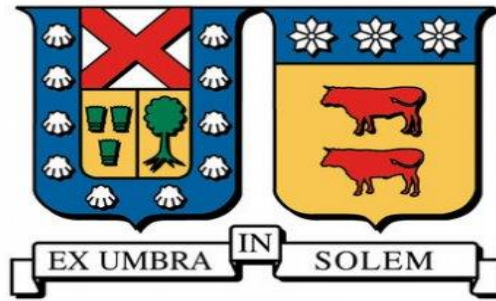


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

VALPARAÍSO-CHILE



**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y PROPUESTA DE MEJORA
PARA LA GESTIÓN DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES.**

CASO APLICADO: ESVAL S.A.

FRANCISCA ANDREA VILLARROEL GONZÁLEZ

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL**

PROFESOR GUÍA: SR. FREDY KRISTJANPOLLER RODRIGUEZ
PROFESOR CORREFERENTE: SR. ALONSO CONTRERAS IRARRÁZAVAL

SEPTIEMBRE 2018

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	AGRADECIMIENTOS.....	7
2.	RESUMEN EJECUTIVO	9
3.	INTRODUCCIÓN.....	12
4.	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
4.1.	Descripción de problemática	13
4.2.	Objetivos.....	14
4.2.1.	Objetivo General.....	14
4.2.2.	Objetivos específicos	14
4.3.	Alcance	15
4.4.	Metodología.....	15
5.	ANTECEDENTES GENERALES.....	17
5.1.	Tratamiento de Aguas Residuales	17
5.2.	Tratamiento de Lodos.....	19
5.3.	Contexto	23
5.3.1.	Contexto Nacional Tratamiento de Aguas Residuales	23
5.3.2.	Contexto Mundial Tratamiento de Lodos.....	24
5.3.3.	Contexto Nacional Tratamiento de Lodos.....	26
5.4.	Marco Legal.....	28
6.	CASO APLICADO: ESVAL S.A.	31
6.1.	Antecedentes de Esval S.A.....	31
6.1.1.	Tipos de tratamientos de aguas servidas utilizados por Esval S.A.....	33
6.1.2.	Tratamiento de lodos en Esval.....	34
6.1.3.	Análisis situación actual	39
6.2.	Análisis de alternativas.....	44
6.2.1.	Digestión aeróbica	45
6.2.2.	Digestión anaeróbica	46
6.2.3.	Compostaje	47
6.2.4.	Secado Solar	47
6.2.5.	Secado térmico	65
6.3.	Evaluación de riesgos	74
6.3.1.	Riesgos negativos	75
6.3.2.	Riesgos positivos	76
6.4.	Sistemas múltiples	77
7.	RESULTADOS	79

7.1.	Análisis de sensibilidad	80
7.1.1.	Variación de la inversión.....	80
8.	CONCLUSIONES.....	84
9.	GLOSARIO	88
10.	REFERENCIAS	90
11.	ANEXOS.....	94
11.1.	Mapas referenciales	94
11.2.	Flujos de caja	95
11.3.	Análisis y cálculos	98

ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1:	Fases de realización del proyecto.	16
Imagen 2:	Ubicación geográfica satelital de PTAS Cordillera.....	35
Imagen 3:	Ubicación geográfica satelital de PTAS Almendral.....	36
Imagen 4:	Ubicación geográfica satelital de PTAS El Molino.	37
Imagen 5:	Ubicación geográfica satelital de PTAS Maitenes.	38
Imagen 6:	Diagrama de Flujo manejo de lodos PTAS Cordillera, El Almendral y Maitenes.	38
Imagen 7:	Diagrama de Flujo manejo de lodos PTAS El Molino.....	39
Imagen 8:	Secado solar con gestor de lodos.....	48
Imagen 9:	Secado solar con topo eléctrico.	49
Imagen 10:	Secado térmico de intercambio de calor directo.....	71
Imagen 11:	Mapa de ubicación de las PTAS a analizar y vertedero KDM.....	94
Imagen 12:	Mapa de ubicación de potenciales plantas de Secado solar con gestor de lodos y Secado solar con topo.	94
Imagen 13:	Mapa de ubicación de potenciales plantas de Secado térmico directo con vapor.	95
Imagen 14:	Coeficientes para cálculo de proyección de lodos El Molino.	98
Imagen 15:	Coeficientes para cálculo de proyección de lodos El Almendral.	98
Imagen 16:	Coeficientes para cálculo de proyección de lodos Cordillera.	98
Imagen 17:	Coeficientes para cálculo de proyección de lodos Maitenes.	98
Imagen 18:	Solicitud Laboratorio de Química para El Molino y El Almendral.	100

Imagen 19: Resultados Laboratorio de Química para El Molino y El Almendral.	100
Imagen 20: Solicitud Laboratorio de Química para Cordillera y Los Maitenes.	101
Imagen 21: Resultados Laboratorio de Química para Cordillera y Los Maitenes.	101
Imagen 22: Resultados Laboratorio de Termodinámica para El Molino.	102
Imagen 23: Resultados Laboratorio de Termodinámica para El Almendral.	102
Imagen 24: Resultados Laboratorio de Termodinámica para Cordillera.	103
Imagen 25: Resultados Laboratorio de Termodinámica para Maitenes.	103

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Proyección cantidad de lodo [ton/año].	41
Gráfico 2: Radiación Alemania, Talca y PTAS El Molino.	50
Gráfico 3: Área requerida [m ²] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar evaluación general.	51
Gráfico 4: Inversión requerida [UF] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar evaluación general.	53
Gráfico 5: Área requerida [m ²] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar con gestor de lodos.	59
Gráfico 6: Inversión requerida [UF] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar con topo.	63
Gráfico 7: Inversión requerida [UF] por cantidad de lodo producido [ton], Secado térmico directo con vapor.	72
Gráfico 8: Sensibilización variando la inversión, Secado térmico directo con vapor.	80
Gráfico 9: Sensibilización variando la cantidad de lodo producida, Secado térmico directo con vapor.	81
Gráfico 10: Ahorro en costo operacional [UF] por periodo de tiempo [año] al implementar Secado térmico directo con vapor.	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados alternativa óptima para la gestión de lodos.	11
Tabla 2: Ejemplo de procesos por método de tratamiento.	20
Tabla 3: N° de sistemas por cada tecnología a nivel nacional.	24
Tabla 4: Datos de Operación Esval.	32
Tabla 5: Cantidad de agua tratada [m ³ /año].	34

Tabla 6: Cantidad de lodo producido [Ton].	39
Tabla 7: Costos de transporte y disposición por tonelada de lodo producido.	40
Tabla 8: Distancia entre PTAS y KDM [km].	40
Tabla 9: Estimación de cantidad de lodos producidos 2017, 2018, 2019 y 2020.	41
Tabla 10: Proyección de gastos de transporte y disposición de lodos.	42
Tabla 11: Costo por encalado	43
Tabla 12: VAC situación sin proyecto.	43
Tabla 13: Aspectos relevantes de cada tecnología a analizar.	44
Tabla 14: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado solar evaluación general.	53
Tabla 15: Distancia entre PTAS [km].	54
Tabla 16: Costo de transporte [UF/ton-km].	54
Tabla 17: Combinación de alternativas y costo de transporte entre PTAS [UF/ton].	55
Tabla 18: Indicadores económicos Secado solar evaluación general.	56
Tabla 19: Área requerida y cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado solar evaluación general.	57
Tabla 20: Área, inversión y costos operacional requerida por módulos.	59
Tabla 21: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado solar con gestor de lodos.	60
Tabla 22: Indicadores económicos Secado solar con gestor de lodos.	60
Tabla 23: N° de módulos, área requerida y cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado solar con gestor de lodos.	61
Tabla 24: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado solar con topo.	64
Tabla 25: Indicadores económicos proyecto Secado solar con topo.	64
Tabla 26: Cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado solar con topo.	65
Tabla 27: Resultados análisis laboratorio para evaluación de secado térmico.	67
Tabla 28: Ahorro en generación de vapor en secado térmico.	68
Tabla 29: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado térmico evaluación general.	69
Tabla 30: Indicadores económicos proyecto Secado térmico.	70
Tabla 31: Cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado térmico.	70

Tabla 32: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado térmico directo con vapor.	73
Tabla 33: Indicadores económicos proyecto, Secado térmico directo con vapor.	73
Tabla 34: Cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado térmico directo con vapor.....	74
Tabla 35: Indicadores económicos para 1 y 2 secadores adicionales, Secado térmico directo con vapor.	74
Tabla 36: Matriz de nivel de impacto del riesgo.	76
Tabla 37: Indicadores económicos proyecto Secado múltiple.	78
Tabla 38: Indicadores económico situación actual y situaciones con proyecto.	79
Tabla 39: Ahorro en costo operacional [UF] por periodo de tiempo [año] al implementar alternativa óptima.	83
Tabla 40: Cálculo VAC situación actual (sin proyecto).....	95
Tabla 41:Flujo de caja implementación tecnología de secado solar evaluación general.	95
Tabla 42: Flujo de caja implementación tecnología de secado solar con gestor de lodos. ..	96
Tabla 43: Flujo de caja implementación tecnología de secado solar con topo.....	96
Tabla 44: Flujo de caja implementación tecnología de secado térmico evaluación general.	97
Tabla 45: Flujo de caja implementación tecnología de secado térmico directo con vapor..	97
Tabla 46: Resultados proyección de cantidad de lodos por PTAS.....	99
Tabla 47: Cotización Huber.....	99
Tabla 48: Cotización Enercom	99

1. AGRADECIMIENTOS

“Siempre hay que encontrar el tiempo para agradecer a las personas que hacen una diferencia en nuestras vidas”.

Agradezco a mi madre Mirtha González de la Hoz por motivarme a seguir adelante cuando los días se veían más difíciles. Por consentirme, abrazarme y apoyarme cada vez que lo necesitaba, cuando ya no quedaban ganas de estudiar, estar ahí para regalarme con los gustos más raros que se me pudieran ocurrir a cualquier hora del día. Gracias por esperarme todas las noches para conversar como estuvo el día y compartir en familia, ya que al final del día eso es lo más importante.

Agradezco a mi melliza Fernanda Villarroel González y mi hermano menor Ricardo Villarroel González; los “enanos” con quienes he compartido las mejores aventuras, juegos, vacaciones, películas, peleas, miedos y sobre todo cuidar a nuestra Pompita, sé que seguiremos sumando vivencias juntos durante toda la vida.

Agradezco a mi padre, Ricardo Villarroel Carriel, por darme las herramientas necesarias para poder cumplir este objetivo y por poner como un desafío el entrar a la Santa María y estudiar Ingeniería Civil Industrial. Sobre todo, agradezco el que me haya motivado a realizar el deporte que hoy en día tanto me llena dentro como fuera de la Universidad.

Agradezco a toda mi familia, a cada uno de los que estuvo presente, todos entregaron una parte de sus vidas para formar la mía.

Agradezco a mis amigos del colegio y de la universidad, a los atletas, las fondistas y mis entrenadores por hacer mi paso por la Universidad mucho más grato y entretenido.

Agradezco a Alonso Contreras Irarrázaval y a la empresa Esval, por darme la oportunidad de poder realizar mi memoria en un ambiente de trabajo en el cual me sentí cómoda y apoyada en todo momento.

Agradezco a mi profesor guía Fredy Kristjanpoller, por confiar en mí y siempre tener una buena disposición para ayudarme a desarrollar mi memoria, muy pocas veces se conoce a profesores como él, que enseñen con tanta entrega y dedicación.

Dedico mi memoria a la persona más especial en mi vida, mi madre Mirtha González de la Hoz, quien con todo su cariño y paciencia entrega su día a día para que yo sea una mejor persona, sin ella no hubiese podido llegar a donde estoy ahora.

“La vida es como una maratón, a veces corres más rápido y otras más lento incluso quieres abandonar, pero una vez que has llegado a la meta sabes que todo el camino recorrido y esfuerzo valió la pena”

2. RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio plantea el análisis de distintas alternativas para la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales enfocándose en la disminución de gastos asociados al transporte y disposición de estos. Los lodos generan una problemática en cuanto a la composición que estos poseen, debido a que su porcentaje de humedad es muy alto (en promedio un 75%), por lo que al momento de gestionarlos se está transportando y disponiendo en su mayoría agua.

Es por esto, que con el fin de disminuir los costos actuales en la gestión de lodos (también llamados biosólidos) se investiga y estudia distintas tecnologías disponibles en el mercado de tal manera de contar con información y antecedentes sobre la gestión de lodos a nivel mundial y nacional. Con los antecedentes obtenidos se acota la investigación al análisis de 3 métodos (estabilización, secado y disposición), que involucran distintos tratamientos y tecnologías que pueden ser aplicados en el país (bajo sus condiciones legales y ambientales), los cuales son: digestión aeróbica, digestión anaeróbica, secado solar, secado térmico y compostaje.

Para la obtención de información relevante de cada tecnología tales como costo de inversión, área requerida, costos operacionales, entre otros; se investigan proyectos similares y se contacta distintas empresas que provean las tecnologías construyéndose de tal manera una base de datos destinada al análisis y evaluación del proyecto.

Se desarrolla un caso práctico para la empresa Esval, empresa que ofrece servicios sanitarios en la IV y V región del país. Esval cuenta con un gran número de plantas de tratamiento de agua potable y aguas servidas, sin embargo, para el análisis del estudio a realizar se consideran 4 plantas de tratamiento de aguas servidas, las cuales ocupan el sistema

de lodos activos como proceso de tratamiento (Planta El Molino, Cordillera, El Almendral y Maitenes). Para poder evaluar la incorporación de distintas tecnologías en cada una de las plantas se requiere realizar un análisis químico-biológico a los lodos producidos por estas y un análisis económico que se ajuste a las condiciones establecidas por la empresa. Para esto se establece una situación actual con la cantidad de lodo y los costos correspondientes sin proyecto y una situación con proyecto (incorporando tecnologías en la cadena operacional).

En primera instancia se evalúan las alternativas con los lodos producidos solo por las plantas mencionadas (lodos activos), y luego se consideran todos los lodos generados por la empresa en diferentes sistemas (lodos activos y lagunas aireadas), esto debido a los posibles cambios normativos que podrían generarse en los próximos 15 años. Para complementar este estudio se identifican los riesgos negativos que podrían amenazar el cumplimiento de los objetivos y los riesgos positivos que podrían favorecer al cumplimiento de los objetivos.

Con los resultados obtenidos se desarrollan distintos modelos de negocios que entreguen información respecto a la posibilidad de tener una o más tecnologías que se puedan implementar en una o más plantas.

Finalmente, los indicadores económicos y métricas utilizadas en el análisis de las distintas alternativas planteadas son comparadas, concluyendo que la alternativa óptima para la gestión de lodos en las PTAS de Esval es el Secado térmico directo con vapor, alternativa que resulta ser económicamente rentable y factible bajo las políticas y estrategias que plantea la empresa.

Tabla 1 Resultados alternativa óptima para la gestión de lodos.

Secado térmico, intercambiador de calor directo.		
Indicadores económicos	VAN [UF]	162.918
	TIR	22,4%
	Payback	4,39
Ubicación y lodo a tratar [ton]	El Molino	13.818*
	Cordillera	9.817**
Inversión [UF]	147.324	
Costo operacional [UF]	185.259	

Fuente: Elaboración propia.

*Incluye lodo transportado de Maitenes.

**Incluye lodo transportado de Almendral.

3. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la gestión y tratamiento de aguas residuales es un tema de alta importancia, la demanda de agua dulce está en constante aumento y los escasos recursos hídricos se ven cada vez más exigidos por la captación excesiva, la contaminación y el cambio climático. Esto implica que las normas medio ambientales sean cada vez más estrictas en cuanto a las características que poseen los residuos finales que se obtienen y cómo se van a disponer al medioambiente.

El nivel de tratamiento de las aguas servidas en Chile ha mejorado significativamente en la última década, siendo el primer país Latinoamericano en alcanzar el 100% de tratamiento de aguas servidas. Sin embargo, los objetivos del tratamiento están aún en nivel primario en lo que respecta a desarrollar procesos con menor impacto ambiental por lo que es esperable que muchas plantas de tratamiento de aguas servidas (desde ahora PTAS) sufran modificaciones en el futuro para adaptarse a nuevos niveles de protección ambiental (Baraño, P.).

Diariamente, como resultado del tratamiento, se obtiene una gran cantidad de efluente y residuos sólidos (lodos). Los lodos obtenidos deben ser tratados y/o dispuestos de tal manera que no contaminen o se violen los márgenes legales establecidos para el cuidado del medio ambiente. Actualmente el marco normativo es cumplido casi en la totalidad en Chile, sin embargo, esto no implica que exista un compromiso con el medio ambiente y comunidad. En general, los lodos son dispuestos en rellenos sanitarios, lo cual no es una práctica sostenible en el tiempo debido al inminente cierre de estos, por lo que es primordial poder desarrollar una mejor gestión para el tratamiento de lodos para contribuir a generar un beneficio social, ambiental y económico para la sociedad.

4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Descripción de problemática

El tratamiento de aguas residuales, siendo un proceso positivo para la comunidad, presenta una complicación para muchas empresas que se dedican a este rubro, la cual es la obtención de residuos sólidos en su etapa final. Los grandes volúmenes producidos por la población conducen a una alta contaminación si estos lodos no son tratados o gestionados de manera adecuada. Los lodos provenientes de PTAS, presentan varios factores que lo caracterizan, siendo una de sus características físicas más importantes el alto porcentaje de humedad que este posee (concentración de agua en el sólido), ya que mientras más alto sea el porcentaje contenido, existirá una mayor dificultad para manejarlo. Este porcentaje varía entre un 70% y un 80%, lo cual implica que la cantidad de toneladas y el volumen de agua contenida en el lodo que deben ser transportadas para su disposición final es muy alto, por lo que se requiere una alta asignación de recursos para esta etapa.

Es así como la disminución del lodo va de la mano con la reducción de contenido de agua que posee. Es por esto, que se evaluarán tecnologías que generen una disminución importante de humedad, ya que; al reducir la cantidad de agua, el tonelaje y volumen total del lodo disminuirá y de la misma manera se reducirán los costos asociados al transporte y posterior disposición.

Es importante destacar que existe un potencial riesgo de cierre de vertedero para la disposición de lodos dado que esto es una tendencia mundial. Adicionalmente, estos tienen una capacidad limitada, solo un 6% de la capacidad total es destinada a la recepción de los residuos sanitarios, por lo que si se ve superada la capacidad se deberá disponer en otro sector habilitado con los costos adicionales que esto implica.

4.2. Objetivos

4.2.1. Objetivo General

Determinar un sistema de gestión de lodos que permita disminuir el gasto anual de transporte y disposición de lodos producidos en plantas de tratamiento de aguas servidas.

4.2.2. Objetivos específicos

- Revisar la situación actual de Chile y el mundo en relación con los procedimientos utilizados para la gestión de lodos y elaborar un marco contextual de la situación sin proyecto del caso práctico.
- Investigar tecnologías disponibles en el mercado para la gestión de los lodos que reduzcan su porcentaje de humedad.
- Estudiar tecnologías que se adapten al ambiente interno y externo del caso práctico, proyectando aumento de clientes y costos estimados asociados a la situación actual y situación con proyecto.
- Generar un compromiso con la realización de proyectos sustentables y de bajo impacto para el medio ambiente.
- Mejorar imagen corporativa y compromiso con el desarrollo de la comunidad.

4.3. Alcance

El propósito de la investigación es determinar qué tecnología para la gestión de lodos se ajusta de mejor manera a las políticas empresariales y a las normativas establecidas por la SISS.

La investigación se limita a un análisis de tecnologías disponibles en el mercado que puedan ser implementadas a la cadena operacional de empresas dedicadas al tratamiento y disposición de aguas servidas.

El estudio considera el análisis de distintas alternativas que potencialmente puedan implementarse en Esval S.A., empresa del rubro sanitario, ubicada en la región de Valparaíso, dedicada a la producción y distribución de agua potable, recolección, tratamiento y disposición de aguas servidas.

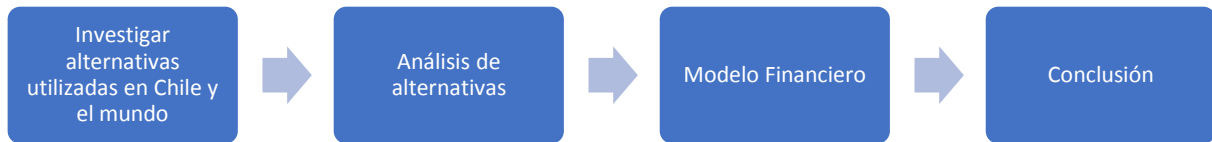
4.4. Metodología

Para llevar a cabo el estudio de las diferentes tecnologías, se investigaron las alternativas disponibles en el mercado, se asistió a workshop y se desarrollaron reuniones con empresas proveedoras de tecnologías para el tratamiento de lodos. Además, se obtiene información y datos relevantes del caso práctico a evaluar en reuniones con expertos en el tema y trabajadores de la empresa, capacitaciones internas y visitas a terreno.

Lo anterior se realiza con el fin de poder comparar las tecnologías en base a sus costos de inversión y mantenimiento, menor impacto medioambiental y mejoramiento de imagen corporativa.

El proyecto se desarrolla de la siguiente manera:

Imagen 1: Fases de realización del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

- Investigar alternativas utilizadas en Chile y el mundo: investigación y recopilación de información de distintas tecnologías disponibles en el mercado.
- Análisis de alternativas y su potencial uso en Chile: estudio y análisis de las distintas alternativas identificándose cuáles se ajustan de mejor manera a las condiciones establecidas.
- Modelo Financiero: se integran las distintas alternativas disponibles para obtener indicadores económicos de cada tecnología.
- Conclusión: se selecciona que propuesta se adoptará en base a las conclusiones y resultados obtenidos de los análisis realizados.

5. ANTECEDENTES GENERALES

5.1. Tratamiento de Aguas Residuales

Existen distintas fuentes de donde las aguas residuales pueden provenir, pudiendo presentar variaciones en la concentración de distintos elementos que la componen. Estas pueden provenir de actividades industriales y mineras, y actividades domésticas y municipales.

Las aguas residuales de actividades industriales son originadas en instalaciones tales como fábricas o industrias que en general requieren una gran cantidad de agua en su proceso productivo. Pueden contener componentes orgánicos tóxicos como hidrocarburos, que en cantidades muy pequeñas pueden contaminar grandes volúmenes de agua (UNESCO, 2017).

Las aguas residuales domésticas son aguas procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas, estas contienen un alto contenido de elementos orgánicos y elementos contaminantes y tóxicos para el ambiente y la salud humana. Para su tratamiento, las aguas son evacuadas mediante ductos de recolección de aguas domiciliarias hacia una PTAS (Alianza por el agua, 2014).

El tratamiento de aguas es el proceso que consta de un conjunto de operaciones físicas, químicas y biológicas, mediante el cual se eliminan una serie de sustancias y microorganismos que implican riesgo para el consumo humano. En los países de altos ingresos el 70% de las aguas residuales es tratada, mientras que en los de bajo ingresos tan solo el 8% es tratada, por lo que es probable que más del 80% de las aguas residuales producidas se liberen al medio ambiente sin un tratamiento adecuado, lo cual tendrá como

consecuencia efectos nocivos para la salud humana, efectos negativos para el ambiente y repercusiones desfavorables para las actividades económicas (UNESCO, 2017).

El objetivo del tratamiento de aguas es devolver un efluente inocuo al medio ambiente, que no genere problemas de salud en la población ni degrade las condiciones ambientales iniciales del sector en donde se realice la descarga. En el proceso de potabilización se debe utilizar métodos que se adecuen a la calidad del agua a tratar (Reyes, M., 2011).

Según el grado de tratamiento del agua, se llevan a cabo distintos procesos, los cuales requieren diferentes tecnologías y elementos. Estos grados se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Pre-tratamiento: el objetivo es eliminar cualquier elemento que pueda entorpecer alguna de las etapas siguientes del tratamiento. Los principales elementos que deben eliminarse en esta etapa son los sólidos gruesos, arena y los aceites y grasas. Generalmente son removidos mediante barras, mallas y/o sistema de rejillas. Dentro del pretratamiento se incluyen las operaciones de separación de grandes sólidos, desbaste, tamizado, desengrasado y desarenado.
- Tratamiento Primario o físico-químico y/o filtración: el objetivo es remover la materia orgánica suspendida con el fin de evitar que los equipos utilizados en los procesos posteriores se desgasten más rápidamente o existan atascamiento en tuberías. Los tratamientos primarios más habituales son decantación primaria (sedimentación) y floculación.
- Tratamiento Secundario o biológico: el objetivo es remover la materia orgánica disuelta. Las principales tecnologías utilizadas en este proceso son lodos activados

(la más utilizada), emisarios submarinos, lagunas, sistemas de medio fijo y lombrifiltros.

- Tratamiento terciario: el objetivo es remover cualquier otro elemento no deseado. Esta etapa del tratamiento está generalmente enfocada a la remoción de nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Alianza por el agua, 2014).

5.2. Tratamiento de Lodos

El tratamiento de aguas residuales genera una gran cantidad de lodo que generalmente es dispuesto en rellenos sanitarios autorizados, sin embargo, esta práctica no es amigable con el medio ambiente y además produce altos costos de transporte y disposición.

Es importante poder realizar tratamientos previos a la disposición de los lodos generados, para esto se puede considerar llevar a cabo el tratamiento de espesado, digestión y/o secado. Estos métodos consideran una serie de sub-procesos para poder obtener un lodo estable y de menor volumen. A continuación, se describen los principales tratamientos que se realizan en las PTAS:

- El espesado es usualmente el primer paso para el tratamiento de lodos, esto porque el lodo líquido obtenido como residuo del tratamiento de aguas es muy difícil de manejar, por lo que para poder realizar otro tipo de tratamiento o disponerlo es necesario poder espesarlo. En esta etapa, la cantidad de lodo puede verse reducida disminuyendo considerablemente el volumen de este.
- La estabilización es un proceso biológico en el cual se descomponen los sólidos orgánicos en sustancias estables. La masa total de sólidos es reducida y los patógenos destruidos, por lo que es más fácil poder deshidratar o secar el lodo en los tratamientos posteriores. Lo ideal es obtener un lodo con un pH superior a 12,5; para así poder

mantenerlo sobre 12 al momento de llevarlo a disposición y de esta manera reducir los olores.

- Finalmente, en el secado, se trata un lodo que contiene aproximadamente entre un 70% y un 80% de humedad. Para el secado se dispone de distintas tecnologías en el mercado. Las más utilizadas son secado térmico y secado solar.
- Posterior a los procesos mencionados el lodo debe disponerse. El destino final del lodo tratado (ya con un porcentaje muy inferior de humedad y un volumen bastante menor al inicial si pasa por los tratamientos mencionados anteriormente) es usualmente un vertedero autorizado, sin embargo, también puede ser incinerado o utilizado como fertilizante siempre que no contenga tóxicos o químicos que sean un peligro para la salud. La normativa vigente es bastante estricta en este sentido debido a los contaminantes que podrían liberarse al ambiente (incineración) y los que podrían encontrarse en los alimentos (fertilizante) provocando graves consecuencias en la salud humana. Es importante considerar que en cada vertedero o destino que se le quiera dar a los residuos existe una normativa establecida, por lo que se debe contar con datos e información que indique cuáles son los niveles de patógenos, químicos y deshidratación que debe contener el lodo al momento de querer disponerlo (Nathanson, J. 2017).

En la tabla a continuación se resumen los procesos que pueden ser empleados para cada método de tratamiento mencionado:

Tabla 2: Ejemplo de procesos por método de tratamiento.

Espesado	Estabilización	Secado	Disposición
Gravedad Flotación	Digestión anaeróbica Digestión aeróbica	Solar Térmico	Fertilizante Incineración

Centrifugación	Con Cal		Relleno Sanitario
----------------	---------	--	-------------------

Fuente: Elaboración propia.

Según el nivel de tratamiento que alcancen los lodos, el sistema regulatorio estableció una clasificación sanitaria, la cual es relativa al nivel de calidad que estos posean. La calidad depende fundamentalmente de cuatro grupos de contaminantes principales:

- Metales: generalmente están presentes en concentraciones bajas en los residuos domésticos, sin embargo, su potencial acumulación en los tejidos humanos y su biomagnificación suscitan preocupaciones.
- Nutrientes y materia orgánica: su peligrosidad radica en su potencial de eutroficación para las aguas subterráneas y superficiales. Sin embargo, se pueden considerar como fertilizantes valiosos al igual que la materia orgánica.
- Contaminantes orgánicos: son generalmente plaguicidas, disolventes industriales, colorantes, plastificantes, agentes tensoactivos y muchas otras moléculas orgánicas complejas. Pueden producir efectos negativos sobre el medio ambiente y sobre la salud humana.
- Agentes patógenos: los más importantes que se han encontrado en los lodos son las bacterias, los virus (especialmente enterovirus), los protozoos, los tremátodos, los céstodos y los nemátodos (parásitos). Se precisa la eliminación o la inactivación eficaz de estos patógenos para que cualquier tipo de vertido del lodo sea seguro (Veléz, J., 2007).

El nivel de calidad se obtiene analizando muestras para medir el porcentaje de contaminantes existentes en el total de la muestra. A continuación, se indican las tres clasificaciones aceptadas por el marco regulatorio general:

- Lodo estabilizado: Se consideran lodos estabilizados o con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios a los lodos que se les ha reducido los sólidos volátiles en un 38 % como mínimo. Se debe demostrar la reducción de atracción de vectores mediante una prueba realizada en un laboratorio que indique los niveles de estos. El pH de los lodos debe ser de 12 o más y el tiempo de residencia del lodo debe ser igual o superior a 25 días (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2009). El lodo obtenido solo puede ser depositado en monorellenos habilitados.
- Lodo clase B: adicional al cumplimiento de la reducción de atracción de vectores, deben cumplir con la media establecida de coliformes fecales y cumplir con una serie de procesos de higienización establecidos por la Autoridad Sanitaria (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2009). El lodo puede ser dispuestos en monorellenos y rellenos sanitarios (con humedad inferior al 70%) y ser aplicado en suelo (cumpliendo con los niveles aceptables de metales pesados y restricciones establecidas).
- Lodo clase A: a lo sumo de lo indicado en lodo clase B, los lodos deben tener una densidad menor de coliformes fecales y contar con la aprobación de la Autoridad Sanitaria de requisitos y condiciones de operación de procesos de higienización adicionales (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2009). El lodo puede ser dispuesto en monorellenos, rellenos sanitarios (con humedad inferior al 70%) y ser aplicado en suelo.

5.3. Contexto

5.3.1. Contexto Nacional Tratamiento de Aguas Residuales

Chile, en términos de cobertura, alcanzó el 100% de tratamiento de aguas servidas generada por la población el año 2013, 13 años después que se implementara el sistema de tratamientos de aguas a través del Decreto N°90 que regula el curso de aguas y superficiales al mar (Chile desarrollo sustentable, 2015).

El sector sanitario urbano se encuentra compuesto por 60 empresas, alcanzando un total de 5.256.296 clientes. De estas empresas, se consideran 28 principales que en conjunto atienden el 99,6% de los clientes de las zonas urbanas del país.

Más del 85% de la población habita en zonas urbanas en que los servicios de agua potable, alcantarillado y tratamiento de aguas servidas son provistos por empresas concesionarias o empresas explotadoras de concesiones (SISS, 2016).

Para el tratamiento de aguas residuales, al año 2016 en el país hay 293 sistemas operativos que utilizan distintas tecnologías. Dentro de las más utilizadas se encuentran las siguientes:

- Lodos Activos: existen distintas tecnologías asociadas a tratamiento por lodos activos, la más utilizada es la aeración extendida (62% de las plantas de lodos activados), seguida de los lodos activados convencionales (20%), las zanjas oxidativas (10%) y los reactores secuenciales batch (8%).
- Laguna estabilización: se usa especialmente en comunidades pequeñas y en la zona centro-norte del país. De las plantas que utilizan la tecnología de lagunas, el 75%

corresponde a lagunas aireadas, mientras que el 25% restante corresponde a lagunas de estabilización.

- Emisario submarino: aprovechan las condiciones de dispersión y de purificación natural del océano para tratar las aguas servidas (SISS, 2016).

Tabla 3: N° de sistemas por cada tecnología a nivel nacional.

Tecnología	N° de sistemas	Porcentaje a nivel nacional
Lodos activados	177	60,40%
Lagunas aireadas	56	19,10%
Emisario submarino	32	10,90%

Fuente: SISS, 2016.

5.3.2. Contexto Mundial Tratamiento de Lodos

La producción de lodos ha aumentado considerablemente los últimos años y la tendencia sigue siendo creciente. Es por esto, que existe una gran preocupación y controversia sobre la forma en que se debe enfocar el problema, la resolución y disminución del mismo. En algunos países (principalmente de la Unión Europea) ya se han implementado nuevas legislaciones y consideraciones de naturaleza medioambiental, por lo que ciertos métodos de disposición ya no son aceptados y han tenido que ser eliminados, como por ejemplo la disposición en vertederos, como es en el caso de los países como Alemania, Holanda y Dinamarca. En base a lo mencionado, es indispensable llevar a cabo un tratamiento de lodos que considere los cambios y restricciones que posiblemente se implementen a futuro (Huber, 2017).

A continuación, se mencionan países vanguardistas en la implementación de diferentes sistemas:

Estabilización:

- Dinamarca (Billund): la planta de tratamiento de aguas produce biomasa (lodos), los cuales son tratados para producir biogás y generar energía (calor y electricidad), produciendo hasta tres veces más lo que necesita la planta para funcionar, transformándose así en un sistema autosustentable. La planta tiene doble alimentación, de tal manera que se traten los residuos orgánicos y aguas residuales a la vez.

Secado:

- Alemania (Hayingen): Utiliza el sistema de secado solar que incluye un “fliper” el cual remezcla los lodos acelerando el proceso de secado, ya que el movimiento continuo de los lodos ayuda a mantener una buena aireación y transferencia de calor. Puede alcanzar hasta un 80% de sequedad (Huber, 2018).
- España (Mallorca): posee la planta de secado solar más grande del mundo. No es necesario que combinen la energía solar con térmica debido a que las condiciones climáticas son bastante favorables.
- Estados Unidos (Mooresville): esta localidad fue la primera en el país en usar el “Belt Dryer” de Huber (tecnología de secado térmico), la cual puede alcanzar hasta un 90% de sequedad (Huber, 2018).

Disposición:

- Argentina: en el país se han construido plantas de compostaje de lodos residuales, es así como lo transforman en un lodo reutilizable y se puede aplicar como biosólido en la agricultura

- Bolivia: en muchas localidades del país existen sistemas ineficientes de recolección y disposición de basura, por lo que las empresas sanitarias tienen que encargarse de tener un lugar adecuado para depositar los lodos residuales, que en general son vertederos autorizados.

5.3.3. Contexto Nacional Tratamiento de Lodos

En Chile el año 2016 se generaron cerca de 683 mil metros cúbicos de lodos deshidratados. Un alto porcentaje de este es producido por la Región Metropolitana. La V región ocupa el cuarto lugar en generación de lodos en el país (SISS, 2016).

Ya se cuenta con tecnologías para el tratamiento de lodos en algunas PTAS del país. Actualmente se ha desarrollado con fuerza la utilización del sistema de digestión anaeróbica en las siguientes plantas:

- La Farfana, Aguas Andinas: el tipo de tratamiento de aguas que utiliza esta planta es la de lodos activados. Los lodos finales generados son bombeados hasta 8 digestores anaeróbicos, en donde se produce una descomposición bacteriana de sólidos volátiles en biogás, a 35°, y donde el lodo permanece por 21 días (Hito tecnológico La Farfana, 2008). El biogás luego se procesa para convertirlo en biometano y se inyecta a la red de gas natural, el cual es suministrado a la comunidad para uso domiciliario (ABT Consultores, 2017).
- El Trebal, Aguas Andinas: el lodo es estabilizado dentro de los digestores, para luego ser tratado para que se genere biogás en un tratamiento biológico. El biogás es utilizado por motores de cogeneración, los cuales producen calor y electricidad. De la electricidad utilizada por la empresa, un 60% proviene del tratamiento de lodos (Suez, 2015).

- Talagante, Aguas Andinas: el proceso contempla espesamiento de los lodos primarios, los cuales son dispuestos en estanques de almacenamiento para luego pasar al digestor anaeróbico en donde se produce biogás. El biogás obtenido es utilizado por cogeneradores, los cuales producen calor que se utiliza para calentar los propios biodigestores produciéndose una economía circular y auto-sustentación (Memoria Aguas Andinas, 2016).
- Gran Concepción, ESSBIO: el tipo de tratamiento de aguas que utiliza esta planta es la de lodos activados. El lodo es tratado en digestores produciendo biogás. Este biogás se utiliza para la mantención de la temperatura de los digestores produciendo una economía circular y auto-sustentación (SISS, 2016).

5.4. Marco Legal

Bajo un contexto legal, existen una serie de leyes y normativas asociadas al tratamiento de aguas residuales, estos se rigen bajo la Legislación Ambiental General de Chile.

La legislación reguladora de Chile, por la cual Esval S.A. es condicionada actualmente, está compuesta por los siguientes instrumentos:

- DFL N°382: “Ley General de Servicios Sanitarios”.
- D.S. N°1.119: “Reglamento de las Concesiones Sanitarias de Producción y distribución de Agua Potable y de Recolección y Disposición de Aguas Servidas y de las Normas sobre Calidad de Atención a los usuarios de estos Servicios”.
- D.F.L N°70: “Ley de Tarifas de Aportes de Financiamiento Reembolsables”.
- D.S. N°453: “Reglamento de la Ley de Tarifa”.
- Ley N°18.902: “Que creó la Superintendencia de Servicios Sanitarios” (Esval, 2016).

El ente regulador de Esval S.A. es la SISS (Superintendencia de Servicios Sanitarios), la cual fue creada con el objeto de garantizar a la población que la prestación de los servicios sanitarios, en cuanto a cantidad, calidad y precio corresponden al ofrecido (Esval, 2016).

Si bien las normativas mencionadas anteriormente son cumplidas por la empresa, cabe mencionar que para el tratamiento de lodos existen otras leyes por las cuales hay que regirse. A continuación, se indican las que se relacionan con la implementación de este sistema:

- Ley 19.300 (Modificada por Ley 20.417), Sobre Bases Generales del Medio Ambiente. El artículo 10 de la Ley considera que el tratamiento de lodos es un

proyecto susceptible de causar impacto ambiental. La ley establece que el proyecto requerirá la elaboración de un Estudio de impacto ambiental si se presentan efectos adversos en la calidad de los recursos naturales, alteración en los sistemas de vidas, localización próxima a poblaciones o áreas protegidas. Es por esto que se debe declarar una descripción del proyecto, como se cumplirá la norma (estándares que se seguirán), permisos necesarios que estén otorgados y características que puedan dar origen al Estudio de impacto ambiental. (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2017)

- D.S N°4/09: Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Toda planta de tratamiento de aguas servidas deberá contar con un proyecto de ingeniería, que deberá ser aprobado por la Autoridad Sanitaria, que deberá dar cuenta del almacenamiento, tratamiento, transporte, disposición final y de los aspectos sanitarios de la aplicación de los lodos al suelo. Además, hay que regirse por requisitos establecidos con relación a las distancias que tiene que estar la planta desde algún área, concentraciones de elementos, tipo de suelo, entre otras. (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2009).
- D.S. N°144: Establece normas para evitar emanaciones o contaminantes atmosféricos de cualquier naturaleza (Ministerio de Salud, 2014).
- D.S. N°146: Norma de emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas. La norma establece los niveles máximos permisibles de presión sonora corregidos y los criterios técnicos para evaluar y calificar la emisión de ruidos molestos generados por fuentes fijas hacia la comunidad (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1998).

- D.S. N°148: Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos. Los subproductos resultantes de operaciones de eliminación de residuos se consideran peligrosos para el ambiente, a menos que se demuestre lo contrario. Se establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que deberá someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reuso, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos (Ministerio de Salud, 2008).
- D.F.L. N°725/67: Las obras públicas o particulares destinadas a aguas servidas de cualquier naturaleza deben cumplir con el código sanitario establecido por el Servicio Nacional de Salud para poder funcionar (Ministerio de Salud, 2017).
- Orden N°243: Procedimiento de Autorización Tarifaria por Cumplimiento del D.S N°4/09, Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas". Para autorizar la aplicación de cargo tarifario por la línea de lodos de una Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) se debe contar con una serie de autorizaciones estipuladas por la SISS (SISS, 2018).

Por otra parte, la empresa cuenta con las siguientes certificaciones los cuales estableces criterios y requisitos para poder obtenerlos:

- Certificación OHSAS 18.001:2007, la cual avala que el sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el trabajo se encuentra implementado.
- Certificación ISO 14.001:2004, cumpliendo con los objetivos de Gestión Medioambiental de la organización.
- Certificación ISO 9001:2008, orientada a un sistema de Gestión de Calidad.
- NCh-ISO 17.025, cumpliendo con los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (Esval, 2016).

6. CASO APLICADO: ESVAL S.A.

6.1. Antecedentes de Esval S.A.

Esval S.A. es una sociedad dedicada a la producción y distribución de agua potable, recolección, tratamiento y disposición de aguas servidas la cual se constituye como empresa sanitaria el año 1989. Su actividad tiene carácter de monopolio natural regulado, ya que es el único que presta servicios dentro de su área de concesión. El territorio operacional de la Compañía comprende las áreas urbanas de la región de Valparaíso y, además presta servicios de agua potable a otras localidades (fuera del área de concesión) en la comuna de Algarrobo. Adicional a lo anterior, Esval en el año 2003 se adjudica los derechos de concesión de Ecconsa S.A., empresa sanitaria de la región de Coquimbo por lo que se constituye una filial denominada Aguas del Valle S.A.

Actualmente la empresa representa el 11,8% de participación del total de las compañías que hay en Chile, atendiendo a un total de 1.658.026 personas que son abastecidas en toda la V región (con excepción de la población de la Isla de Pascua, Juan Fernández, Olmué, Panquehue y Santo Domingo). Se proyecta que la tasa de crecimiento de clientes será en promedio de un 2,5% anualmente (Memoria Corporativa Esval, 2016). En su proceso de producción de agua potable Esval alcanza una cobertura del 99,9% de sus clientes teniendo como principales plantas las que se encuentran ubicadas en las localidades de Concón, Las Vegas y San Juan, con respecto al tratamiento de aguas servidas se alcanza una cobertura de un 93,8% y tiene como principales plantas de tratamiento a las ubicadas en Loma Larga, Dos norte (Viña del Mar) y Quillota. Además, la empresa cuenta con 35 oficinas comerciales habilitadas para la atención de clientes localizadas en todas las comunas de la región de Valparaíso y su edificio central está ubicado en Cochrane 751, Valparaíso.

Tabla 4: Datos de Operación Esval.

Datos	Total
Población urbana abastecida	1.658.026
Cientes Agua Potable	622.656
Cientes Alcantarillado	571.049
Cobertura Agua Potable (%)	99,9%
Cobertura Alcantarillado (%)	94,7%

Fuente: Memoria Corporativa ESVAL, 2016.

En relación con la cadena de valor de Esval esta está constituida por distintos tipos de procesos estratégicos, de negocios, operacionales, de apoyo y de control, los cuales apuntan a poder desarrollar de manera óptima las dos principales labores de su línea productiva, las cuales son los siguientes:

- Producción de agua potable: en este proceso se desarrollan distintas fases tales como captar y conducir aguas crudas desde distintas fuentes naturales hacia una planta de agua potable que cuenta con los equipos e infraestructura adecuada para poder tratar estas aguas con el fin de que sea apta para el consumo de los clientes.
- Tratamiento de aguas servidas: en este proceso se recolecta y conduce el agua hacia las plantas de tratamiento de aguas servidas en donde en un principio se lleva a cabo un tratamiento preliminar en donde se separa el agua de los residuos sólidos, luego se aplican distintos tratamientos físicos, químicos y biológicos para eliminar distintos patógenos y contaminantes, y así finalmente el agua se descontamina para poder ser devuelta a fuentes naturales.

Dentro de los dos procesos mencionados, para el caso específico de este trabajo se analizarán los residuos generados en el proceso de tratamiento de aguas servidas.

6.1.1. Tipos de tratamientos de aguas servidas utilizados por Esval S.A.

Dependiendo del sector a donde llegan las aguas residuales o la cantidad producida por los clientes, Esval dispone de PTAS que tratan las aguas con diferentes tecnologías, las cuales son:

- Emisarios submarinos: se utiliza principalmente en zonas costeras. En ellas se separa la basura mediante rejas gruesas y finas, tras lo cual se retiran las grasas y aceites (por flotación) y las arenas (por decantación). Posteriormente, un emisario submarino las transporta a gran distancia del borde costero y a varios metros de profundidad en el fondo marino, el que mediante un sistema de difusores permite una alta dilución instantánea en el medio marino.
- Lodos activados: se utiliza en zonas interiores. Se caracteriza por la interacción de distintos tipos de bacterias y microorganismos que requieren oxígeno para vivir y consumen materia orgánica contenida en el lodo, incluye procesos biológicos y de desinfección de aguas. Al finalizar el saneamiento de las aguas, estas son devueltas a cauces naturales como esteros o ríos.
- Lagunas aireadas: se utiliza en zonas interiores. Se denominan aireadas debido a que el sistema incorpora algún tipo de aireación artificial. Incluye procesos biológicos y de desinfección de aguas, que permiten la remoción de material orgánico, sólidos y agentes patógenos. Las lagunas reciben el agua residual posterior al pretratamiento y luego de tratarla las envían a los sedimentadores para que finalmente los residuos sólidos separados sean dispuestos en vertederos y las aguas tratadas sean descargadas a cauces naturales como esteros o ríos (Memoria corporativa Esval, 2016).

La cantidad de agua tratada por cada tecnología mencionada es la siguiente:

Tabla 5: Cantidad de agua tratada [m3/año].

Sistema	Cantidad de agua tratada [m3/año]
Emisarios	101.474.696
Lodos activos	25.834.309
Lagunas aireadas	9.589.993
Total	136.898.998

Fuente: Memoria Corporativa ESVAL, 2016.

6.1.2. Tratamiento de lodos en Esval

Actualmente Esval no realiza tratamiento a los lodos que produce, estos solamente son depositados en un vertedero autorizado. Los lodos son depositados con un 70-80% de humedad, lo cual implica que la empresa está incurriendo en altos costos de transporte y disposición debido a la cantidad de agua presente en los residuos. Además, existen grandes riesgos asociados a la disponibilidad de sitios de disposición debido al potencial cierre de vertederos autorizados.

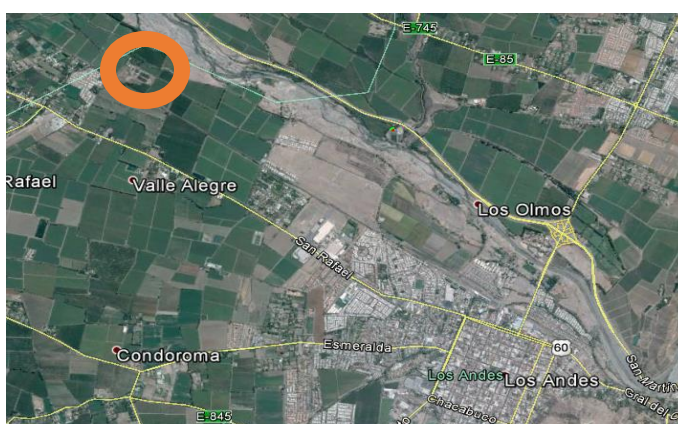
En particular la evaluación se realizará a PTAS de lodos activados, esto debido a que la cantidad de agua tratada y lodo producido es mayor que en las lagunas aireadas y, respecto a los emisarios; los residuos, posterior a un tratamiento primario, son eliminados hacia el medio marino, por lo que no se efectúan tratamientos posteriores ni se tienen que disponer residuos en otro sector.

Esval posee cuatro PTAS de lodos activados en la región las cuales destacan por su ubicación, tamaño y cantidad de lodo producido, estas son las siguientes:

- Cordillera: se encuentra ubicada en La Tordilla en la ciudad de Los Andes, la PTAS presta servicio a la localidad Los Andes atendiendo a 22.259 clientes (mayo, 2015), logrando un 95,8% de cobertura de alcantarillado respectivamente. Cuenta con un sistema de pretratamiento de agua, reactores biológicos, sedimentadores secundarios

y sistema de desinfección, para luego depositar el agua tratada en el Río Aconcagua. La PTAS Cordillera recibe actualmente el lodo espesado generado por las PTAS Curimón y Rinconada para poder ser tratado. Finalmente, el lodo obtenido más el recibido es deshidratado de manera mecanizada en dos centrifugas, obteniéndose un lodo debidamente estabilizado. Los lodos obtenidos son transportados a un monorelleno autorizado (Gerencia Operaciones de Esval, 2015).

Imagen 2: Ubicación geográfica satelital de PTAS Cordillera.

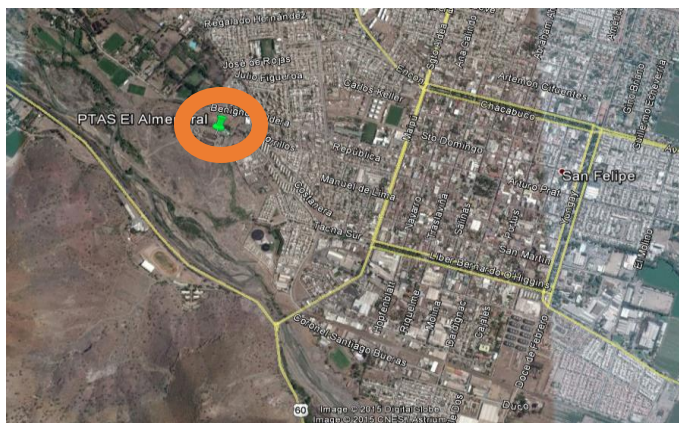


Fuente: Gerencia de Operaciones de Esval, 2015.

- El Almendral: se encuentra ubicada en la ciudad de San Felipe y su acceso es por la calle Benigno Caldera. Las localidades atendidas por esta planta son San Felipe y El Almendral, entregando servicio de alcantarillado a 23.109 clientes aproximadamente (mayo, 2015), logrando una cobertura de sistema de alcantarillado y tratamiento y disposición final de 96,8%. Cuenta con un sistema de pretratamiento de agua, reactores biológicos, sedimentadores secundarios y sistema de desinfección, para luego depositar el agua tratada al Río Aconcagua. Finalmente, el lodo obtenido del proceso es deshidratado de manera mecanizada, obteniéndose un lodo estabilizado,

el cual es transportado y depositado hacia monorellenos (Gerencia Operaciones de Esval, 2015).

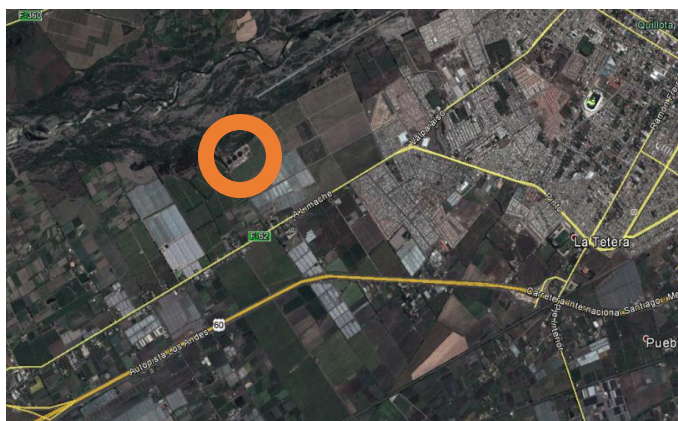
Imagen 3: Ubicación geográfica satelital de PTAS Almendral.



Fuente: Gerencia de Operaciones de Esval, 2015.

- **El Molino:** se encuentra ubicada en el sector de San Pedro, en la comuna de Quillota. Las localidades atendidas por esta planta son Quillota, San Pedro, Limache, La Cruz, La Calera, Artificio, Nogales e Hijuelas. Actualmente entrega servicio de alcantarillado a 63.431 clientes aproximadamente (mayo, 2015), logrando una cobertura de sistema de alcantarillado y tratamiento y disposición final de 96,7%. Cuenta con un sistema de pretratamiento de agua, sedimentadores primarios, reactores biológicos, sedimentadores secundarios y sistema de desinfección, para luego depositar el agua tratada en el Río Aconcagua. Finalmente, el lodo obtenido del proceso es deshidratado de manera mecanizada en una centrifuga y encalado para su estabilización, obteniéndose un lodo Clase B el cual es depositado en contenedores para poder ser transportado a rellenos sanitarios autorizados (Gerencia Operaciones de Esval, 2015).

Imagen 4: Ubicación geográfica satelital de PTAS El Molino.



Fuente: Gerencia de Operaciones de Esva, 2015.

- Maitenes: se encuentra ubicada en el extremo norte de la calle Goenechea, al norponiente de la comuna de La Ligua. Las localidades atendidas por esta planta son La Ligua y Placilla de la Ligua, entregando servicio de alcantarillado a 8.070 clientes aproximadamente (mayo, 2015), logrando una cobertura de sistema de alcantarillado y tratamiento y disposición final de 89,9%. Cuenta con un sistema de pretratamiento de aguas, reactores biológicos, sedimentadores secundarios y sistema de desinfección, para luego depositar el agua tratada en el Río Aconcagua. La PTAS Los Maitenes recibe actualmente el lodo espesado generado por las PTAS Cachagua, La Laguna, Zapallar y Punta Puyai, el cual es transportado mediante camiones para ser tratados en esta instalación. Finalmente, el lodo obtenido del proceso más el lodo recibido es deshidratado de manera mecanizada y encalado para su estabilización, obteniéndose de esta manera un lodo de Clase B, el cual es transportado para ser dispuesto a monorellenos autorizados (Gerencia Operaciones de Esva, 2015).

Imagen 5: Ubicación geográfica satelital de PTAS Maitenes.

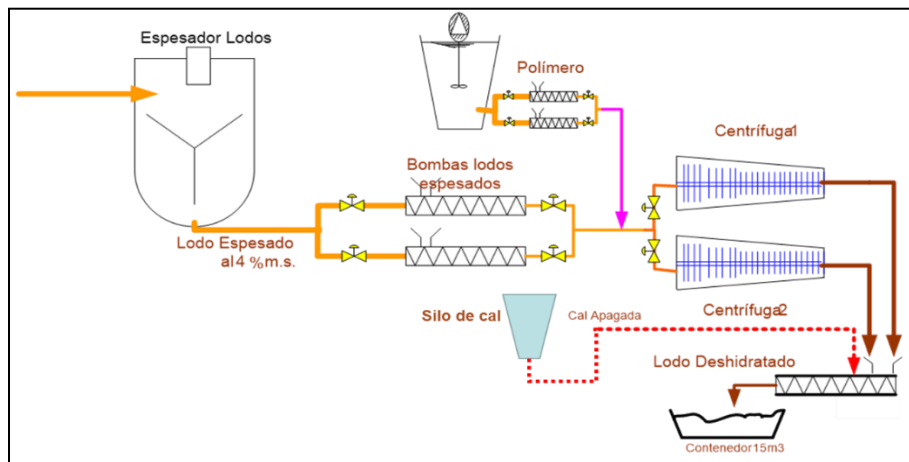


Fuente: Gerencia de Operaciones de Esval, 2015.

A continuación, se ejemplifican los procesos descritos en el punto anterior mediante los diagramas de flujo de las PTAS que detallan los equipos que componen el tratamiento de lodos que se realiza actualmente.

Para las PTAS Cordillera, El Almendral y Maitenes su proceso es el siguiente:

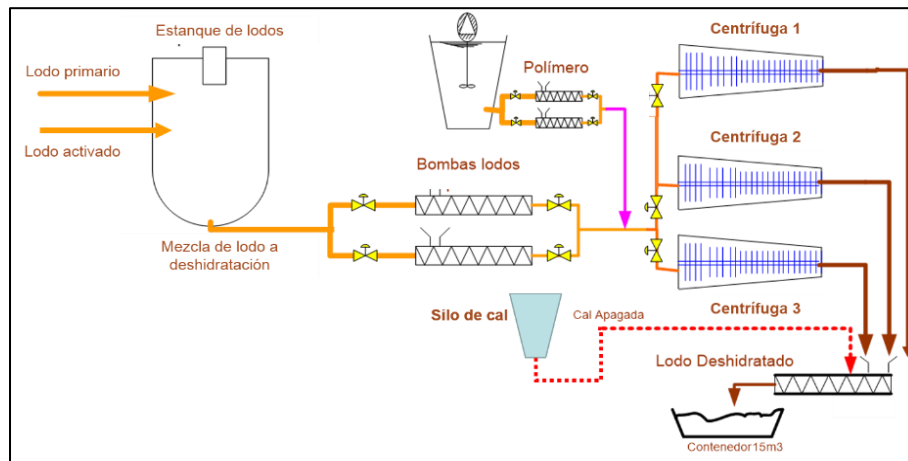
Imagen 6. Diagrama de Flujo manejo de lodos PTAS Cordillera, El Almendral y Maitenes.



Fuente: Gerencia de Operaciones de Esval, 2015).

Para la PTAS El Molino su proceso el siguiente:

Imagen 7: Diagrama de Flujo manejo de lodos PTAS El Molino.



Fuente: Gerencia de Operaciones de Esval, 2015.

La principal diferencia entre la PTAS El Molino y las otras, es que la primera cuenta con sedimentador primario, etapa en la cual se separan elementos de mayor densidad del agua residual, produciendo un lodo primario que en general contiene entre un 93% y un 97% de humedad.

6.1.3. Análisis situación actual

Para definir la situación actual se consideran los costos de manejo de lodos que se efectúan al presente. Estos costos dependen principalmente de la cantidad de lodo producido por cada planta, los costos de transporte y disposición por tonelada de lodo y las distancias que se debe recorrer para transportar los residuos desde una planta hasta el sector de disposición autorizado, actualmente KDM. Datos que se muestran a continuación:

Tabla 6: Cantidad de lodo producido [Ton].

PTAS	Cantidad de lodo [ton]
Cordillera	5.938
El Almendral	5.843
El Molino	13.376
Maitenes	3.206
Total	28.362

Fuente: Memoria Corporativa Esval, 2016.

Tabla 7: Costos de transporte y disposición por tonelada de lodo producido.

PTAS	Costo transporte [UF/ton]	Costo disposición [UF/ton]	Total [UF/ton]
Cordillera	0,34	0,86	1,21
Almendral	0,32	0,86	1,19
El Molino	0,55	1,04	1,59
Maitenes	0,68	0,69	1,37

Fuente: ESVAL, 2018.

Tabla 8: Distancia entre PTAS y KDM [km].

PTAS	Distancia [km]
Cordillera	76
Almendral	80
Molino	127
Maitenes	148

Fuente: Elaboración propia.

La situación actual (o sin proyecto) se desarrolla en la suposición de que la empresa no implementara ningún tipo de tecnología y siguiera gestionando los lodos sin modificar la cadena operacional.

Las políticas de evaluación de proyectos de la empresa definen que el periodo de evaluación es de 15 años y la tasa de descuento debe ser de un 7%. Debido a esto se plantea que se debe determinar la cantidad de lodo que se generará en los próximos años para poder estimar el costo que implicaría el manejo de lodos. Para esto se proyecta la cantidad de toneladas de lodos de tal manera de obtener el costo total por año en los próximos 15 años.

La proyección se realizó de la siguiente manera:

- Se utilizan datos relativos al crecimiento de la población de los años 2017, 2018, 2019 y 2020 los cuales son obtenidos del INE (Instituto nacional de estadística), con lo anterior se estima mediante una relación directamente proporcional cual será el

crecimiento de la cantidad de lodos producidos en los mismos 4 años obteniéndose el siguiente resultado:

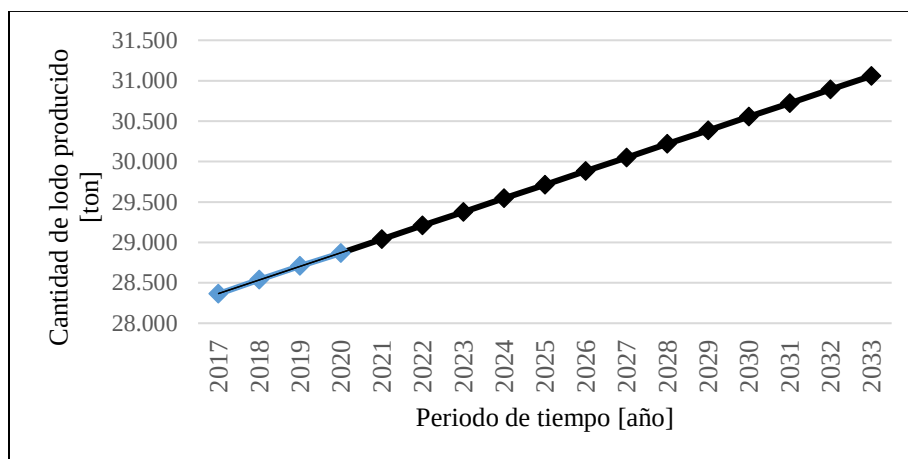
Tabla 9: Estimación de cantidad de lodos producidos 2017, 2018, 2019 y 2020.

Año	Población total	Lodos producidos [ton]
2017	437.185	28.363
2018	440.170	28.539
2019	443.052	28.708
2020	445.784	28.867

Fuente: Elaboración propia.

- Posterior a eso se realiza una regresión lineal con los datos obtenidos de la cantidad de lodo a producirse los años mencionados y se extrapola este resultado hasta el año 2033 obteniéndose el siguiente gráfico:

Gráfico 1: Proyección cantidad de lodo [ton/año].



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de los datos observados en el gráfico se modela mediante la siguiente ecuación:

$$y = 168,19x + 28199$$

En donde:

Y: corresponde a cantidad de lodos producidos [ton]

X: periodo de tiempo [año].

De la ecuación se puede deducir que cada año en promedio la cantidad de lodo producido aumentará en 168,19 [ton].

- Finalmente, con la cantidad de lodos estimada hasta el año 2033, se puede calcular el costo que significará el transporte y disposición de los lodos si no se desarrollara ninguna nueva tecnología para su gestión. Los costos son directamente proporcionales a la cantidad de lodo producida, por lo que con los costos indicados en la “Tabla 6” se obtiene lo siguiente:

Tabla 10: Proyección de gastos de transporte y disposición de lodos.

Año	Lodos producidos [ton]	Costos [UF]
2017	28.363	36.920
2018	28.539	37.149
2019	28.708	37.369
2020	28.867	37.576
2021	29.040	37.801
2022	29.208	38.020
2023	29.376	38.239
2024	29.544	38.457
2025	29.712	38.676
2026	29.881	38.895
2027	30.049	39.114
2028	30.217	39.333
2029	30.385	39.552
2030	30.553	39.771
2031	30.722	39.990
2032	30.890	40.209
2033	31.058	40.428

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos se estima que la cantidad de lodo aumentaría aproximadamente en 2,5 toneladas, lo que se traduce en un gasto de 3.500 [UF] adicional para el año 2033 en comparación con el año base 2017.

Adicional a los costos de transporte y disposición, existe un costo de consumo de cal requerida para la estabilización de lodos, debido a que estos para ser dispuestos en KDM deben cumplir con ciertos valores químicos que aseguren que es un residuo estable.

Este costo es de 4,07 [UF] por tonelada de cal utilizada. Para calcular cuanta cal se requiere para el proceso se debe conocer el porcentaje de lodo deshidratado sobre el total de lodo generado debido a que por cada tonelada de lodo deshidratado se requiere en promedio 0,4655 [ton] de cal para que el lodo pueda ser dispuesto, información que se indica a continuación:

Tabla 11: Costo por encalado

Distancia [km]	% Lodos deshidratados	Lodo deshidratado [ton]	Cal requerida [ton]	Costo por encalado [UF]
Cordillera	23,0%	1.366	636	2.588
Almendral	17,0%	993	462	1.882
Molino	26,7%	3.571	1.662	6.766
Maitenes	15,8%	507	236	960

Fuente: Esva, 2018.

Con los costos anteriores se calcula el VAC de esta situación y los costos totales anuales que se efectuarían los próximos 15 años a una tasa de descuento del 7%.

Tabla 12: VAC situación sin proyecto.

Indicador	Resultado
VAC [UF]	503.093

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos reflejan que este proceso significa un alto costo para la empresa, por lo que buscar alternativas que signifiquen un menor costo operacional es primordial para disminuir este indicador a largo plazo. Además, la disposición de lodos en vertederos es una práctica que debe realizarse con mayor control, ya que los vertederos son fuentes de malos olores, de vectores y contaminantes que presentan riesgo de incendios,

sanitarios y ambientales por lo que si se reducen los residuos producidos y depositados en estos vertederos los impactos y riesgos negativos se verán disminuidos y más controlados por parte de Esval generando un compromiso por parte de la empresa con el desarrollo sostenible y sustentable del medio ambiente y la comunidad.

Los costos de la situación actual se consideran ingresos para las situaciones con proyecto debido a que son recursos que se dejan de gastar al utilizar otras tecnologías para el manejo de lodos.

6.2. Análisis de alternativas

De acuerdo con los objetivos planteados, se han estudiado diferentes sistemas de tratamiento que permiten obtener un lodo con un menor contenido de agua. Al respecto, la elección de cual o cuales optimizarán la gestión de lodos para la empresa va a depender de distintos factores, tales como condiciones geográficas, volúmenes a tratar, variables económicas, entre otros aspectos. Adicionalmente, para la elección de alguna alternativa debe cumplirse con un marco legal establecido por las entidades correspondientes, para efectos de esto se debe considerar que Esval es una empresa de servicios regulada, por lo que se entiende que cumplirá con los aspectos normativas que defina la SISS. A modo de introducción se identifican puntos relevantes de cada tecnología:

Tabla 13: Aspectos relevantes de cada tecnología a analizar.

Tecnología	Beneficio o Ventaja	Perjuicio
Digestión aeróbica	Alta reducción de patógenos ⁽¹⁾	Requiere de otros procesos para generar un lodo fácil de gestionar. Se requiere un mayor espacio que otras alternativas para su instalación ⁽¹⁾

Digestión anaeróbica	Alta reducción de patógenos. Bajo consumo de energía eléctrica ⁽²⁾	Generación de ruidos de alta frecuencia. Dificultad de limpieza ⁽²⁾
Compostaje	No se requiere de transporte y disposición en vertederos ⁽³⁾	Requiere condiciones climáticas y de suelo específicas para evitar contaminación y una operación muy extensa. Requiere disponibilidad de terreno ⁽³⁾
Secado Solar	Costos de uso de energía muy bajos. No requiere personal especializado. Requiere poco mantenimiento ⁽⁴⁾	En condiciones climáticas desfavorables el secado de lodos podría ser muy lento. Se requiere un espacio más amplio ⁽²⁾
Secado Térmico	Menor generación de aire contaminado a tratar. Se requiere menor área. Reduce considerablemente el volumen del lodo ⁽⁵⁾	Requiere mayor mantenimiento preventivo ⁽⁵⁾

Fuente: (1) Diocaretz, M., 2010; (2) Nannig, J., 2018; (3) Castro, C., et al, 2007; (4) Huber, 2018; (5) Enercom, 2018.

A continuación, se describen y evalúan las tecnologías de gestión de lodos que se analizarán para la empresa:

6.2.1. Digestión aeróbica

En este proceso se suministra oxígeno para la degradación biológica de sustancias orgánicas generándose un ambiente óptimo para el crecimiento de bacterias que se desarrollan en presencia de oxígeno obteniendo como resultado que el lodo generado en la planta sea más estable y el volumen de los residuos disminuye. Su utilización conlleva a una baja generación de olores, mejores propiedades de decantación y una buena desinfección del lodo, sin embargo, como desventaja presenta un gran consumo de energía eléctrica asociado al suministro de oxígeno, el lodo obtenido es difícil de deshidratar y el exceso de residuos producidos por la digestión aeróbica debe ser tratado por una digestión anaeróbica u otro proceso estabilizante (Velásquez, P., 2015). Por lo anterior se considera solo evaluar la

digestión anaeróbica con un mayor análisis debido a que si se considera esta alternativa habría que incurrir en una doble inversión para asegurar el éxito en su funcionamiento.

6.2.2. Digestión anaeróbica

Es la degradación biológica de sustancias orgánicas complejas en ausencia de oxígeno. Durante esas reacciones se libera energía y subproductos, uno de los subproductos que se obtiene de este tratamiento es biogás, el cual puede alimentar cogeneradores produciendo calor y electricidad. El calor puede ser utilizado para secar lodo y la electricidad ser utilizada por la misma empresa transformando su modelo de negocio en una economía circular, estrategia que plantea que los recursos son inagotables y que los procesos deben actuar sin generar residuos ni gastar energía (Revistagua, 2017).

Es importante contemplar que, si se llega a instalar un digestor anaeróbico y a desarrollar un sistema de cogeneración hay que tener en consideración que, a los subproductos obtenidos, en particular al biogás, se le asocian una serie de normativas para poder generarlos y utilizarlos las cuales se indican a continuación:

- Ley N°20.999: Ley de servicios de gas y otras disposiciones. Establece un registro en el que los propietarios de las instalaciones que sirvan para producir, importar, refinar, distribuir, transportar, almacenar, abastecer o comercializar biogás.
- Decreto N°119: Reglamento de seguridad de plantas de biogás. Reglamentación que vela por la seguridad de las personas y bienes en los aspectos vinculados a la construcción y operación de las plantas de biogás.
- Resolución N°14.841: Procedimiento para el registro de plantas de biogás nuevas y en operación. Se debe inscribir el proyecto de biogás en la Superintendencia de Electricidad y Combustibles antes de que la planta entre en funcionamiento.

La utilización de esta tecnología provoca la disminución y facilita el tratamiento de los lodos generados por las PTAS, sin embargo, es necesario espacio para la instalación de digestores que puedan procesar la cantidad de lodo producido por la empresa y la utilización de un posterior sistema de secado para poder disminuir los lodos a un volumen esperado y así cumplir con el objetivo principal de este análisis.

Considerando que la cantidad de lodos que se producen actualmente es muy baja, es esperable que al tener que realizar una inversión muy alta, esta no se recupere al evaluar el proyecto en un periodo de tiempo de 15 años por lo que se concluye que no se justifica la instalación de esta alternativa por presentar un alto costo de inversión para la empresa, por lo que el estudio económico y de mercado no se llevará a cabo.

6.2.3. Compostaje

El lodo es acondicionado de tal manera que se obtiene un producto comercializable, con niveles indetectables de patógenos, que pueda ser utilizado como acondicionador de suelos y fertilizante, dado su alto contenido de materia orgánica y nutrientes como nitrógeno y potasio. Al utilizar esta alternativa el volumen del lodo que se genera en procesos previos no disminuye y además existe riesgo de generación de olores. Esta alternativa no es recomendable debido a que no existe un mercado desarrollado para poder comercializar el compost (producto obtenido al finalizar este proceso) y si bien el lodo sería un subproducto estable y con potencial para la utilización de recuperación de suelos no existe la posibilidad de poder aprovecharlo.

6.2.4. Secado Solar

- Secado Solar con gestor de lodos: El secado se produce bajo un “invernadero”, aprovechando el efecto de las radiaciones solares. La cantidad de agua evaporada

depende de las condiciones climáticas y del aire. Además, el lodo es removido periódicamente para asegurar su secado uniforme mediante un “gestor” de lodos, la cual es una máquina de desplazamiento longitudinal que va removiendo el lodo, esto debido a que el lodo seco se acumula en la superficie mientras que a medida que el lodo se encuentra menos expuesto a las condiciones externas, este se conserva húmedo. Para su operación es necesario contar con condiciones climatológicas óptimas y una gran superficie disponible para la instalación de la planta tipo invernadero. El lodo requiere seguir siendo estabilizado para poder aplicar esta tecnología, por lo que la aplicación de cal deberá seguir efectuándose, esto debido a que el lodo es altamente putrescible y existe un alto riesgo de una eventual generación de olores. El volumen de residuo alcanza un 25-30% del volumen original, con una humedad de 10-25% dependiendo de las condiciones climáticas.

Imagen 8: Secado solar con gestor de lodos.



Fuente: Huber (2018).

- Secado Solar con topo: Este sistema es similar al secado solar convencional, la diferencia radica en que en este se utilizan robots que mueven y desplazan los lodos para agilizar el secado de estos bajo la misma premisa anterior, en la cual el lodo en

la parte superior del manto se seca más rápido que el que no está expuesto a las condiciones exteriores. Los robots se llaman “Topos”, y trabajan automáticamente. Para su operación, es necesario contar con condiciones climatológicas óptimas y espacio para la instalación de la planta tipo invernadero.

Imagen 9: Secado solar con topo eléctrico.



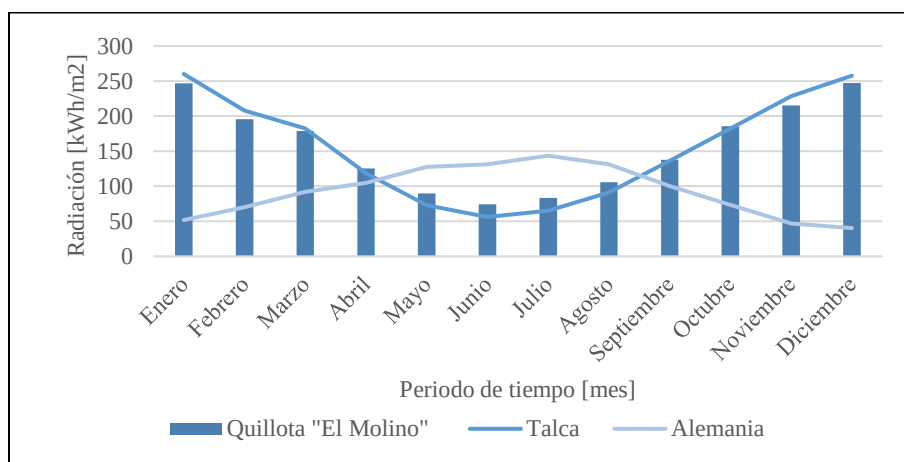
Fuente: Thermo-system (2018).

6.2.4.1. Análisis Económico: Evaluación general

Cabe mencionar que la energía solar es lejos una de las energías renovables más abundantes en el mundo, por lo que convierte a esta alternativa en una potencial solución sustentable para el proceso de tratamiento de lodos. La radiación es un factor importante a tener en cuenta si se quiere desarrollar alternativas que requieran de esta emisión de energía para poder funcionar de manera óptima. Es por esto, que se identifica cuánta es la radiación en la planta El Molino de Esval (PTAS que genera la mayor cantidad de lodos entre las que se están evaluando) y se compara con la radiación de Talca y en Alemania.

Por un lado tenemos información que en la comuna de Talca otra sanitaria realizó una evaluación de un proyecto de este tipo en la cual resultaron rentabilidades interesantes, por otra parte, con respecto a Alemania, este es un país pionero en la implementación de este tipo de tecnología para la gestión de lodos, obteniendo resultados económicos positivos bajo las condiciones climatológicas y ambientales que presenta.

Gráfico 2: Radiación Alemania, Talca y PTAS El Molino.



Fuente: Facultad de ciencias físicas y matemáticas Universidad de Chile, 2018.

Al analizar el gráfico, se puede notar que la radiación en la PTAS El Molino es mucho mayor que en Alemania y bastante similar a la de Talca, por lo que, si consideramos la radiación como factor primordial para la instalación de un sistema de secado solar, su operación debería ser funcional y factible para Esval.

Además, existen otros factores que deben considerarse al momento de evaluar esta alternativa como por ejemplo la superficie requerida, ubicación, temperatura en el ambiente, velocidad del viento promedio, entre otros.

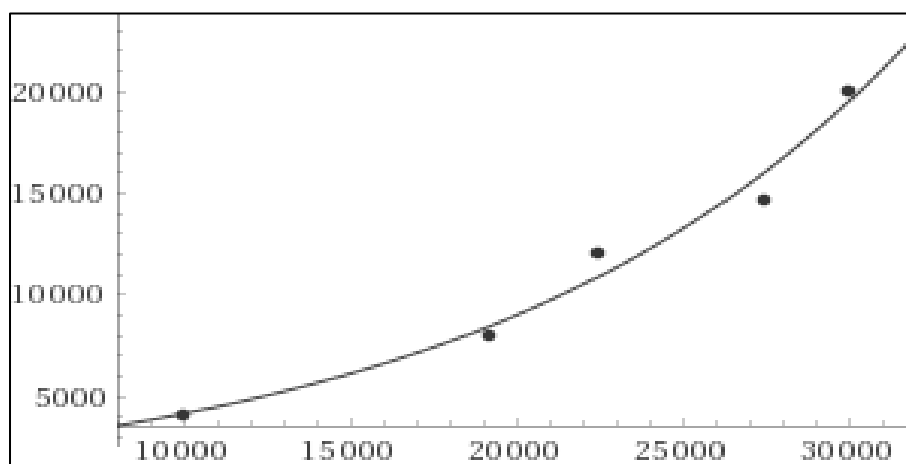
Respecto a la superficie necesaria para poder construir un invernadero de secado solar se pueden considerar diferentes variables, donde las principales son: área disponible para

construcción y toneladas de lodo producidas por cada PTAS. Por lo menos uno de los factores identificados debe fijarse para luego ajustar los otros a la restricción establecida, sumo a esto se debe dejar por lo menos un factor como variable dependiente de los factores fijos.

Se establece que como factor fijo se deja a las toneladas producidas por cada planta y como factor variable la superficie necesaria para la instalación, para las otras variables se investigan proyectos con características similares al de las PTAS del estudio de tal manera de construir una base de datos centrado en el factor fijo y factor variable mencionado. Con una base de datos consistente se desarrolla un modelo de estimación con el cual se pueda obtener el área que se requiere para la instalación de un secador solar y la inversión que esto significa para poder gestionar la cantidad de lodos producidos.

Para estimar el tamaño del área requerida según la cantidad de lodo producido en las PTAS de Esval, se realiza una regresión exponencial, modelo que se ajusta y se aproxima de mejor manera a los valores esperados y a la curva obtenida, la cual se indica a continuación:

Gráfico 3: Área requerida [m²] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar evaluación general.



Fuente: Elaboración propia.

Curva que se modela mediante de la siguiente ecuación:

$$y = 1885,11 * e^{0,0000776825x}$$

En donde:

Y: corresponde a área requerida [m2].

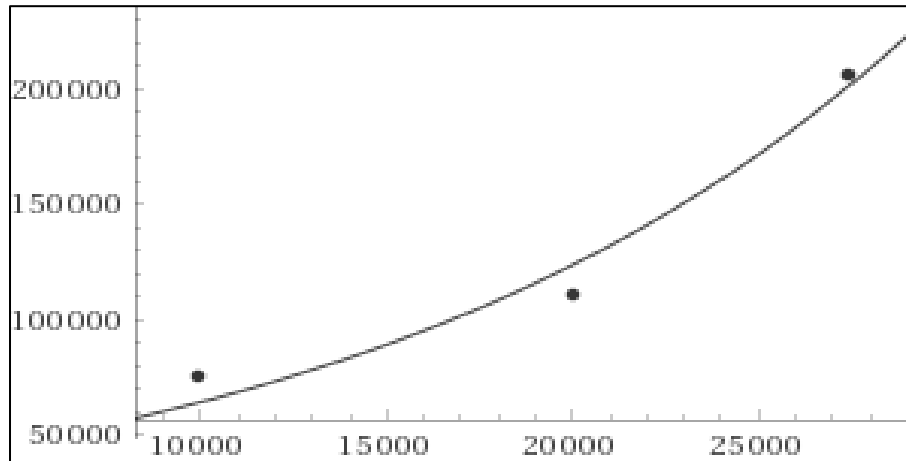
X: corresponde a cantidad de lodos producidos [ton].

Cabe mencionar que la confiabilidad de los resultados obtenidos es alta, ya que el coeficiente de determinación (indicador estadístico que refleja la calidad de los datos que explican el modelo) es de 0,99564, lo que indica que el modelo explica en un 99,564% el área de los invernaderos, esto quiere decir que el comportamiento de la variable área [m2] será similar al comportamiento de la variable toneladas [ton], por lo que la relación entre los datos y la curva es casi exacta.

Ya teniendo una estimación de la superficie que se requiere por la cantidad de lodo producido, es necesario poder conocer la inversión necesaria para la instalación del invernadero. A modo preliminar se sabe que la instalación de un secador solar es una tecnología amigable con el medio ambiente y que genera ahorro a largo plazo debido al menor uso de electricidad, esto porque el sistema funciona con una fuente natural de energía, sin embargo, la instalación del invernadero requiere de una inversión considerable.

Para poder tener una aproximación de lo que puede costar instalar una planta de secado solar se realiza regresión exponencial debido a que los datos se ajustan de mejor manera a este tipo de curva, lo cual se representa mediante el siguiente gráfico:

Gráfico 4: Inversión requerida [UF] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar evaluación general.



Fuente: Elaboración propia.

La curva obtenida se modela mediante de la siguiente ecuación:

$$y = 33.108,4 * e^{0,0000656112x}$$

En donde:

Y: corresponde a inversión requerida [UF].

X: corresponde a cantidad de lodos producidos [ton].

El coeficiente de determinación obtenido es de un 0,994639, lo cual indica que los datos se ajustan en un 99,4639% al modelo obtenido.

Con la ecuación obtenida es posible obtener la inversión requerida y con esto calcular los siguientes indicadores para cada planta en base a sus respectivas cantidades de lodo generadas si se construyera un secador solar en cada una de estas:

Tabla 14: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado solar evaluación general.

PTAS	Inversión estimada [UF]	VAN [UF]	TIR	Payback	VAC [UF]
Cordillera	50.954	-6.417	4,88%	10,27	61.006
Almendral	48.577	-4.088	5,57	10,42	60.231

El Molino	83.778	31.381	12,73	6,5	121.717
Maitenes	41.896	-21.777	-3,62	20,37	38.707

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados son indicadores asociados a la instalación de un sistema de secado solar por cada PTAS si funcionan de manera independiente, sin embargo, en el caso de construir una, dos o tres plantas de secado solar habrá plantas sin esta tecnología, por lo que se modelan diferentes combinaciones posibles para la gestión de lodos. Adicional a esto se debe considerar que los lodos producidos en las PTAS en donde no se construya un secador solar deben ser transportados hacia las que se construya este sistema, por lo que se efectuarán costos de transporte entre PTAS.

Para poder estimar los costos asociados al transporte de lodos entre PTAS, se utilizan las distancias entre estas [km] y los costos reales de transporte desde cada planta [UF/ton-km] hacia vertedero (no incluye disposición):

Tabla 15: Distancia entre PTAS [km].

PTAS	Cordillera	Almendral	Molino	Maitenes
Cordillera	0	14,3	88	105
Almendral	14,3	0	73	93
Molino	88	73	0	69
Maitenes	105	93	69	0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16: Costo de transporte [UF/ton-km].

PTAS	[UF/ton-km]
Cordillera	0,01587
Almendral	0,0157
Molino	0,0125
Maitenes	0,00925

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos mencionados podemos estimar el costo de transporte necesario para poder llevar lodos hasta la/s PTAS en donde se estime conveniente la construcción del invernadero de secado solar.

Las distintas alternativas para poder encontrar la ubicación que optimice los recursos son las combinaciones posibles de transportar lodo entre todas las PTAS que estamos evaluando, es decir, se parte evaluando si transporta todo el lodo a una PTAS hasta la posibilidad de que no se transporte nada (si se construye un secador en cada planta) lo cual se indica a continuación:

Tabla 17: Combinación de alternativas y costo de transporte entre PTAS [UF/ton].

N°	PTAS	Costo por transporte [UF/ton]
1	Desde El Molino hacia Cordillera	0,381
2	Desde El Molino hacia Almendral	0,316
3	Desde El Molino hacia Maitenes	0,299
4	Desde Cordillera hacia Maitenes	0,472
5	Desde Cordillera hacia Almendral	0,064
6	Desde Cordillera hacia El Molino	0,396
7	Desde Maitenes hacia Almendral	0,427
8	Desde Maitenes hacia El Molino	0,317
9	Desde Maitenes hacia Cordillera	0,482
10	Desde Almendral hacia El Molino	0,296
11	Desde Almendral hacia Cordillera	0,058
12	Desde Almendral hacia Maitenes	0,377
13	Desde El Molino y Cordillera hacia Maitenes	0,771
14	Desde Cordillera y Maitenes hacia El Molino	0,713
15	Desde El Molino y Maitenes hacia Cordillera	0,864
16	Desde El Molino y Cordillera hacia Almendral	0,380
17	Desde Cordillera y Almendral hacia El Molino	0,691
18	Desde El Molino y Almendral hacia Cordillera	0,439
19	Desde El Molino y Maitenes hacia Almendral	0,743
20	Desde Maitenes y Almendral hacia El Molino	0,613
21	Desde El Molino y Almendral hacia Maitenes	0,675
22	Desde Cordillera y Maitenes hacia Almendral	0,492
23	Desde Maitenes y Almendral hacia Cordillera	0,540

24	Desde Cordillera y Almendral hacia Maitenes	0,441
25	Desde El Molino, Cordillera y Maitenes hacia Almendral	0,808
26	Desde Cordillera, Maitenes y Almendral hacia El Molino	1,008
27	Desde Maitenes, Almendral y El Molino hacia Cordillera	0,921
28	Desde El Molino, Cordillera y Almendral hacia Maitenes	1,148

Fuente: Elaboración propia.

El costo con proyecto incluye la inversión de la planta de secado solar, la inversión adicional requerida para un sistema de tratamiento de olores y compra de terreno en la PTAS que lo requieran, ya que por ejemplo El Molino no cuenta con terreno disponible para la instalación de un sistema de secado solar por lo que se estima este costo en base al valor de una hectárea en terreno agrícola en la V región (El Mercurio, 2015), además se considera que durante el periodo a evaluar se efectúan gastos operacionales de mantención, energía, horas hombre y encalado. Es importante señalar que el flujo de caja detallado del Anexo 11.2. considera el crecimiento de la cantidad de lodo producido hasta el año 2033 lo cual se indica en la Tabla 10.

Con lo anterior se desarrolla un flujo de cada para cada combinación para poder evaluar el proyecto, obteniéndose los siguientes indicadores que son resultado de la mejor alternativa, la cual corresponde a la combinación 5 y 8, es decir, instalar plantas de secado solar en El Molino y Almendral, recibiendo lodos de Maitenes y Cordillera respectivamente, los resultados son los siguientes:

Tabla 18: Indicadores económicos Secado solar evaluación general.

Indicador	Resultado
VAN [UF]	56.566
TIR	11,96%
Payback	7,04
Inversión [UF]	176.101
VAC [UF]*	269.868

Fuente: Elaboración propia.

*Se calcula el VAC de los costos operacionales en los próximos 15 años.

La cantidad de lodo a tratar y el área requerida por cada PTAS en la que se instala un secado solar debe ser la siguiente:

Tabla 19: Área requerida y cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado solar evaluación general.

PTAS	Cantidad [ton]	Área [m2]
El Molino	13.818	5.515
Almendral	9.817	3.386

Fuente: Elaboración propia.

En la PTAS El Molino se requiere comprar terreno agrícola debido a que no cuenta con la capacidad suficiente de espacio para instalar los equipos necesarios para gestionar la cantidad de lodos mencionada.

Es importante destacar que el modelo se ajusta a las condiciones climatológicas de las localidades en donde se realiza la evaluación (V región de Valparaíso) y no es aplicable para otras que presenten características diferentes a las utilizadas para el análisis.

Los resultados obtenidos son estimativos y se basan en la situación actual de Esval, es decir, se trabaja con datos del año 2017, tales como toneladas de lodo producido, espacios disponibles y costos de transporte y disposición efectuados. Además, en esta parte del análisis no se consideran condicionantes externas, solo se evalúa en el ámbito económico de manera teórica y general.

A continuación, se analizarán dos casos que corresponden a tecnologías existentes en el mercado nacional y de las cuales se cuenta con referencias de costos de inversión y mantenimiento. Para poder demostrar que la evaluación general realizada con información teórica de distintas investigaciones de papers y otros documentos es confiable, los resultados posteriores deben tener similitud con los obtenidos en esta parte del análisis.

6.2.4.2. Análisis económico: Secado solar con gestor de lodos

Para este tipo de tecnología se hizo un análisis de mercado con una importante empresa dedicada a entregar soluciones para el tratamiento de aguas residuales y sus subproductos. La tecnología de secado solar con topo consiste en la instalación de módulos tipo invernadero dentro de los cuales se utiliza un gestor de lodos que remueve el lodo para un secado más rápido y uniforme.

Para determinar el área y la inversión requerida para la instalación de equipos, obras civiles y montaje se parametrizan los datos de las cotizaciones mediante la utilización de una función escalonada, esto porque cada módulo a instalar tiene una capacidad para almacenar y tratar 2.550 toneladas de lodo al año, por lo que para cada 2.550 toneladas se genera un nuevo intervalo en donde la cantidad de módulos aumenta en uno.

Se define la siguiente función para el cálculo del área requerida:

$$F(x) = \begin{cases} 1.700 & \text{si } 0 < x \leq 2.550 \\ 3.400 & \text{si } 2.550 < x \leq 5.100 \\ 5.100 & \text{si } 5.100 < x \leq 7.650 \\ 6.800 & \text{si } 7.650 < x \leq 10.200 \\ 8.500 & \text{si } 10.200 < x \leq 12.750 \\ 10.200 & \text{si } 12.750 < x \leq 15.300 \\ 11.900 & \text{si } 15.300 < x \leq 17.850 \\ 13.600 & \text{si } 17.850 < x \leq 20.400 \\ 15.300 & \text{si } 20.400 < x \leq 22.950 \\ 17.000 & \text{si } 22.950 < x \leq 25.500 \\ 18.700 & \text{si } 25.500 < x \leq 28.050 \\ 20.400 & \text{si } 28.050 < x \leq 30.600 \\ 22.100 & \text{si } 30.600 < x \leq 33.150 \\ 23.800 & \text{si } 33.150 < x \leq 35.700 \end{cases}$$

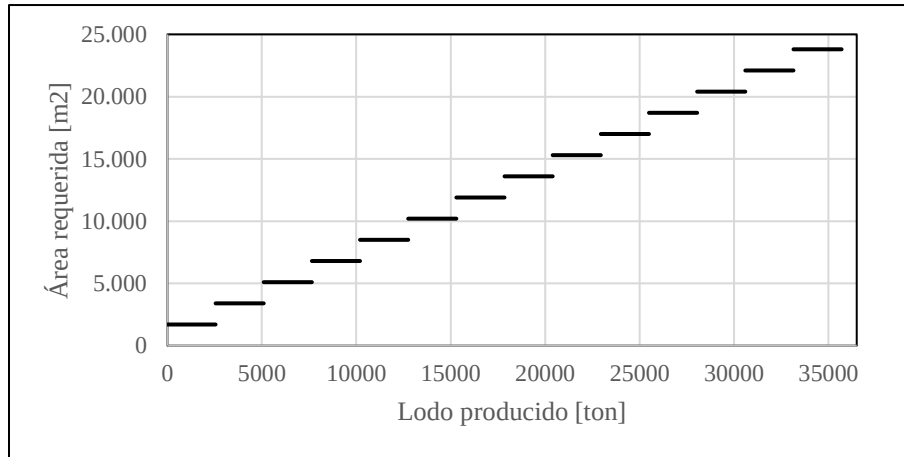
En donde:

F(x): corresponde al área requerida [m²].

X: corresponde a cantidad de lodos producidos [ton].

Esta función tiene 14 intervalos escalonados como se ve en el siguiente gráfico:

Gráfico 5: Área requerida [m²] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar con gestor de lodos.



Fuente: Huber (2018).

Respecto a la construcción de módulos, se requiere que por cada intervalo se aumente en uno la cantidad de módulos, además cada módulo tiene un costo de inversión y operacional lo cual se indica en la siguiente tabla:

Tabla 20: Área, inversión y costos operacional requerida por módulos.

N° de módulos	Área [m ²]	Inversión [UF]	Opex [UF]
1	1.700	18.772	5.055
2	3.400	32.076	10.110
3	5.100	45.381	15.165
4	6.800	58.585	20.220
5	8.500	71.890	25.275
6	10.200	85.194	30.330
7	11.900	98.499	35.385
8	13.600	111.703	40.440
9	15.300	127.655	45.495
10	17.000	140.960	50.550
11	18.700	154.264	55.605
12	20.400	167.468	60.660
13	22.100	180.943	65.715
14	23.800	194.518	70.770

Fuente: Huber (2018).

Adicional a los costos asociados a la operación de cada módulo (energía y mantención) se considera el costo de transporte entre PTAS, costo de transporte y disposición de residuos, horas hombre y encalado para la obtención de los costos operacionales totales y en caso de ser necesario se considera la compra de terreno en el costo de inversión.

Con lo anterior es posible obtener el número de módulos requerido por cada PTAS, el área e inversión si funcionarán de manera independiente y con esto calcular los siguientes indicadores para cada planta en base a sus respectivas cantidades de lodo generadas si se construyera un secador solar con gestor de lodo en cada una de estas:

Tabla 21: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado solar con gestor de lodos.

PTAS	N° de módulos	Inversión estimada [UF]	VAN [UF]	TIR	Payback	VAC [UF]
Cordillera	3	47.455	-3.072	5,9%	9,74	61.963
Almendral	3	45.381	-1.985	6,26%	9,94	61.177
El Molino	6	88.395	18.789	10,36	7,5	130.664
Maitenes	2	33.133	-14.159	-1,3%	16,52	39.339

Fuente: Elaboración propia.

Posterior al análisis por PTAS se evalúan las distintas combinaciones descritas en la Tabla 17 para encontrar la ubicación que optimice los recursos y con cada una se desarrolla un flujo de caja obteniéndose los siguientes indicadores que son resultado de la mejor alternativa la cual corresponde a la combinación 5 y 8, es decir en la PTAS El Molino y Almendral recibiendo lodos de Maitenes y Cordillera respectivamente, los indicadores se indican a continuación:

Tabla 22: Indicadores económicos Secado solar con gestor de lodos.

Indicador	Resultado
VAN	45.771 [UF]
TIR	11,22%
Payback	7,31
Inversión [UF]	167.468

VAC [UF]*	288.406
-----------	---------

Fuente: Elaboración propia.

*Se calcula el VAC de los costos operacionales en los próximos 15 años.

La cantidad de lodo a tratar, número de módulos y el área requerida por cada PTAS en la que se instala un secado solar con gestor de lodos debe ser la siguiente:

Tabla 23: N° de módulos, área requerida y cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado solar con gestor de lodos.

PTAS	Cantidad [ton]	N° de módulos	Área [m2]
El Molino	13.818	7	11.900
Almendral	9.817	5	8.500

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se basan en el análisis de mercado para los costos de inversión y operación, y la situación actual de Esval, es decir, se trabaja con datos del año 2017, tales como toneladas de lodo producido, espacios disponibles y costos de transporte y disposición efectuados. Además, en esta parte del análisis no se consideran condicionantes externas, solo se evalúa en el ámbito económico.

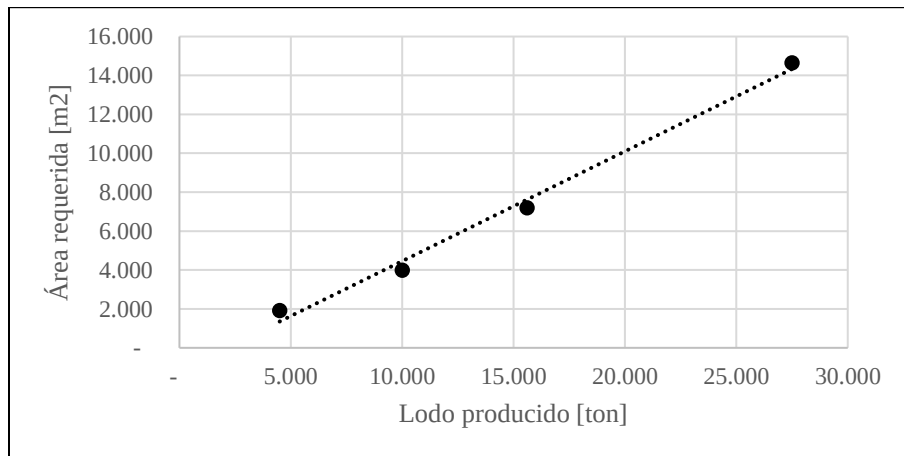
6.2.4.3. Análisis económico: Secado solar con topo

Para este tipo de tecnología se hizo un análisis de mercado con una importante empresa dedicada a proveer soluciones para el tratamiento de agua y sus residuos.

Para el análisis se cuenta con información de 4 tamaños de planta diferentes. Esta información es utilizada para el cálculo de la inversión y área requerida mediante la parametrización de los datos a través de una regresión lineal de tal manera de obtener una curva que se aproxime de mejor manera a la información entregada.

Para el cálculo del área requerida se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico: Área requerida [m2] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar con topo.



Fuente: Ecopreneur (2018).

La curva obtenida se modela mediante de la siguiente ecuación:

$$y = 0,5643x - 1186,6 \quad ; \quad x \geq 2.500$$

En donde:

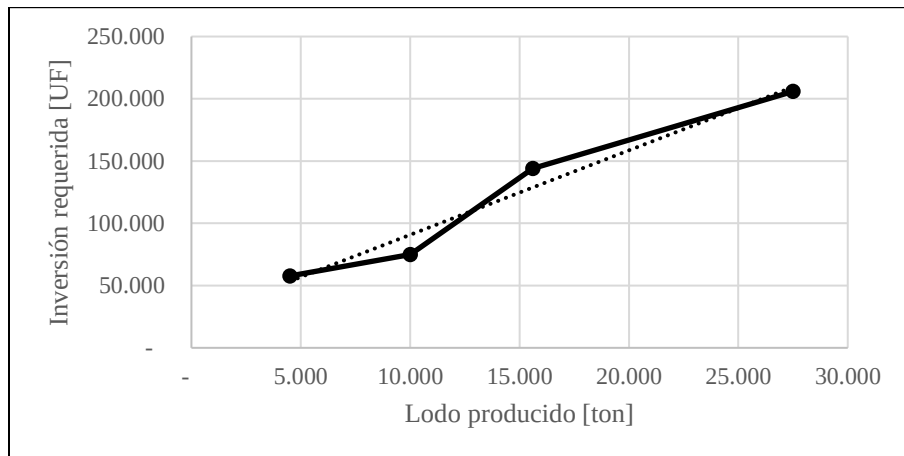
Y: corresponde al área requerida [m2].

X: corresponde a cantidad de lodos producidos [ton].

El coeficiente de determinación obtenido es de un 0,9914, lo cual indica que los datos se ajustan en un 99,14% al modelo obtenido.

Para el cálculo de la inversión requerida se obtiene el siguiente gráfico:

Gráfico 6: Inversión requerida [UF] por cantidad de lodo producido [ton], Secado solar con topo.



Fuente: Ecopreneur (2018).

La curva obtenida se modela mediante de la siguiente ecuación:

$$y = 6,7816x + 22.960$$

En donde:

Y: corresponde a la inversión requerida [UF].

X: corresponde a cantidad de lodos producidos [ton].

El coeficiente de determinación obtenido es de un 0,9626, lo cual indica que los datos se ajustan en un 99,26% al modelo obtenido.

Adicional a los costos de inversión de los equipos se considera la compra de terrenos en las PTAS que lo requieran, además para la evaluación se consideran costos operacionales, tales como costo de transporte entre PTAS, costo de transporte y disposición de residuos, energía, mantención, horas hombre y encalado.

Con lo anterior es posible obtener el área requerida por cada PTAS y la inversión si funcionarán de manera independiente y con esto calcular los siguientes indicadores para cada

planta en base a sus respectivas cantidades de lodo generadas si se construyera un secador solar con topo en cada una de estas:

Tabla 24: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado solar con topo.

PTAS	Área [m2]	Inversión estimada [UF]	VAN [UF]	TIR	Payback	VAC [UF]
Cordillera	2.164	64.266	-18.485	1,77%	13,47	61.645
Almendral	2.111	62.585	-17.770	1,84%	13,61	60.863
El Molino	6.361	116.782	-514	6,93%	9,37	122.842
Maitenes	623	45.739	-25.798	-4,85%	22,82	39.167

Fuente: Elaboración propia.

Posterior al análisis por PTAS se evalúan las distintas combinaciones descritas en la Tabla 17 para encontrar la ubicación que optimice los recursos y con cada una se desarrolla un flujo de caja obteniéndose los siguientes indicadores que son resultado de la mejor alternativa la cual corresponde a la combinación 5 y 8, es decir instalar los secadores en las PTAS El Molino y Almendral recibiendo lodos de Maitenes y Cordillera respectivamente, los indicadores se indican a continuación:

Tabla 25: Indicadores económicos proyecto Secado solar con topo.

Indicador	Resultado
VAN	25.230
TIR	8,96%
Payback	8,43
Inversión [UF]	206.205
VAC [UF]*	272.667

Fuente: Elaboración propia.

*Se calcula el VAC de los costos operacionales en los próximos 15 años.

La cantidad de lodo a tratar y el área requerida por cada PTAS en la que se instala un secado solar con topo debe ser la siguiente:

Tabla 26: Cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado solar con topo.

PTAS	Cantidad [ton]	Área [m2]
El Molino	13.818	6.611
Almendral	9.817	4.363

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se basan en el análisis de mercado para los costos de inversión y operación, y la situación actual de Esval, es decir, se trabaja con datos del año 2017, tales como toneladas de lodo producido, espacios disponibles y costos de transporte y disposición efectuados. Además, en esta parte del análisis no se consideran condicionantes externas, solo se evalúa en el ámbito económico.

6.2.5. Secado térmico

Consiste en la aplicación de calor al lodo para la evaporación de gran parte del agua intersticial contenida. El aporte calorífico de la energía necesaria para la evaporación del agua puede proceder de diferentes equipos, tales como caldera de gas natural, biogás, cogeneraciones, bombas de calor u otros sistemas de aporte energético, por lo que es necesario contar con una fuente externa que proporcione calor al sistema. Como residuo del proceso se obtienen cenizas de la combustión del lodo seco, cuyo volumen puede alcanzar desde un 6% a un 10% del volumen inicial, por lo que los costos de disposición de este residuo serían considerablemente menores, para el estudio se considera que el volumen final a disponer es del 10% con respecto al inicial. Requiere una baja superficie para su instalación y el lodo no requiere ser estabilizado (encalado).

Para poder estimar los costos que implicaría el instalar una planta de secado térmico en las PTAS que estamos evaluando es necesario realizar un estudio químico-biológico de los lodos que se producen, para esto se requiere medir la composición química y la concentración de elementos y patógenos para establecer la calidad del lodo que se tratará es

las distintas tecnologías, acorde a esto, cada tecnología requiere que el lodo cumpla con ciertas características para poder ser tratado.

Para esto se realiza una toma de muestra de lodos a las PTAS que se van a evaluar, muestra que es analizada por el Laboratorio de Termodinámica y Laboratorio de Química de la Universidad Técnica Federico Santa María, quienes entregan los resultados de los valores requeridos por Esval. La muestra es tomada posterior al proceso de centrifugación y previo a la estabilización con cal, esto porque el lodo estaría en cierto grado más espeso luego de centrifugar y además no estaría alterada la composición física y química del lodo, efecto que produce el encalado. Luego la muestra es depositada en recipientes plásticos diseñados para este proceso y preservado bajo las condiciones establecidas por el laboratorio de aguas del departamento de salud ambiental del instituto de salud pública de Chile, evitando de esta manera que la muestra se vea contaminada por elementos externos.

Los resultados de los análisis realizados deben contener la siguiente información:

- Nivel de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno, Azufre y Cenizas: se analiza para medir la cantidad de nutrientes presentes en la muestra, estos estimulan el crecimiento de microorganismos en el lodo, por lo que disminuyen la cantidad de oxígeno. Debido a eso se debe medir, ya que grandes concentraciones de nutrientes provocan grandes cantidades de microorganismos (EPA, 2008).
- Sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV): se debe contar con la información de los sólidos suspendidos totales y volátiles que hay en el lodo debido a que este debe cumplir con niveles de SST y SSV aceptados para poder ser secado, si se sobrepasan los niveles de estos, se podrían encontrar sólidos que

retrasen el proceso de secado del lodo o que los residuos a tratar estén contaminados de mayor manera (García J., 2014).

- Poder calorífico inferior y superior: es necesario contar con esta información debido a que dependiendo del poder calorífico que tenga el lodo se obtiene cierta cantidad de energía contenida en este. La energía podría ser utilizada en distintas tecnologías como por ejemplo en el secado térmico directo con vapor, en donde, el nivel del poder calorífico se relaciona la cantidad de vapor obtenido para secar los lodos.
- Humedad de la muestra: para ciertas tecnologías se debe ingresar el lodo con cierto porcentaje de humedad al sistema, ya que si tienen un porcentaje muy alto puede que la tecnología no funcione a su potencial esperable.

Tabla 27: Resultados análisis laboratorio para evaluación de secado térmico.

Determinación	El Molino	Almendral	Cordillera	Maitenes
Poder calorífico superior (base seca) [kcal/kg n base seca]	5.268	4.046	3.466	4.351
Poder calorífico inferior (base seca) [kcal/kg en base seca]	4.872	3.748	3.133	4.036
Humedad [% en lodo base húmeda]	73,3%	84,2%	77,0%	83%
Cenizas [% en lodo base seca]	4,66%	4,18%	3,74%	3,71%
Sólidos suspendidos totales (SST) [g de SST/kg en lodo base seca]	265 ± 3	155,4 ± 0,6	128,9 ± 0,2	168,5 ± 0,2
Sólidos suspendidos volátiles (SSV) [g de SSV/kg en lodo base seca]	50 ± 2	47 ± 2	91,6 ± 0,1	127,9 ± 0,6
Carbono [g de C/kg lodo en lodo base seca]	467 ± 3	370 ± 1	384,9 ± 0,6	411 ± 2
Hidrógeno [g de H/kg en lodo base seca]	69,3 ± 0,3	55,5 ± 0,1	53,2 ± 0,9	59,2 ± 0,5

Oxígeno [g de O/kg en lodo base seca]	206 ± 1	215,2 ± 0,1	232 ± 2	226 ± 1
Nitrógeno [g de N/kg en lodo base seca]	59 ± 2	71,3 ± 0,2	68,4 ± 0,5	68,25 ± 0,09
Azufre [g de S/kg en lodo base seca]	9,8 ± 0,1	9,2 ± 0,4	9,8 ± 0,1	10,0 ± 0,4

Fuente: Laboratorio de Química y Termodinámica, UTFSM (2018).

Uno de los factores más importantes a considerar es el poder calorífico (energía que puede liberar el lodo), ya que la energía que liberan los lodos tratados puede ser utilizada para el proceso de evaporación, por lo que se genera un ahorro en el uso de energía total debido a que casi no se tendrá que utilizar una fuente externa de energía para generar vapor.

Para obtener el ahorro se calcula el vapor requerido para el proceso de secado con su respectivo costo y se calcula el vapor que generan los lodos al secarse (considerando el poder calorífico inferior del lodo en base seca) tal como se muestra a continuación:

Tabla 28: Ahorro en generación de vapor en secado térmico.

PTAS	Vapor requerido [kg/hora]	Vapor generado [kg/hora]	Excedente de vapor [kg/hora]	Costo vapor requerido [UF/año]*	Ahorro vapor generado [UF/año]	Costo total [UF/año]
El Molino	1.732	2.085	353	7.585	7.585	0
Almendral	757	687	-70	3.315	3.008	307
Cordillera	768	562	-196	3.364	2.507	857
Maitenes	416	409	-7	1.821	1.790	31

Fuente: Elaboración propia.

*El costo se estima en base al valor actual del kilogramo de gas natural como combustible para la generación de vapor.

6.2.5.1. Análisis económico: Evaluación general

Para determinar el costo de inversión de un sistema de secado solar se parametrizan distintos costos de inversión entregados por otros análisis teóricos que implementaron plantas

de similares características y así obtener una curva que se aproxime de mejor manera a la inversión que se requiere, la curva se modela mediante la siguiente ecuación:

$$y = 0,957927x + 47.986,8$$

En donde:

Y: corresponde a inversión requerida [UF].

X: corresponde a toneladas producidas [ton].

Además, se supone que durante el periodo a evaluar se efectuarán gastos operacionales de mantención, energía y horas hombre y costo de disposición de los residuos finales que equivalen a un 10% del lodo húmedo ingresado al tratamiento. El encalado no se considera porque no es necesario estabilizar el lodo para utilizar esta tecnología.

Con lo anterior es posible obtener la inversión requerida si cada PTAS funcionara de manera independiente y con esto calcular los siguientes indicadores para cada planta en base a sus respectivas cantidades de lodo generadas si se construyera un secador térmico en cada una de estas:

Tabla 29: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado térmico evaluación general.

PTAS	Inversión estimada [UF]	VAN [UF]	TIR	Payback	VAC [UF]
Cordillera	69.600	6.692	9,01%	8,4	45.296
Almendral	69.499	5.676	8,72%	8,55	44,776
El Molino	77.437	86.223	26,22%	3,81	86.015
Maitenes	66.721	-22.520	-1,61%	17,76	30.340

Fuente: Elaboración propia.

Posterior al análisis por PTAS se evalúan las distintas combinaciones descritas en la Tabla 17 para encontrar la ubicación que optimice los recursos y con cada una se desarrolla

un flujo de caja obteniéndose los siguientes indicadores que son resultado de la mejor alternativa la cual corresponde a la combinación 8 y 11, es decir, se construye un secador térmico en la PTAS El Molino y Cordillera recibiendo lodos de Maitenes y Almendral respectivamente, los indicadores se indican a continuación:

Tabla 30: Indicadores económicos proyecto Secado térmico.

Indicador	Resultado
VAN	145.636 [UF]
TIR	20,19%
Payback	4,8
Inversión [UF]	156.572
VAC [UF]*	194.391

Fuente: Elaboración propia.

*Se calcula el VAC de los costos operacionales en los próximos 15 años.

La cantidad de lodo a tratar por cada PTAS en la que se instala un secador térmico debe ser la siguiente:

Tabla 31: Cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado térmico.

PTAS	Cantidad [ton]
El Molino	13.818
Cordillera	9.818

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos son estimativos y se basan en la situación actual de la empresa, es decir, se trabaja con datos del año 2017, tales como toneladas de lodo producido y costos de transporte y disposición efectuados.

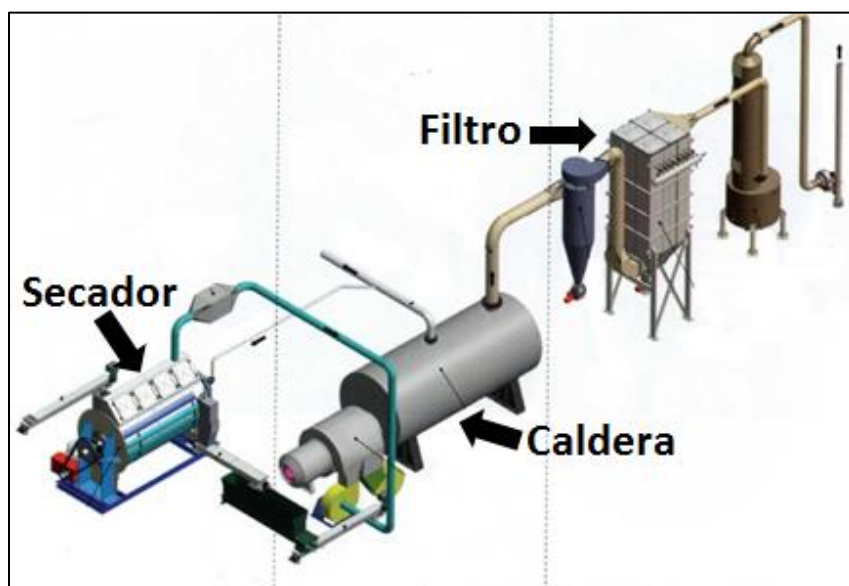
A continuación, se analizará un caso que corresponde a una tecnología existente en el mercado nacional la cual cuenta con referencias de costos de inversión y mantenimiento. Para poder demostrar que la evaluación general realizada con información teórica de distintas

investigaciones de papers y otros documentos es confiable, los resultados posteriores deben tener similitud con los obtenidos en esta parte del análisis.

6.2.5.2. Análisis económico: Secado directo con vapor

Este tipo de secado térmico consiste en la instalación de un sistema que seca los lodos con la ayuda de vapor, el cual es obtenido del agua contenida en los lodos y el lodo ya deshidratado se utiliza como combustible para la caldera que genera el vapor, por lo que la energía externa requerida solo sería necesaria al inicio del proceso de secado debido a que luego la energía es obtenida de los lodos.

Imagen 10: Secado térmico de intercambio de calor directo.

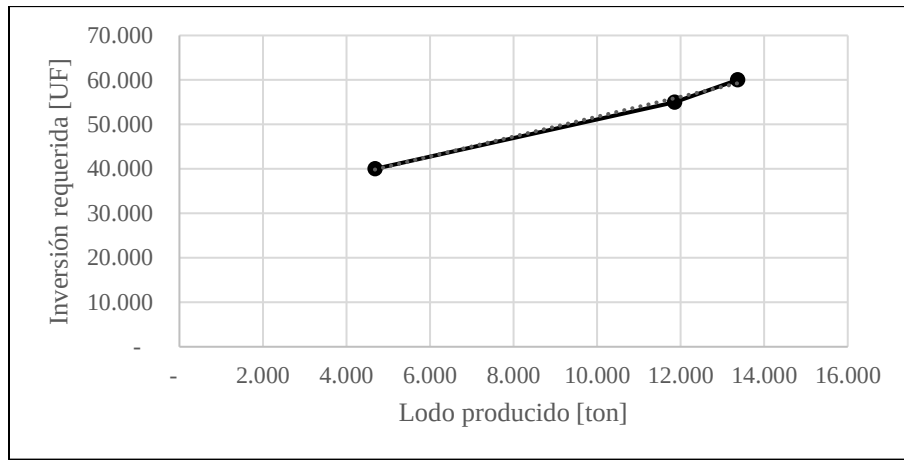


Fuente: Enercom (2018).

Para este análisis se realizó un estudio de mercado en donde se obtienen datos e información de una empresa que crea soluciones en el área de procesos térmicos, combustión y secado, la cual facilita la cotización de 3 tamaños de planta diferentes. Esta información es utilizada para el cálculo de la inversión parametrizando los datos a través de una regresión lineal y así obtener una curva que se aproxime de mejor manera a la información entregada.

Para el cálculo de la inversión requerida se obtienen los siguientes resultados:

Gráfico 7: Inversión requerida [UF] por cantidad de lodo producido [ton], Secado térmico directo con vapor.



Fuente: Enercom (2018).

Curva que se modela mediante de la siguiente ecuación:

$$y = 2,2359x + 29381$$

En donde:

Y: corresponde a la inversión requerida [UF].

X: corresponde a cantidad de lodos producidos [ton].

El coeficiente de determinación obtenido es de un 0,9937, lo cual indica que los datos se ajustan en un 99,37% al modelo obtenido.

Al igual que en caso anterior, se supone que durante el periodo a evaluar se efectuaran gastos operacionales de mantención, energía y horas hombre y costo de disposición de los residuos finales que equivalen a un 10% del lodo húmedo ingresado al tratamiento.

Con lo anterior es posible obtener la inversión requerida si cada PTAS funcionara de manera independiente y con esto calcular los siguientes indicadores para cada planta en base

a sus respectivas cantidades de lodo generadas si se construyera un secador térmico directo con vapor en cada una de estas:

Tabla 32: Indicadores económicos por PTAS funcionando de manera independiente, Secado térmico directo con vapor.

PTAS	Inversión estimada [UF]	VAN [UF]	TIR	Payback	VAC
Cordillera	56.398	16.190	11,48%	7,3	32.501
Almendral	56.028	10.233	9,91%	7,97	37.457
El Molino	78.361	79.107	21,2%	4,61	76.168
Maitenes	48.245	-17.401	0,22%	15,31	27.675

Fuente: Elaboración propia.

Posterior al análisis por PTAS se evalúan las distintas combinaciones descritas en la Tabla 17 para encontrar la ubicación que optimice los recursos y con cada una se desarrolla un flujo de caja obteniéndose los siguientes indicadores que son resultado de la mejor alternativa que corresponde a la combinación 8 y 11, es decir se construye un secador térmico directo con vapor en la PTAS El Molino y Cordillera recibiendo lodos de Maitenes y Almendral respectivamente, los indicadores se indican a continuación:

Tabla 33: Indicadores económicos proyecto, Secado térmico directo con vapor.

Indicador	Resultado
VAN	162.918
TIR	22,4%
Payback	4,39
Inversión [UF]	147.324
VAC [UF]*	185.259

Fuente: Elaboración propia.

*Se calcula el VAC de los costos operacionales en los próximos 15 años.

La cantidad de lodo a tratar por cada PTAS en la que se instala un secador térmico directo con vapor debe ser la siguiente:

Tabla 34: Cantidad de lodo a tratar por PTAS, Secado térmico directo con vapor.

PTAS	Cantidad [ton]
El Molino	13.818
Cordillera	9.817

Fuente: Elaboración propia.

Para el estudio anterior se estimó que las PTAS tendrán solo un equipo de secado térmico debido a que la capacidad de este es suficiente para tratar la cantidad de lodos producidos actualmente, sin embargo, la producción de lodo va creciendo cada año, por lo que se evalúa la posibilidad de que se requiera un secador térmico adicional en una PTAS o ambas obteniéndose los siguientes indicadores:

Tabla 35: Indicadores económicos para 1 y 2 secadores adicionales, Secado térmico directo con vapor.

Caso original		1 secador adicional en una PTAS (*)		1 secador adicional en cada PTAS (**)	
Indicador	Resultado	Indicador	Resultado	Indicador	Resultado
VAN	162.918	VAN	135.459	VAN	108.000
TIR	22,4%	TIR	18,07%	TIR	14,82%
Payback	4,39	Payback	5,27	Payback	6,14

Fuente: Elaboración propia.

(*) Instalar un secador adicional en alguna de las dos plantas de la ubicación óptima es más rentable que instalar en tres plantas un secador en cada una.

(**) Instalar un secador adicional en cada planta de la ubicación óptima es más rentable que instalar en 4 plantas un secador en cada una.

6.3. Evaluación de riesgos

Los riesgos representan el impacto potencial de todas las amenazas u oportunidades que podrían afectar los logros de los objetivos del proyecto. Existen riesgos que pueden retrasar el proyecto o generar mayores costos, por lo que identificarlos y evaluarlos es primordial para tomar buenas decisiones. También se debe considerar que pueden existir

imprevistos o riesgos que no se pudieron determinar con anticipación por lo que no estábamos preparados para evitarlos u afrontarlos, es por esto que es de suma importancia considerar la mayor cantidad de riesgos independiente que su probabilidad de ocurrencia sea baja, ya que puede que el impacto sea muy alto y al no existir medidas de contingencia el proyecto podría fracasar.

La forma más general de dividir los riesgos se presenta a continuación y se indican los respectivos riesgos identificados por categoría:

6.3.1. Riesgos negativos

Para la instalación de una tecnología que involucre calor, altas temperaturas, elementos contaminantes, elementos con alto potencial de ignición, generación de malos olores, etc., es necesario identificar y evaluar los posibles riesgos que se podrían presentar.

Para un proyecto como el evaluado se debe considerar al menos lo siguiente:

- Probabilidad y presencia de fuentes de ignición que podrían causar alguna explosión: se debe contar con medidores de temperatura y presión en sectores donde se efectúen operaciones que requieren calor o calentamiento. Las fuentes de calor en las tecnologías evaluadas no se pueden evitar, por lo que para prevenir que estos procesos se salgan de control es fundamental generar una lista de posibles fuentes de ignición de tal manera de evitar la probabilidad de ocurrencia de algún accidente.
- Generación de malos olores: existe un límite de concentración de sustancias en el aire para evitar que se generen olores que perjudiquen a los trabajadores y comunidad cercana a la planta. Se debe tener una alta preocupación para no incurrir en este problema debido a que Esval podría arriesgarse a sufrir demandas por parte de la

comunidad, ya que los olores generados por los lodos son putrefactos y podrían causar efectos negativos en la salud de las personas.

- Generación de contaminación sonora: al igual que en el punto anterior, se debe tener en cuenta que cerca de algunas PTAS hay comunidades a las cuales les puede afectar el ruido generado por un sistema de secado, en especial el secado solar, por lo que lo recomendable es instalarlo en las PTAS que no tengan comunidades cercanas.
- Efecto de la variación de las condiciones climáticas: en el caso de instalar un sistema de secado solar, este depende altamente de las condiciones climáticas. Durante un periodo de altas temperaturas el sistema va a funcionar exitosamente, sin embargo, los días lluviosos y de bajas temperaturas el secado va a ser más lento por lo que el lodo podría comenzar a acumularse generando problemas de olores y almacenaje.

Tabla 36: Matriz de nivel de impacto del riesgo.

Tecnología/Riesgo	Presencia de fuentes de ignición	Generación de malos olores	Generación de contaminación sonora	Efecto de condiciones climáticas desfavorables
Secado solar con gestor de lodos	Bajo	Alto	Alto	Medio
Secado solar con topo	Bajo	Alto	Alto	Medio
Secado térmico directo con vapor	Alto	Bajo	Medio	Bajo
Secado múltiple (térmico + solar)	Alto	Medio	Medio	Medio

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2. Riesgos positivos

Los riesgos positivos se pueden presentar como oportunidad para generar estrategias y acciones que concreten tal oportunidad para el beneficio del proyecto, en este caso es importante aumentar la probabilidad de ocurrencia.

Es posible identificar los siguientes riesgos positivos:

- Mejorar imagen de la compañía: al implementar tecnologías que sean sostenibles en el tiempo, se genera un compromiso con el medio ambiente y la comunidad, esto porque la empresa adquiere una condición de responsabilidad social con el medio ambiente a través de una práctica que no merma contra factores tales como recursos disponibles en el ambiente y contaminación a la comunidad.
- Disminución de lodos dispuestos en vertederos: como resultado de los tratamientos, los lodos a disponer disminuyen su volumen en un gran porcentaje, por lo que los residuos dispuestos van a ser mucho menores.
- Disminución del tráfico: como el lodo disminuye su porcentaje de humedad, la cantidad que queda excedente o subproducto de la gestión de estos disminuye considerablemente obteniendo como consecuencia directa una disminución en la emisión de CO₂ al ambiente generando un mayor compromiso de la empresa con la comunidad y el medio ambiente.

6.4. Sistemas múltiples

En base al análisis económico y de riesgos se concluye que la instalación de un sistema de secado solar en El Molino es una opción que presenta riesgos de una potencial generación de olores que puede afectar a las comunidades cercanas, es por esto que se hace una evaluación adicional que determina la posibilidad de instalar un sistema de secado térmico en El Molino que incluya los lodos de Maitenes y un sistema de secado solar en El Almendral (PTAS que cuenta con suficiente área para la instalación de esta tecnología) que incluya los lodos de Cordillera. Para esta evaluación se estima que los sistemas deben ser secado térmico directo con vapor y secado solar con gestor de lodos obteniéndose los siguientes indicadores:

Tabla 37: Indicadores económicos proyecto Secado múltiple.

Indicador	Resultado
VAN [UF]	109.536
TIR	17,53%
Payback	5,38
Inversión [UF]	151.456
VAC [UF]*	215.968

Fuente: Elaboración propia.

*Se calcula el VAC de los costos operacionales en los próximos 15 años

7. RESULTADOS

Por políticas de la empresa la evaluación de cada alternativa planteada se realiza en un periodo de 15 años y se requiere tener una rentabilidad sobre el 7% para que la tecnología sea factible de implementar.

A continuación, se comparan los resultados obtenidos para cada posible alternativa que optimiza los recursos:

Tabla 38: Indicadores económico situación actual y situaciones con proyecto.

Tecnología / Indicador	Ubicación	VAN [UF]	TIR	Payback	VAC + Inversión	Ahorro [UF]
Situación Actual	-	-	-	-	503.093	-
Secado solar evaluación general	El Molino y Almendral*	56.566	11,96%	7,04	445.969	57.124
Secado solar con gestor de lodos	El Molino y Almendral*	45.771	11,22%	7,31	455.874	47.219
Secado solar con topo	El Molino y Almendral*	25.230	8,96%	8,43	478.872	24.221
Secado térmico evaluación general	El Molino y Cordillera**	145.636	20,19%	4,8	350.963	152.130
Secado térmico directo con vapor	El Molino y Cordillera**	162.918	22,4%	4,39	332.583	170.510
Sistema múltiple	El Molino y Almendral*	109.536	17,53%	5,38	367.424	135.669

Fuente: Elaboración propia.

*El Molino recibe lodos de Maitenes y Almendral recibe lodos de Cordillera.

**El Molino recibe lodos de Maitenes y Cordillera recibe lodos de Almendral.

Con los resultados se identifica que la alternativa que optimiza los recursos es instalar un sistema de secado térmico directo con vapor. El ahorro en términos de inversión y costos operacionales totales en 15 años alcanza 170.510 [UF]

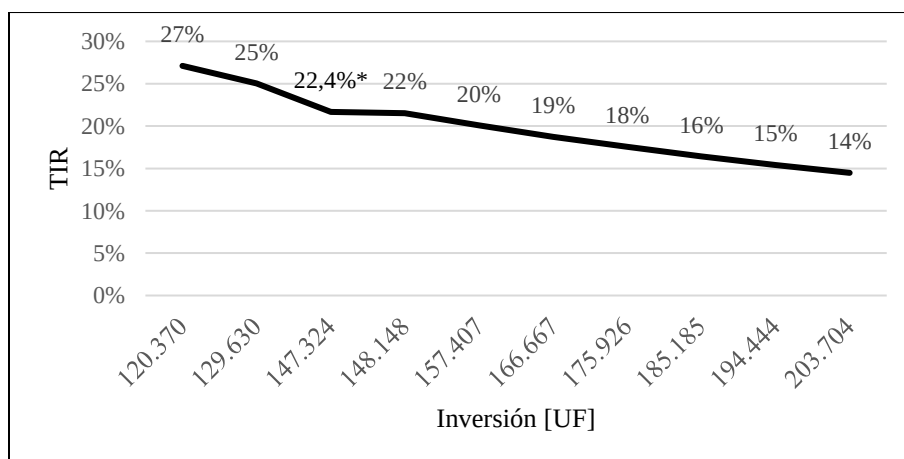
7.1. Análisis de sensibilidad

Para observar el comportamiento de los indicadores económicos es necesario realizar un análisis de sensibilidad en el cual se varíe la inversión y la cantidad de lodo producido de tal manera de conocer los rangos en que el proyecto es rentable, esto debido a que el estudio realizado es de ingeniería conceptual, y una vez que se tenga la ingeniería en detalle con su respectivo costo de inversión es posible conocer si el proyecto sigue siendo rentable o no.

La sensibilización se hace en base a la alternativa que optimiza los recursos, es decir, la instalación de dos plantas de Secado térmico directo con vapor, una en El Molino y otra en Cordillera.

7.1.1. Variación de la inversión

Gráfico 8: Sensibilización variando la inversión, Secado térmico directo con vapor.



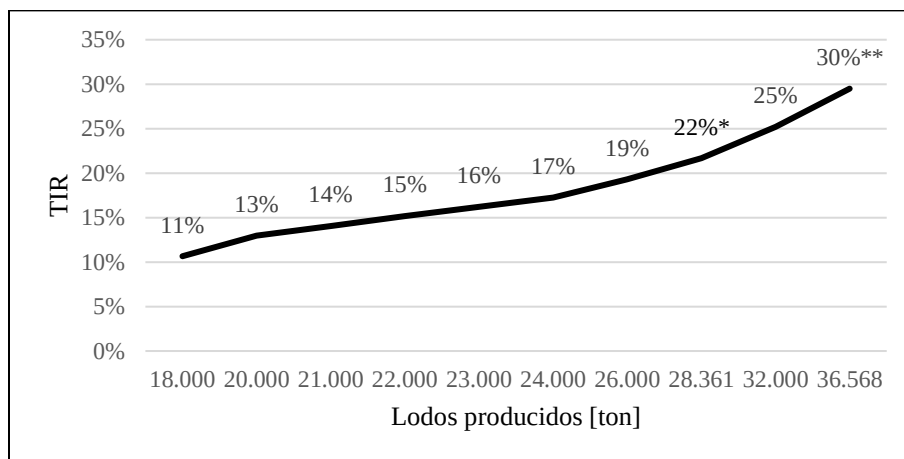
Fuente: Elaboración propia.

*Resultados obtenidos en el caso base.

Al aumentar la inversión inicial y conservando los costos operacionales y la cantidad de lodo producido como dato fijo, la TIR disminuye. Es importante notar que, si la inversión aumenta hasta casi el doble, esta alternativa seguiría siendo rentable para la empresa. La inversión puede variar en particular por los aspectos técnicos requeridos. La construcción de un sistema de secado térmico requiere de la utilización de distintos recursos y materiales, principalmente la utilización del acero inoxidable debido a la resistencia que este tiene a la corrosión es por esto que si el precio del acero sufre una variación importante, esto puede afectar de manera considerable la inversión final, sumo a lo anterior, al tener que invertir en equipos que son importados, una variación en la divisa de compra provocaría también variaciones en la inversión final del proyecto.

- Variación de la cantidad de lodo producida:

Gráfico 9: Sensibilización variando la cantidad de lodo producida, Secado térmico directo con vapor.



Fuente: Elaboración propia.

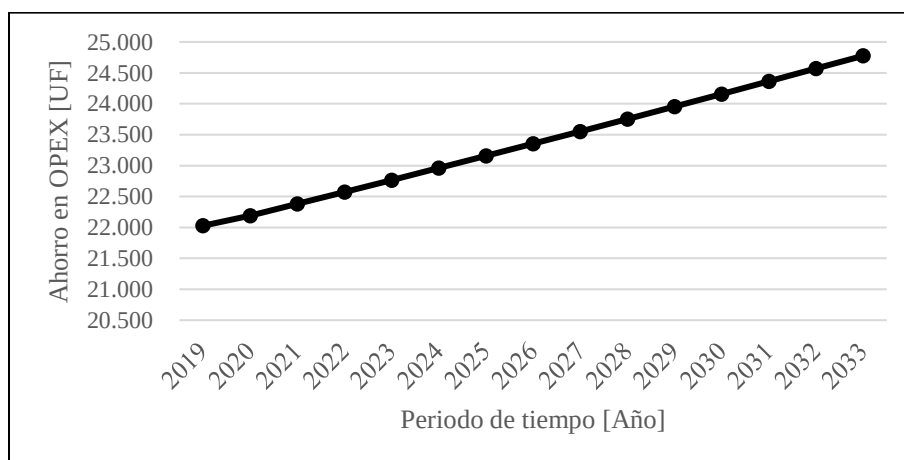
*Resultados obtenidos en el caso base.

**Resultados obtenidos en el caso de tener que gestionar los lodos producidos actualmente por las PTAS de lagunas y lodos activados.

Se debe considerar que para este caso al conservar la inversión requerida los lodos generados en otros sectores deben ser llevados a las PTAS en donde este instalado un secador térmico, que sería el caso de la planta El Molino y Cordillera.

Al aumentar la cantidad de lodos producidos y conservando la inversión requerida y los costos operacionales como dato fijo, la TIR aumenta, esto sucede porque la diferencia entre los costos operacionales de la situación actual (sin proyecto) y la con proyecto van aumentando, generándose un ahorro mayor como se puede ver a continuación:

Gráfico 10: Ahorro en costo operacional [UF] por periodo de tiempo [año] al implementar Secado térmico directo con vapor.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se puede observar que el ahorro en costos operacionales va aumentando, por lo que cada año el costo operacional aumenta en mayor proporción en la situación sin proyecto en comparación a la situación con proyecto, esto se debe a que el costo de transporte y disposición empleado para la gestión de lodos es mayor que el costo operacional requerido para gestionar los lodos con el sistema de secado térmico (energía, transporte de lodos entre PTAS, costo de personal). Los resultados del gráfico anterior se indican a continuación:

Tabla 39: Ahorro en costo operacional [UF] por periodo de tiempo [año] al implementar alternativa óptima.

Año	Ahorro [UF]
2019	22.028
2020	22.190
2021	22.381
2022	22.573
2023	22.766
2024	22.961
2025	23.157
2026	23.355
2027	23.554
2028	23.754
2029	23.956
2030	24.159
2031	24.363
2032	24.568
2033	24.776

Fuente: Elaboración propia.

8. CONCLUSIONES

- Conforme a la problemática identificada, actualmente la gestión de lodos significa un alto costo para la empresa, sumo a eso, con los resultados económicos de las situación actual y situaciones con proyecto se demuestra que lo que actualmente se está haciendo es la situación que significa el mayor costo operacional para Esval (transporte y disposición de lodos en un relleno autorizado), por lo que es preciso que la empresa implemente tecnologías que permitan un manejo de lodos eficiente de tal manera que se evite con los costos operacionales actuales se disminuyan a largo plazo. Adicional a lo anterior, existen riesgos asociados a la potencial eliminación de rellenos sanitarios, ya que esta situación es una tendencia mundial debido a la gran preocupación que existe por el alto consumo de recursos y gran nivel de contaminación que actualmente generan la mayoría de los países, por lo que es necesario adelantarse a la posibilidad de no tener donde disponer los residuos finales, y además de lo anterior se detecta que existen tecnologías que en sus procesos podrían generar distintos tipos de problemas que afecten a la comunidad por lo que es necesario definir de manera clara que riesgos podrían ser un obstáculo que generen diversos problemas para la empresa.
- Por lo anterior es necesario que para la implementación de cualquier tecnología para la gestión de lodos se evalúan riesgos que se relacionan directamente con consecuencias negativas que afectan a los distintos interesados del proyecto como por ejemplo, existe un riesgo asociado a las temperaturas que se puede alcanzar en los procesos de secado las cuales pueden llegar a ser muy altas, por lo que es imprescindible contar con elementos y acciones definidas para actuar frente a

situaciones de peligro, sumo a esto, al tratarse del tratamiento de residuos que contienen elementos contaminantes se debe gestionar los permisos correspondientes y cumplir con el Reglamento para el manejo de lodos en plantas de tratamiento de aguas servidas (D.S. N°4/2009) para así utilizar la tecnología óptima mitigando y evitando de mayor manera los riesgos que podrían suceder.

- Por la naturaleza del proyecto, las condiciones de la empresa y normativas del país, todas las alternativas planteadas presentan una solución rentable como se puede ver en la Tabla 39, por lo que para una selección que además de lo económico considere los eventuales riesgos que podrían provocarse es aplicable para todas las propuestas. Con la identificación de los riesgos negativos que tienen mayor impacto y/o probabilidad de suceder se concluye que las soluciones que involucran un secado solar en la PTAS El Molino no deben considerarse debido a que el impacto ambiental asociado a los olores que se generarían afecta directamente a las comunidades cercanas.
- Posterior al análisis de riesgo se considera que la mejor alternativa es el secado térmico directo con vapor, esta tecnología conlleva a un menor impacto en el ámbito ambiental y además es la que presenta el mejor rendimiento económico, esta alternativa genera un ahorro de 170.510 [UF] en el periodo de evaluación (15 años) en comparación a la situación sin proyecto. En relación al costo de transporte y disposición, este se vería muy reducido debido a que la alternativa propuesta reduce la humedad del lodo a un 10% disminuyendo considerablemente el volumen final de los residuos, además se asume un compromiso ambiental asociado a la baja utilización de camiones para el transporte de los residuos por lo que el uso de combustibles y producción de CO₂ para el ambiente también disminuirá de manera

relevante. Adicional a lo anterior implementar un sistema de secado térmico trae como ventajas la baja generación de malos olores, baja contaminación debido a que los residuos que produce son cenizas inocuas y el potencial cierre de rellenos sanitarios para el depósito de lodos ya no sería un problema grave para la empresa debido a que las cenizas obtenidas pueden ser dispuestas en cualquier vertedero municipal.

- Respecto a la evaluación de un sistema que involucre más de una tecnología se considera que existe una actitud frente a los riesgos en la cual el grado de incertidumbre que se produce al trabajar solo con una tecnología aumenta, sin embargo, si bien es un proyecto innovador, existen precedentes de empresas que han utilizado la tecnología de secado térmico para otro tipo de residuos parecidos (lodos de origen animal) en las cuales la operación del sistema ha sido exitosa, además, también existe un nivel de tolerancia que cada empresa está dispuesta a aceptar en la cual si bien la incertidumbre puede ser mayor, se pueden obtener mayores beneficios a futuro. Pese a que la alternativa seleccionada tiene una probabilidad de fallar bastante baja, el impacto de que falle es muy alto debido a los costos de inversión que implica instalar un equipo de esta envergadura. Además, viéndolo desde un punto de vista sostenible para la compañía se debe considerar el poder acotar los costos y/o disminuir los riesgos lo cual puede alcanzarse si se emplea la alternativa de sistema múltiple, en la cual se instalaría una planta de secado térmico en El Molino y otra de secado solar en Almendral.

Se recomienda en un inicio hacer un estudio de ingeniería de detalle solo para la planta de secado térmico en El Molino, debido a que en la alternativa de sistema

múltiple y en la alternativa de secado térmico (alternativa óptima) se requiere la construcción de un secador térmico en dicha PTAS.

- El análisis es una evaluación de lo que se quiere realizar y lo que se espera obtener (resultados económicos que rindan beneficio), sin embargo, para lograr que el proyecto se acerque a los resultados es necesario que durante la instalación y operación de los equipos exista un monitoreo y control exhaustivo para así incrementar la posibilidad de tener un resultado exitoso y esperado.

9. GLOSARIO

- Coliformes fecales: son bacterias que se encuentran en los intestinos y excrementos de animales y humanos. Su presencia indica que el agua está contaminada y tiene el potencial de causar enfermedades (North Carolina Public Health, 2009).
- Eutroficación: es un crecimiento excesivo de plantas y algas debido a la mayor disponibilidad de uno o más factores limitantes de crecimiento necesarios para la fotosíntesis, como la luz solar, el dióxido de carbono y los fertilizantes nutrientes (Concepto definición, 2017).
- Monorelleno: es una celda o depósito diseñado para recibir y confinar específicamente lodos, favoreciendo su degradación en condiciones controladas (KDM, 2017).
- Poder calorífico inferior: cantidad de calor que puede producir 1 [kg] de combustible, evitando que el agua contenida en la combustión se condense (Escuelapedia, 2018).
- Poder calorífico superior: cantidad de calor producida por 1 [kg] de combustible cuando este entra en combustión (Escuelapedia, 2018).
- Rellenos sanitarios: es un depósito controlado de residuos, que permite minimizar los efectos producidos por la degradación de la fracción orgánica de los residuos (KDM, 2017).
- SST: los sólidos suspendidos totales son la fracción de los sólidos totales retenidos con un filtro que tiene poros de un tamaño en específico (García, J., 2014).
- SSV: los sólidos suspendidos volátiles son la fracción de los sólidos totales que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los SST son calcinados a una temperatura de 500+-50°C (García, J., 2014).

- Vertederos: es un lugar de disposición de residuos que fue planificado para ese uso, pero que no cuenta con las medidas sanitarias mínimas establecidas para el depósito particular de residuos de aguas sanitarias (KDM, 2017).

10. REFERENCIAS

ABT Consultores (2017). Aguas Andinas apuesta por las energías renovables en su licitación eléctrica. Recupera de: <https://blog.abtconsultores.cl/category/biofactoria/>

Alianza por el agua (2014). Monográficos agua en Centroamérica. Manual de depuración de aguas residuales urbanas.

Baraño, P., Tapia, L. (2004). Tratamiento de las aguas servidas. Situación Chile.

Castro, C., et al. (2007). Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. Revista de geografía Norte Grande.

Chile desarrollo sustentable (2015). Chile avanza en la descontaminación de aguas residuales. Recuperado de: <http://www.chiledesarrollosustentable.cl/noticias/noticia-pais/chile-avanza-en-la-descontaminacion-de-aguas-residuales/> .

Concepto definición (2017). Eutrofización. Recuperado de: <http://conceptodefinicion.de/eutrofizacion/>.

Diocaretz, M. (2010). Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas. Universidad de Concepción.

El Mercurio (2015). Economía y Negocios. La hectárea de suelo agrícola ya vale casi \$45 millones cerca de Santiago. Recuperado de: <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=168198>.

Enercom (2017). Enercom, más de 25 años de calidad y respaldo. Recuperado de: <http://www.enercom.cl/#!/es>.

- Enercom (2018). Evaluación económica secador solar para empresa Esval.
- EPA (2008). Municipal nutrient removal technologies referent document. Technical report. U.S. Enviromental protection agency. Volume 1.
- Escuelapedia (2018). El poder calorífico de los combustibles. Recuperado de: <http://www.escuelapedia.com/el-poder-calorifico-de-los-combustibles/>.
- Esval (2017). Historia. Recuperado de: <http://portal.esval.cl/quienes-somos/historia/>.
- Esval (2018). Gerencia de Planificación. Subgerencia de Eficiencia y Innovación.
- Facultad de ciencias físicas y matemáticas Universidad de Chile (2018). Explorador Solar. Reporte recurso solar y datos meteorológicos.
- García, J. (2014). Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) en agua tratada.
- Gerencia operaciones de Esval (2015). Proyecto de Ingeniería de manejo de lodos.
- Huber (2017). Tecnología medioambiental HUBER a escala mundial.
- Huber (2018). Evaluación económica secador solar para empresa Esval.
- KDM (2017). Preguntas frecuentes. Recuperado de: <https://www.kdm.cl/preguntas-frecuentes.html#16>.
- Memoria Aguas Andinas (2016). Sector sanitario Chile.
- Memoria Corporativa ESVAL (2016). Memoria Anual.
- Ministerio de Salud (2008). Subsecretaría de Salud Pública. Decreto 189. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=268137&idParte=0>.

Ministerio de Salud, 2014. Código Sanitario. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=9981>.

Ministerio de Salud (2017). Código Sanitario. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5595>.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia (1998). Comisión nacional del medio ambiente. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=98096>.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2009). Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar/?idNorma=1007456&idVersion=2010-04-26&idParte>.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia (2017). Aprueba Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Recuperado de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=30667>.

Nannig, J. (2018). Implementación de sistemas de secado de lodos y/o cogeneración. AKROS Ingeniería.

Nathanson, J. (2017). Sludge treatment and disposal. Encyclopedia Britannica.

North Carolina Public Health (2009). Hoja informativa sobre las bacterias coliformes en los pozos de agua privada. Recuperado de: http://epi.publichealth.nc.gov/oe/docs/Las_Bacterias_Coliformes_WellWaterFactSt.pdf.

Peralta, J. (2013). Digestión aerobia. Diseño de procesos en ingeniería ambiental. Recuperado de: http://www3.uclm.es/profesorado/giq/contenido/dis_procesos/tema6.pdf.

Revistagua (2017). Aguas Andinas reformula su negocio y apuesta por una economía circular. Recuperado de: <http://www.revistagua.cl/2017/04/20/aguas-andinas-reformula-negocio-apuesta-una-economia-circular/#>

Reyes, M. (2011). Evaluación de la factibilidad técnica y económica de distintos tratamientos de bio-sólidos generados por la empresa agroindustrial Invertec S.A. Memoria de Título.

SISS (2016). Informe de Gestión del Sector Sanitario.

SISS (2018). Procedimiento autorización tarifaria por cumplimiento del decreto supremo SEGPRES N°4/09 Reglamento para el manejo de lodos generados en PTAS.

Suez (2015). El Trebal, Mapocho. Wastewater treatment plants.

Thermosystem (2017). Secado con el topo eléctrico. Recuperado de: <http://www.thermo-system.com/es/productos/secado-solar-de-lodos/el-topo-electrico/secado/>.

Thermosystem (2018). Evaluación económica secador solar para empresa Esval.

UNESCO (2017). Aguas residuales, el recurso desaprovechado. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017.

Velásquez, P. (2015). Digestión aerobia y anaerobia. Recuperado de: <https://prezi.com/gaeybyrjubdd/digestion-aerobia-y-anaerobia/>.

Veléz, J. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? Recuperado de: http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/RevistaLimpia/vol2n2/PL_V2N2_57-71_biosolidos.pdf.

11. ANEXOS

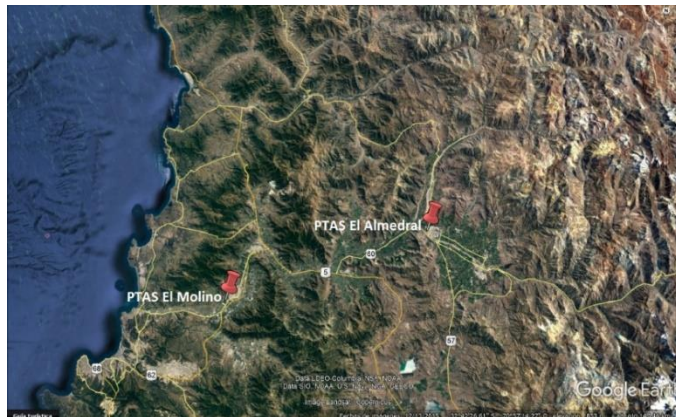
11.1. Mapas referenciales

Imagen 11: Mapa de ubicación de las PTAS a analizar y vertedero KDM.



Fuente: Google Earth Pro.

Imagen 12: Mapa de ubicación de potenciales plantas de Secado solar con gestor de lodos y Secado solar con topo.



Fuente: Google Earth Pro.

Imagen 13: Mapa de ubicación de potenciales plantas de Secado térmico directo con vapor.



Fuente: Google Earth Pro.

11.2. Flujos de caja

Tabla 40: Cálculo VAC situación actual (sin proyecto).

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Costo por T&D (UF)		40.668	41.065	41.466	41.871	42.281	42.694	43.111	43.532	43.958	44.387	44.821	45.259	45.701	46.148	46.598
Costo Encalado [UF]		11.517	11.630	11.744	11.858	11.974	12.091	12.209	12.329	12.449	12.571	12.694	12.818	12.943	13.069	13.197
Total costos [UF]		52.185	52.695	53.210	53.730	54.255	54.785	55.320	55.861	56.407	56.958	57.514	58.076	58.644	59.217	59.796
VAC	503.093															

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41: Flujo de caja implementación tecnología de secado solar evaluación general.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Costo Anterior		41.065	41.466	41.871	42.281	42.694	43.111	43.532	43.958	44.387	44.821	45.259	45.701	46.148	46.598	47.054
Costo anterior encalado		11.517	11.630	11.743	11.858	11.974	12.091	12.209	12.329	12.449	12.571	12.694	12.818	12.943	13.069	13.197
Costo transporte entre PTAS		-1.398	-1.440	-1.454	-1.468	-1.482	-1.497	-1.511	-1.526	-1.541	-1.556	-1.571	-1.587	-1.602	-1.618	-1.634
Costo por T&D		-12.894	-13.020	-13.148	-13.276	-13.406	-13.537	-13.669	-13.803	-13.938	-14.074	-14.211	-14.350	-14.490	-14.632	-14.775
Energía		-2.654	-2.680	-2.707	-2.733	-2.760	-2.787	-2.814	-2.841	-2.869	-2.897	-2.926	-2.954	-2.983	-3.012	-3.042
Mantención		-2.398	-2.421	-2.445	-2.469	-2.493	-2.517	-2.542	-2.567	-2.592	-2.617	-2.643	-2.669	-2.695	-2.721	-2.748
HH		-2.448	-2.497	-2.547	-2.598	-2.650	-2.703	-2.757	-2.812	-2.868	-2.926	-2.984	-3.044	-3.105	-3.167	-3.230
Encalado (Eventual)		-6.066	-6.126	-6.185	-6.246	-6.307	-6.369	-6.431	-6.494	-6.557	-6.621	-6.686	-6.751	-6.817	-6.884	-6.951
Costo terreno	2.074															
Inversión	174.027															
Flujo	-176.101	24.723	24.912	25.130	25.349	25.570	25.793	26.017	26.243	26.471	26.700	26.931	27.164	27.398	27.634	27.872

VAC	270.295
VAN	56.566
TIR	12%
Payback	7,04

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 42: Flujo de caja implementación tecnología de secado solar con gestor de lodos.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Costo Anterior T&D		41.065	41.466	41.871	42.281	42.694	43.111	43.532	43.958	44.387	44.821	45.259	45.701	46.148	46.598	47.054
Costo anterior encalado		11.517	11.630	11.743	11.858	11.974	12.091	12.209	12.329	12.449	12.571	12.694	12.818	12.943	13.069	13.197
Costo por T&D		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costo transporte entre PTAS		-1.426	-1.440	-1.454	-1.468	-1.482	-1.497	-1.511	-1.526	-1.541	-1.556	-1.571	-1.587	-1.602	-1.618	-1.634
Energía		-2.680	-2.707	-2.733	-2.760	-2.787	-2.814	-2.841	-2.869	-2.897	-2.926	-2.954	-2.983	-3.012	-3.042	-3.071
Mantenición		-2.603	-2.628	-2.654	-2.680	-2.706	-2.732	-2.759	-2.786	-2.813	-2.841	-2.869	-2.897	-2.925	-2.953	-2.982
HH		-3.884	-3.962	-4.041	-4.122	-4.204	-4.288	-4.374	-4.462	-4.551	-4.642	-4.735	-4.829	-4.926	-5.025	-5.125
Encalado (Eventual)		-6.185	-6.246	-6.307	-6.369	-6.431	-6.494	-6.557	-6.621	-6.686	-6.751	-6.817	-6.884	-6.951	-7.019	-7.088
Inversión	167.468															
Costo terreno	2.074															
Flujo	169.542	22.909	23.094	23.279	23.465	23.652	23.840	24.029	24.219	24.410	24.602	24.795	24.989	25.184	25.379	25.576
VAC	288.406															
VAN	45.771															
TIR	11%															
Payback	7,31															

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43: Flujo de caja implementación tecnología de secado solar con topo.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Costo Anterior T&D		41.064	41.465	41.870	42.279	42.692	43.109	43.531	43.956	44.385	44.819	45.257	45.699	46.146	46.597	47.052
Costo anterior encalado		11.517	11.629	11.743	11.858	11.974	12.091	12.209	12.328	12.449	12.570	12.693	12.817	12.942	13.069	13.197
Costo por T&D		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Costo transporte entre PTAS		-1.426	-1.440	-1.454	-1.468	-1.482	-1.497	-1.511	-1.526	-1.541	-1.556	-1.571	-1.587	-1.602	-1.618	-1.634
Energía		-2.680	-2.706	-2.733	-2.760	-2.787	-2.814	-2.841	-2.869	-2.897	-2.925	-2.954	-2.983	-3.012	-3.041	-3.071
Mantenición		-2.445	-2.469	-2.493	-2.517	-2.542	-2.567	-2.592	-2.617	-2.643	-2.668	-2.695	-2.721	-2.747	-2.774	-2.801
HH		-2.497	-2.547	-2.598	-2.650	-2.703	-2.757	-2.812	-2.868	-2.926	-2.984	-3.044	-3.105	-3.167	-3.230	-3.295
Encalado (Eventual)		-6.185	-6.246	-6.307	-6.368	-6.431	-6.493	-6.557	-6.621	-6.686	-6.751	-6.817	-6.884	-6.951	-7.019	-7.087
Inversión	206.205															

Costo terreno	1.037															
Flujo	-207.242	24.453	24.667	24.882	25.098	25.316	25.536	25.758	25.980	26.205	26.431	26.659	26.888	27.119	27.352	27.586
VAC	272.667															
VAN	25.230															
TIR	9%															
Payback	8,43															

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 44: Flujo de caja implementación tecnología de secado térmico evaluación general.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Costo Anterior T&D		41.064	41.465	41.870	42.279	42.692	43.109	43.531	43.956	44.385	44.819	45.257	45.699	46.146	46.597	47.052
Costo anterior encalado		11.517	11.629	11.743	11.858	11.974	12.091	12.209	12.328	12.449	12.570	12.693	12.817	12.942	13.069	13.197
Costo por TyD		-6.497	-6.561	-6.625	-6.690	-6.755	-6.821	-6.888	-6.955	-7.023	-7.092	-7.161	-7.231	-7.302	-7.373	-7.445
Costo por Transporte entre PTAS		-1.381	-1.422	-1.436	-1.450	-1.464	-1.479	-1.493	-1.508	-1.522	-1.537	-1.552	-1.567	-1.583	-1.598	-1.614
Costo energía		-6.354	-6.416	-6.478	-6.542	-6.606	-6.670	-6.735	-6.801	-6.867	-6.935	-7.002	-7.071	-7.140	-7.210	-7.280
Mantención caldera + secador		-3.254	-3.286	-3.318	-3.350	-3.383	-3.416	-3.449	-3.483	-3.517	-3.552	-3.586	-3.621	-3.657	-3.692	-3.729
HH		-2.497	-2.547	-2.598	-2.650	-2.703	-2.757	-2.812	-2.868	-2.926	-2.984	-3.044	-3.105	-3.167	-3.230	-3.295
Inversión	156.572															
Flujo	-156.572	32.597	32.863	33.158	33.455	33.755	34.057	34.362	34.669	34.978	35.290	35.605	35.921	36.241	36.562	36.887
VAC	194.391															
VAN	145.740															
TIR	20%															
Payback	4,80															

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45: Flujo de caja implementación tecnología de secado térmico directo con vapor.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Costo Anterior T&D		41.064	41.465	41.870	42.279	42.692	43.109	43.531	43.956	44.385	44.819	45.257	45.699	46.146	46.597	47.052
Costo anterior encalado		11.517	11.629	11.743	11.858	11.974	12.091	12.209	12.328	12.449	12.570	12.693	12.817	12.942	13.069	13.197
Costo por TyD		-4.332	-4.374	-4.417	-4.460	-4.503	-4.547	-4.592	-4.637	-4.682	-4.728	-4.774	-4.821	-4.868	-4.915	-4.963
Costo por Transporte entre PTAS		-1.381	-1.422	-1.436	-1.450	-1.464	-1.479	-1.493	-1.508	-1.522	-1.537	-1.552	-1.567	-1.583	-1.598	-1.614
Costo energía		-6.354	-6.416	-6.478	-6.542	-6.606	-6.670	-6.735	-6.801	-6.867	-6.935	-7.002	-7.071	-7.140	-7.210	-7.280
Costo generar vapor		-1.218	-1.230	-1.242	-1.255	-1.267	-1.279	-1.292	-1.304	-1.317	-1.330	-1.343	-1.356	-1.369	-1.383	-1.396

Mantenimiento caldera + secador		-3.254	-3.286	-3.318	-3.350	-3.383	-3.416	-3.449	-3.483	-3.517	-3.552	-3.586	-3.621	-3.657	-3.692	-3.729
HH		-2.497	-2.547	-2.598	-2.650	-2.703	-2.757	-2.812	-2.868	-2.926	-2.984	-3.044	-3.105	-3.167	-3.230	-3.295
Inversión	147.324															
Flujo	147.324	33.545	33.819	34.124	34.431	34.740	35.052	35.366	35.683	36.002	36.324	36.649	36.976	37.305	37.637	37.972
VAC	185.259															
VAN	162.918															
TIR	22%															
Payback	4,39															

Fuente: Elaboración propia.

11.3. Análisis y cálculos

Imagen 14: Coeficientes para cálculo de proyección de lodos El Molino.

	Coeficientes
Intercepción	-4120326,1
Variable X 1	2171,6
Coeficiente de determinación R ²	0,99977391

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 15: Coeficientes para cálculo de proyección de lodos El Almendral.

	Coeficientes
Intercepción	-794506
Variable X 1	431
Coeficiente de determinación R ²	0,99954801

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 16: Coeficientes para cálculo de proyección de lodos Cordillera.

	Coeficientes
Intercepción	-520621,7
Variable X 1	292,2
Coeficiente de determinación R ²	0,99850822

Fuente: Elaboración propia.

Imagen 17: Coeficientes para cálculo de proyección de lodos Maitenes.

	Coeficientes
Intercepción	88145,4
Variable X 1	-26,9
Coeficiente de determinación R ²	0,98030211

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46: Resultados proyección de cantidad de lodos por PTAS.

Año	Lodos producidos por PTAS				Lodo total [ton]	Costos [UF]
	El Molino	El Almendral	Cordillera	Maitenes		
2017	13.743	4.291	5.216	2.892	26.142	36.920
2018	13.862	4.316	5.240	2.891	26.308	37.155
2019	13.977	4.341	5.262	2.888	26.469	37.382
2020	14.088	4.365	5.282	2.885	26.620	37.595
2021	14.205	4.390	5.305	2.883	26.784	37.826
2022	14.320	4.415	5.328	2.881	26.943	38.051
2023	14.435	4.439	5.350	2.879	27.103	38.277
2024	14.550	4.464	5.372	2.876	27.262	38.502
2025	14.665	4.489	5.394	2.874	27.422	38.727
2026	14.779	4.514	5.416	2.872	27.581	38.952
2027	14.894	4.538	5.438	2.870	27.741	39.178
2028	15.009	4.563	5.461	2.867	27.900	39.403
2029	15.124	4.588	5.483	2.865	28.059	39.628
2030	15.239	4.612	5.505	2.863	28.219	39.853
2031	15.354	4.637	5.527	2.860	28.379	40.079
2032	15.469	4.662	5.549	2.858	28.538	40.304
2033	15.584	4.687	5.571	2.856	28.698	40.529

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47: Cotización Huber.

Lodo total [ton]	Área [m2]	Inversión [UF]
4.500	1.920	57.730
10.000	3.994	74.800
15.600	7.200	144.030
27.500	14.643	205.903

Fuente: Huber (2018).

Tabla 48: Cotización Enercom

Lodo total [ton]	Inversión [UF]
13.365	60.000
11.856	55.000
4.680	40.000

Fuente: Enercom (2018).

Imagen 18: Solicitud Laboratorio de Química para El Molino y El Almendral.

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno, Azufre, Sólidos Totales, Sólidos Totales Volátiles		
Tipo de muestra	Lodos		
Identificación muestra	El Molino	CI 154	
	El Almendral	CI 155	
Fecha de recepción	15-05-2018	Inicio Análisis	23-05-2018
Método utilizado	Análisis elemental: Tratamiento previo: Secado muestra a 105°C durante 48 horas. Cuantificación: Analizador elemental: Thermo Finnigan. Modelo Flash EA. Serie 1112. Sólidos totales Gravimetría: secado a 105°C durante 12 horas Sólidos Totales Volátiles Calcinción a 550°C		
Responsable muestreo	Francisca Villarroel		

Fuente: Laboratorio de Química, UTFSM (2018).

Imagen 19: Resultados Laboratorio de Química para El Molino y El Almendral.

Análisis	Unidad	RESULTADOS	
		Código Interno	
		CI 154	CI 155
Cabono	[g C / 100 g de muestra seca]	46,7 ± 0,3	37,0 ± 0,1
Hidrógeno	[g H / 100 g de muestra seca]	6,93 ± 0,06	5,55 ± 0,01
Nitrógeno	[g N / 100 g de muestra seca]	5,9 ± 0,2	7,13 ± 0,02
Oxígeno	[g O / 100 g de muestra seca]	20,6 ± 0,1	21,52 ± 0,01
Azufre	[g S / 100 g de muestra seca]	0,98 ± 0,01	0,92 ± 0,04
Sólidos Totales (ST)	[g ST / 100 g de muestra recibida]	26,5 ± 0,3	15,54 ± 0,06
Sólidos Totales Volátiles	[g STV / 100 g de muestra recibida]	5,0 ± 0,2	4,7 ± 0,2

Fuente: Laboratorio de Química, UTFSM (2018).

Imagen 20: Solicitud Laboratorio de Química para Cordillera y Los Maitenes.

Información del análisis y muestra			
Análisis solicitado	Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Oxígeno, Azufre, Sólidos Totales, Sólidos Totales Volátiles		
Tipo de muestra	Lodos		
Identificación muestra	Cordillera	CI 187	
	Los Maitenes	CI 188	
Fecha de recepción	31-05-2018	Inicio Análisis	05-06-2018
Método utilizado	Análisis elemental: Tratamiento previo: Secado muestra a 105°C durante 24 horas. Cuantificación: Analizador elemental: Thermo Finnigan. Modelo Flash EA. Serie 1112. Sólidos totales Gravimetría: secado a 105°C durante 12 horas Sólidos Totales Volátiles Calcinación a 550°C		
Responsable muestreo	Francisca Villarroel		

Fuente: Laboratorio de Química, UTFSM (2018).

Imagen 21: Resultados Laboratorio de Química para Cordillera y Los Maitenes.

Análisis	Unidad	RESULTADOS	
		Código Interno	
		CI 187	CI 188
Cabono	[g C / 100 g de muestra seca]	38,49 ± 0,06	41,1 ± 0,2
Hidrógeno	[g H / 100 g de muestra seca]	5,32 ± 0,09	5,92 ± 0,05
Nitrógeno	[g N / 100 g de muestra seca]	6,84 ± 0,05	6,825 ± 0,009
Oxígeno	[g O / 100 g de muestra seca]	23,2 ± 0,2	22,6 ± 0,1
Azufre	[g S / 100 g de muestra seca]	0,98 ± 0,01	1,00 ± 0,04
Sólidos Totales (ST)	[g ST / 100 g de muestra recibida]	12,89 ± 0,02	16,85 ± 0,02
Sólidos Totales Volátiles	[g STV / 100 g de muestra recibida]	9,16 ± 0,01	12,79 ± 0,06

Fuente: Laboratorio de Química, UTFSM (2018).

Imagen 22: Resultados Laboratorio de Termodinámica para El Molino.

<u>RESULTADOS OBTENIDOS</u>			
Determinación	Resultado	Unidad	Norma
Poder Calorífico Superior (Base recibida)	5.887	[kJ/kg]	ASTM D-240
	1.406	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Inferior (Base recibida)	4.232	[kJ/kg]	
	1.011	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Superior (Base seca)	22.050	[kJ/kg]	
	5.268	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Inferior (Base seca)	20.395	[kJ/kg]	
	4.872	[kcal/kg]	
Humedad	73,3	%	ASTM D-2016-74
Cenizas	4,66	%	ASTM D-482
Observaciones: Resultado obtenido del promedio de dos determinaciones.			
			
VALPARAISO, 25 de mayo de 2018			

Fuente: Laboratorio de Termodinámica, UTFSM (2018).

Imagen 23: Resultados Laboratorio de Termodinámica para El Almendral.

<u>RESULTADOS OBTENIDOS</u>			
Determinación	Resultado	Unidad	Norma
Poder Calorífico Superior (Base recibida)	2.676	[kJ/kg]	ASTM D-240
	639	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Inferior (Base recibida)	1.428	[kJ/kg]	
	341	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Superior (Base seca)	16.936	[kJ/kg]	
	4.046	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Inferior (Base seca)	15.688	[kJ/kg]	
	3.748	[kcal/kg]	
Humedad	84,2	%	ASTM D-2016-74
Cenizas	4,18	%	ASTM D-482
Observaciones: Resultado obtenido del promedio de dos determinaciones.			
			
VALPARAISO, 25 de mayo de 2018			

Fuente: Laboratorio de Termodinámica, UTFSM (2018).

Imagen 24: Resultados Laboratorio de Termodinámica para Cordillera.

RESULTADOS OBTENIDOS			
Determinación	Resultado	Unidad	Norma
Poder Calorífico Superior (Base recibida)	3.337	[kJ/kg]	ASTM D-240
	797	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Inferior (Base recibida)	1.942	[kJ/kg]	
	464	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Superior (Base seca)	14.509	[kJ/kg]	
	3.466	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Inferior (Base seca)	13.114	[kJ/kg]	
	3.133	[kcal/kg]	
Humedad	77,0	%	ASTM D-2016-74
Cenizas	3,74	%	ASTM D-482
Observaciones: Resultado obtenido del promedio de dos determinaciones.			
 Ing. Jaime Espinoza Silva Laboratorio Termodinámica Departamento Ingeniería Mecánica FEDERICO SANTA MARÍA			
VALPARAISO, 25 de mayo de 2018			

Fuente: Laboratorio de Termodinámica, UTFSM (2018).

Imagen 25: Resultados Laboratorio de Termodinámica para Maitenes.

RESULTADOS OBTENIDOS			
Determinación	Resultado	Unidad	Norma
Poder Calorífico Superior (Base recibida)	3.096	[kJ/kg]	ASTM D-240
	740	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Inferior (Base recibida)	1.779	[kJ/kg]	
	425	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Superior (Base seca)	18.213	[kJ/kg]	
	4.351	[kcal/kg]	
Poder Calorífico Inferior (Base seca)	16.896	[kJ/kg]	
	4.036	[kcal/kg]	
Humedad	83,0	%	ASTM D-2016-74
Cenizas	3,71	%	ASTM D-482
Observaciones: Resultado obtenido del promedio de dos determinaciones.			
 Ing. Jaime Espinoza Silva Laboratorio Termodinámica Departamento Ingeniería Mecánica FEDERICO SANTA MARÍA			
VALPARAISO, 07 de junio de 2018			

Fuente: Laboratorio de Termodinámica, UTFSM (2018).