por lo que, hay incentivos de esta naturaleza para la construcción de la alternativa propuesta.

## 10. Evaluación social

En esta sección se realiza una evaluación cualitativa del proyecto. Para esto se utiliza una Herramienta de Análisis Integral (HAIN) [76], estrategia que utiliza diversas preguntas para reflexionar acerca del contexto donde se encuentra inmerso el proyecto, obteniendo así, puntos de vistas más amplios previos a su realización, de modo que no sólo se justifique desde lo técnico y lo económico, sino también de lo social.

Es importante mencionar que las preguntas están formuladas para que las respuestas sean más que un simple “sí” o “no”. Tampoco existen respuestas buenas o malas, puesto que lo que busca la HAIN es levantar una reflexión crítica en relación al bienestar ético del proyecto, para que la ingeniería pueda cumplir el rol social que posee y se mejore la calidad de la toma de decisiones [76].

### 10.1. Conciencia social

#### ***¿Realizaría esta acción si fuese parte de la comunidad afectada?***

Para responder esta pregunta, primero se deben identificar los agentes impactados con la realización del proyecto.

El sistema propuesto se encontrará instalado dentro del recinto del relleno sanitario Loma Los Colorados, perteneciente a la empresa KDM Tratamiento, que disponen los residuos sólidos municipales de manera controlada, pero éstos generan lixiviados que deben ser tratados, considerándose RILes muy tóxicos.

Recientemente se han presentado gran cantidad de quejas relacionadas con el relleno sanitario y los efectos colaterales en el entorno donde se encuentra, específicamente, en la comuna de Til Til, cuyos habitantes deben convivir con las externalidades negativas de este, como, los malos olores, animales circundantes, disminución de la plusvalía del terreno, movimiento de camiones que generan ruido y deterioran los caminos, entre otros [77].

Es por esto, que cualquier medida que atenúe estos problemas, debiese ser bien recibida por la comunidad, en la que se incluyen los trabajadores de la empresa, de los cuales, muchos viven en las proximidades.

Más aún, existe un riesgo latente con respecto a los lixiviados que podrían afectar gravemente a la comunidad, como el riesgo de contaminación a las napas subterráneas, filtraciones o derrames, de los lixiviados, lo que implicaría un daño altamente nocivo a la salud de las personas y el medio ambiente, llegando a afectar incluso comunas más lejanas en la ciudad de Santiago [77].

Por otro lado, los tomadores de decisiones dentro de KDM Tratamiento, deben ser responsables y entender las consecuencias de sus acciones, ya que, si por malas prácticas se clausura el relleno sanitario, no sólo habría problemas para la empresa, sino que se podría generar una fuerte alerta ambiental en la ciudad de Santiago. Esto ya ha sucedido, en particular, el año 2017 cuando el alcalde de Til Til lo clausuró por tener permisos municipales pendientes. Esto conllevó varios problemas operacionales dentro de la empresa, ya que se acumuló basura en la Estación de Transferencia de Quilicura y, socialmente, se formó una mala reputación y recepción por parte de la comunidad [78].

KDM Tratamiento al tener un rol con la sociedad y más aún con la comunidad cercana al recinto, debe ser capaz de tomar decisiones reconociendo las características culturales e intereses de los vecinos de Til Til. Considerando la influencia que pueden tener los humedales artificiales en la calidad de vida de las personas.

## 10.2. Reflexión crítica

### ***¿Cuáles son las consecuencias del proyecto? ¿Qué precauciones se tienen que tener?***

En este proyecto, el principal inconveniente que podría afectar a la comunidad y las partes interesadas es la llegada de animales al recinto atraídos por las nuevas plantas. Cabe destacar que el concepto “animales” abarca tanto terrestres como aves.

El relleno sanitario Loma Los Colorados se encuentra ubicado en una zona rural de la Región Metropolitana, por lo que, existe gran cantidad de terrenos campestres ubicados en las cercanías del recinto, donde los habitantes son dueños de diversos animales, como ganado, gallinas, perros, entre otros.

Durante el funcionamiento del relleno sanitario, se han visto casos de animales que encuentran partes rotas de la cerca y entran en busca de alimento y agua, confundiendo el lixiviado acumulado en las piscinas con este vital recurso, precipitándose y cayendo dentro del líquido contaminante.

No se descarta que, con el nuevo sistema de tratamiento, lleguen animales a la zona, de hecho, se constituye como una posibilidad, dada la existencia de nuevas especies que puedan ser atractivos para los animales.

Esta situación, conllevaría diversos problemas para los vecinos de la comunidad cercana, porque, pierden sus animales y, a los trabajadores, ya que la llegada de animales al recinto está prohibida, puesto que generan focos de infección y peligro para el tránsito de vehículos al interior del terreno.

Como empresa, KDM Tratamiento debe hacer un estudio riguroso de la instalación de cualquier operación, la que debe estar aprobada por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, para estimar completamente los efectos en el tiempo del funcionamiento de los humedales artificiales. Para ello, debe existir un levantamiento de información de la línea base presentada en el Reglamento del Sistema de Evaluación Ambiental, debiendo incluir componentes como: la calidad del aire, hidrología, geología, geomorfología, suelo, flora y fauna, paisaje, mano de obra y situación económica del medio cercano al sistema propuesto, entre otros [75].

## 10.3. Integración

### ***¿Qué conflicto podría despertar esta alternativa en las partes interesadas?***

Primero, hay que identificar a las partes interesadas, que corresponden a aquellas cuyo bienestar puede verse impactado positiva o negativamente con el desarrollo del proyecto. De acuerdo a esto, se pueden identificar a KDM Tratamiento como la principal parte interesada, sin embargo, también se debe considerar al Estado de Chile como un agente, debido a su interés de velar por el medio ambiente y la salud de las personas, como ente regulador entre las empresas y la sociedad.

Como se mencionó anteriormente, KDM Tratamiento no puede tener la planta de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario Loma Los Colorados detenida, ya que viola el D.S. n° 189/01, donde se declara que se debe asegurar que el manejo de lixiviados se mantendrá operativo durante toda la vida útil del relleno y su cierre.

El Estado debe velar porque se cumpla este decreto, ya que una falla o mala práctica puede desencadenar peligros para el medio ambiente, la salud de las personas y la economía del país. Así, como los tomadores de decisiones de KDM Tratamiento, deben interiorizar y comprender a cabalidad su rol dentro de la sociedad, velando por solucionar los problemas de ésta, no sólo por sus intereses económicos.

Podría pensarse que, para la empresa, es un obstáculo la interacción con el Estado, sin embargo, es crucial que los tomadores de decisiones encuentren el punto de entendimiento entre ellos, para no caer sólo en las aplicaciones técnicas, sino que en formas de retribuir a la sociedad. Más aún, dados todos los problemas que han tenido últimamente con los vecinos cercanos al relleno sanitario, quienes están descontentos con su calidad de vida, culpando directamente a la empresa y al Estado, por dejarlos como “el patio trasero de Santiago” [79].

#### 10.4. Creatividad

##### ***¿Qué nuevas soluciones puede hacerse? ¿Hay efectos no previstos?***

El tratamiento de lixiviados es clave para evitar la potencial contaminación de aguas subterráneas. Se pueden categorizar de acuerdo a los niveles de tratamiento que se logre, o al contaminante que se desee remover [17].

Debido a la heterogeneidad de la composición de los lixiviados y a la variabilidad de los volúmenes que se generan, no se puede determinar un sistema único de tratamiento, por lo tanto, cada lixiviado debe ser evaluado individualmente para encontrar el sistema propicio para su manejo [18].

Además, siempre es necesario una combinación de sistemas de tratamiento, los que se pueden dividir en las siguientes categorías, según el medio de eliminación de contaminantes: recirculación al relleno, evaporación, tratamiento biológico, tratamientos fisicoquímicos, sistemas de membranas y tratamientos naturales. En el capítulo 3 se ahonda y detallan las principales alternativas de tratamiento [10, 17].

Los humedales artificiales no son la única alternativa de tratamiento, pero son un sistema con bajo impacto ambiental, ya que no se requiere de maquinarias específicas que puedan convertirse en residuos, sino que corresponden a un sistema completamente natural que puede mimetizarse con su entorno.

Por otro lado, considerando el nivel de impacto ambiental que puede haber por la contaminación con lixiviados, las precauciones en su manejo deben ser extremas. Los esfuerzos de la empresa por tratar este contaminante deben ser estrictas y prioritarias.



## 10.5. Desarrollo

### ***Integral***

#### ***¿Se incluye en la toma de decisiones a todos los grupos sociales?***

KDM Tratamiento, debe ser capaz de conjugar sus intereses con los de las comunidades aledañas, así como con el Estado.

Si bien, es tarea de la ingeniería como disciplina construir una planta de tratamiento con humedales artificiales a gran escala, con tecnología más limpia, también es tarea de los ingenieros establecer un vínculo con la comunidad, además de relacionarse adecuadamente con el sector público, para ello, la empresa cuenta con un área de Responsabilidad Social Empresarial, que se encarga de planificar y desarrollar actividades en conjunto con diferentes colaboradores para las comunidades locales. Sin embargo, es importantes realizar una Evaluación de Impacto Ambiental del proyecto, ya que es una buena herramienta para analizar relación que efectivamente existe entre la empresa y la comunidad.

La comunidad cercana al relleno sanitario puede recibir diferentes beneficios de la implementación de esta planta, ya que eventualmente, se podría abastecer de agua de regadío para la zona, que está declarada con emergencia hídrica hace 10 años y saturada de contaminación [80].

Si bien, los vecinos pueden no tener conocimientos técnicos respecto al tratamiento de lixiviados, es importante contar con sus opiniones a la hora de realizar un proyecto como éste, ya que se sienten incluidos y participes de la toma de decisiones. Las opiniones y comentarios podrían ser obtenidas a través de un Consejo, en el que se generen discusiones con diferentes puntos de vista y, a partir de ellas tomar decisiones con respecto a diferentes temas atinentes al proyecto. Por otro lado, se podrían realizar encuestas públicas para obtener una cantidad representativa de opiniones. Lo que se busca con esto es que exista transparencia respecto a lo que se está haciendo al interior del relleno y entregar diferentes canales como: encargado, mail, teléfono, buzón, etc., donde la comunidad y las personas que se sientan afectadas o participes de alguna manera puedan expresar sus preocupaciones e inquietudes.

Cabe destacar que la ingeniería como profesión debiese buscar el bien común y la solución de problemas, por lo que el integrar a todos los grupos sociales en la toma de decisiones es conveniente, ya sea a través de consultas ciudadanas, visitas, entre otras.

### ***Equilibrado***

#### ***¿Se aporta de manera balanceada a todos los grupos sociales?***

Socialmente, se han mostrado aspectos beneficiosos del proyecto, lo cuales afectan de similar manera a todos los agentes involucrados.

Sin embargo, la evaluación de este proyecto no abarca la implementación de actividades concretas con los grupos sociales, sino que entrega una reflexión crítica de los escenarios en los que se encuentra inmerso el proyecto.

Además, este proyecto si bien solucionar parte de los problemas que tiene la comunidad y la empresa, siguen existiendo los asociados al mismo relleno en sí, lo que provoca un desgaste en la relación que estos agentes tienen.

Es importante que el área de Responsabilidad Social Empresarial de KDM Tratamiento trabaje activamente en la solución o mitigación de estos problemas, velando por la calidad de vida de sus vecinos, realizando actividades beneficiosas y más aún, dirigiendo y gestionando sus operaciones priorizando a las personas, tomando decisiones que vayan más allá de un simple regalo a la comunidad.

La empresa señala que proporciona soluciones sostenibles orientadas al cuidado del medio ambiente y la salud de las personas [81]. Entonces, las acciones que sostengan deben ser consecuentes con estas alineaciones.

### ***Sostenible***

#### ***¿Se compromete de alguna manera el desarrollo del futuro?***

Como se mencionó anteriormente, el sistema de tratamiento con humedales artificiales es una operación natural que no genera residuos ni afecta al entorno donde se ubica.

La producción desmedida en el siglo pasado ha afectado intensamente al medio ambiente en el siglo actual, por lo que, los problemas se están haciendo notar hoy en diferentes aspectos.

En particular, la producción de lixiviados generados por los residuos son un grave problema asociado a su disposición y, aun cuando se conoce la peligrosidad de estos fluidos, se siguen produciendo y a cantidades que el terreno no va a poder soportar.

Si bien, el sistema de humedales es una solución posterior a la producción, es importante hacer un análisis que pudiese evitar su aparición.

Los lixiviados se generan principalmente por los residuos orgánicos que se disponen en el relleno sanitario. Entonces, ¿por qué KDM Tratamiento no busca una acción para minimizar la disposición de estos residuos?, por ejemplo, potenciando campañas con el Estado para los ciudadanos para que se disminuyan los flujos de estos contaminantes desde las ciudades. Esto conllevaría significantes beneficios a la empresa, desde económicos, ambientales y sociales.

Por otro lado, volviendo al tratamiento de los lixiviados, con esta acción, se les está alargando su tiempo de vida útil y reduciendo su volumen, aprovechándolos para obtener agua, que, como se mencionó anteriormente, es escasa en la zona, por lo que, este contaminante que tan fácil se genera, sirve para beneficiar.

En consecuencia, este proyecto se compromete con el desarrollo de futuras generaciones de diferentes maneras al reducir RILes altamente peligrosos.

## **10.6. Bien común**

### ***¿Cómo se afecta a la generación y distribución de riquezas sociales?***

El contexto de este proyecto, como ya se ha mencionado, se enmarca dentro de un ambiente empresarial destinado a la disposición de residuos. Se espera que el impacto económico de éste se vea reflejado dentro del mismo sistema donde estará envuelto, esto se evidencia en el flujo de caja de la planta; el cual tiene un VAN negativo, lo que significa que es inviable económicamente para la empresa, sin embargo, no se contempla la evaluación mediante un VAN social asociado a este proyecto, la que puede dar cuentas de los beneficios sociales que se pueden entregar.

Sin bien, el VAN resultante es negativo, por todo lo mencionado anteriormente y los beneficios sociales y ambientales que este proyecto pueda traer consigo, debe existir un interés por parte del Estado por licitarlo, es decir, entregar un incentivo monetario para que el privado invierta en este proyecto.

El principal costo económico corresponde a la inversión del sistema de tratamiento, el cual no deberían afectar en ningún punto, ni económica, ni ambiental, ni socialmente a los beneficiarios de este proyecto, ya que es una inversión dispuesta por la empresa.

Este proyecto, entonces, afecta positivamente a la generación de riquezas sociales, dadas las externalidades positivas que posee. Las que han quedado plasmadas en esta reflexión. La empresa debe velar a que esta riqueza generada se distribuya de forma ética y sin hacer daño, para que se le dé un uso sostenible al agua de riego generada.

Finalmente, cabe destacar que un proyecto de ingeniería debe permitir la generación y distribución de las riquezas sociales en todos los ámbitos sociales, estando en concordancia además con un desarrollo integral, equilibrado y sostenible [76]. Este proyecto se plantea bajo estas ideas, sin embargo, es responsabilidad de KDM Tratamiento velar por que se cumplan y respalden en los años futuros.

## 11. Discusión general

El presente proyecto es realizado en base a la importancia del tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario, dado el significativo impacto que poseen, ambientalmente y en la salud de las personas. Su manejo y gestión debe ser la adecuada para evitar la potencial contaminación de aguas subterráneas y suelos.

Frente a otras alternativas de tratamiento, el uso de humedales artificiales, resultó ser el sistema más económico y amigable con el medio ambiente, dado que no se requiere de maquinaria para su operación. Sin embargo, existen ciertas incertidumbres respecto a la operación.

En primer lugar, el funcionamiento y rendimiento de los humedales artificiales depende fuertemente de las condiciones del entorno, especialmente de la radiación solar, dado que este fenómeno es el encargado del ciclo vital de las plantas y la temperatura depende de los niveles de ésta.

La zona de Til Til está caracterizada por ser un sector con bruscos cambios de temperatura – situación que no se analizó en el diseño –, es de gran importancia analizar el rendimiento de las plantas frente a los cambios de temperatura. Físicoquímicamente, se puede intuir que a menores temperaturas el rendimiento disminuye, dado que la actividad microbiana se puede ver desfavorecida, sin embargo, existen microorganismos que se pueden ver beneficiados por este fenómeno. Es de esperarse que los microorganismos existentes en el lugar, que aportarán a la reducción de contaminantes en el lixiviado, puedan adaptarse al sistema de humedales y logren construir un ecosistema simbiótico con las plantas que se instalarán. Si bien, las plantas seleccionadas son cosmopolitas, es un supuesto el hecho de que se lograrán adaptar bien al lugar, y si no lo hacen, se deberá probar la instalación con otras especies depuradoras que logren sostener la carga contaminante que posee el líquido.

Durante el período de invierno – primavera, es recurrente que en las mañanas el sector del RSLLC se encuentre escarchado dadas las bajas temperaturas. Este es un claro ejemplo de un fenómeno meteorológico que podría afectar el rendimiento de las plantas, ya que, si no se adaptan bien a las condiciones, esta situación puede afectarlas hasta matarlas y, considerando la gran inversión que se tiene en ellas, hay que analizar cuidadosamente y bajo un largo periodo, cómo éstas responderán a los cambios climáticos de la zona.

Por otro lado, los lixiviados de un relleno sanitario poseen gran cantidad de contaminantes, muchos de los cuales no se encuentran analizados en este estudio, como, por ejemplo: bromo, arsénico, cianuro, diferentes sales, entre otros, que si bien, se encuentran en bajas concentraciones y bajo la normativa actual, pueden actuar con un agente tóxico y venenoso para las plantas y microorganismos.

Si bien, este es un trabajo netamente teórico y, de los cálculos y ecuaciones se infiere que el proyecto puede funcionar, es muy importante que se lleve a la práctica para analizar la real efectividad que se posee para el entorno en el que estará situado. Para ello, la mayor recomendación es realizar pruebas de pilotaje para analizar o comprobar las diferentes aristas y supuestos que se plantearon en este trabajo. Entre los estudios experimentales que se deben realizar están: estudio con trazadores para determinar tiempos de residencia y constantes de velocidad, estudiar el impacto que tienen los cambios de temperatura en el ciclo de vida de las

plantas, así como la carga contaminante de los lixiviados, es decir, cómo las plantas se desempeñan frente a éste; lo cual, puede realizarse bajo un simple experimento donde se les riegue con éste. Por otro lado, se debe analizar el desempeño de los medios granulares seleccionados, si bien, se definieron espesores según bibliografía, se recomienda hacer un estudio donde se analicen diferentes proporciones de éstos, con el objetivo de abaratar los costos de inversión, dado que el mayor porcentaje proviene de este ítem.

Todos los estudios antes mencionados, se refieren, principalmente, a análisis fisicoquímicos y de desempeño del sistema. Es por ello, que se recomienda hacer varios pilotajes para analizar cada ámbito por separado, de esta manera, se pueden ir haciendo estudios por etapas, escalando los experimentos, hasta alcanzar un nivel semi industrial del que se puedan obtener conclusiones certeras para la instalación.

Por otro lado, también es importante que se puedan realizar análisis de la operación del sistema, para ello, es importante tener en cuenta que KDM Tratamiento posee varios rellenos sanitarios a lo largo del país, siendo el más grande el RSLLC. Sería interesante evaluar la implementación de este proyecto en alguno de los otros rellenos más pequeños, para estudiar el funcionamiento y control del sistema y, si existiesen fallas de construcción y/u operación, sería más sencillo controlarlas, para así, prever situaciones de funcionamiento a futuro en un sistema de mayor envergadura.

## 12. Conclusiones

El trabajo desarrollado busca determinar y diseñar un sistema de tratamiento para los lixiviados provenientes de un relleno sanitario, en particular, el Relleno Sanitario Loma Los Colorados de la empresa KDM Tratamiento. Para esto, se analizaron diferentes alternativas de tratamiento bajo aspectos técnicos y económicos y se seleccionó un sistema de humedales artificiales.

Se utilizaron los parámetros del D.S. N°90/00 para determinar las concentraciones que debe poseer el fluido a la salida del sistema propuesto. Con éste, se pueden reducir los principales contaminantes que se encuentran fuera de norma, a excepción de los cloruros, sin embargo, se propone utilizar la columna de adsorción con carbón activado que posee la empresa para este propósito.

Se decidió trabajar con humedales de flujo subsuperficial, en una configuración híbrida con dos operaciones en serie: un humedal de flujo subsuperficial vertical seguido de un humedal de flujo subsuperficial horizontal, para favorecer las reacciones de nitrificación y luego la desnitrificación. Respecto al medio granular, se optó por aquellos que mejores resultados han tenido en bibliografía, estos corresponden a: arena, zeolita, y dos capas de grava de diferentes granulometrías para el vertical y sólo grava para el horizontal. Respecto a las plantas, se seleccionan dos especies de macrófitas utilizadas comúnmente en el tratamiento de RILes con humedales artificiales: *Phragmites australis* para el vertical y *Thypha angustifolia* para el vertical, y como medio impermeable se escoge una geomembrana de 1 [mm] de espesor.

Se dimensionó el sistema para disminuir cada concentración de contaminantes a los estipulado por la norma. El sistema final de tratamiento consistirá en dos humedales artificiales en serie, uno vertical de área aproximada 4.500 [m<sup>2</sup>] y uno horizontal de 20.200 [m<sup>2</sup>] ubicados luego de los sedimentadores del sistema de tratamiento biológico actual, con un *by-pass* desde el sumidero.

Se estimaron los costos de inversión a partir de cotizaciones con empresas nacionales, en total es de 654.000.000 [CLP]. El costo del medio granular corresponde al mayor porcentaje de la inversión, 50%. Se estimó el costo de operación considerando sólo la incorporación de un operador, correspondiente a 12.000.000 [CLP/año].

El proyecto es inviable económicamente. Además, se realizó un flujo de caja para un escenario con financiamiento y para otro sin, entregando los dos un VAN negativo a 15 años. Sin embargo, se puede concluir que a la empresa le conviene pedir un préstamo para apalancar la inversión.

El proyecto tiene impactos ambientales mayormente positivos que negativos, por lo que se puede concluir que es viable bajo esta evaluación. Los beneficios tienen relación con la recirculación de lixiviados. El proyecto posee beneficios frente a la situación que existe actualmente y frente a otras alternativas, ya que es un proceso completamente natural que se espera se adapte al entorno en el que se situará

Finalmente, se realizó una evaluación social en la que se analizó el rol activo que debe poseer KDM Tratamiento para beneficiar con sus acciones a todos los agentes involucrados, concluyendo que deben trabajar con una visión que aporte a la comunidad, integrando a todos los grupos sociales en la toma de decisiones.

## 13. Referencias

- [1] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. 2011. Informe del Estado del Medio Ambiente. Capítulo 3: 136-165.
- [2] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE. Primer Reporte sobre Manejo de Residuos Sólidos en Chile [en línea]. 2010. <[http://www.sinia.cl/1292/articulos-49564\\_informe\\_final.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articulos-49564_informe_final.pdf)>
- [3] TISSERANT, Alexandre et al. 2017. Solid Waste and the Circular Economy: A Global Analysis of Waste Treatment and Waste Footprints. *Journal of Industrial Ecology*.
- [4] WASTE. The Waste Atlas [en línea]. <<http://www.atlas.d-waste.com/>> [consulta: 24 julio 2017].
- [5] EFE. Chile lidera generación de basura per cápita en Sudamérica. La Tercera [en línea]. <<http://www.latercera.com/noticia/chile-lidera-generacion-basura-per-capita-sudamerica/>> 2016 [consulta: 24 julio 2017].
- [6] GOBIERNO DE CHILE. 2010. APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE. LEY 19.300 [en línea]. <[http://portales.mineduc.cl/usuarios/convivencia\\_escolar/doc/201204161055270.ley\\_bases\\_del\\_medio\\_ambiente.pdf](http://portales.mineduc.cl/usuarios/convivencia_escolar/doc/201204161055270.ley_bases_del_medio_ambiente.pdf)>
- [7] GONZÁLEZ, Carlos. 2016. Chile es el segundo país que más basura envía a rellenos. La Tercera [en línea]. <<http://www.latercera.com/noticia/chile-es-el-segundo-pais-que-mas-basura-envia-a-rellenos/>>
- [8] MINISTERIO DE SALUD. APRUEBA REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES SANITARIAS Y DE SEGURIDAD BÁSICAS EN LOS RELLENOS SANITARIOS [en línea]. 2005. <[http://www.respel.cl/ResiduosPeligrosos/documentos\\_respel/Reglamento\\_DS\\_189-05\\_Rellenos\\_Sanitarios\\_-\\_DO\\_05ene08.pdf](http://www.respel.cl/ResiduosPeligrosos/documentos_respel/Reglamento_DS_189-05_Rellenos_Sanitarios_-_DO_05ene08.pdf)>
- [9] LÓPEZ, Daniel. 2016. Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios [en línea]. Universidad de Chile. 5-8 p. <<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/138545/Modelo-para-el-diseno-de-sistemas-de-captacion-y-aprovechamiento-de-biogas-producido.pdf?sequence=1>>
- [10] GARCÉS, Constanza. 2016. Evaluación de la sustentabilidad del tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario utilizando energía solar térmica [en línea]. Universidad de Chile. 2-3 p. <<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/144105/Evaluación-de-la-sustentabilidad-del-tratamiento-de-lixiviados-de-un-relleno-sanitario-utilizando-energía-solar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>
- [11] DI IACONI, Claudio et al. 2011. Effective treatment of stabilized municipal landfill leachates. *Chemical Engineering Journal*.
- [12] BONMATÍ, August. Gestión y Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos [en línea]. <[http://www.crea.uab.es/propies/pilar/LibroRiesgos/09\\_Capítulo8.pdf](http://www.crea.uab.es/propies/pilar/LibroRiesgos/09_Capítulo8.pdf)> 2008 [consulta: 23 agosto 2017].
- [13] PENG, Yao. 2017. Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*

- [14] EL-GOHARY, Fatma A. y KAMEL, G. 2016. Characterization and biological treatment of pre-treated landfill leachate. *Ecological Engineering*
- [15] HUANG, Wenhai et al. 2016. Pilot-scale landfill with leachate recirculation for enhanced stabilization. *Biochemical Engineering Journal*
- [16] MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS. Norma Oficial de Calidad para el uso de aguas
- [17] GIRALDO, Eugenio. Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes [en línea]. 2001. <<https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/view/538>> [consulta: 22 agosto 2017]
- [18] IVÁN, Roger et al. 2009. COMPARACIÓN DE CUATRO TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS DE LIXIVIADOS Autónoma de Yucatán . Facultad de Ingeniería . Av . Industrias No Contaminantes por Periférico Norte , s / n . Tablaje Catastral 12685 . Mérida , Yucatán , México .
- [19] NAJERA, Hugo. LIXIVIADOS ¿Qué son, cómo se clasifican? (Parte 1) [en línea]. <[https://www.unicach.mx/\\_/ambiental/descargar/Gaceta4/Lixiviados.pdf](https://www.unicach.mx/_/ambiental/descargar/Gaceta4/Lixiviados.pdf)> [consulta: 24 agosto 2017].
- [20] RENO, S. et al. 2008. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*
- [21] MÉNDEZ, Novelo R et al. 2008. Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto. *Ingenieria Revista Academica*. 12: 13-19.
- [22] PALANIANDY, Puganeshwary et al. 2010. Application of dissolved air flotation (DAF) in semi-aerobic leachate treatment. *Chemical Engineering Journal*
- [23] EL-GOHARY, F. et al. 2010. Comparative study between chemical coagulation/precipitation (C/P) versus coagulation/dissolved air flotation (C/DAF) for pre-treatment of personal care products (PCPs) wastewater. *Desalination*
- [24] FUNDACIÓN CHILE. CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS: Tecnologías de Flotación por aire disuelto - DAF [en línea]. 2010. [consulta: 25 agosto 2017]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_03.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_03.pdf)>
- [25] AGUILAR, M.I. et al. 2002. Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación. 1era ed. 35 p.
- [26] VILAR, Almudena. 2015. Evaluación del tratamiento integral del lixiviado de vertedero de residuos sólidos urbanos. Universidad da Coruña.
- [27] KOSHLAND SCIENCE MUSEUM. Coagulación - Floculación [en línea]. <<https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation.html>> [consulta: 25 agosto 2017].



- [28] FUNDACIÓN CHILE. CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS: Tecnologías de coagulación y/o floculación [en línea]. 2010. [consulta: 25 agosto 2017]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_05.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_05.pdf)>
- [29] TEXTOSCIENTIFICOS.COM. Procesos en las plantas de tratamiento: Sistemas para tratamiento de aguas residuales por adsorción [en línea]. <<https://www.textoscientificos.com/quimica/carbon-activo/plantas-tratamiento>> [consulta: 25 agosto 2017].
- [30] GUANOLUISA, Lorena. 2012. Diseño de un sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario El Inga mediante electrocoagulación y fitorremediación [en línea]. Escuela Politécnica Nacional. <<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4625/1/CD-4255.pdf>> [consulta: 25 agosto 2017]
- [31] FUNDACIÓN CHILE. CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS: Tecnologías de adsorción con carbón activado [en línea]. 2010. [consulta: 25 agosto 2017]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_01.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_01.pdf)>
- [32] REYES, Manuel. sin fecha. Lixiviados en plantas de residuos. Una contribución para la selección del proceso de tratamiento. Universidad Politécnica de Valencia.
- [33] FUNDACIÓN CHILE. CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS: Procesos de Oxidación Avanzada, POAs [en línea]. 2010. [consulta: 25 agosto 2017]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_19.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_19.pdf)>
- [34] ABENGOA. ¿Qué son las membranas y para qué sirven? [en línea]. <<http://www.laenergiadelcambio.com/membranas-en-el-tratamiento-de-aguas>> [consulta: 26 agosto 2017].
- [35] FUNDACIÓN CHILE. CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS: Tecnología de membranas Ultra y Microfiltración [en línea]. 2010. [consulta: 7 septiembre 2017]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_26.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_26.pdf)>
- [36] HIDALGO, A et al. Alternativas en el tratamiento de lixiviados de vertedero. 2016.
- [37] FUNDACIÓN CHILE. CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS: Tecnologías de membrana nanofiltración [en línea]. 2010. [consulta: 8 septiembre 2017]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_23.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_23.pdf)>
- [38] CARBOTECNIA. Ósmosis inversa [en línea]. <<https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-la-osmosis-inversa/>> [consulta: 28 agosto 2017].

- [39] FUNDACIÓN CHILE. CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS: Tecnología de membranas Osmosis Inversa [en línea]. 2010. [consulta: 12 septiembre 2017]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_25.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_25.pdf)>
- [40] BULC, Tjasa G. 2006. Long term performance of a constructed wetland for landfill leachate treatment. *Ecological Engineering*
- [41] YALCUK, Arda y UGURLU, Aysenur. 2009. Comparison of horizontal and vertical constructed wetland systems for landfill leachate treatment. *Bioresource Technology*
- [42] FUNDACIÓN CHILE. CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS: Wetlands artificiales [en línea]. 2010. [consulta: 12 septiembre 2017]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-49990\\_33.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_33.pdf)>
- [43] MOSQUERA-BELTRÁN, Y y LARA-BORRERO, J. Tratamiento de lixiviados mediante humedales artificiales: revisión del estado del arte. 2012. 7.
- [44] SÁNCHEZ, David. 2010. Depuración de aguas residuales de una población mediante humedales artificiales. b.n.
- [45] FUNDACIÓN CHILE. INFORME FINAL: CONSULTORÍA DE APOYO A LOS PROCESOS DE NORMAS AMBIENTALES EN SISTEMAS HÍDRICOS: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE ABATIMIENTO DE CONTAMINANTES EN RESIDUOS LÍQUIDOS. 2010.
- [46] CHEN, Z M et al. 2008. A vertical subsurface-flow constructed wetland in Beijing
- [47] KADLEC, Robert H. 1999. Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands. *Water Science and Technology*
- [48] WANG, Mo et al. 2017. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate — A review. *Journal of Environmental Sciences*
- [49] ARIAS, Carlos y BRIX, Hans. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.
- [50] ZHANG, Yue. 2012. Design of a Constructed Wetland for Wastewater Treatment and Reuse in Mount Pleasant, Utah. Utah State University.
- [51] VYMAZAL, Jan. 2005. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*
- [52] PÉREZ VILLAR, M. M. et al. 2012. Vertical subsurface wetlands for wastewater purification. *Procedia Engineering*
- [53] VYMAZAL, Jan. 2014. Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review. *Ecological Engineering*
- [54] WU, Haiming et al. 2015. A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*
- [55] NIVALA, J. et al. 2007. Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Science of the Total Environment*

- [56] IDALGO, J O S É C Elis H et al. 2005. Recent Applications of Waste Water By Means. Theoria
- [57] KADLEC, Robert H. y KNIGHT, Robert L. 1996. Treatment Wetlands. 1era ed. Lewis Publishers.
- [58] BRIX, Hans. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? Water Science and Technology
- [59] GUNCKEL, Hugo. 1959. Flora vascular de Chile: Tifáceas.
- [60] EXPLORADOR CLIMÁTICO CR2. Precipitaciones [en línea]. <<http://explorador.cr2.cl/>> [consulta: 8 marzo 2018].
- [61] KADLEC, Robert H. 1997. Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design. Water Science and Technology
- [62] ANDES ZEOLITES. Zeolita [en línea]. <<https://www.andeszeolites.cl/>> [consulta: 30 noviembre 2017].
- [63] YURMOT. Venta de Aridos [en línea]. <<https://www.yurmot.cl/aridos>> [consulta: 29 noviembre 2017].
- [64] ACUATICAS. Carrizo o Pragmites australis [en línea]. <[http://www.acuaticas.cl/\\_p/prd14/4637483331/product/carrizo-o-pragmites-australis](http://www.acuaticas.cl/_p/prd14/4637483331/product/carrizo-o-pragmites-australis)> [consulta: 29 noviembre 2017].
- [65] CRIADERO RUCAPANGUE. Totora [en línea]. <<http://www.rucapangue.cl/producto/totora>> [consulta: 29 noviembre 2017].
- [66] GEOSINTÉTICOS. Geomembranas [en línea]. <<http://www.geosinteticos.cl/geomenbranas>> [consulta: 18 diciembre 2017].
- [67] ELIMAQ. Obra: Humedal VSSF y HSSF. 2017.
- [68] VIVASTREET. Gran Terreno 32 Ha, ideal proyecto Solar, Isam 5 [en línea]. <<http://www.vivastreet.cl/loteos-lotes/tiltil/gran-terreno-32-ha--ideal-proyecto-solar--isam-5/157557284>> [consulta: 7 enero 2018].
- [69] PEREVOCHTCHIKOVA, María et al. 2013. La evaluación del impacto ambiental y la importancia de los indicadores ambientales. El Colegio de México. Gestión y política pública [en línea]. (38): 283-312. ISSN 14051079. <<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4665569&info=resumen&idioma=ENG>> [consulta: 7 enero 2018]
- [70] FANG, Jing Jing et al. 2012. Odor compounds from different sources of landfill: Characterization and source identification. Waste Management
- [71] PICEK, Tomáš et al. 2007. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland-Plants as important sources of carbon. Ecological Engineering
- [72] CHIEMCHASRI, C. et al. 2009. Leachate treatment and greenhouse gas emission in subsurface horizontal flow constructed wetland. Bioresource Technology
- [73] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. 2011. Informe del Estado del Medio Ambiente. Capítulo 1: 442.

- [74] BBC CAPITAL. 2017. Los beneficios ocultos de poner una planta sobre tu escritorio [en línea]. <<http://www.bbc.com/mundo/vert-cap-38261887>> [consulta: 08 enero 2018]
- [75] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Aprueba Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. 2013
- [76] MARTÍNEZ, Richard. 2012. Dilemas Éticos en la Ingeniería Química. Universidad de Chile.
- [77] LA TERCERA. 2017. Tilttil “en guerra” por aprobación de relleno para residuos peligrosos [en línea]. <<http://www.latercera.com/noticia/tiltil-guerra-aprobacion-relleno-residuos-peligrosos/>> [consulta: 08 enero 2018]
- [78] EL MERCURIO ONLINE. 2017. KDM, la dueña del relleno sanitario más grande de Santiago que está en la mira del alcalde de Til Til [en línea]. <<http://www.emol.com/noticias/Economia/2017/07/28/868765/kdm-la-empresa-que-el-alcalde-de-til-til-decreto-cerrarla.html>> [consulta: 05 enero 2018]
- [79] LA TERCERA. 2017. La promesa incumplida de Tilttil [en línea]. <<http://www.latercera.com/noticia/la-promesa-incumplida-de-til-til/>> [ consulta: 05 enero 2018]
- [80] EL CIUDADANO. 2017. Til Til: Alcalde Orellana anuncia bomba de tiempo ambiental en la comuna [en línea]. <<https://www.elciudadano.cl/medio-ambiente/til-til-alcalde-orellana-denuncia-bomba-de-tiempo-ambiental-en-la-comuna/05/18/>> [consulta: 04 enero 2018]
- [81] TRATAMIENTO, KDM. KDM Tratamiento:Protección sustentable del ambiente [en línea]. <<https://www.kdm.cl/tratamiento/index.html>> [consulta: 4 enero 2018].
- [82] GOBIERNO DE CHILE. Ministerio de Obras Públicas. Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado. DS N° 609/98 [en línea]. <[http://www.sinia.cl/1292/articles-27696\\_pdf\\_norma.pdf](http://www.sinia.cl/1292/articles-27696_pdf_norma.pdf)> [consulta: 18 diciembre 2017].
- [83] ZEOCAT. Ficha Técnica: Zeolita Natural Aqua [en línea]. <<http://www.zeolitanatural.com/docs/fichaznaqua.pdf>> [consulta: 22 diciembre 2017].
- [84] CERAMICA SANTIAGO. Estudio de Impacto Ambiental: “Restauración Ambiental de sector de Humedal Batuco”.

## 14. Anexos

### 14.1. Anexo A: Caracterización de los lixiviados

Tabla 29: Valores medidos en junio de 2016 por el laboratorio externo. Se incluye comparación con el D.S. n° 90/00.

Contaminante	Unidad	Valor medido junio 2016	Límite máximo
Aceites y grasas	[mg/L]	21	20
Aluminio	[mg/L]	0,33	5
Arsénico	[mg/L]	0,066	0,5
Boro	[mg/L]	5,73	0,75
Cadmio	[mg/L]	<0,01	0,01
Cianuro	[mg/L]	<0,02	0,2
Cloruros	[mg/L]	6.863	400
Cobre total	[mg/L]	0,08	1
Coliformes fecales	[mg/L]	11.000	1.000
Índice de Fenol	[NMP/100 ml]	<0,05	0,5
Cromo hexavalente	[mg/L]	<0,03	0,05
DBO <sub>5</sub>	[mg O <sub>2</sub> /L]	2.791	35
Fósforo	[mg/L]	6,2	10
Fluoruro	[mg/L]	<0,5	1,5
Hidrocarburos fijos	[mg/L]	<5	10
Hierro Disuelto	[mg/L]	3,39	5
Manganeso	[mg/L]	0,68	0,3
Mercurio	[mg/L]	<0,0005	0,001
Molibdeno	[mg/L]	0,03	1
Níquel	[mg/L]	0,48	0,2
Nitrógeno total kjeldahl	[mg/L]	935	50
Pentaclorofenol	[mg/L]	<0,005	0,009
pH	[]	8,4	6,0 - 8,5
Plomo	[mg/L]	<0,05	0,05
Poder Espumógeno	[mm]	<2	7
Selenio	mg/L	<0,001	0,01
Sólidos suspendidos totales	mg/L	227	80
Sulfato	mg/L	52	1.000
Sulfuro	mg/L	<0,2	1
Temperatura	°C	21,8	35
Tetracloroetano	mg/L	<0,01	0,04
Tolueno	mg/L	<0,2	0,7
Triclorometano	mg/L	<0,01	0,2
Xileno	mg/L	<0,2	0,5
Zinc	mg/L	0,2	3

## 14.2. Anexo B: Estimación de costos de las alternativas de tratamiento

Para obtener las ecuaciones, el equipo de Fundación Chile realizó las siguientes etapas:

- Etapa de definición: se recopila y ordena la información para confeccionar las fichas técnicas de cada tecnología [24, 28, 31, 33, 35, 37, 39, 42].
- Etapa preliminar: se definen las condiciones de borde de cada tecnología para acotar la evaluación a escenarios reales.
- Etapa de cálculo detallado: se determina el capital total, compuesto por el capital fijo y capital de trabajo. Para calcular el primero, se aplican relaciones de índices de costos junto con el factor de Williams, mientras para el segundo, se consideran costos de insumos (materias primas y suministros, correspondientes al 80 - 90% del total), operación (personal involucrado, 9 - 17% del total) y mantención (3 - 5% del costo físico de la planta) obtenidos de bibliografía especializada en ingeniería de procesos.
- Etapa de documentación: se compila la información de entrada, los cálculos realizados y un análisis detallado por cada tecnología que describe las consideraciones más importantes para la estimación económica de inversión y tratamiento extrapolada con las funciones de costos obtenidas.

A continuación, se señalan las ecuaciones obtenidas de la estimación de costos para cada alternativa de tratamiento estudiada. Donde  $C_{inv}$  corresponde al costo de inversión en [USD],  $C_{op}$  al costo de operación en [USD/m<sup>3</sup>] y Q al caudal.

### **Flotación**

$$C_{inv} = 3.772,2 \cdot Q^{0,8967} \quad (B.1)$$

$$C_{op} = 2,5425 \cdot Q^{-0,745} \quad (B.2)$$

$$Q = \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

### **Coagulación - Flocculación**

$$C_{inv} = 3.186 \cdot Q^{0,8} \quad (B.3)$$

$$C_{op} = 0,1723 \cdot Q^{-0,72} \quad (B.4)$$

$$Q = \left[ \frac{m^3}{h} \right]$$

### **Adsorción**

$$C_{inv} = 3.255,4 \cdot Q^{0,6} \quad (B.5)$$

$$C_{op} = 22,747 \cdot Q^{-0,707} \quad (B.6)$$

$$Q = \left[ \frac{m^3}{d} \right]$$

### **Oxidación química**

$$C_{inv} = 22.714 \cdot Q^{0,6} \quad (B.7)$$

$$C_{op} = 1,7056 \cdot Q^{-0,131} \quad (B.8)$$

$$Q = \left[ \frac{m^3}{d} \right]$$

### **Microfiltración y Ultrafiltración**

$$C_{inv} = 0,3067 \cdot Q^{0,6} \quad (B.9)$$

$$C_{op} = 0,6841 \cdot Q^{-0,112} \quad (B.10)$$

$$Q = \left[ \frac{L}{s} \right]$$

### **Nanofiltración**

$$C_{inv} = 0,3485 \cdot Q^{0,6} \quad (B.11)$$

$$C_{op} = 0,7385 \cdot Q^{-0,112} \quad (B.12)$$

$$Q = \left[ \frac{L}{s} \right]$$

### **Osmosis inversa**

$$C_{inv} = 0,3485 \cdot Q^{0,6} \quad (B.13)$$

$$C_{op} = 0,7774 \cdot Q^{-0,112} \quad (B.14)$$

$$Q = \left[ \frac{L}{s} \right]$$

### ***Humedales artificiales***

$$C_{inv} = 0,4454 \cdot Q^3 - 85,98 \cdot Q^2 + 6.256,5 \cdot Q - 3.715,9 \quad (B.15)$$

$$C_{op} = 0,0808 \cdot Q^{-0,546} \quad (B.16)$$

$$Q = \left[ \frac{m^3}{d} \right]$$

Para realizar los cálculos, se utilizó un caudal estándar de  $Q = 100 [m^3/d]$ , el que fue transformado dependiendo de las unidades de medida de cada ecuación, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.



### 14.3. Anexo C: Datos caso base

Tabla 30: Producción de lixiviados del RSLLC, balance hídrico 2016.

	<b>Valor generado [m<sup>3</sup>/mes]</b>	<b>Valor mín. mes [m<sup>3</sup>/día]</b>	<b>Valor máx. mes [m<sup>3</sup>/día]</b>	<b>Promedio diario [m<sup>3</sup>/día]</b>
<b>Enero</b>	14.420	180	1.500	536,43
<b>Febrero</b>	13.900	30	720	496,43
<b>Marzo</b>	15.310	200	620	510,33
<b>Abril</b>	18.678	420	1.800	644,07
<b>Mayo</b>	18.390	480	1.200	613
<b>Junio</b>	23.350	150	3.000	805,17
<b>Julio</b>	24.270	560	2.000	809
<b>Agosto</b>	20.000	420	980	645,16
<b>Septiembre</b>	19.230	500	890	641
<b>Octubre</b>	20.060	380	1.320	647,10
<b>Noviembre</b>	15.620	260	670	520,67
<b>Diciembre</b>	17.020	500	710	549,03
<b>Promedio</b>	<b>18.354</b>	<b>340</b>	<b>1.284,17</b>	<b>618,12</b>

Tabla 31: Efluente de la planta de tratamiento del RSLLC, balance hídrico 2016.

	<b>Producción planta [m<sup>3</sup>/mes]</b>	<b>Producción promedio diario [m<sup>3</sup>/día]</b>	<b>Producción promedio diario* [m<sup>3</sup>/día]</b>
<b>Enero</b>	1.321	42,61	165,13
<b>Febrero</b>	7.852	270,76	302
<b>Marzo</b>	9.749	314,48	348,18
<b>Abril</b>	6.682	222,73	303,73
<b>Mayo</b>	5.812	187,48	215,26
<b>Junio</b>	9.916	330,53	413,17
<b>Julio</b>	3.959	127,71	188,52
<b>Agosto</b>	8.286	267,29	276,20
<b>Septiembre</b>	10.740	358	358
<b>Octubre</b>	9.800	316,13	350
<b>Noviembre</b>	-	-	-
<b>Diciembre</b>	-	-	-
<b>Promedio **</b>	<b>7.411,7</b>	<b>243,77</b>	<b>292,02</b>

\* Sin contar los días donde la medición flujo fue cero debido a fallas de funcionamiento en el sistema.

\*\* Sin contar los meses de noviembre y diciembre, desde donde inició la falla general del sistema.

## 14.4. Anexo D: Dimensionamiento del sistema

### D.1. Definición de las ecuaciones utilizadas

La mayoría de la literatura sobre hidrología de humedales define un tiempo de residencia nominal (también llamado tiempo de detención) como la relación entre el volumen de agua en el humedal dividido por la tasa de flujo volumétrico del agua a través del humedal [57].

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (D.1)$$

donde:  $\tau$  = Tiempo de residencia [d]  
 $V$  = Volumen de líquido dentro del humedal [m<sup>3</sup>]

El valor del tiempo de residencia a menudo no se conoce con un alto grado de precisión. Rara vez es posible realizar un experimento de llenado o drenaje cuantitativo para cuantificar el volumen de líquido. Un estudio de seguimiento bien realizado puede determinar el tiempo medio real de detención para el humedal [57].

La distribución del tiempo de residencia (DTR) se utiliza para caracterizar los reactores químicos. Estos principios básicos de ingeniería de reacción química se pueden aplicar a los humedales debido a que estos son, en realidad, reactores químicos. La DTR representa el tiempo en que varias fracciones de fluido pasan en el reactor; por lo tanto, es la distribución del tiempo de contacto para el sistema. En un contexto más amplio, la DTR es la función de densidad de probabilidad para los tiempos de residencia en un humedal [57].

$$f(t)\Delta t = \begin{array}{l} \text{Fracción del agua entrante que permanece} \\ \text{en el humedal por un período de tiempo} \\ \text{entre } t \text{ y } t + \Delta t \end{array} \quad (D.2)$$

donde:  $f$  = Función DTR [1/d]  
 $t$  = Tiempo [d]

Puede medirse inyectando un impulso de material trazador inerte disuelto en la entrada del humedal y luego midiendo la concentración del marcador en función del tiempo en la salida del humedal. Todo el material trazador ingresa en el tiempo cero. Algunos elementos de este material siguen rutas de alta velocidad a través del humedal y llegan mucho antes del tiempo real de detención real. Otros elementos se retrasan en regiones de movimiento lento y salen del humedal mucho más tarde que el tiempo medio de detención. Típicamente, la última gota de agua sale después de aproximadamente tres tiempos de detención promedio [57].

Asimismo, la DTR se puede utilizar para determinar el grado de reducción de contaminantes en el humedal, siempre que se conozca una ecuación de velocidad de reacción. En la ingeniería química, una ecuación de velocidad volumétrica de primer orden encuentra una aplicación frecuente, la cual también se ha utilizado para el diseño de humedales. La variación de concentración en un reactor batch homogéneo de primer orden está dada por [57]:

$$\frac{C(t)}{C_i} = \exp(-k_v t) \quad (D.3)$$

donde:  $C(t)$  = Concentración del contaminante en un tiempo  $t$  [g/m<sup>3</sup>]  
 $C_i$  = Concentración inicial del contaminante [g/m<sup>3</sup>]  
 $k_v$  = Constante de reacción [1/d]  
 $t$  = Tiempo de reacción [d]

Para un reactor de humedal de flujo continuo, se presume que los elementos de entrada de agua se mueven a través del sistema como "paquetes" individuales no interactivos, lo que describe a un reactor de flujo pistón (PFR). La DTR especifica la duración del tiempo que un paquete pasa en el humedal antes de partir. La concentración restante promedio se determina promediando la distribución de los tiempos de residencia dentro del humedal para obtener rendimiento [57].

$$\frac{C_f}{C_i} = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-k_v t) dt \quad (D.4)$$

donde:  $C_i$  = Concentración del contaminante en la entrada [g/m<sup>3</sup>]  
 $C_f$  = Concentración del contaminante en la salida [g/m<sup>3</sup>]

Se puede usar un procedimiento similar para calcular las concentraciones para una ecuación de tasa de área de primer orden [57].

$$\frac{C}{C_i} = \exp(-k_v t) = \exp\left(-\frac{k_A}{q}\right) \quad (D.5)$$

donde:  $k_A$  = Constante de velocidad basada en el área [m/d]  
 $q$  = Tasa de conductividad hidráulica [m/d]

Se debe tener cierto cuidado al aplicar la ecuación anterior porque la velocidad de conductividad hidráulica puede depender del tiempo de retención de forma no lineal [57]. Cabe recordar que la conductividad hidráulica representa la movilidad de un fluido bajo tierra.

Por otro lado, la reducción de los contaminantes de los humedales a menudo se puede modelar con ecuaciones de la forma de primer orden basadas en el área superficial, a través de un proceso de transferencia de masa [57].

En general, la transferencia de masa se define a través de la siguiente ecuación, que representa la reducción de moles en el tiempo:

$$\frac{dN}{dt} = J \cdot A \quad (D.6)$$

donde:  $N$  = Moles [mol]  
 $J$  = Tasa de reducción [g/m<sup>2</sup>/año]  
 $A$  = Área [m<sup>2</sup>]

Asimismo:

$$\frac{dN}{dt} = V \cdot \frac{dC}{dt} \quad (D.7)$$

donde:  $V$  = Volumen del reactor [m<sup>3</sup>]

Por ende, reemplazando (D.7) en (D.6), se tiene:

$$\frac{dC}{dt} = J \cdot \frac{A}{V} \quad (D.8)$$

Ahora bien, la tasa de reducción se define como la masa que desaparece por metro cuadrado en el tiempo, y se puede definir por la siguiente ecuación:

$$J = k \cdot \Delta C \quad (D.9)$$

En un reactor de flujo pistón, se cumple la siguiente igualdad:

$$\frac{dC}{dt} = q \cdot \frac{dC}{dy} \quad (D.10)$$

donde:  $y$  = Distancia en el eje horizontal [m]

Entonces, reemplazando (D.10) y (D.9) en (D.8), se tiene:

$$q \cdot \frac{dC}{dy} = k \cdot \Delta C \cdot \frac{A}{V} \quad (D.11)$$

Se puede inferir que de la constante de la ecuación anterior se obtiene la constante de velocidad basada en el área que definen Kadlec y Knight (1996) para el diseño de humedales.

Además, la diferencia de concentración, la definieron como la diferencia de la concentración en el tiempo, con lo que se transfiere al fondo [57].

$$J = k \cdot (C - C^*) \quad (D.12)$$

donde:  $C^*$  = Concentración del contaminante en el fondo del humedal [g/m<sup>3</sup>]

Entonces, se tiene un flujo pistón, que lleva a la siguiente ecuación del balance de masa del contaminante [57]:

$$q \left( \frac{dC}{dy} \right) = k_A (C - C^*) \quad (D.13)$$

Al integrar la ecuación anterior se obtiene lo siguiente, considerando desde la entrada hasta la salida ( $y = 1$ ) para el flujo pistón [57]:

$$\frac{C_f - C^*}{C_i - C^*} = \exp\left(-\frac{k_A}{q}\right) = \exp\left(-\frac{k_A \tau}{\varepsilon h}\right) \quad (D.14)$$

donde:  $\varepsilon$  = Porosidad del humedal  
 $h$  = Profundidad del humedal [m]

Considerando que el volumen del humedal puede describirse de la siguiente manera:

$$V = A \cdot \varepsilon \cdot h \quad (D.15)$$

donde:  $A$  = Área es el área superficial del humedal [m<sup>2</sup>]

Además, el tiempo de residencia se puede expresar:

$$\tau = \frac{A \cdot \varepsilon \cdot h}{Q} \quad (\text{D.16})$$

Entonces, reemplazando (D.16) en (D.14), se tiene:

$$\frac{C_f - C^*}{C_i - C^*} = \exp\left(-\frac{k_A A \varepsilon h}{\varepsilon h Q}\right) \quad (\text{D.17})$$

Despejando:

$$A = \frac{Q}{k_A} \ln\left(\frac{C_i - C^*}{C_f - C^*}\right) \quad (\text{D.18})$$

El largo y ancho de los humedales artificiales están son recomendados según Kadlec y Knight (1996) por la siguiente relación [57]:

$$L:W = 1,5:1 \quad (\text{D.19})$$

Donde:  $L$  = Largo [m]  
 $W$  = Ancho [m]

Por ende,

$$W = \sqrt{\frac{A}{1,5}} \quad (\text{D.20})$$

$$L = \frac{A}{W} \quad (\text{D.21})$$

## D.2. Ejemplo de cálculo

A continuación, se realiza un ejemplo de cálculo utilizando los datos del nitrógeno para el caso 1.

Primero, se calcula la constante de velocidad basada en el área.

$$k_{A,N_T} = k_{A,20,N_T} \theta_{N_T}^{T-T_{Ref}} \quad (D.22)$$

$$k_{A,N_T} = 0,07 \left[ \frac{m}{d} \right] \cdot 1,05^{(24,9 [^{\circ}C] - 20 [^{\circ}C])} \quad (D.23)$$

$$k_A = 0,09 \left[ \frac{m}{d} \right] \quad (D.24)$$

Luego, se calcula el área del humedal artificial vertical, considerando que la concentración de salida de éste debe ser el 50% de la de entrada.

$$C_{f1,N_T} = 0,5 \cdot 2.098,2 \left[ \frac{mg}{L} \right] = 1.049,1 \left[ \frac{mg}{L} \right] \quad (D.25)$$

$$A_V = \left( \frac{Q}{k_A} \right) \ln \left( \frac{C_{i,N_T} - C_{N_T}^*}{C_{f1,N_T} - C_{N_T}^*} \right) \quad (D.26)$$

$$A_V = \left( \frac{618,1 \left[ \frac{m^3}{d} \right]}{0,09 \left[ \frac{m}{d} \right]} \right) \ln \left( \frac{2.098,2 \left[ \frac{mg}{L} \right] - 1,5 \left[ \frac{mg}{L} \right]}{1.049,1 \left[ \frac{mg}{L} \right] - 1,5 \left[ \frac{mg}{L} \right]} \right) \quad (D.27)$$

$$A_V = 4.568,7 [m^2] \quad (D.28)$$

Finalmente, se calcula el área del humedal artificial horizontal, se considera que la concentración final es la estipulada por el D.S. n° 90; para el caso del nitrógeno total es 50 [mg/L].

$$A_H = \left( \frac{Q}{k_{A,N_T}} \right) \ln \left( \frac{C_{f1,N_T} - C_{N_T}^*}{C_{f2,N_T} - C_{N_T}^*} \right) \quad (D.29)$$

$$A_H = \left( \frac{618,1 \left[ \frac{m^3}{d} \right]}{0,09 \left[ \frac{m}{d} \right]} \right) \ln \left( \frac{1.049,1 \left[ \frac{mg}{L} \right] - 1,5 \left[ \frac{mg}{L} \right]}{50 \left[ \frac{mg}{L} \right] - 1,5 \left[ \frac{mg}{L} \right]} \right) \quad (D.30)$$

$$A_H = 20.231,8 [m^2] \quad (D.31)$$

Ahora, se deben calcular las concentraciones finales de cada contaminante que se obtienen de un sistema de humedales con las áreas anteriormente obtenidas.

Primero, se calcula la concentración final que se obtiene con el humedal vertical y luego con el horizontal. Se ejemplificará con la DBO<sub>5</sub> saliente de los sedimentadores.

$$C_{f1,DBO_5} = C_{DBO_5}^* + \frac{C_{o,DBO_5} - C_{DBO_5}^*}{\exp\left(\frac{A_V \cdot k_{A,DBO_5}}{Q}\right)} \quad (D.32)$$

$$C_{f1,DBO_5} = 21,7 \left[ \frac{mg}{L} \right] + \left( \frac{344,2 \left[ \frac{mg}{L} \right] - 21,7 \left[ \frac{mg}{L} \right]}{\exp\left(\frac{4.568,7[m^2] \cdot 0,5 \left[ \frac{m}{d} \right]}{292,0 \left[ \frac{m^3}{d} \right]}\right)} \right) \quad (D.33)$$

$$C_{f1,DBO_5} = 21,9 \left[ \frac{mg}{L} \right] \quad (D.34)$$

Asimismo, se debe calcular la concentración final de la DBO<sub>5</sub> obtenida desde el humedal artificial horizontal.

$$C_{f2,DBO_5} = C_{DBO_5}^* + \frac{C_{f1,DBO_5} - C_{DBO_5}^*}{\exp\left(\frac{A_H \cdot k_{A,DBO_5}}{Q}\right)} \quad (D.35)$$

$$C_{f2,DBO_5} = 21,7 \left[ \frac{mg}{L} \right] + \left( \frac{21,8 \left[ \frac{mg}{L} \right] - 21,7 \left[ \frac{mg}{L} \right]}{\exp\left(\frac{20.231,8[m^2] \cdot 0,5 \left[ \frac{m}{d} \right]}{292,0 \left[ \frac{m^3}{d} \right]}\right)} \right) \quad (D.36)$$

$$C_{f2,DBO_5} = 21,7 \left[ \frac{mg}{L} \right] \quad (D.37)$$

Así, se comprueba que las áreas seleccionadas sirven teóricamente para disminuir los contaminantes de los lixiviados del relleno sanitario.

Ahora, se debe determinar los largo y ancho de los humedales artificiales seleccionados, se sigue la siguiente relación (ecuación D.19):

$$L: W = 1,5: 1$$

Se ejemplificará con las dimensiones del humedal vertical.

$$W_V = \sqrt{\frac{A_V}{1,5}} \quad (D.38)$$

$$W_V = \sqrt{\frac{4.568,7 [m^2]}{1,5}} \quad (D.39)$$

$$W_V = 55,2[m] \tag{D.40}$$

$$L_V = \frac{A_V}{W_V} \tag{D.41}$$

$$L_V = \frac{4.568,7[m^2]}{55,2[m]} \tag{D.42}$$

$$L_V = 82,8 [m] \tag{D.43}$$



### D.3. Concentraciones finales para cada área

Tabla 32: Concentraciones finales de cada contaminante calculadas para cada área obtenida. En rojo aquellas que se encuentran fuera de lo estipulado en el D.S. n° 90.

Caso 1: Sistema paralelo			Caso 2: Sistema Complementario		
<b>Concentraciones con el área que disminuye la DBO<sub>5</sub></b>					
<b>Concentraciones [mg/L]</b>	<b>C<sub>f1</sub></b>	<b>C<sub>f2</sub></b>	<b>Concentraciones [mg/L]</b>	<b>C<sub>f1</sub></b>	<b>C<sub>f2</sub></b>
DBO <sub>5</sub>	723,6	-	DBO <sub>5</sub>	206,5	35
SST	19,5	-	SST	48,4	48,3
N <sub>T</sub>	1.889,4	-	N <sub>T</sub>	1.465,9	1.000,6
P <sub>s</sub>	19,4	-	P <sub>s</sub>	20,3	17,1
<b>Concentraciones con el área que disminuye los SST</b>					
<b>Concentraciones [mg/L]</b>	<b>C<sub>f1</sub></b>	<b>C<sub>f2</sub></b>	<b>Concentraciones [mg/L]</b>	<b>C<sub>f1</sub></b>	<b>C<sub>f2</sub></b>
DBO <sub>5</sub>	1.151,5	1.139,3	DBO <sub>5</sub>	329,5	292,2
SST	92,6	80	SST	321,4	80
N <sub>T</sub>	2.078,7	2.056,3	N <sub>T</sub>	1.578,4	1.549,1
P <sub>s</sub>	20,1	20,0	P <sub>s</sub>	21,0	20,9
<b>Concentraciones con el área que disminuye el Nt</b>					
<b>Concentraciones [mg/L]</b>	<b>C<sub>f1</sub></b>	<b>C<sub>f2</sub></b>	<b>Concentraciones [mg/L]</b>	<b>C<sub>f1</sub></b>	<b>C<sub>f2</sub></b>
DBO <sub>5</sub>	97,2	67,4*	DBO <sub>5</sub>	24,4	21,7
SST	19,5	19,5	SST	48,3	48,3
N <sub>T</sub>	1.049,1	50	N <sub>T</sub>	794,6	50
P <sub>s</sub>	15,8	5,4	P <sub>s</sub>	15,4	4,3
<b>Concentraciones con el área que disminuye el Pt</b>					
<b>Concentraciones [mg/L]</b>	<b>C<sub>f1</sub></b>	<b>C<sub>f2</sub></b>	<b>Concentraciones [mg/L]</b>	<b>C<sub>f1</sub></b>	<b>C<sub>f2</sub></b>
DBO <sub>5</sub>	67,9	67,5	DBO <sub>5</sub>	21,9	21,7
SST	19,5	19,5	SST	48,3	48,3
N <sub>T</sub>	488,2	275,0	N <sub>T</sub>	523,0	302,2
P <sub>s</sub>	12,1	10	P <sub>s</sub>	12,7	10

\* Valor fuera de la norma se debe sólo al supuesto de que la concentración de fondo es mayor a la de salida, lo que no es factible, por ende, no se considera.

## 14.5. Anexo E: Evaluación económica

### E.1. Costos de inversión

#### E.1.1. Sustrato

Para el desarrollo de los costos obtenidos, primero hay que determinar el volumen que ocupa cada sustrato en el humedal artificial correspondiente, que se obtiene al calcular el espesor de la capa de cada sustrato por el área del humedal, lo que resulta en los datos de la Tabla 33:

Tabla 33: Volumen ocupado por cada sustrato en los humedales artificiales.

Humedal	Medio [mm]	Espesor [m]	Volumen ocupado[m <sup>3</sup> ]
VSSF	Arena (0 - 7)	0,2	913,7
	Zeolita (0,8 - 2)	0,1	456,9
	Grava (7 - 15)	0,15	685,3
	Grava (15 - 30)	0,15	685,3
HSSF	Grava (7 - 15)	0,6	12.139,1

Entonces, se debe multiplicar el volumen obtenido por el precio de venta. En este caso, se analiza por separado la zeolita, ya que su formato de venta es diferente al de la arena y grava.

Tabla 34: Costos de inversión de los sustratos, a excepción de la zeolita.

Humedal	Medio [mm]	Volumen ocupado[m <sup>3</sup> ]	Costo por m <sup>3</sup> [CLP]	Costo total [CLP]	Referencia
VSSF	Arena (0 - 7)	913,7	20.000	18.274.764	[63]
	Grava (7 - 15)	685,3	13.500	9.251.599	[63]
	Grava (15 - 30)	685,3	12.600	8.634.826	[63]
HSSF	Grava (7 - 15)	12.139,1	13.500	163.877.886	[63]

Ahora bien, Andes Zeolites [62] vende zeolita con un precio de 400.000 [CLP] la tonelada. La densidad aparente de la zeolita es en promedio 0,71 [gr/m<sup>3</sup>] (según granulometría) [83]. Por ende, la tonelada de zeolita se calcula de la siguiente manera:

$$Tonelada_{zeolita} = 0,71 \left[ \frac{g}{cm^3} \right] \cdot \left[ \frac{100^3 cm^3 \cdot 1 kg}{1 m^3 \cdot 1.000 g} \right] \cdot \left[ \frac{1 ton}{1.000 kg} \right] \cdot 600,2 [m^3] = 426,2 [ton]$$

Entonces, el costo total por la zeolita se encuentra en la Tabla 35:

Tabla 35: Costos para la zeolita.

Humedal	Medio [mm]	Toneladas requeridas [ton]	Costo por tonelada [CLP]	Costo total [CLP]	Referencia
VSSF	Zeolita (0,8 - 2)	426,2	400.000	129.750.823	[62]

Por ende, el costo total asociado a la adquisición del sustrato corresponde a 329.789.898 [CLP].

### E.1.2. Plantas

Como se mencionó en la sección 6.4.2, cada humedal requiere de un número específico de plantas por metro cuadrado. Dada las características contaminantes del afluente, se requiere gran acción de las plantas en el tratamiento del lixiviado, por lo que se considerará la cota superior para el asentamiento de las plantas, es decir, 4 plantas por metro cuadrado en el humedal VSSF y de 2 plantas por metro cuadrado en el humedal HSSF.

Los costos de estas plantas se encuentran señalados en la Tabla 36.

Tabla 36: Costos de inversión de las plantas.

Humedal	Especie	Cantidad de plantas por m <sup>2</sup>	Cantidad de plantas por humedal	Costo unitario [CLP]	Costo total [CLP]	Referencia
VSSF	<i>Phragmites australis</i>	4	18.275	3.000	54.824.291	[64]
HSSF	<i>Typha angustifolia</i>	2	40.464	3.000	121.391.027	[65]

Por ende, la inversión en plantas es de 176.215.318 [CLP].

### E.1.3. Geomembranas

Se realizó una cotización en la empresa Geosintéticos [66]. Se utilizarán geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1 mm de espesor, que tienen un costo 1.340 [CLP] el metro cuadrado. En la Tabla 37, se muestran los costos de las geomembranas para cada humedal.

Tabla 37: Costos de inversión de las geomembranas.

Humedal	Área [m <sup>2</sup> ]	Costo por m <sup>2</sup> [CLP]	Costo total [CLP]	Referencia
VSSF	4.568,7	1.340	6.122.046	[66]
HSSF	20.231,8	1.340	27.110.663	[66]

Por ende, la inversión de las geomembranas es de 33.232.708 [CLP].

### E.1.4. Construcción

La construcción corresponde a la preparación del terreno donde se instalarán los humedales artificiales.

Se realizó una cotización en la empresa de Ingeniería y Construcción Elimaq [67], que incluye la maquinaria y mano de obra necesaria para cada humedal.

En las Tablas 38 y 39 se detallan todos los costos asociados a esta excavación.

Tabla 38: Detalle de la cotización para la construcción del humedal VSSF.

<b>A) Maquinarias</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario [CLP]</b>	<b>Costo Total [CLP]</b>
Retroexcavadora (Excavación)	hr	120	20.000	2.400.000
Retroexcavadora (Carguío excedentes)	hr	120	20.000	2.400.000
Camión (Retiro Excedentes a 10 km)	hr	120	18.750	2.250.000
Retroexcavadora (Relleno Material Estrato)	hr	120	20.000	2.400.000
<b>SUBTOTAL MAQUINARIA \$</b>				<b>9.450.000</b>
<b>B) Obra de mano</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rendición</b>	<b>Costo unitario [CLP]</b>	<b>Costo Total [CLP]</b>
4 jornales	dia	30	63.636	1.909.091
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA \$</b>				<b>1.909.091</b>
<b>C) Leyes sociales ____%</b>	<b>SUBTOTAL LEYES SOCIALES \$</b>			<b>553.636</b>
<b>D) Total costo directo (A + B+ C)</b>				<b>11.912.727</b>
	15%	Gastos generales		1.786.909
	20%	Utilidad		2.382.545
		Valor neto		16.082.182
		IVA		3.055.615
		<b>Total</b>		<b>19.137.796</b>

Tabla 39: Detalle de la cotización de la construcción del humedal HSSF.

<b>A) Maquinarias</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario [CLP]</b>	<b>Costo Total [CLP]</b>
Retroexcavadora (Excavación)	hr	532	20.000	10.640.000
Retroexcavadora (Carguío excedentes)	hr	532	20.000	10.640.000
Camión (Retiro Excedentes a 10 km)	hr	532	18.750	9.975.000
Retroexcavadora (Relleno Material Estrato)	hr	532	20.000	10.640.000
<b>SUBTOTAL MAQUINARIA \$</b>				<b>41.895.000</b>
<b>B) Obra de mano</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rendición</b>	<b>Costo unitario [CLP]</b>	<b>Costo Total [CLP]</b>
4 jornales	dia	90	63.636	5.727.273
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA \$</b>				<b>5.727.273</b>
<b>C) Leyes sociales ____%</b>				<b>1.660.909</b>
<b>D) Total costo directo (A + B+ C)</b>				<b>49.283.182</b>
	15%	Gastos generales		4.928.318
	20%	Utilidad		9.856.636
		Valor neto		64.068.136
		IVA		12.172.946
		<b>Total</b>		<b>76.241.082</b>

Por ende, el costo de inversión asociado a la construcción corresponde a 95.378.879 [CLP].

#### E.1.5. Piping

Para calcular el costo de inversión del *piping*, se supone que esto corresponde a un 3% de la inversión total, dado que este sistema de tratamiento cuenta con pocas cañerías y bombas. Entonces, se considera que la suma de todos los costos anteriores corresponde al 97% de la inversión total, por lo tanto, los costos para el *piping* de cada humedal artificial son:

Tabla 40: Costo de inversión del *piping* para cada humedal artificial.

<b>Humedal</b>	<b>Factor</b>	<b>Costo Total [CLP]</b>
<b>VSSF</b>	3%	7.608.128
<b>HSSF</b>	3%	12.019.196

Por lo tanto, los costos de inversión totales para el *piping* son de 19.627.324 [CLP].

## E.2. Costos de operación

Para la estimación de los costos de operación, se consideró el costo total de operación del sistema actual de tratamiento, lo que corresponde a 476 [CLP/m<sup>3</sup>] [10]. A este valor se encuentran descontados los costos referentes a la mano de obra, la recirculación del efluente – correspondiente a la operación de la flota de camiones – y la energía eléctrica, asociada principalmente al tratamiento biológico.

Entonces, el costo anual del sistema con humedales artificiales se obtuvo al multiplicar el costo por metro cúbico con el caudal diario de operación propuesto, 812 [m<sup>3</sup>/día].

Además, se debe incluir el costo por mano de obra de un operario que trabaje sólo en el nuevo sistema de tratamiento. En la Tabla 41 se muestra el detalle de los costos de operación anuales.

*Tabla 41: Costos de operación anuales asociados al sistema de tratamiento con humedales artificiales.*

<b>Ítem</b>	<b>[CLP/año] [10]</b>
<b>Costo anual del sistema con humedales artificiales</b>	105.900.480
<b>Mano de obra (un operario)</b>	11.676.000

Por ende, el costo de operación anual asciende a 117.576.480 [CLP/año] al considerar el costo por metro cúbico de la empresa.

### E.3. Flujo de caja

Se consideraron los siguientes supuestos para la confección del flujo de caja:

- El horizonte de evaluación es de 15 años, basado en la vida útil de los humedales artificiales.
- Se estudia la confección con al optar a un crédito por la inversión fija a con cuotas fijas a 10 años y tasa de interés del 6%.
- Los ahorros y costos de operación (OPEX) se mantienen constantes en el tiempo.
- No se considera depreciación, dada las características del sistema.
- No hay valor residual debido a que no se pueden vender los ítems de la inversión al finalizar el horizonte de evaluación.
- El capital de trabajo es igual a dos meses de los costos de operación (OPEX).
- No se consideran reinversiones al sistema.
- La tasa de descuento es del 15% (recomendación de la empresa, tasa utilizada en el rubro).

En la siguiente tabla se muestra la evaluación mediante el flujo de caja.

Tabla 42: Flujo de caja del proyecto sin financiamiento. Los valores se encuentran en pesos chilenos [CLP].

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
(+) Ahorros de compra de agua potable		12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559
(+) Ahorro compra de agua lavado camiones		4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987
(+) Ahorros por recirculación al relleno		23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443
(-) OPEX		-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000
(-) Pago Interés crédito																
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital																
(-) Depreciaciones																
(-) Pérdidas ejercicio anterior																
(=) Utilidad antes de Impuesto		29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988
(-) Impuesto (20%)																
(=) Utilidad después de Impuesto		29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988
(+) Depreciaciones																
(-/+ ) Ganancias/pérdidas de Capital																
(+) Pérdida ejercicio anterior																
(=) Flujo de caja Operacional		29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988
(-) Inversiones	-654.244.127															
(-) IVA de la inversión	-124.306.384															
(+) Recuperación del IVA de la inversión		124.306.384														
(+) Valor Residual de los activos																
(-) Capital de trabajo	-1.946.000															
(+) Recuperación del Capital de Trabajo																1.946.000
(+) Préstamos																
(-) Amortizaciones																
(=) Flujo de Capitales	-780.496.511	124.306.384														1.946.000
Flujo de caja Neto	-780.496.511	153.716.372	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	31.355.988



Tabla 43: Flujo de caja del proyecto con financiamiento. Los valores se encuentran en pesos chilenos [CLP].

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
(+) Ahorros de compra de agua potable		12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559	12.207.559
(+) Ahorro compra de agua lavado camiones		4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987	4.914.987
(+) Ahorros por recirculación al relleno		23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443	23.963.443
(-) OPEX		-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000	-11.676.000
(-) Pago Interés crédito		-27.478.253	-25.393.534	-23.183.732	-20.841.342	-18.358.408	-15.726.499	-12.936.674	-9.979.461	-6.844.814	-3.522.089	-	-	-	-	-
(+/-) Ganancias/pérdidas de Capital																
(-) Depreciaciones																
(-) Pérdidas ejercicio anterior			1.931.735	5.948.188	12.174.444	20.743.090										
(=) Utilidad antes de Impuesto		1.931.735	5.948.188	12.174.444	20.743.090	31.794.670	13.683.489	16.473.314	19.430.527	22.565.174	25.887.899	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988
(-) Impuesto (20%)																
(=) Utilidad después de Impuesto		1.931.735	5.948.188	12.174.444	20.743.090	31.794.670	13.683.489	16.473.314	19.430.527	22.565.174	25.887.899	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988
(+) Depreciaciones																
(-/+ ) Ganancias/pérdidas de Capital																
(+) Pérdida ejercicio anterior			-1.931.735	-5.948.188	-12.174.444	-20.743.090										
(=) Flujo de caja Operacional		1.931.735	4.016.454	6.226.256	8.568.646	11.051.580	13.683.489	16.473.314	19.430.527	22.565.174	25.887.899	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988
(-) Inversiones	-654.244.127															
(-) IVA de la inversión	-124.306.384															
(+) Recuperación del IVA de la inversión		124.306.384														
(+) Valor Residual de los activos																
(-) Capital de trabajo	-1.946.000															
(+) Recuperación del Capital de Trabajo																1.946.000
(+) Préstamos	457.970.889															
(-) Amortizaciones		-34.745.316	-36.830.035	-39.039.837	-41.382.228	-43.865.161	-46.497.071	-49.286.895	-52.244.109	-55.378.755	-58.701.481					
(=) Flujo de Capitales	-322.525.622	89.561.068	-36.830.035	-39.039.837	-41.382.228	-43.865.161	-46.497.071	-49.286.895	-52.244.109	-55.378.755	-58.701.481					1.946.000
Flujo de caja Neto	-322.525.622	91.492.803	-32.813.582	-32.813.582	-32.813.582	-32.813.582	-32.813.582	-32.813.582	-32.813.582	-32.813.582	-32.813.582	29.409.988	29.409.988	29.409.988	29.409.988	31.355.988

## 14.6. Anexo F: Evaluación ambiental

La valoración de cada impacto se mide a través de tres parámetros: magnitud, temporalidad y naturaleza del impacto.

La magnitud ( $M$ ), se refiere a la significancia que tiene el impacto resultante, considerándose beneficioso, dañino o neutro. Se cuantifica de la siguiente manera [84]:

- 0: Sin significancia, la magnitud del impacto no tiene importancia.
- 1: Significancia menor, la magnitud del impacto es baja y habrá recuperación inmediata del medio tras el cese de la acción.
- 2: Significancia moderada, la magnitud del impacto es aceptable, habiendo recuperación del medio en un cierto tiempo, o bien, el impacto se detiene.
- 3: Significancia mayor, la magnitud del impacto es alta, la recuperación del medio requiere tiempo y acciones adicionales.

La temporalidad ( $T$ ), corresponde al horizonte de tiempo entre la acción y la manifestación del impacto. Puede ser a largo, mediano o corto plazo y se cuantifica de la siguiente manera [84]:

- 1: Largo plazo.
- 2: Mediano plazo.
- 3: Corto plazo.

La naturaleza del impacto ( $N$ ) demuestra el carácter del impacto, es decir, si mejora o deteriora la condición original del ambiente. Se valora de la siguiente manera [84]:

- +1: Positivo. Implica un mejoramiento del componente ambiental.
- 0: Neutro. La acción no produce un impacto en el ambiente o no se relaciona con el componente ambiental.
- -1: Negativo. Implica un deterioro del componente ambiental.

Para obtener el indicador, se deben multiplicar los tres parámetros de cada componente ambiental y luego, sumar estos valores, como se señala en la siguiente ecuación.

$$I = \sum_i^n M_i \cdot T_i \cdot N_i$$

A continuación, se muestran las tablas de interacción construidas para la situación actual y la situación con proyecto.

Tabla 44: Indicador de impacto ambiental de la situación actual.

Componente ambiental		Impacto ambiental	M	T	N	M · T · N
Medio físico	Calidad del aire	Cambio en la emisión de gases de efecto invernadero generados por la empresa debido a los humedales artificiales	1	1	-1	-1
		Emisión de olores contaminantes del relleno sanitario	1	2	-1	-2
	Geología - Geomorfología	Desestabilización del relleno sanitario	3	2	0	0
	Recursos hídricos	Aumento en el volumen y concentración de lixiviados	3	2	-1	-6
		Contaminación de napas subterráneas por filtración	3	1	-1	-3
	Suelo	Contaminación de suelo por filtración	3	1	-1	-3
	Paisaje	Alteración de la calidad del paisaje visible	1	3	0	0
Medio biótico	Vegetación y flora	Introducción de especies vegetales al ecosistema	0	3	0	0
	Fauna terrestre	Llegada de fauna al terreno	2	3	0	0
	Biota acuática	Llegada de biota acuática al terreno	0	3	0	0
Medio humano	Dimensión socioeconómica	Modificación sobre la demanda de mano de obra	0	3	0	0
		Cambio en la energía utilizada	2	2	-1	-4
	Dimensión social-bienestar	Modificación de la calidad de vida de los trabajadores	1	3	0	0
Medio vial	Infraestructura vial	Cambio en la emisión de gases de efecto invernadero generados por la empresa	1	2	-1	-2
						<b>-21</b>

Tabla 45: Indicador de impacto ambiental de la situación con proyecto.

Componente ambiental		Impacto ambiental	M	T	N	M · T · N
Medio físico	Calidad del aire	Cambio en la emisión de gases de efecto invernadero generados por la empresa debido a los humedales artificiales	1	1	-1	-1
		Emisión de olores contaminantes del relleno sanitario	1	2	1	2
	Geología - Geomorfología	Desestabilización del relleno sanitario	3	2	1	6
	Recursos hídricos	Aumento en el volumen y concentración de lixiviados	3	2	1	6
		Contaminación de napas subterráneas por filtración	3	1	0	0
	Suelo	Contaminación de suelo por filtración	3	1	0	0
	Paisaje	Alteración de la calidad del paisaje visible	1	3	1	3
Medio biótico	Vegetación y flora	Introducción de especies vegetales al ecosistema	0	3	1	0
	Fauna terrestre	Llegada de fauna al terreno	2	3	-1	-6
	Biota acuática	Llegada de biota acuática al terreno	0	3	1	0
Medio humano	Dimensión socioeconómica	Modificación sobre la demanda de mano de obra	0	3	1	0
		Cambio en la energía utilizada	2	2	1	4
	Dimensión social-bienestar	Modificación de la calidad de vida de los trabajadores	1	3	1	3
Medio vial	Infraestructura vial	Cambio en la emisión de gases de efecto invernadero generados por la empresa	1	2	1	2
						<b>19</b>