



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOTECNOLOGÍA

# ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL GENERADO POR PTAR TALAGANTE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

JAVIERA PILAR RIFFO RIVAS

PROFESOR GUÍA:

FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MELANIE COLET LAGRILLE

FELIPE SÁNCHEZ IHL

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniera Civil Química

POR: Javiera Pilar Riffo Rivas

FECHA: 04/09/2017

PROFESOR GUÍA: Felipe Díaz Alvarado

## ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA PARA UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES:

### POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL GENERADO POR PTAR TALAGANTE

El cambio climático es un problema ambiental progresivo que afecta a nivel global a la sociedad y al ecosistema. Es provocado por las emisiones antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y puede ser contenido solo mediante la reducción sustancial y continua, de tales emisiones.

En este contexto, se aplica la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida sobre el proceso de tratamiento de aguas residuales de la planta Talagante, enfocado en la emisión de GEI y, por lo tanto, en el Potencial de Calentamiento Global. Este análisis se realiza con el objetivo de evaluar ambientalmente el escenario del proceso actual y un escenario futuro, con foco en la gestión energética, a fin de, identificar las actividades que posean un mayor impacto y recomendar acciones que apunten a disminuir dicho impacto sin afectar la operación normal de la planta.

Se analizan tres escenarios: el primero es el actual donde se combustiona el 40% del biogás en caldera para abastecer de energía al biodigestor y el excedente en antorcha; en el segundo, escenario el 100% del biogás es combustionando en un motor de cogeneración que produciría energía eléctrica para la planta y energía térmica para el biodigestor; el tercer escenario corresponde al escenario proyectado al año 2024, que comprende la ampliación de la planta en un módulo de la línea de agua.

El resultado del análisis muestra que el total de las emisiones del escenario base (año 2016) fue de 5.100 tCO<sub>2eq</sub>. En el nuevo escenario, con cogeneración, se disminuye en un 17% las emisiones anuales de la planta. El tercer escenario se obtiene un total de 5.000 tCO<sub>2eq</sub> para el año 2024. Las emisiones directas de la planta contribuyen sobre el 60% del total de las emisiones del sistema en todos los escenarios analizados. La emisión más significativa corresponde al óxido nitroso que proviene desde el tratamiento biológico de la planta, aportando más del 70% de las emisiones directas en todos los escenarios analizados. Estas emisiones, al estar dentro del campo de acción directo de la empresa, poseen un alto potencial de disminución.

En función de los resultados, se definieron estrategias de mitigación para las emisiones directas de óxido nitroso. Se generaron tres recomendaciones: la primera es la realización de campañas de medición de óxido nitroso, la segunda es la optimización de la aeración del tratamiento biológico, y la tercera es la implementación de la tecnología *Anammox* sobre las aguas de rechazo.

Como proyección se sugiere considerar el Potencial de Calentamiento Global en la toma de decisiones de la empresa. De esta forma todos los proyectos realizados pueden contribuir a la disminución de la emisión de GEI, y, con ello, a la contención del cambio climático.

*A mi mamá, a mi papá, a la tierra.*

*En ese orden y en ninguno.*

## Agradecimientos

*Ahora que me encuentro cerca de cerrar esta etapa tan importante en mi vida, me siento como la mar, caótica. Quisiera agradecer profundamente a todas las personas que recorrieron este camino conmigo y me permitieron recorrer sus caminos con ustedes, en especial a:*

*Papi y mami, a ustedes les agradezco su amoramoramor infinito, su intenso esfuerzo para lograr que mis hermanos y yo podamos estudiar y ser las personas que queremos ser. Por las enseñanzas, por hacernos personas inclusivas, respetuosas y que buscamos el bien común. A ustedes, mi vida.*

*Marce, por todas esas noches juntas, conversaciones, bailes, risas, por todo, hermana. Te amo mucho, tenemos un mundo por delante.*

*Nacho, por tus invitaciones, por tu protección, por hacernos sentir siempre seguras.*

*A ti Sophi, por regalarme tu amor rebelde desde tan pequeña.*

*A ti Javi, por vivir esto conmigo desde otra dimensión, por las conversaciones, por la conexión con otras realidades, por el camino recorrido, por el amor. Nuestra amistad es irrompible, porque logramos encontrar en la intersección entre dos mundos y mentalidades complejas.*

*A ti Catita, porque nos conocimos en el momento exacto y nos contuvimos en estos últimos años de universidad, que llevaron tantos cambios en mí, aprendimos tanto juntas, amiga.*

*A ustedes, mis compañeras y compañeros de los primeros años de U, por vivir conmigo momentos tan difíciles y extraños. También a los que me acompañaron durante la especialidad, con los que pude trabajar y festejar.*

*A ti Miguel, por ser mi cómplice durante los años más difíciles, por el amor que nos tuvimos, y porque supimos soltarnos cuando fue necesario.*

*A ti Cami, la primera que conocí de este mundo misterioso, porque supimos mantenernos cuando tomamos caminos distintos, por el apañe amiga.*

*A Felipe D., por ser un profesor que no esconde su sensibilidad, por todos los aprendizajes y oportunidades que me diste durante mi transcurso por el DIQBT. Felipe, es un placer trabajar contigo.*

*A ti Felipe S. por darme la oportunidad de realizar mi memoria en A.A. en el área de Medioambiente donde me sentí tan bien recibida, por permitirme tomar mis decisiones con respecto a mi trabajo y por motivarme a buscar lo que me gusta.*

*A mis antepasados, por las raíces.*

*A la vida, por forjarme como mujer libre, feminista y feliz.*

# Tabla de contenido

Acrónimos .....	x
1 Introducción.....	1
1.1 Aguas Andinas S.A.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 General.....	3
1.2.2 Específicos.....	3
2 Metodología.....	4
2.1.1 Contextualización y revisión de antecedentes .....	4
2.1.2 Realización de Análisis de Ciclo de Vida .....	4
2.1.3 Generación de propuestas y recomendaciones .....	5
2.2 Estructura del estudio.....	5
3 Antecedentes técnicos.....	6
3.1 Proceso de tratamiento de aguas residuales .....	6
3.1.1 Tratamiento Preliminar.....	7
3.1.2 Tratamiento Primario.....	7
3.1.3 Tratamiento Secundario.....	7
3.1.4 Tratamiento de lodos .....	9
3.1.5 Sistema de desodorización.....	10
3.2 Análisis de ciclo de vida .....	10
3.2.1 Objetivo y alcance del estudio.....	11
3.2.2 Análisis del inventario .....	12
3.2.3 Evaluación del impacto ambiental.....	12
3.2.4 Interpretación del ciclo de vida .....	13
3.3 Cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero.....	14
3.4 Escenario energético chileno .....	16
3.4.1 Proyección escenario energético chileno.....	18
4 Estado del arte .....	21
4.1 Análisis de ciclo de vida .....	21
4.1.1 Escenario mundial .....	21
4.1.2 Aplicación de referencia: Italia 2016.....	22
4.1.3 Escenario chileno.....	23
5 Objetivo y alcance del ACV.....	24

5.1	Objetivo del estudio .....	24
5.2	Alcance del estudio .....	24
5.2.1	Escenarios .....	24
5.2.2	Unidad funcional .....	26
5.2.3	Límites del sistema .....	27
5.2.4	Calidad de los datos .....	27
5.2.5	Categorías de impacto .....	28
6	Análisis del inventario .....	31
6.1	Datos del sistema y factores de emisión .....	31
6.1.1	Emisiones directas .....	31
6.1.2	Matriz energética .....	35
6.1.3	Disposición de residuos .....	35
6.1.4	Transporte .....	36
6.1.5	Producción de químicos .....	36
6.2	Escenario N°2: cogeneración .....	36
6.3	Escenario 3: ampliación .....	39
6.3.1	Variación del escenario ampliado .....	40
7	Evaluación del impacto ambiental .....	41
7.1	Emisiones totales por escenario .....	41
7.2	Distribución emisiones por alcance .....	43
7.2.1	Distribución emisiones alcance N°1 .....	44
7.2.2	Distribución emisiones alcance N°3 .....	45
7.3	Emisiones por GEI .....	46
7.3.1	Análisis de sensibilidad .....	47
7.4	Indicadores de emisión .....	48
8	Recomendaciones .....	51
8.1	Producción de óxido nitroso en una PTAR .....	51
8.1.1	Campana de medición óxido nitroso .....	52
8.2	Condiciones de operación .....	53
8.3	Tecnologías de remoción de nitrógeno .....	55
8.3.1	Proceso Anammox .....	56
8.4	Análisis de recomendaciones .....	59
9	Conclusiones .....	61
	Bibliografía .....	63

Anexos.....	67
Anexo A: Pronóstico escenario ampliado .....	67
Anexo B: Ejemplos de cálculo .....	68
Anexo B.1: Emisiones directas.....	68
Anexo B.2: Consumo energía eléctrica .....	69
Anexo B.3: Disposición.....	70
Anexo B.4: Transporte .....	71
Anexo B.5: Producción de químicos .....	71
Anexo C: Resultados específicos de la huella de carbono .....	72
Anexo D: Cotización equipos de medición de óxido nitroso .....	73
Anexo E: Información adicional sobre tecnología Anammox .....	75

## Índice de tablas

Tabla 1: Tipos de tratamiento secundario utilizados en la depuración de agua residual. Adaptado de [8].....	8
Tabla 2: Factor de emisión pronosticado para el SIC en el año 2030 .....	20
Tabla 3: Factor de potencial de calentamiento global [30] .....	29
Tabla 4: Características promedio del afluente y efluente de la planta del año 2016 .....	31
Tabla 5: Consumo eléctrico y generación de biogás de la PTAR Talagante en el año 2016.....	31
Tabla 6: Factor de emisión equipos de la línea de lodos .....	35
Tabla 7: Factor de emisión del SIC en distintos años .....	35
Tabla 8: Factor de emisión por GEI para cada residuo generado en kg de GEI por kg de residuo. .....	36
Tabla 9: Factor de emisión medios de transporte .....	36
Tabla 10: Factor de emisión de producción de químicos .....	36
Tabla 11: Factor de emisión motor de cogeneración.....	37
Tabla 12: Características promedio del afluente y efluente de la planta del año 2024, considerando crecimiento vegetativo.....	39
Tabla 13: Consumo eléctrico y generación de biogás de la PTAR Talagante en el año 2024, considerando crecimiento vegetativo .....	40
Tabla 14: Características promedio del afluente y efluente de la planta del año 2024, considerando redistribución afluente .....	40
Tabla 15: Consumo eléctrico y generación de biogás de la PTAR Talagante en el año 2024, considerando redistribución afluente.....	40
Tabla 16: Comparación factores de emisión de equipos de combustión.....	45
Tabla 17: Cotización de equipos de medición.....	53
Tabla 18: Análisis comparativo entre tecnologías nitrificación parcial/ anammox y nitrificación/desnitrificación. Flechas azules indican ventaja y amarillas desventaja.....	58
Tabla 19: Factores de decisión sobre la realización de las recomendaciones .....	59
Tabla 20: Emisiones directas de metano y óxido nitroso del Escenario N°3- Ampliación.....	69
Tabla 21: Emisiones de disposición de residuos Escenario N°3- Ampliación.....	70
Tabla 22: Resultados emisiones de transporte de residuos y químicos del Escenario N°3- Ampliación .....	71
Tabla 23: Resultados emisiones producción de químicos del Escenario N°3- Ampliación.....	71
Tabla 24: Resultados Escenario N°1 - Base .....	72
Tabla 25: Resultados Escenario N°2 - Cogeneración.....	72
Tabla 26: Resultados Escenario N°3 - Ampliación .....	72
Tabla 27: Resultados Escenario N°3 – Ampliación. Crecimiento vegetativo.....	72



## Índice de figuras

Figura 1: Proceso de tratamiento de aguas residuales simplificado .....	7
Figura 2: Procesos de nitrificación y desnitrificación .....	9
Figura 3: Marco de referencia de un Análisis de Ciclo de Vida, junto a las principales actividades a realizar en cada etapa adaptado de [12] .....	11
Figura 4: Esquematización de las relaciones entre intervenciones, categorías de impacto intermedias y áreas de protección. Adaptado de [17].....	13
Figura 5: Emisiones antropógenas globales anuales de GEI para el período 1970-2010 [18].....	15
Figura 6: Emisiones de GEI por sector en Chile [3]. Los sectores son: energía, IPPU (Procesos industriales y uso de productos), AFOLU (Agricultura, silvicultura y otros usos de suelo) y residuos.....	15
Figura 7: Total nacional de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por tecnología en MW [4] .....	17
Figura 8: Total SIC de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por tecnología en MW [4] .....	17
Figura 9: Distribución de los MW de los proyectos de generación eléctrica en evaluación ambiental [4] .....	18
Figura 10: Distribución matriz energética proyectada al año 2030, adaptado de [21].....	19
Figura 11: Esquema simplificado Escenario N°1 - base .....	25
Figura 12: Esquema simplificado Escenario N°2 – cogeneración. * La caldera es el equipo de respaldo para cuando el motor se encuentre fuera de operación por mantenimiento u otro.....	26
Figura 13: Límites del sistema.....	27
Figura 14: Modelo de línea de agua .....	32
Figura 15: Modelo línea de lodos Escenario N°1- Base.....	34
Figura 16: Modelo línea de lodos escenario N°2 .....	38
Figura 17: Proporción de GEI totales emitidos para cada escenario expresado en tCO <sub>2eq</sub> .....	47
Figura 18: Producción de óxido nitroso en procesos de nitrificación y denitrificación .....	52
Figura 19: Variables que afectan la producción de óxido nitroso en procesos de nitrificación y desnitrificación. Adaptado de [55] .....	54
Figura 20: Esquema proceso Anammox.....	56
Figura 21: Esquema de recomendación incorporación tecnología Anammox. Flechas azules corresponden a agua y las cafés a lodo.....	59
Figura 22: Cotización de N <sub>2</sub> O - WW Unisense, no incluye IVA [51] .....	73
Figura 23: Cotización de Analizador Servomex N <sub>2</sub> O, no incluye IVA [54].....	74
Figura 24: Distribución geográfica de plantas industriales que utilizan la tecnología anammox alrededor del planeta al año 2015 [60] .....	75

## Índice de gráficos

Gráfico 1: Distribución emisiones Escenario N°1- Base .....	41
Gráfico 2: Distribución emisiones Escenario N°2- Cogeneración .....	42
Gráfico 3: Distribución emisiones Escenario N°3- Ampliación con redistribución de afluente (tasa de crecimiento 2%) .....	43
Gráfico 4: Distribución de emisiones directas o alcance N°1 para cada escenario .....	44
Gráfico 5: Emisiones alcance N°3 para cada escenario .....	46
Gráfico 6: Análisis de sensibilidad sobre las emisiones directas de la planta, considerando en el caso pesimista un factor de emisión de $0,0065 \text{ kgN}_2\text{O/kgTKN}_{\text{afluente}}$ y en el caso optimista de $0,0035 \text{ kgN}_2\text{O/kgTKN}_{\text{afluente}}$ .....	48
Gráfico 7 : Indicador de emisión en $\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ de agua tratada por escenario .....	49
Gráfico 8: Indicador de emisión en $\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ de agua tratada según estudios realizados a plantas de tratamiento de Aguas Andinas y el calculado en el presente estudio. ....	49
Gráfico 9: Concentración NKT del afluente y efluente para la planta Talagante en el período 2013-2017 .....	60
Gráfico 10: Producción de biogás en función del caudal afluente. ....	67

## **Acrónimos**

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

AFOLU: Agricultura, silvicultura y otros usos de suelo

Anammox: *Anaerobic ammonium oxidation*

AOB: *Ammonia Oxidizing Bacteria*

CSP: *Concentrated Solar Power*

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

ERNCC: Energía Renovable No Convencional

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GHG: *Green House Gas*

GWP: *Global Warming Potential*

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPPU: Procesos industriales y uso de productos

ISO: Organización Internacional de Normalización

MS: Lodos mixtos (*Mixed Sludge*)

NKT: Nitrógeno Total Kjeldahl

NOB: *Nitrite Oxidizing Bacteria*

PAM: Poliacrilamida

PCG: Potencial de Calentamiento Global

PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable

PTAR: Planta de Tratamiento de Agua Residual

RCA: Resolución de Calificación Ambiental

SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

SIC: Sistema Interconectado Central

SING: Sistema Interconectado del Norte Grande

# 1 Introducción

El ciclo natural del agua es un proceso continuo y complejo. En él, el agua circula a través de la Tierra y su atmósfera involucrando procesos de evaporación, condensación, precipitación y transpiración, presentándose en estado líquido, gaseoso y sólido. Este proceso es llamado ciclo hidrológico. Por otro lado, el ciclo urbano del agua se basa en la captación desde fuentes hídricas, producción de agua potable, distribución en la red urbana, posterior recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales.

Actualmente, el objetivo del ciclo urbano del agua es alterar mínimamente el ciclo hidrológico, por lo que la etapa específica de tratamiento de aguas residuales se encarga de disminuir los contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en las aguas de uso humano e industrial para después ser reintegrada al ciclo natural.

La operación de este tipo de infraestructura está asociada a un alto consumo energético relacionado principalmente con el sistema de bombeo, elevación del agua y aeración de sistemas biológicos dependiendo de la tecnología utilizada [1]. Esto toma relevancia debido a que el sector energía representa el 35% de las emisiones mundiales de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [2] y, en Chile, este porcentaje es aún mayor alcanzando el 77% del total de las emisiones chilenas del año 2013 [3]. La emisión antropogénica excesiva de GEI es la principal causa del cambio climático, problemática medioambiental de nivel global considerada como el mayor desafío que ha debido enfrentar la humanidad y que ha tomado relevancia durante las últimas décadas dadas las posibles consecuencias que puede tener.

Así, el sector energía lleva asociado un alto impacto ambiental, si este se enfoca, además, en las emisiones de GEI y, por lo tanto, en el cambio climático.

En general, la energía necesaria para la operación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) es abastecida por la matriz energética del lugar donde se ubique. En particular, las plantas de tratamiento ubicadas en la región Metropolitana son abastecidas por el Sistema Interconectado Central (SIC), cuya matriz primaria tiene una generación eléctrica neta instalada de 17.000 MW, donde el 48% es de origen fósil [4].

Dado lo anterior cobra importancia la búsqueda de nuevas formas de energía para cumplir dos objetivos: disminuir la dependencia sobre las energías de origen fósil debido al alto impacto ambiental ligado al uso de estos combustibles y operar procesos más sostenibles para el medio ambiente.

Este estudio tiene el propósito de evaluar el cambio en el uso del biogás producido en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Talagante. Actualmente, una fracción de este es combustionado en caldera y el excedente en antorcha; en el escenario futuro se combustionará el 100% en un motor de cogeneración, como medida de eficiencia energética. Además, del análisis, se generarán recomendaciones que permitan desarrollar líneas de acción para la mitigación de impactos asociados a la emisión de GEI, manteniendo el objetivo productivo inicial de la planta, lo anterior evaluado mediante la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida.

## **1.1 Aguas Andinas S.A.**

El Grupo Aguas está conformado por nueve empresas, todas vinculadas al mercado sanitario. Aguas Andinas S.A., Aguas Cordillera S.A., Aguas Manquehue S.A. y la Empresa de Servicios Sanitarios de Los Lagos S.A. (ESSAL) son concesionarias de servicios sanitarios, sometidas a la legislación que regula el sector. Se trata de empresas que prestan servicios de captación, producción, distribución de agua potable, recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales y demás prestaciones relacionadas con dichas actividades. Por su parte, las cuatro empresas vinculadas restantes ofrecen servicios relacionados con los residuos industriales líquidos, comercialización de materiales, análisis de laboratorio y desarrollo de proyectos energéticos relacionados con empresas sanitarias [5].

Específicamente, Aguas Andinas S.A. se encarga de la captación, producción, distribución, alcantarillado y tratamiento de aproximadamente el 90% del agua de la región Metropolitana con respecto al total de clientes inmuebles de la región [6], completando el ciclo integral del agua urbana. En este contexto, en el caso de producción, la materia prima es agua cruda de fuentes hídricas superficiales (Río Maipo, Embalse el Yeso y estero San Ramón) y subterráneas (150 pozos profundos), obteniéndose como producto agua potable, y, en el caso de depuración, la materia prima son aguas servidas obteniéndose aguas depuradas [7].

Las principales Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) son: complejo Vizcachas constituido por Vizcachas, Vizcachitas e Ingeniero Antonio Tagle, y planta La Florida. Ambas captan agua desde fuentes superficiales y, sumado a otras fuentes subterráneas, captan un total de 22.000 l/s de agua cruda.

En cuanto a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), son dos plantas con un alto caudal de tratamiento: Farfana y complejo Trebal-Mapocho, cada una trata aproximadamente 8,8 mil litros de agua residual por segundo y, además, existen trece plantas ubicadas en distintas localidades en la región metropolitana con un menor caudal de tratamiento (entre 50 y 600 l/s).

La planta en la que se centrará este estudio es una PTAR de localidad, ubicada en la comuna Talagante de la región Metropolitana. PTAR Talagante trata y dispone las aguas residuales de las localidades de Padre Hurtado, Calera de Tango, Malloco, Peñaflor y Talagante, con un caudal total promedio de 0,6 m<sup>3</sup>/s. La planta opera en base a un proceso de filtros biológicos con digestión anaeróbica de lodos.

## **1.2 Objetivos**

A continuación, se exponen los objetivos del estudio que se aborda en el presente trabajo.

### **1.2.1 General**

Evaluar ambientalmente, mediante la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Talagante considerando el escenario actual y uno futuro, enfocado en el uso del biogás y las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Lo anterior con el fin de identificar las actividades que posean mayor impacto ambiental y generar recomendaciones que apunten a disminuirlo manteniendo el objetivo productivo de la planta.

### **1.2.2 Específicos**

- Definir el objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida, en particular, modelar los escenarios a evaluar considerando los límites del sistema a analizar.
- Evaluar la pertinencia del Potencial de Calentamiento Global como categoría de impacto.
- Realizar el análisis de inventario, es decir, recopilar los datos de la operación de la planta y los factores de emisión de los procesos involucrados, para realizar el Análisis de Ciclo de Vida.
- Evaluar el impacto ambiental, cuantificando las emisiones de Gases de Efecto Invernadero del sistema y calculando el indicador Potencial de Calentamiento Global, para todos los escenarios propuestos.
- Identificar las actividades que posean un mayor impacto ambiental, con respecto al Potencial de Calentamiento Global.
- Recomendar cambios operativos y/o tecnológicos para mejorar el desempeño ambiental del sistema.

## 2 Metodología

El desarrollo metodológico de este trabajo se ha dividido en tres etapas, descritas en los apartados siguientes. Estas etapas han cubierto: primero, la contextualización y revisión bibliográfica sobre la temática, segundo, la realización del ACV y, por último, la generación de recomendaciones en función de los resultados obtenidos previamente. Es importante destacar que las actividades de cada etapa no se realizan necesariamente en orden cronológico.

### 2.1.1 Contextualización y revisión de antecedentes

Durante esta etapa se realizan las siguientes revisiones:

- Revisión de contexto: se indaga en el proceso productivo actual de la planta Talagante mediante memoria de procesos y visitas a terreno.
- Análisis de estado del arte en procesos de tratamiento de aguas residuales: revisión bibliográfica sobre nuevas tecnologías aplicadas para mejorar el desempeño ambiental del proceso de tratamiento de aguas residuales.
- Análisis del estado del arte en uso de la metodología de Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: revisión bibliográfica de estudios de análisis de ciclo de vida y cálculo de huella de carbono aplicados a plantas de tratamiento de aguas residuales.

### 2.1.2 Realización de Análisis de Ciclo de Vida

Se basa en la ejecución de las fases que comprende la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV):

- Definición del objetivo y alcance: corresponde a la primera fase del ACV y se basa en la definición del objetivo, la unidad funcional y los límites del sistema. En esta fase debe detallarse el proceso a analizar junto con los escenarios propuestos. Se realiza mediante el análisis del proceso del caso de estudio y, con la información recopilada en la primera etapa de revisión.
- Análisis del inventario: Segunda fase del ACV que consiste en la recopilación de datos y cuantificación de entradas y salidas de los subsistemas, es decir, modelar el sistema en etapas. La recopilación de datos se realiza mediante tres vías, la primera es la recopilación de datos históricos de la planta, la segunda es búsqueda bibliográfica de datos aplicados al contexto y la tercera es el uso de la base de datos *Ecoinvent*.
- Evaluación del impacto: Tercera fase del ACV, que consiste en calcular los indicadores de impacto definidos previamente en el alcance del estudio para cada uno de los escenarios propuestos.

En cuanto a la fase de interpretación del ACV, se separa de esta etapa de la metodología debido a que se presenta en el siguiente apartado.

### **2.1.3 Generación de propuestas y recomendaciones**

En función de los resultados obtenidos del ACV, se confeccionan recomendaciones y propuestas para mejorar el proceso actual de la planta apuntando a un mejor desempeño ambiental. Estas se desarrollan mediante investigación de tecnologías específicas y considerando el contexto en el que se planean desarrollar.

## **2.2 Estructura del estudio**

El estudio se encuentra organizado siguiendo un hilo conductor lógico para comprender su desarrollo. Los tópicos que se abordan comienzan con la contextualización y motivación del estudio lo que permite definir sus objetivos y la metodología a seguir para cumplirlos.

Continuando, se aborda el marco teórico, que entrega los antecedentes técnicos necesarios para el correcto desarrollo de la memoria. Primero, se incluye el proceso de tratamiento de aguas residuales y sus posibles variaciones. Segundo, se explica en qué consiste la herramienta de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), sus etapas y cómo debe ser aplicado a un proceso. Tercero, se presenta la problemática ambiental global que se busca abordar en este trabajo que corresponde al cambio climático y la importancia del impacto ocasionado por la emisión de Gases de Efecto Invernadero a la atmósfera. Por último, dado a que el sector energía es el principal emisor de GEI en Chile se aborda como insumo del trabajo el contexto energético chileno.

Luego, se realiza un estudio bibliográfico para conocer qué se ha hecho recientemente sobre ACV aplicados a procesos en general y en particular sobre tratamiento de aguas residuales, tanto a nivel global como local.

Ya definidos los aspectos técnicos necesarios, se desarrollan las etapas propias de un ACV, iniciando con la definición de objetivo y alcance del estudio, que involucra el planteamiento de escenarios a analizar, límites del sistema, categoría de impacto, entre otros. Siguiendo con el análisis de inventario donde se presentan los datos recopilados para el cálculo de resultados. Por último, se presentan los resultados obtenidos y el análisis de estos enfocados a responder el objetivo previamente planteado del ACV.

Finalmente, dado el análisis de resultados, se generan recomendaciones que apuntan a disminuir el impacto total de la planta y se concluye.



### **3 Antecedentes técnicos**

En el presente capítulo se abordan las bases teóricas necesarias para realizar el trabajo. Entre ellas se abarca el proceso de tratamiento de aguas residuales de forma general y específico aplicado al caso de estudio, también se contextualiza sobre el análisis de ciclo de vida y su metodología, luego se hace mención al cambio climático, sus causas e impactos, debido a que éste se encuentra ligado a la categoría de impacto que se seleccionó para el desarrollo del estudio, Potencial de Calentamiento Global (PCG). Finalmente, se presenta el escenario energético actual chileno y sus proyecciones que, como se verá en la sección de resultados, afecta significativamente las emisiones de GEI del proceso de tratamiento de aguas residuales. Además, la matriz energética usualmente posee relevancia sobre la categoría de impacto PCG.

#### **3.1 Proceso de tratamiento de aguas residuales**

Como se menciona en la introducción, el objetivo de las plantas de tratamiento de aguas residuales es asemejar el ciclo urbano del agua al ciclo hidrológico del agua, reintegrando a su cauce natural aguas mínimamente alteradas en su composición y caudal.

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales consisten generalmente en una secuencia de operaciones unitarias que dependen de las características del afluente y de las características esperadas para el efluente. En esta sección se detalla el proceso de tratamiento de aguas residuales que, a modo general, cuenta con tres líneas productivas: agua, lodo y biogás, la última solo si es que existe producción de biogás en el tratamiento de lodos (Ver Figura 1). Además, se hace referencia al tratamiento específico utilizado en la planta Talagante.

En la línea de agua la materia prima es agua residual y los principales productos son aguas depuradas, lodos primarios y secundarios. Esta línea se subdivide en tres tratamientos llamados preliminar, primario y secundario, y en ocasiones, se incorporan tratamientos terciario y cuaternario. En la línea de lodos, la materia prima son lodos primarios y secundarios y el producto son lodos digeridos y biogás, en el caso de haber digestión de lodos. En las siguientes secciones se abarcan los tres tratamientos principales de la línea de agua y los procesos de la línea de lodos.

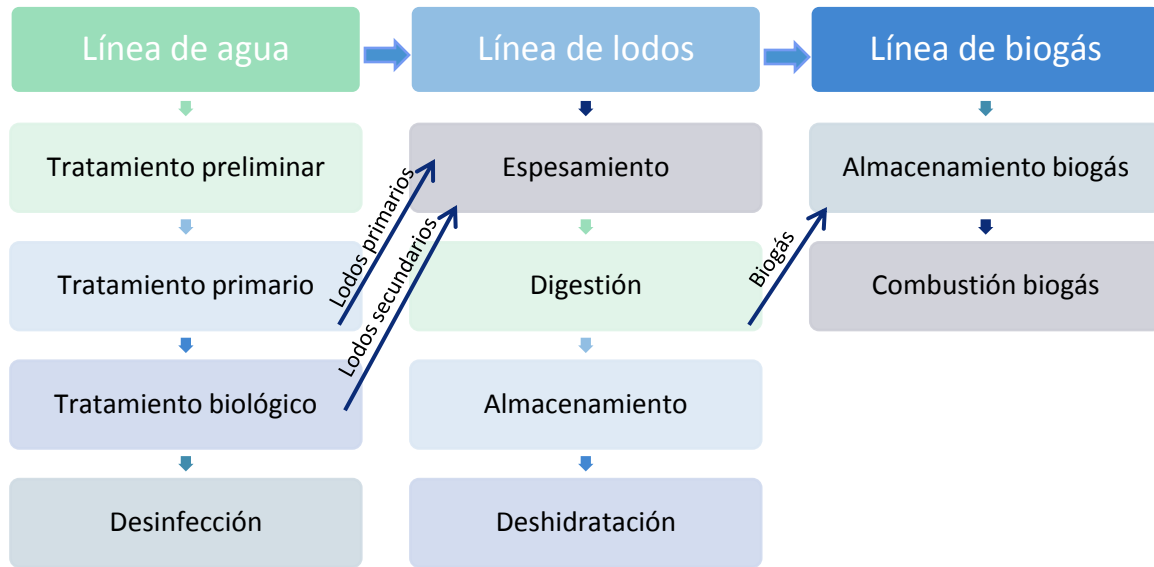


Figura 1: Proceso de tratamiento de aguas residuales simplificado

### 3.1.1 Tratamiento Preliminar

Consiste en la separación de los residuos gruesos, medianos y finos, grasas y arenas, mediante sistemas mecánicos. Consta, usualmente, de un pozo donde se retiran sólidos gruesos, un tamiz para los finos y, un desarenador y desengrasador que mediante gravedad o flotación son retirados las arenas y grasas respectivamente. En esta etapa el agua es elevada mediante un sistema de bombeo.

### 3.1.2 Tratamiento Primario

Tratamiento de acondicionamiento previo a la estabilización biológica, que tiene por objetivo separar los sólidos suspendidos del afluente principal. Generalmente se utilizan estanques de sedimentación laminar. De esta etapa se obtiene agua clarificada que es conducida a tratamiento secundario, y lodos primarios, que se envían a la línea de lodos.

### 3.1.3 Tratamiento Secundario

El agua ya sedimentada es bombeada al tratamiento biológico, el cual posee tres objetivos: disminuir la carga orgánica de las aguas, reducir el contenido de nutrientes y eliminar patógenos. De este proceso se obtiene agua depurada y lodos secundarios o biológicos.

Los tratamientos biológicos se basan en la utilización de microorganismos capaces de asimilar y procesar la carga orgánica de las aguas produciendo energía para sus funciones vitales. Estos procesos biológicos se clasifican según condiciones de operación, entre ellas, aerobias, anaerobia, anóxicas y combinaciones de las anteriores, y, según tipo de cultivo, suspensión o fijo. Los principales procesos biológicos utilizados se presentan según su clasificación en la Tabla 1.

Tabla 1: Tipos de tratamiento secundario utilizados en la depuración de agua residual. Adaptado de [8].

<b>Tipo de proceso</b>	<b>Cultivo</b>	<b>Tecnología</b>	<b>Tipo de operación</b>
<b>Procesos aerobios</b>	Cultivo en suspensión	Lodos activados	Continuos, discontinuos, aireación prolongada, canales de oxidación, etc.
		Lagunas aireadas	-
	Cultivo fijo	Biodiscos rotativos	-
		Filtros percoladores	Alta o baja carga.
<b>Procesos anóxicos</b>	Desnitrificación con cultivo en suspensión	-	-
	Desnitrificación con cultivo fijo	-	-
<b>Procesos anaerobios</b>	Cultivo en suspensión	Digestión anaerobia	Alta o baja carga.
	Cultivo fijo	Filtro anaerobio	-
		Lecho expandido	-
<b>Procesos combinados</b>	Nitrificación - desnitrificación	-	-

El proceso utilizado en la planta Talagante es el de filtros percoladores o biológicos, el que consiste en un reactor de lecho fijo en condiciones aerobias, donde la biomasa forma una película sobre el material de relleno que puede ser sintético o natural (sintético de tipo *crossflow*, en este caso), donde es posteriormente degradada por los microorganismos antes nombrados. Este proceso no requiere suministro de oxígeno debido a que posee aeración natural dado el gradiente de temperatura y a que el aire puede fluir entre los intersticios del material de relleno [9].

A medida que la biomasa crece, se desprende de las paredes por lo que se debe enviar a un proceso de sedimentación separado para obtener agua clarificada. Finalmente, se desinfecta el agua con el objeto de reducir el contenido de coliformes en el agua, como agente químico se utiliza gas cloro. El agua tratada se descarga en el curso receptor ya sea río, mar o lago. En el caso de la PTAR Talagante el curso receptor es el río Mapocho.

### 3.1.3.1 Remoción de nitrógeno

La reducción biológica de nitrógeno se consigue por dos procesos sucesivos: nitrificación y desnitrificación. En la nitrificación, se reduce la demanda de oxígeno del nitrógeno amoniacal mediante su conversión a nitrato. Este proceso es realizado mediante las bacterias Amoniooxidantes (AOB) y Nitritooxidantes (NOB), y para que ocurra el proceso es necesaria una concentración de oxígeno disuelto mayor a 1 mg/l. Además, en esta etapa las bacterias AOB producen óxido nitroso como subproducto [10].

En el segundo paso, la desnitrificación, el nitrato se convierte en un producto gaseoso que es eliminado. Los nitratos al reducirse producen óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y nitrógeno gas (N<sub>2</sub>). Para que el proceso ocurra de manera correcta se deben asegurar condiciones anóxicas y

carbono orgánico que las bacterias puedan degradar. Los procesos involucrados durante la nitrificación y desnitrificación se encuentran esquematizados en la Figura 2.

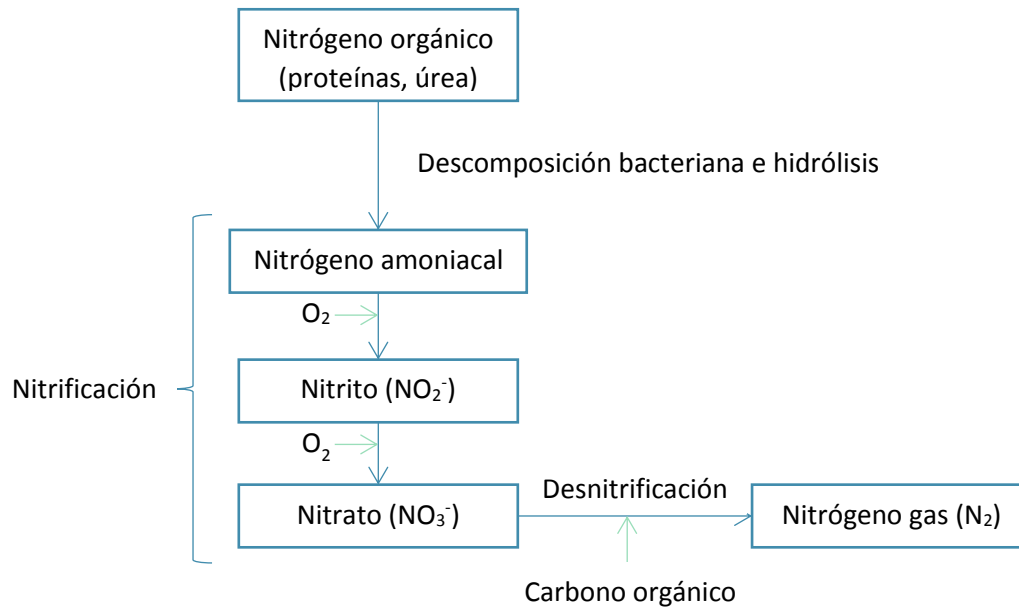


Figura 2: Procesos de nitrificación y desnitrificación

### 3.1.4 Tratamiento de lodos

La línea de tratamiento de lodos tiene por objetivos estabilizar los lodos y disminuir su volumen, para que luego estos sean dispuestos. En primer lugar, los lodos son espesados, los primarios mediante un sistema gravitacional y los secundarios, por otra parte, son espesados por flotación, con insuflación de aire comprimido. Luego, ambos lodos son enviados a una cámara de mezcla y posteriormente son bombeados hacia el digester. Del espesado gravitacional se obtiene además una corriente de agua que es reingresada al tratamiento primario.

En el digester se estabiliza biológicamente la materia orgánica de los lodos mediante digestión anaerobia. Este proceso metabólico es realizado por un conjunto de bacterias y consta de tres fases: hidrolítica, fermentativa o acidogénica y metanogénica [11].

En la planta Talagante el biodigester opera en a temperatura mesofílica, aproximadamente 35°C, y posee un período de retención de 25 días. De este proceso se obtiene lodo estabilizado para la deshidratación y biogás con 65% de metano.

El biogás es almacenado en gasómetros y, generalmente, es combustionado en calderas, motores o turbinas para obtener energía según los requerimientos de la planta, si existe excedente este puede ser combustionado en antorcha.

Por su parte, el lodo se almacena en un estanque para posteriormente ser deshidratado en centrífugas, donde se reduce su humedad desde un 98% hasta un 70% aproximadamente. Finalmente, el lodo deshidratado es enviado a relleno sanitario u otro tratamiento final.

### **3.1.5 Sistema de desodorización**

En algunas plantas de tratamiento se implementa un sistema de desodorización para disminuir el impacto de olores. En particular en la planta Talagante se posee un sistema de captación de aire viciado de las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, flotación y espesamiento de lodos, cámara de mezcla y centrífugas con el objetivo de disminuir las cargas contaminantes de H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> y CH<sub>2</sub>SH. La tecnología utilizada es filtro de biodesodorización de lecho fijo, utilizando biolita como relleno, material inerte físico, biológico y químicamente.

### **3.2 Análisis de ciclo de vida**

El Análisis de Ciclo de Vida, ACV, es una herramienta normalizada por la Organización Internacional de Normalización (ISO en nomenclatura inglesa) creada para evaluar ambientalmente un producto o proceso a lo largo de todo su ciclo de vida. Esto significa desde la adquisición de las materias primas, entradas de materia y energía, pasando por la operación, hasta la disposición final de las salidas del sistema, es decir, desde la cuna a la tumba. A través de esta visión general es posible identificar las etapas que posean una mayor carga ambiental con respecto a las demás, dependiendo también de la categoría de impacto a analizar.

Actualmente se han elaborado cuatro normas relativas al ACV:

- ISO 14040: especifica el marco general, principios y requerimientos mínimos para la elaboración de un ACV [12].
- ISO 14041: en esta norma se profundiza en la metodología para definir el objetivo y alcance del análisis, y los lineamientos para realizar el análisis de inventario [13].
- ISO 14042: en ella se describe y se establece una guía general de la fase de análisis de impacto (AICV) [14].
- ISO 14043: esta normativa proporciona recomendaciones para llevar a cabo la fase de interpretación de un ACV [15].

Las aplicaciones de un ACV son variadas, en particular los usos directos de un ACV están ligados con el desarrollo y mejora de un producto específico, planificación estratégica y toma de decisiones con el objetivo de mejorar el desempeño medioambiental del proceso o producto.

Las etapas por analizar en el caso de realizar un ACV para un proceso son la construcción, operación y posterior desmantelamiento de la planta.

En la Figura 3 se ilustra el marco de referencia para la realización de un ACV, según la metodología propuesta por la ISO 14040, el análisis cuenta con cuatro fases: objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, análisis del impacto e interpretación. Destacar que corresponde a una técnica iterativa y que cada fase depende de los resultados y análisis de las fases anteriores. En los apartados siguientes se detallan los contenidos de cada una de las fases de un ACV.

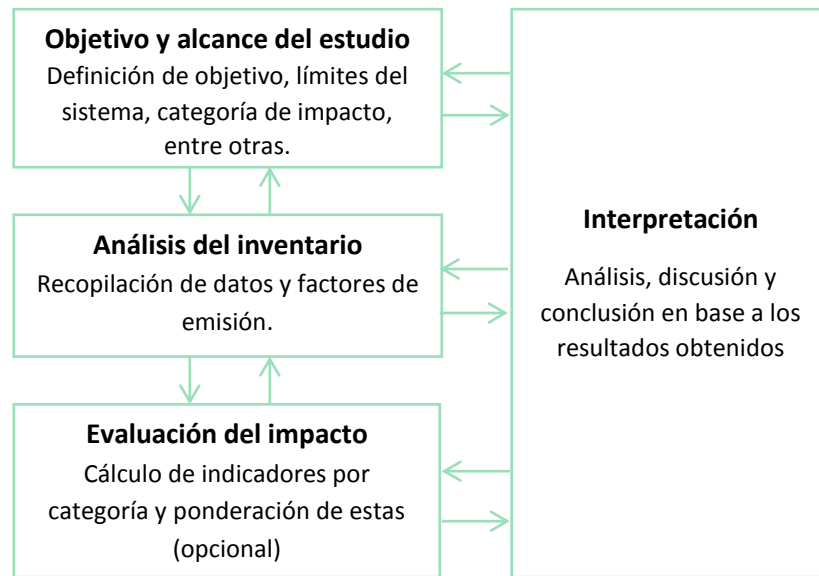


Figura 3: Marco de referencia de un Análisis de Ciclo de Vida, junto a las principales actividades a realizar en cada etapa adaptado de [12]

En las próximas subsecciones se explican las etapas a desarrollar en un ACV, características obtenidas de cada una de las normas referenciadas previamente.

### 3.2.1 Objetivo y alcance del estudio

En el objetivo se establece el tema de estudio y los motivos que llevan a realizarlo por lo que se debe identificar el público objetivo y con qué fines serán utilizados los resultados obtenidos.

Por otro lado, en el alcance del estudio se especifica el sistema del producto a estudiar, la unidad funcional, los límites del sistema, los procedimientos de asignación, las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación del impacto.

La unidad funcional define qué se está estudiando del sistema analizado. Su propósito fundamental es proporcionar una referencia a la cual se relacionen las entradas y salidas. Es necesaria esta referencia para asegurar que los resultados del ACV sean comparables, por lo tanto, todos los análisis subsecuentes son relativos a la unidad funcional. Por ejemplo, para el caso particular de tratamiento de aguas servidas suele definirse la unidad funcional como un volumen de agua tratada o un volumen de lodo producido. La elección de la unidad dependerá fuertemente del objetivo del estudio y el enfoque que se le quiera dar al análisis.

Los límites del sistema definen los procesos unitarios a ser incluidos en el análisis. Idealmente, se debería modelar de tal manera que todas las entradas y salidas en sus límites sean flujos elementales, es decir, flujos extraídos directamente de la naturaleza, sin una transformación previa por el ser humano, por ejemplo, petróleo crudo extraído desde la tierra. Por otra parte, un flujo elemental de salida puede ser emisiones al aire, al agua, radiación, entre otras.

En el establecimiento de los límites es necesario considerar las etapas del ciclo de vida, los procesos unitarios y los flujos. Para fines comparativos, los límites pueden ser fijados de manera parcial esto es, fijando fronteras que no están directamente comunicadas con la naturaleza, por ejemplo, en el

caso de la producción de insumos del proceso su estudio puede llegar a la producción de estos sin involucrar entonces la extracción de la materia prima desde la naturaleza.

### **3.2.2 Análisis del inventario**

Es la segunda fase del ACV y se basa en la recopilación de datos y los procedimientos de cálculo para la cuantificación de entradas y salidas en relación con el sistema en estudio. Corresponde a un proceso iterativo, debido a que mientras más datos se recopilan más se conoce sobre el sistema, haciendo posible identificar nuevos flujos.

Los datos están ligados principalmente a tres categorías: las entradas de energía, materia prima y entradas auxiliares; productos, co-productos y residuos; emisiones al aire, agua o suelo.

La calidad de los datos es importante para poder entregar un grado de fiabilidad alto al estudio realizado. Estos pueden ser medidos, calculados o estimados. Para asegurar la calidad de datos se debe considerar la cobertura de tiempo, posición geográfica y la tecnología.

En el presente trabajo se utilizará la base de datos *Ecoinvent*, que contiene datos de inventario de ciclo de vida de energía (electricidad, petróleo, carbón, gas natural, biomasa, biocombustibles, bioenergía, energía hidroeléctrica, energía nuclear, fotovoltaica, energía eólica, biogás, entre otras), materiales, gestión de residuos (incineración, vertido, tratamiento de aguas residuales), transporte, productos y procesos agrícolas, entre otros [16]. Para distintos procesos o productos a analizar, *Ecoinvent* provee un reporte con los subproductos, entradas desde la tecnosfera y desde el medioambiente y emisiones al aire, agua y suelos.

Además de la recopilación de datos, en la etapa de análisis de inventario, se deben relacionar los datos con cada proceso unitario y con la unidad funcional para finalmente realizar la cuantificación final.

### **3.2.3 Evaluación del impacto ambiental**

Esta fase tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del inventario de ciclo de vida.

Este paso posee tres elementos obligatorios: selección de categorías de impacto e indicadores de categoría con ello definir el modelo a utilizar para el cálculo de las distintas categorías, asignación de resultados de análisis de inventario (clasificación) y cálculo de resultados de distintos indicadores (caracterización).

Los elementos opcionales son normalización, agrupación y ponderación, los que permiten obtener un grado mayor de profundización para la posterior interpretación.

Existen tres grupos principales de categoría de impacto finales, es decir, que afectan directamente a la sociedad, llamadas áreas de protección: salud humana, entorno natural y recursos naturales. Los cuales son calculados en función de un subconjunto de categorías de impacto intermedias o *midpoint* (ver Figura 4), debido a que no existe consenso científico acerca del cálculo de las categorías finales, usualmente se llega solamente a las categorías intermedias.

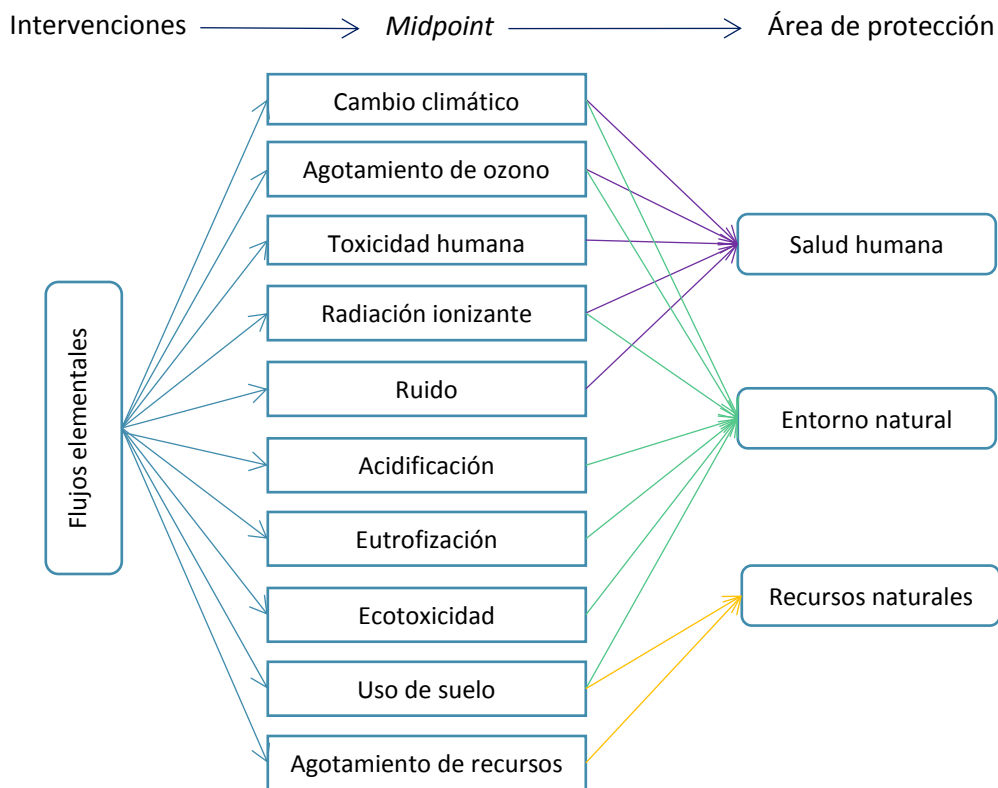


Figura 4: Esquematización de las relaciones entre intervenciones, categorías de impacto intermedias y áreas de protección. Adaptado de [17].

Además, las categorías de impacto pueden clasificarse en función del tipo de impacto que origina cada una, distinguiéndose categorías de efectos globales y de efectos regionales.

Es importante destacar que el nivel de detalle, la selección de categoría e impactos evaluados dependen fuertemente del alcance y objetivo del estudio.

### 3.2.4 Interpretación del ciclo de vida

En la fase de interpretación se reúnen los resultados del análisis de inventario y evaluación de impacto con el fin de proporcionar conclusiones y recomendaciones en función del alcance y objetivo del estudio. Además, permite determinar en qué fase del ciclo de vida del proceso se generan las principales cargas ambientales y por tanto es posible identificar qué puntos del sistema requieren mejoras y los casos de comparación de distintos escenarios se podrá determinar cuál posee un mejor desempeño ambiental.

En el esquema se muestra esta fase como transversal a cada una de las etapas del análisis, esto debido a que es posible reflexionar a partir de los resultados obtenidos para cada una de las fases, en particular del análisis del inventario y la evaluación ambiental.



### 3.3 Cambio climático y emisiones de gases de efecto invernadero

En la presente sección, se aborda el cambio climático como problemática medioambiental, sus causas e impactos, debido a que éste se encuentra ligado a la categoría de impacto que se seleccionó, a priori, para el desarrollo del estudio, el Potencial de Calentamiento Global (PCG).

El cambio climático es una problemática medioambiental progresiva de nivel global que posee consecuencias a corto, mediano y largo plazo sobre la sociedad y el ecosistema en general.

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMCC) [18], el cambio climático corresponde a:

*“Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”*

Este cambio climático se ve expresado sobre la atmósfera, los océanos, la criósfera y el nivel del mar, de diferente forma y con distinta intensidad. En cada uno de estos sistemas los cambios observados son: la atmósfera y los océanos se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar ha aumentado.

El principal cambio observado es el aumento de la temperatura media global en 0,85°C en el periodo 1880-2012, fenómeno llamado calentamiento global. La causa de este es la alta emisión de GEI a la atmósfera los que producen una capa en esta que provoca que parte de la radiación solar recibida por la tierra quede retenida y de esta forma se aumente la temperatura media global.

Los impactos del cambio climático se observan en los sistemas naturales, biológicos y humanos, siendo los últimos los más claros de reconocer. Cabe destacar que uno de estos impactos se encuentra ligado a la alteración del ciclo hidrológico del agua afectando en calidad y cantidad los recursos hídricos del planeta.

Además, otra expresión del cambio climático es la presencia de episodios extremos, tales como el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la disminución de las temperaturas frías extremas, elevación de los niveles máximos del mar y el mayor número de precipitaciones intensas en distintas regiones.

Como se mencionó, la principal causa del cambio climático son las emisiones de GEI a la atmósfera. Este aumento en las emisiones se debe principalmente a emisiones antropogénicas y han aumentado de forma progresiva desde el 1970. Los gases con mayor impacto son: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Detalle de ello se puede ver en la Figura 5.

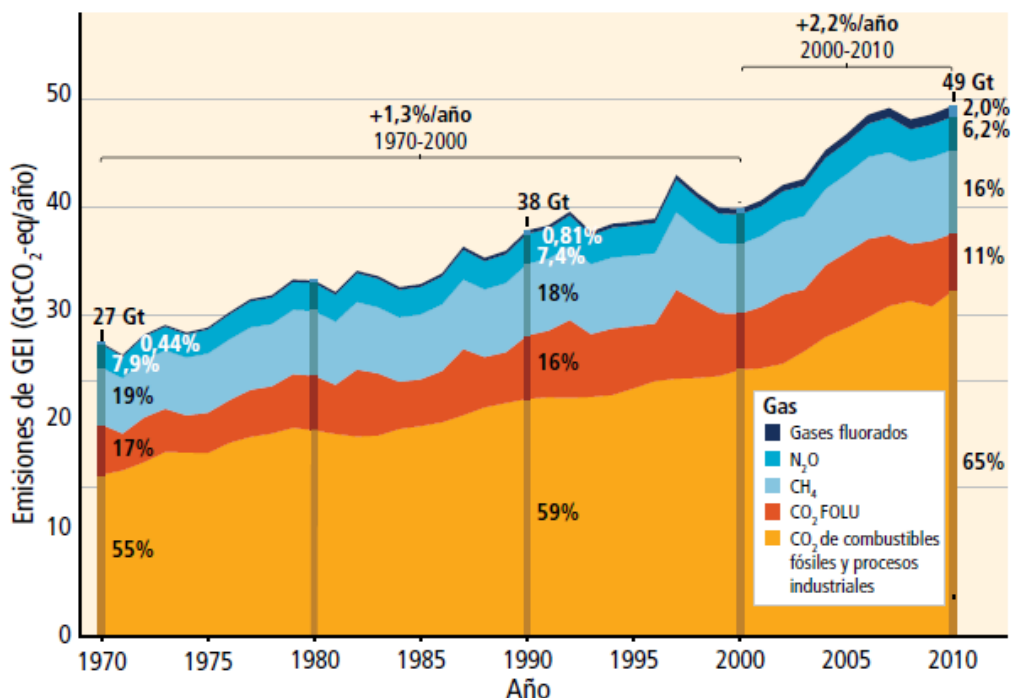


Figura 5: Emisiones antropógenas globales anuales de GEI para el período 1970-2010 [18]

En Chile, las emisiones históricas por sector se presentan en la Figura 6, se observa un crecimiento progresivo, aumentando en un 113% en el periodo 1990-2013, debido principalmente al crecimiento económico y demográfico del país. Además, el sector que posee el mayor aporte es el de la energía primaria, alcanzando un 77,4% en el año 2013 [3]. El uso de combustibles fósiles como carbón mineral y gas natural, y el uso de diésel y gasolina para transportes terrestres.

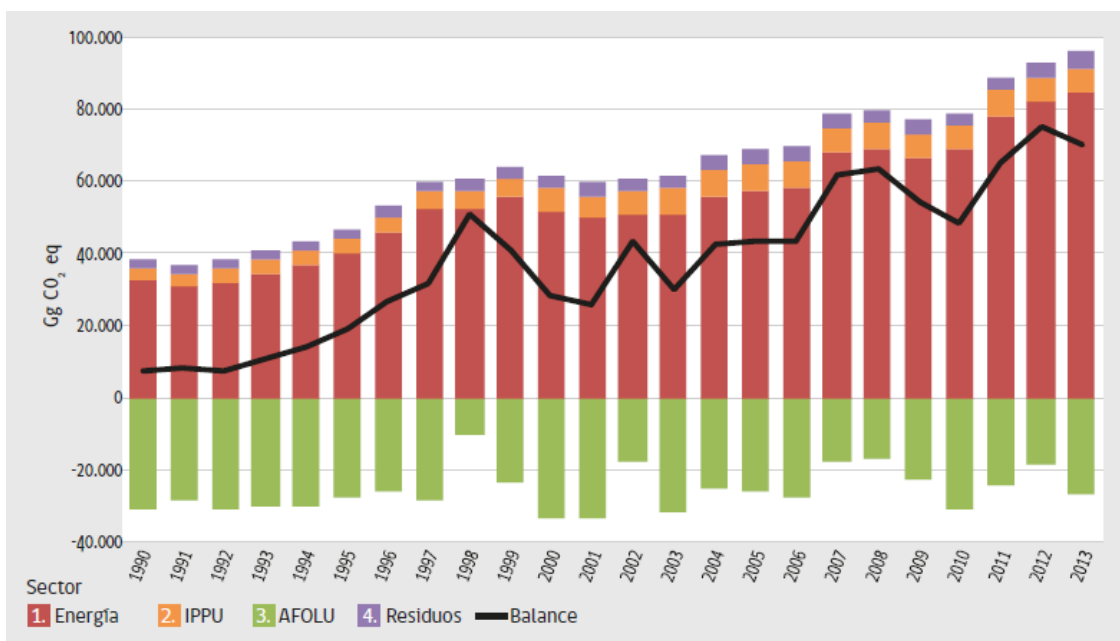


Figura 6: Emisiones de GEI por sector en Chile [3]. Los sectores son: energía, IPPU (Procesos industriales y uso de productos), AFOLU (Agricultura, silvicultura y otros usos de suelo) y residuos.

Finalmente, el cambio climático es una problemática de carácter progresiva y con consecuencias generalizadas, según el IPCC:

*La emisión continua de gases de efecto invernadero causará un mayor calentamiento y cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático, lo que hará que aumente la probabilidad de **impactos graves, generalizados e irreversibles para las personas y los ecosistemas**. Para contener el cambio climático sería necesario **reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de gases de efecto invernadero**, lo cual, junto con la adaptación, puede limitar los riesgos del cambio climático [18].*

Dado el contexto presentado, para poder contener el cambio climático, es necesario disminuir las emisiones de GEI en el país, y el campo de acción más propicio actualmente es el sector de la energía dado su protagonismo en las emisiones totales del país, por lo que cobra relevancia mejorar la gestión de los recursos energéticos del país, en todos sus niveles, desde su producción, su uso industrial y domiciliario y su uso en los medios de transporte.

### **3.4 Escenario energético chileno**

En las secciones anteriores se abordaron las temáticas de ACV y cambio climático, el último fuertemente ligado a la categoría de impacto PCG de un ACV. Debido a que el precursor del cambio climático son las emisiones antropogénicas de GEI y a que el sector energético chileno es el principal contribuyente a las emisiones totales de GEI en Chile (77,4%) [3], nace la necesidad de estudiar el escenario energético chileno, que, a través del consumo eléctrico de la planta, condicionará las emisiones de la PTAR en estudio. Así, a continuación, se analiza la composición actual de la matriz energética chilena y su proyección.

En Chile existen dos grandes sistemas eléctricos interconectados: el Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), además existen dos Sistemas Medianos (SSMM): el Sistema Eléctrico de Aysén (SEA) y el Sistema Eléctrico de Magallanes (SEM).

La capacidad instalada de generación eléctrica neta del año 2016 asciende a 22.045 MW, del cual el 76,4% corresponde al SIC, 22,8% al SING y el restante 0,8% a los SSMM. En la Figura 7 se observa el porcentaje de capacidad de generación eléctrica neta instalada dependiendo de la tecnología utilizada. Se distingue que el 59% de la generación se basa en termoelectricidad, 28% en hidráulica convencional y 14% en ERNC [4].

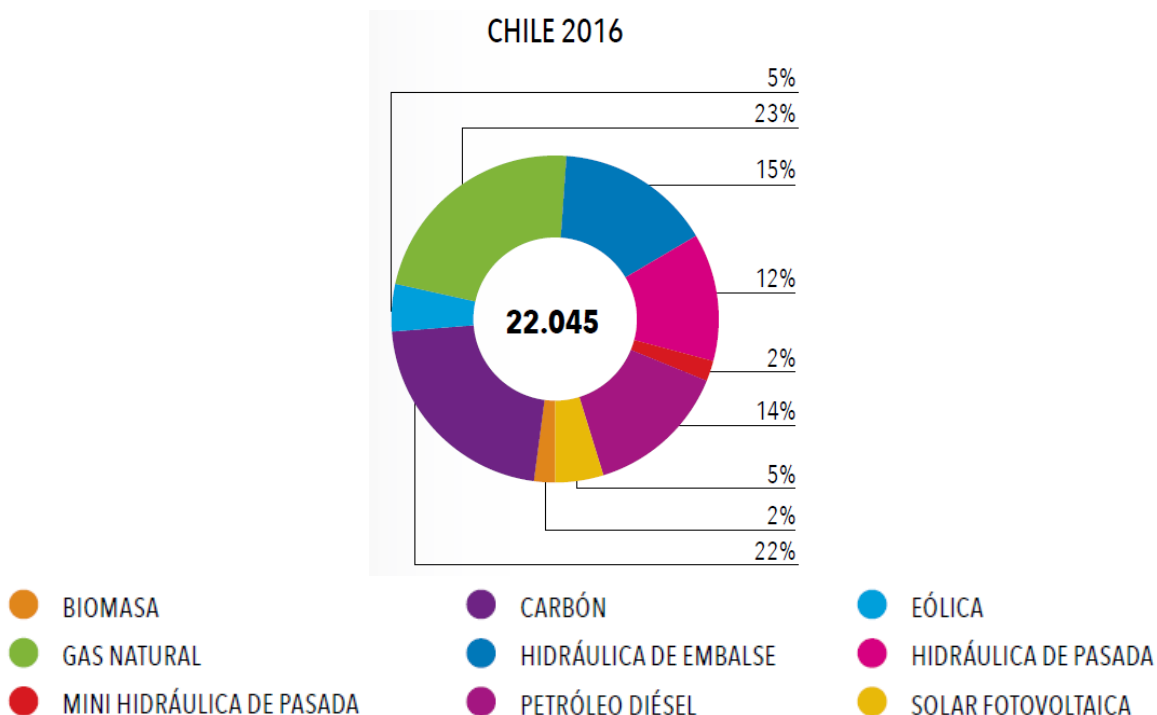


Figura 7: Total nacional de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por tecnología en MW [4]

En particular, la Región Metropolitana es abastecida por el SIC y es, en consecuencia, el sistema que abastece a la planta Talagante. La categorización según tecnología para el SIC, la Figura 8, muestra que del total de la capacidad de generación neta instalada (16.837 MW), un 48% se basa en tecnología termoeléctrica, 39% en hidroeléctrica y 13% en ERNC [4].

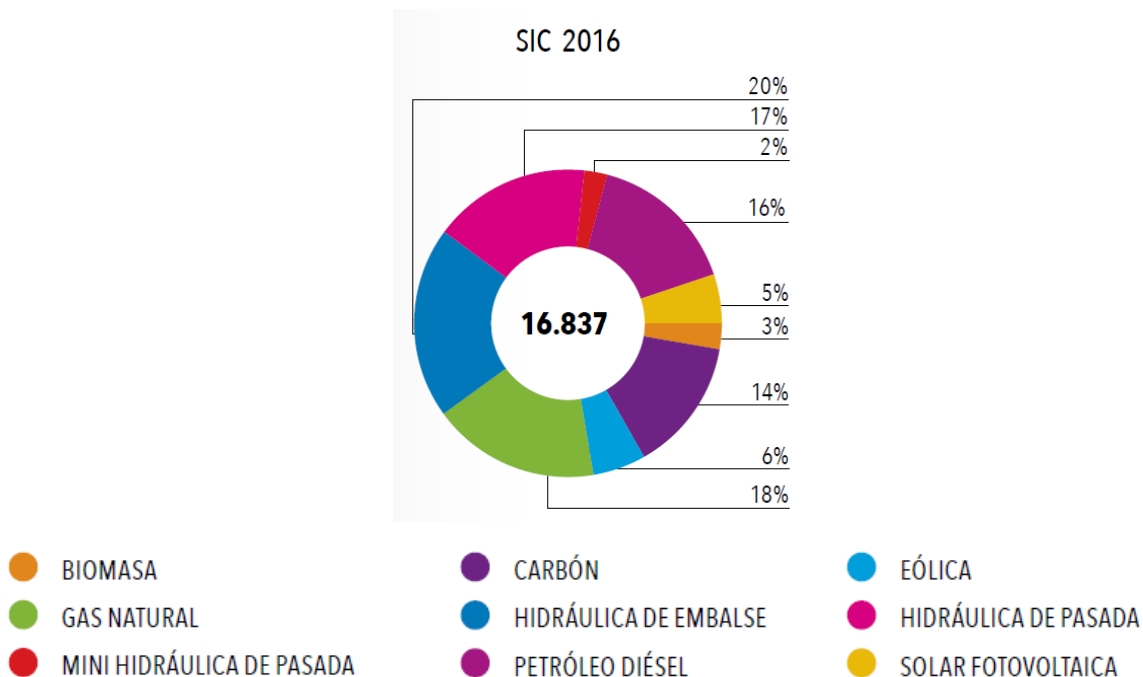


Figura 8: Total SIC de la capacidad de generación eléctrica neta instalada por tecnología en MW [4]

Finalmente, a modo de referencia, en mayo de 2017 la capacidad de generación eléctrica en el SIC ascendió a 17.282 GWh, proviniendo en un 45% de tecnología termoeléctrica, 38,3% de hidroeléctrica, 6,6% eólica y 7,4% solar, 2,7% de biomasa [19].

### 3.4.1 Proyección escenario energético chileno

El escenario energético chileno se encuentra en constante cambio debido al aumento de los requerimientos energéticos del país y a las políticas públicas que se han ido desarrollando en las últimas décadas con respecto a esta temática. Evidencia de lo anterior es la diversidad de proyectos que se encuentran actualmente bajo el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) se contabilizan a diciembre del 2016, 129 proyectos energéticos en tramitación para la aprobación de las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), su distribución según tecnología se aprecia en la Figura 9, donde resalta que el 61% de la generación de los proyectos en evaluación corresponden a generación en base a tecnologías de ERNC.

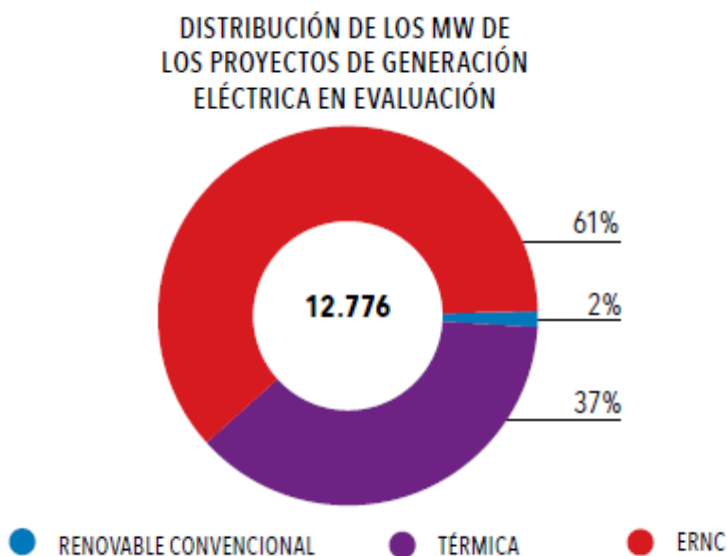


Figura 9: Distribución de los MW de los proyectos de generación eléctrica en evaluación ambiental [4]

La última política en desarrollo corresponde a Energía 2050 que tiene cuatro pilares fundamentales: seguridad y calidad del suministro, energía como motor de desarrollo, energía compatible con el medio ambiente y, eficiencia y educación energética [20].

En particular, con respecto al pilar tres, este busca impulsar una matriz energética renovable y desarrollar lineamientos que permitan abordar los impactos ambientales locales y globales de la matriz. Debido a lo anterior, se proponen como metas futuras para la matriz energética:

- Para el año 2035 el 60% de la generación eléctrica se encuentra constituida por energía renovable.
- Para el año 2050 el 70% de la generación eléctrica se encuentra constituida por energía renovable.

Con respecto a las emisiones de GEI, para el año 2030 se plantea la reducción de al menos un 30% en intensidad de emisiones de GEI respecto al año 2007.

Dado lo anterior la proyección de la matriz energética chilena presenta una alta incertidumbre y complejidad. Por ello durante el periodo 2011-2013 se construyó el informe “Escenarios energéticos Chile 2030” que tiene por objetivo pronosticar distintos escenarios energéticos. La construcción del informe involucró actores del sector público, privado y sociedad civil [21].

Dentro del estudio se consideran cuatro escenarios, dos para el SIC y dos para el SING, uno con enfoque de mercado sin modificar de forma radical la matriz y uno con enfoque sustentable con una alta penetración de ERNC.

En la Figura 10 se presenta la matriz energética proyectada al 2030 con enfoque de mercado que posee como principales supuestos la implementación de las grandes centrales hidráulicas en la zona de Aysén y desarrollo de centrales de GNL. Este escenario contendría aproximadamente un 50% en base a energía renovable.

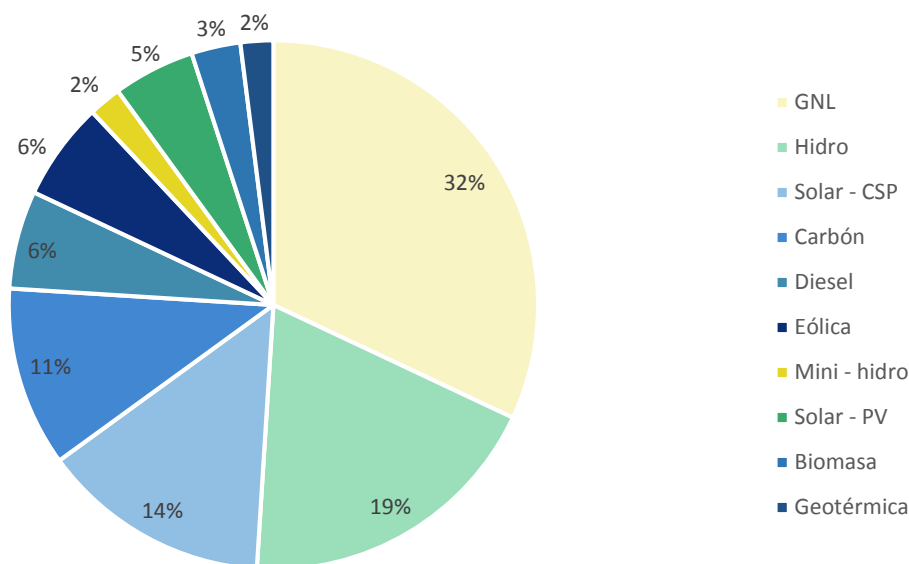


Figura 10: Distribución matriz energética proyectada al año 2030, adaptado de [21].

Dada la incertidumbre que presentan los escenarios calculados, se construyeron variaciones sujeto a distintos supuestos, entre ellos, la disminución de costos de inversión en tecnología solar, variación de costos de GNL, desarrollo de la geotermia y el retraso o no implementación de grandes proyectos que se encuentran en proceso de resolución ambiental u otro proceso anterior.

En la Tabla 2, se presentan los factores de emisión del escenario base y de algunas de sus variaciones. El escenario optimista solar, considera que los costos de inversión de esta tecnología disminuyen con respecto a la estimación actual lo que permitiría que se desarrolle en mayor proporción.

El escenario optimista sobre el costo del GNL toma en cuenta la situación actual de Estados Unidos con respecto a la explotación de gas que pasó de ser un importador neto a ser exportador potencial neto, esto provoca un cambio estructural en el mercado internacional de este combustible lo que se

ha reflejado en proyecciones de costo para Chile bastante más bajos que los estipulados actualmente.

El escenario sin hidroaysén considera la no materialización de los proyectos de hidroelectricidad emplazados en el sur de Chile, específicamente, en Aysén. Se plantea este escenario debido a que existe una alta incertidumbre sobre su implementación. Si estos proyectos no se materializan, el aporte a la generación de grandes centrales hidráulicas cae por debajo del 50%, es por eso el cambio en el factor de emisión.

Tabla 2: Factor de emisión pronosticado para el SIC en el año 2030

<b>Escenario</b>	<b>Factor de emisión [tCO<sub>2</sub>/MWh]</b>
Escenario SIC - Mercado	0,21
Escenario SIC – Optimista solar	0,20
Escenario SIC – Optimista costo GNL	0,20
Escenario SIC – Sin hidroaysén	0,24

Los factores principales que influyen en la definición de la matriz futura son los costos actuales y futuros de las distintas tecnologías, el retraso o rechazo de proyectos de generación eléctrica y las políticas públicas implementadas para el desarrollo energético.

Estos escenarios, provocarán diferentes emisiones indirectas de GEI asociadas a la PTAR analizada. Tales cambios serán objeto de análisis en las siguientes secciones.

## 4 Estado del arte

Este capítulo tiene por objetivo dar a conocer qué tipo de estudios se han realizado actualmente utilizando la herramienta ACV y qué resultados se han obtenido de estudios aplicados a plantas de tratamiento de aguas servidas. También, se presentan estudios realizados para la categoría específica potencial de calentamiento global, debido a que es la que presenta más interés en el campo de estudio.

### 4.1 Análisis de ciclo de vida

La herramienta de Análisis de Ciclo de Vida fue originada en la década del 60, dada la preocupación por el agotamiento de recursos energéticos fósiles y recursos naturales, por lo que se plantea como una herramienta de sostenibilidad. Los primeros estudios fueron orientados a productos, en particular, en 1969 *The Coca Cola Company* lideró la instauración de métodos para la realización de este tipo de análisis con el propósito de determinar el envase apropiado de sus productos en base a su desempeño ambiental [22].

La aplicación del análisis en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales comenzó en la década del 90, y desde ese momento ha sido ampliamente utilizada. Más de 50 estudios han sido realizados en distintos países con el propósito de tener procesos más sostenibles.

El estado del arte será presentado en tres secciones, la primera dando una visión global de Análisis de Ciclo de Vida en el mundo, luego un caso de estudio específico y finalmente referencias del estado del arte en Chile sobre estudios de ACV.

#### 4.1.1 Escenario mundial

En el contexto de tratamiento de aguas, el análisis ha sido aplicado principalmente con los siguientes propósitos [23]:

- Estimar el impacto ambiental de una planta convencional de tratamiento de aguas residuales.
- Estimar el impacto ambiental de una planta no convencional de tratamiento de aguas residuales, comparando distintas tecnologías.
- Evaluación de estrategias para el procesamiento de aguas residuales.
- Comparación entre distintas estrategias de tratamiento y disposición de lodos.

Respecto a las semejanzas y diferencias que presentan los distintos estudios realizados, pueden ser identificados en las distintas fases del análisis, sin embargo, los más relevantes tienen relación con la primera y tercera fase.

En la etapa de definición de objetivo y alcance, la unidad funcional más común es un volumen de agua tratada. Sin embargo, esta unidad no es siempre representativa del estudio. También se presenta como una posibilidad normalizar con respecto a un volumen de lodo producido [24].

Sobre la definición de los límites, 23 de 44 estudios analizados por un *review* [23], centran su análisis en la fase de operación de la planta, sin considerar entonces las fases de construcción y desmantelamiento, la primera por su bajo aporte y la segunda por la ausencia de datos. Solo seis del total de los estudios concluyen que es necesario contar la fase de construcción, sin embargo,



todos ellos presentan tecnologías tales como lodos activados o biorreactores de membrana. El bajo aporte de estas etapas está justificado por la vida útil de este tipo de plantas de tratamiento que en promedio es de 30 años y esto hace que la operación cobre más importancia que las otras etapas. Por otro lado, 36 de 44 estudios considera dentro de sus límites el tratamiento de las aguas y la disposición de los lodos, dado su alto aporte en distintas categorías de impacto.

Para la fase de evaluación de impacto, las diferencias entre los estudios radican en los indicadores de impacto analizados, en general los más utilizados son potencial de cambio climático, eutrofización y acidificación. Entre ellos, el relevante para este estudio es el potencial de cambio climático.

#### **4.1.2 Aplicación de referencia: Italia 2016**

Dada la variedad de estudios existentes sobre la temática, se seleccionó un caso tomando en cuenta su reciente publicación (2016) y la similitud con el proceso de tratamiento [25], como ejemplo para guiar el estudio a realizar y como referencia de Análisis de Ciclo de Vida.

La planta está ubicada en la zona sur de Italia, y el objetivo del estudio es comparar el desempeño ambiental de distintos escenarios para el tratamiento de aguas residuales y la disposición de los lodos generados. Los límites del sistema abarcan las etapas de construcción y operación de la planta, y la unidad funcional son 1.000 m<sup>3</sup> de agua tratada. Las categorías de impacto a analizar son siete, entre ellas, potencial de cambio climático, eutrofización y agotamiento de combustibles fósiles.

Se analizaron cuatro escenarios: el actual y otros enfocados en un objetivo común que es lograr el autoabastecimiento energético de la planta. A continuación, se especifican sus principales características:

1. Escenario basado en el proceso actual en que los lodos deshidratados son dispuestos en un relleno sanitario y el agua tratada devuelta al río.
2. Este escenario abarca la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de los lodos a temperatura mesofílica. Además, el biogás producido sería utilizado en un motor de cogeneración produciendo energía eléctrica y térmica para el proceso. La energía eléctrica es utilizada para abastecer parcialmente la demanda del proceso y la térmica es utilizada para secar el lodo digerido. Finalmente, el lodo seco se dispondría en relleno sanitario y el agua tratada devuelta al río.
3. El tercer escenario, propone la gasificación de los lodos secos con el objetivo de producir energía térmica y eléctrica para el proceso. Los residuos restantes de la gasificación son dispuestos en relleno.
4. El cuarto escenario está basado en el tercero, con la diferencia de que un porcentaje del agua tratada es utilizada para la fertirrigación (regado con nutrientes) de campos aledaños.

Finalmente se propone un *Green Scenario* que se basa en el anterior considerando, además, que la energía eléctrica restante necesaria para la operación de la planta es suplida por energías renovables.

Los resultados del análisis muestran que, para todos los escenarios propuestos, todas las categorías de impacto disminuyen con respecto al escenario actual (Escenario 1.).

Además, concluyen que el mejor escenario es el cuatro que presenta la línea de producción de biogás a partir de la degradación anaeróbica, producción de energía térmica y eléctrica a partir del biogás y contaría con fertirrigación.

La principal propuesta para el proceso apunta hacia el autoabastecimiento energético de la planta que aportaría a la disminución de los impactos generados por el proceso. Sin embargo, según los resultados, no sería posible que la PTAR además de autoabastecerse energéticamente produjera energía para la venta.

Se concluye que existen procesos capaces de disminuir el impacto ambiental provocado por una planta de tratamiento de aguas residuales. Para decidir qué proceso recomendar es necesario estudiar todas las etapas del ciclo de vida considerando el contexto específico del caso en estudio.

### **4.1.3 Escenario chileno**

En el contexto chileno existen pocas referencias de ACV debido a que empezó a ser utilizada históricamente más tarde como herramienta de evaluación ambiental. Además, en principio, en los países se realizan ACV privados y luego, con los años, se empiezan a realizar en Universidades. En su mayoría el enfoque del análisis está orientado a productos, sin embargo, existen algunos ejemplos aplicados a procesos, a continuación, se presentan algunos estudios recientes.

El 2015 se realizó un ACV para la industria de detergentes de lavado de textil teniendo como caso de estudio la empresa ENVATEC, analizando los productos en polvo y líquido. El estudio arrojó como principales resultados que el mayor impacto está asociado a la etapa final del producto, es decir el desecho, siguiendo la etapa de uso de este. Cabe destacar que una de las conclusiones del trabajo es la diferencia, en magnitud, de los impactos obtenidos con respecto a estudios realizados a productos similares en otros países donde la etapa con mayor impacto es la de uso, esto debido principalmente a que en Chile los usuarios utilizan agua fría para el lavado mientras que en otros países utilizan agua caliente [26].

Otro ejemplo trata de un ACV realizado para la determinación de la huella de carbono y energía contenida en el proceso de fabricación del hormigón premezclado, presentando como caso de estudio una planta productiva ubicada en la región del Biobío. Como principal conclusión se obtuvo que el proceso unitario con mayor impacto ambiental, desde el punto de vista de consumo energético y huella de carbono, es el transporte de las materias primas, principalmente áridos, siendo el 46% de un total de  $26 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$  producido del sistema estudiado [27].

Finalmente, el año 2016 se realizó un estudio de ACV que evalúa la integración de la industria minera con la solar en Chile, estimando el beneficio ambiental que se podría alcanzar con un uso más intensivo de tecnologías solares para abastecer de energía la industria minera, específicamente los procesos hidro y pirometalúrgicos de extracción del cobre. Se evaluaron las tecnologías: fotovoltaica, solar de concentración (CSP) y solar térmica. La mayor reducción del Potencial de Calentamiento Global se logra al integrar CSP y solar térmica en el proceso hidrometalúrgico [28].

## **5 Objetivo y alcance del ACV**

En este capítulo se definen el objetivo y alcance del estudio según las directrices de la metodología ACV. Dentro del alcance se presentan de forma general los escenarios a analizar, la unidad funcional, límites del sistema en estudio y la fuente y calidad de los datos a utilizar.

### **5.1 Objetivo del estudio**

El caso de estudio es la PTAR ubicada en la comuna Talagante de la Región Metropolitana la cual trata y dispone las aguas residuales de las localidades de Padre Hurtado, Calera de Tango, Malloco, Peñaflor y Talagante, con un caudal total promedio de 0,6 m<sup>3</sup>/s.

Actualmente la producción de biogás de la planta Talagante es de aproximadamente 2.700 Nm<sup>3</sup> por día, el cual es combustionado en una caldera para suplir los requerimientos energéticos del biodigestor y el excedente, que corresponde aproximadamente al 60% del biogás producido, es combustionado en antorcha.

A raíz de lo anterior, se encuentra en proceso de adquisición un motor de cogeneración donde se combustionaría el 100% del biogás producido con el objetivo de suplir los requerimientos del biodigestor y abastecer de energía eléctrica a la planta.

A partir de este nuevo escenario, la empresa solicita la evaluación de impacto ambiental del escenario actual en comparación con el mejorado, realizando la comparación entre el abastecimiento de un 100% de energía del Sistema Interconectado Central con el abastecimiento parcial mediante un biocombustible (biogás).

Se busca conocer el desempeño ambiental del escenario actual de la planta identificando las actividades que poseen un mayor aporte, y luego comparar el desempeño actual con el futuro. Así, se identificarán oportunidades para mejorar el desempeño ambiental del proceso en este caso específico.

### **5.2 Alcance del estudio**

#### **5.2.1 Escenarios**

Se proponen 3 escenarios: el primero corresponde al escenario actual de operación de la planta, es decir, el escenario de línea base. El segundo comprende la implementación de una tecnología de cogeneración de energía donde será combustionado el 100% del biogás producido a partir de la digestión anaerobia, ello permitirá evaluar si esta medida disminuye la emisión de GEI del proceso. El tercero está basado en el segundo, y considera además la fase de ampliación de la planta en un módulo de tratamiento adicional para suplir la demanda futura, con el objetivo de analizar las variables que afectarían a futuro la emisión de GEI. A continuación, se caracterizan los escenarios propuestos:

1. Corresponde al escenario actual que se modela en dos subprocesos: la línea de tratamiento de agua y la de lodos. La primera con 10 operaciones unitarias todas abastecidas de energía eléctrica. La segunda posee 8 operaciones unitarias, en su mayoría provistas de energía eléctrica y, en particular, la digestión anaerobia es abastecida de energía térmica a partir de la combustión en caldera de aproximadamente el 40% de biogás producido, el excedente es

combustionado actualmente en antorcha. Además, la planta posee un sistema de bombeo para transporte de agua y lodos entre equipos, y un sistema de desodorización para abatimiento de olores, lo anterior con abastecimiento de energía eléctrica provista por el SIC. En la Figura 11 se presenta un esquema simplificado del escenario, donde destaca el uso actual del biogás producido en la planta.

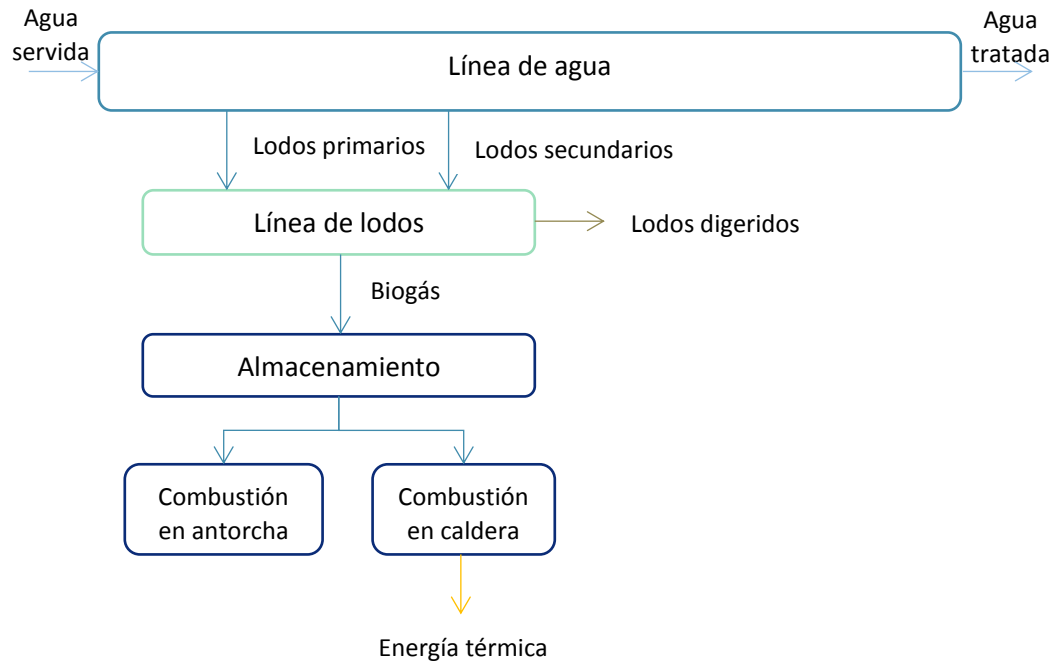


Figura 11: Esquema simplificado Escenario N°1 - base

2. El segundo escenario se caracteriza por el cambio de uso del biogás producido en la digestión anaerobia. En la línea de lodos se presenta una etapa de cogeneración, proceso que produce energía eléctrica y térmica útil de forma simultánea, aumentando la eficiencia energética del proceso. En este motor será combustionado la totalidad del biogás. La energía eléctrica producida será inyectada directamente en el proceso y la energía térmica será utilizada para suplir los requerimientos energéticos del biodigestor. En la Figura 12 se presenta un esquema simplificado del escenario, se observa la diferencia con el anterior que corresponde a la combustión de biogás en el cogenerador.

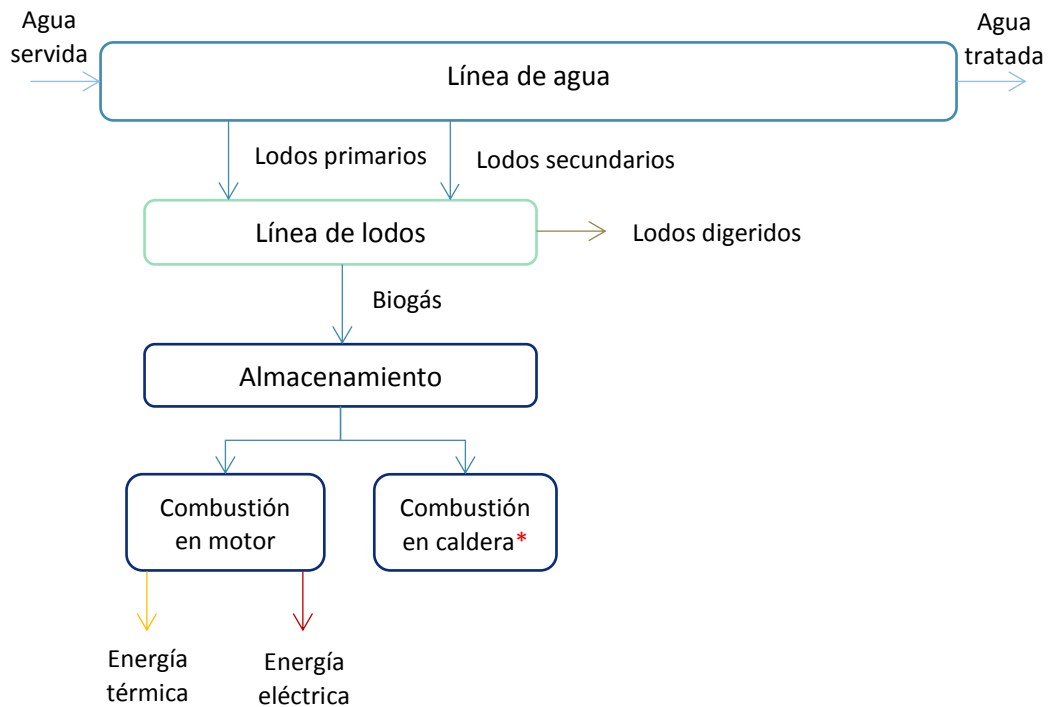


Figura 12: Esquema simplificado Escenario N°2 – cogeneración. \* La caldera es el equipo de respaldo para cuando el motor se encuentre fuera de operación por mantención u otro.

3. El tercer escenario se caracteriza por la ampliación de la planta. Se decide realizar la estimación para el año 2024 lo que implicaría un aumento del afluente de la planta y con esto de la producción de biogás. La ampliación comprende la construcción de un módulo en la línea de agua, es decir, un filtro biológico, un clarificador secundario y un espesador de lodos primarios.

Las emisiones de la construcción no son consideradas, debido a su bajo aporte sobre las emisiones totales, por ello las modificaciones observadas se deben a los cambios propios de la operación de la planta, vinculados principalmente al uso del biogás y el aumento de equipos dentro del proceso. Otro de los cambios relevantes que tienen relación con este escenario y el anterior son el cambio de la matriz energética chilena en función del tiempo. Como el proceso sigue siendo el mismo que en el escenario con cogeneración, la Figura 12 es una referencia de este escenario igual.

### 5.2.2 Unidad funcional

La definición de la unidad funcional del sistema es crucial para estudios de ACV. En el presente análisis corresponde a 1 m<sup>3</sup> de agua tratada. Por lo tanto, todos los materiales, emisiones, consumo de energía, entre otros están referidos a este volumen de agua, luego de la normalización.

Se decidió esta unidad funcional para facilitar la difusión de los resultados y su comparación. Además, el volumen puede ser obtenido, para un tiempo definido, a partir del flujo, que corresponde a una variable que es medida mediante caudalímetro de forma instantánea, por lo que se considera una medición fiable.

### 5.2.3 Límites del sistema

El estudio abarca la etapa de operación de la planta, sin considerar entonces las etapas de construcción y demolición, porque la primera no afecta de forma significativa los resultados del estudio dado su bajo aporte con respecto a la etapa de operación, en general menor a un 5% [23], y la segunda, debido a la amplia vida útil de este tipo de plantas, que son concebidas inicialmente con duración indefinida incluyendo etapas de mantención y ampliación, pero no de demolición.

Las emisiones de la operación de los respectivos equipos son consideradas, al igual que el suministro energético.

Así, la Figura 13 ilustra el límite del sistema, donde se estudia directamente la fase de operación, considerando las emisiones de los respectivos equipos, al igual que el suministro energético. Mediante la base de datos *Ecoinvent*, se obtiene información acerca de los procesos de producción de químicos, electricidad, transporte y disposición de residuos.

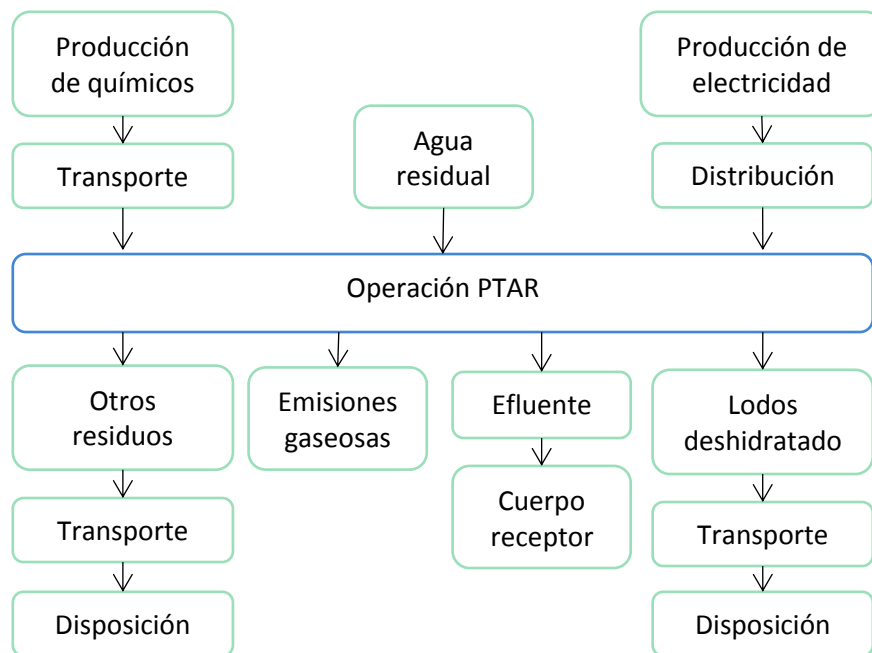


Figura 13: Límites del sistema

De los límites planteados, los aspectos no incluidos son la extracción y producción de combustibles fósiles y la extracción de químicos, porque no significan cambios en la comparación buscada en el objetivo de este estudio, no hay necesidad de considerar los flujos elementales.

### 5.2.4 Calidad de los datos

En esta sección se reporta el origen de los datos utilizados y su calidad.

Los datos de operación de la planta, tales como caudal, consumo eléctrico, consumo de químicos, entre otros, se obtienen del sistema de datos de la empresa, utilizando, en su mayoría, promedios diarios del periodo temporal enero 2016 - enero 2017, por lo tanto, se presenta el año 2016 como año base. La operación de la planta es continua de lunes a domingo y las 24 horas del día.

De la base de datos *Ecoinvent* se obtiene una fracción de los factores de emisión dadas las distintas actividades de emisión directa o indirecta. En particular, se obtienen los factores de emisión directa de equipos de combustión, emisiones indirectas de traslado y disposición de residuos, entre otros. Para asegurar la calidad de los datos se da preferencia a los datos más actuales y representativos del sistema en estudio. Con representatividad se refiere al uso de estudios que apliquen geográficamente a Chile o, en su defecto, a nivel global y que, además, apliquen temporalmente y técnicamente de ser posible.

Los factores de emisión que no se encuentren en la base de datos, o que posean mejores estimaciones, se obtendrán desde bibliografía, específicamente la emisión de óxido nitroso del tratamiento secundario y luego de depositado el efluente en el cauce receptor, se utilizan factores de emisión obtenidos de estudios científicos.

El factor de emisión actual de la matriz energética es obtenido desde el Ministerio de Energía en el enlace de Inventario de emisiones de GEI del SIC [29].

Los factores de caracterización para la categoría de impacto Potencial de Calentamiento Global (PCG) se obtiene del informe del IPCC 2013 [30].

### **5.2.5 Categorías de impacto**

Como se ha explicado anteriormente existe una gama de categorías de impacto que se podrían analizar, la selección de cuál es la óptima depende de los resultados requeridos y los objetivos del estudio. Debido a que, inicialmente, este estudio se basa en la gestión de energía y su impacto ambiental, se decide estudiar el Potencial de Calentamiento Global que corresponde a la categoría llamada usualmente huella de carbono. Esta categoría contabiliza las emisiones de GEI del sistema propuesto, cuantificando mediante lo anterior el potencial de calentamiento global.

La relación entre las emisiones de GEI y el impacto ocasionado por la gestión energética del proceso es debido al aporte del sector energético en las emisiones totales del planeta y del país.

Así, el calentamiento global denota el aumento gradual, observado o proyectado, de la temperatura global en la superficie, como una de las consecuencias del forzamiento radiativo provocado por las emisiones antropógenas de GEI [2]. Por lo tanto, el PCG es un factor que describe el impacto de la fuerza de radiación (grado de daño a la atmósfera) de una unidad de un determinado GEI con relación a una unidad de CO<sub>2</sub> en un tiempo determinado. La unidad de cuantificación se conoce como CO<sub>2</sub> equivalente, y corresponde a la sumatoria de la ponderación entre el flujo emitido de un determinado GEI por su potencial de cambio climático para todos los GEI involucrados en el cálculo.

En el presente estudio se considera las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso dado a que abarcan las principales emisiones de la industria en estudio.

Para calcular el indicador PCG se poseen los valores del índice PCG por GEI, los que son publicados periódicamente por el IPCC. Este índice depende del GEI analizado, debido a que no todos tienen la misma capacidad de provocar la misma magnitud de calentamiento global debido a que su intensidad depende de su poder de radiación y el tiempo promedio que permanece en la atmósfera. Este factor, por lo tanto, depende del tiempo de integración, para evaluaciones a largo

plazo se considera usualmente a 100 años y para corto plazo a 20 años, los valores entregados por el IPCC el año 2013 pueden verse en la Tabla 3.

Es importante destacar que otros estudios realizados por la empresa omiten la emisión de óxido nitroso en sus resultados finales. Esto representa una importante omisión de estos estudios, pues las emisiones de este componente son muy significativas en el proceso de tratamiento de aguas servidas. En este estudio se han decidido incluir para dar cuenta fiel del impacto y su cambio.

Tabla 3: Factor de potencial de calentamiento global [30]

GEI	Factor PCG <sub>20</sub>	Factor PCG <sub>100</sub>
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	1	1
Metano (CH <sub>4</sub> )	72	25
Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O)	289	298

Cabe notar que el potencial del óxido nitroso es significativamente mayor con respecto al potencial del dióxido de carbono, seguido, con un orden de magnitud menor, por el metano. Además, la variación del potencial del metano a 20 y a 100 años se debe a que su vida media en la atmósfera es menor.

Finalmente, como se mencionó anteriormente, el indicador PCG se identifica con la unidad de CO<sub>2</sub> equivalente, calculado con la Ecuación (1) [31].

$$PCG_{Total}[CO_{2eq}] = \sum_{i=1}^n GHG_i \cdot PCG_i \quad (1)$$

Donde:

- $CO_{2eq}$ : Emisiones en dióxido de carbono equivalente
- $GHG_i$ : Flujo emitido de un determinado GEI
- $PCG_i$ : Potencial de cambio climático por GEI
- $n$ : Número de GEI emitido por la fuente

### 5.2.5.1 Alcances huella de carbono

Para poder diferenciar entre emisiones directas e indirectas el *GHG Protocol* define tres alcances para agrupar los distintos tipos de emisiones [32]. Los alcances son:

**Alcance N°1:** corresponden a las emisiones directas generadas por la compañía. En particular, para el cálculo se considera:

- Emisiones directas de los equipos de la línea de agua y lodos
- Emisiones fugitivas de los equipos

**Alcance N°2:** emisiones indirectas asociadas a la generación externa de electricidad, calor o vapor. Estas emisiones indirectas son separadas de las demás debido a que usualmente tiene un aporte significativo en las emisiones totales de la empresa.



**Alcance N°3:** otras emisiones indirectas que se dan en consecuencia de las actividades de la compañía. En particular para el cálculo se considera:

- Transporte de reactivos y residuos
- Disposición de residuos
- Producción de reactivos.

## 6 Análisis del inventario

En este capítulo, siguiendo la metodología propia de un estudio de ACV, se presentan los datos relacionados con cada uno de los escenarios a evaluar y los supuestos tomados para los cálculos. También se hace referencia a los factores de emisión de GEI para cada una de las actividades que se encuentran dentro del límite del estudio.

### 6.1 Datos del sistema y factores de emisión

Dada la complejidad del sistema completo, este se ha subdividido en 5 actividades: Emisiones directas del proceso, emisiones dado el consumo energético, emisiones del transporte de reactivos y residuos, emisiones de producción de reactivos y emisiones de la disposición de residuos.

Para cada una de las actividades consideradas se investigó el tipo de emisiones que tienen y su factor de emisión.

Las características del agua de entrada y el agua entregada por la planta pueden verse en la Tabla 4, los datos presentados corresponden al promedio del año 2016, definido previamente como línea base.

Tabla 4: Características promedio del afluente y efluente de la planta del año 2016

Parámetro	Unidad	Afluente	Efluente
Caudal volumétrico	m <sup>3</sup> /año	13.155.740	12.432.587
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	568,33	118,93
Nitrógeno Total Kjeldhal (NKT)	mg/l	71,05	52,35

Además, la Tabla 5 muestra el consumo eléctrico promedio de la planta y la generación de biogás anual, parámetros relevantes para el cálculo de emisiones.

Tabla 5: Consumo eléctrico y generación de biogás de la PTAR Talagante en el año 2016

Parámetro	Unidad	Valor
Consumo eléctrico	MWh/año	3.743
Generación de biogás	Nm <sup>3</sup> /año	963.446
Consumo petróleo	l/año	4.495

#### 6.1.1 Emisiones directas

Las emisiones directas, o alcance N°1, que corresponden a las emisiones de los equipos del proceso, se abarcan según se den en la línea de agua o la de lodos. Estas son, en su mayoría, óxido nitroso y metano.

##### 6.1.1.1 Emisiones de la línea de agua

En la Figura 14 se presentan las operaciones unitarias de la línea de agua junto a los flujos de agua, energía, emisiones, entre otros.

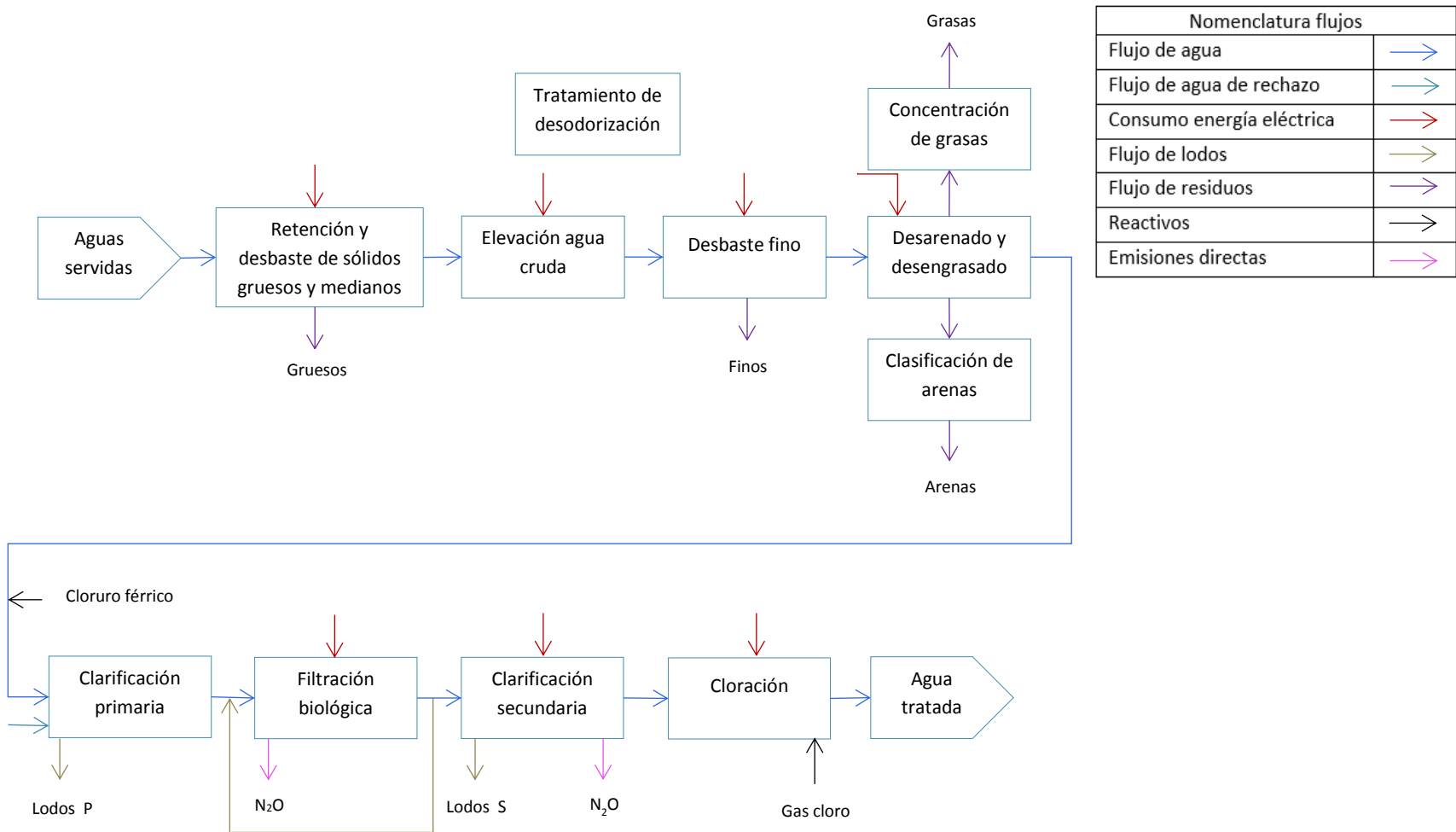


Figura 14: Modelo de línea de agua

El gas emitido mayormente en la línea de agua es óxido nitroso, formado principalmente en la etapa de filtración biológica debido a los procesos de nitrificación y desnitrificación. Estas emisiones son difíciles de estimar dada la variabilidad que presenta la emisión de óxido nitroso, la dificultad de la medición en las distintas fases (gas y líquida) y lo complejo que es modelar el sistema debido a las reacciones biológicas que ocurren.

En el presente estudio, para estimar la emisión se utiliza la Ecuación (2), propuesta por Chandran en el año 2010, esta se encuentra en función de la carga de Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN, por su nombre en inglés), el caudal de entrada, y un factor de emisión de óxido nitroso [31]. Esta ecuación se obtuvo a partir de una campaña de medición de óxido nitroso realizada en 12 plantas de Estados Unidos que poseen distintas características entre ellas, por lo tanto, los valores obtenidos son empíricos y no son representativo de un sistema en particular.

$$N_2O_{PTAR} = Q \cdot TKN \cdot EF_{N_2O} \cdot \frac{44}{28} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Donde:

- $Q$ : caudal afluente, [ $m^3/año$ ]
- $TKN$ : concentración de TKN en afluente, [ $mg/L$ ]
- $EF_{N_2O}$ : factor de emisión de óxido nitroso (gramos de nitrógeno emitido como  $N_2O$  por gramos de TKN en el afluente), igual a  $0,005 \text{ kg}N_2O/\text{kgTKN}_{\text{afluente}}$  [33]
- $\frac{44}{28}$ : conversión de peso molecular, gramos de  $N_2O$  por gramos de nitrógeno emitido como  $N_2O$ .
- $10^{-3}$ : factor de conversión de unidades.

Si bien la Ecuación (2) es empírica, no existe una corroboración científica. Pese a ello, se considera que es una mejor estimación que la recomendada actualmente por el IPCC, que se encuentra en función de la cantidad de habitantes equivalentes de la planta (carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de 5 días de  $60 \text{ g/día}$ ) y la cantidad de proteína promedio consumida por habitante según la zona, sin considerar entonces otros residuos que se agregan al afluente, tales como residuos industriales y otras contribuciones de procesos domiciliarios [34]. Además, la Ecuación (2) se encuentra en función del TKN, valor que se mide actualmente en la planta Talagante.

### 6.1.1.2 Emisiones de la línea de lodos

En la Figura 15 se presenta el modelo de la línea de lodos para el Escenario N°1 - Base, con las operaciones unitarias que esta involucra y sus flujos de lodos, energía, emisiones, entre otros.

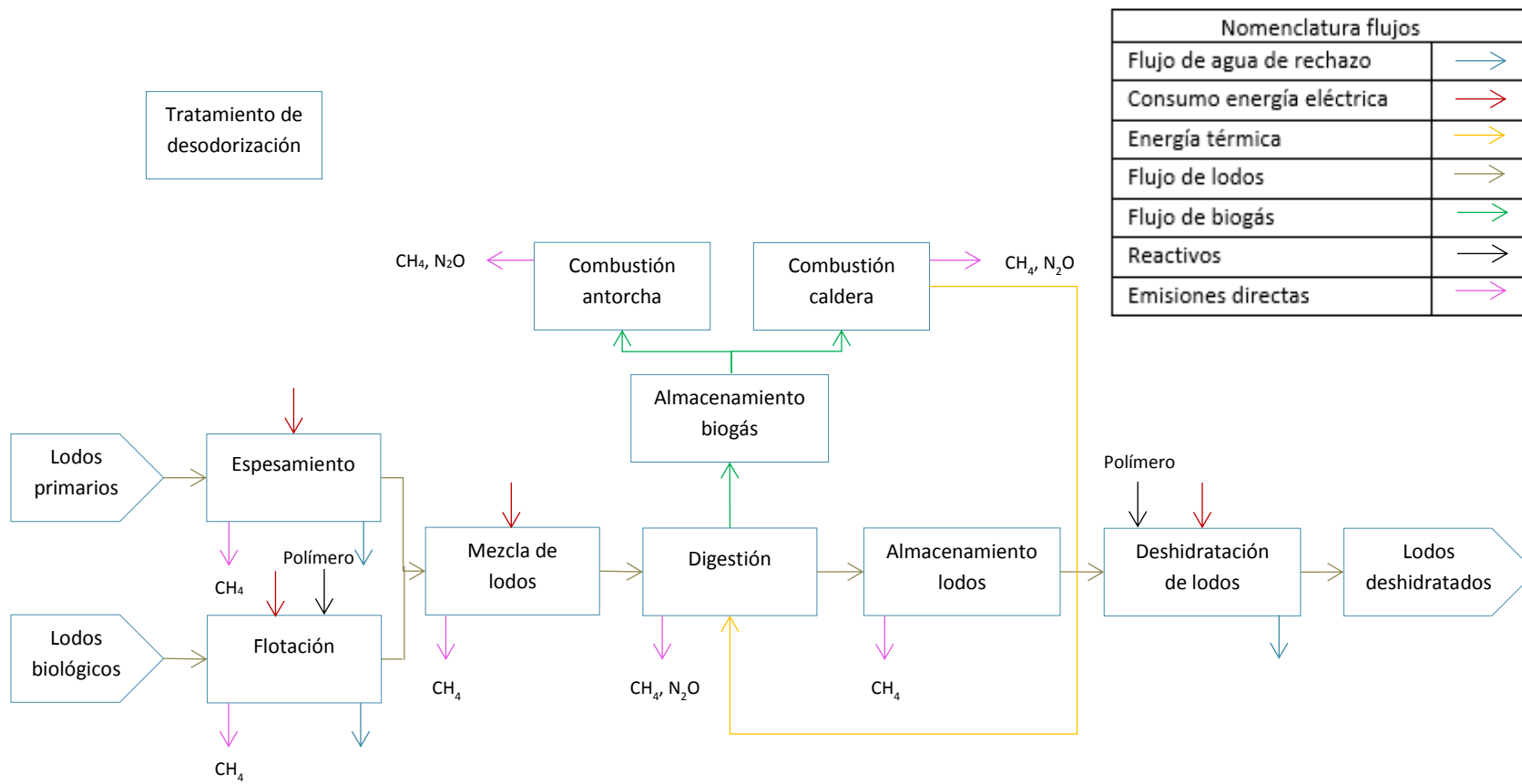


Figura 15: Modelo línea de lodos Escenario N°1- Base

En la línea de lodos se produce metano y óxido nitroso, siendo el primero producido en mayor flujo. Las emisiones de metano se dan en las etapas de espesamiento de lodos secundarios, mezcla de lodos, digestión, deshidratación y almacenamiento. Es importante destacar que la emisión de metano en la digestión corresponde expresamente al metano fugitivo, no a la composición del biogás.

Además, en las etapas de combustión, se produce dióxido de carbono, metano y óxido nitroso. Cabe mencionar que, en el caso de que la combustión sea a partir de un biocombustible, en particular biogás, las emisiones de dióxido de carbono no son contabilizadas debido a que se trata de carbono biogénico, es decir, parte del ciclo natural del carbono [32].

En la Tabla 6 se muestran los factores de emisión de cada equipo utilizados para los cálculos.

Tabla 6: Factor de emisión equipos de la línea de lodos

Etapa	GEI	Factor de emisión	Unidad	Referencia
Espesamiento	CH <sub>4</sub>	0,574	kg CH <sub>4</sub> /tMS	[35]
Cámara de mezcla	CH <sub>4</sub>	0,214	kg CH <sub>4</sub> /tMS	[35]
Digestión	CH <sub>4</sub>	0,2	kg CH <sub>4</sub> /tMS	[36]
	N <sub>2</sub> O	1,51 · 10 <sup>-5</sup>	kg N <sub>2</sub> O /tMS	[37]
Almacenamiento lodos	CH <sub>4</sub>	0,35	kg CH <sub>4</sub> /t lodo	[37]
Caldera	CH <sub>4</sub>	1,25 · 10 <sup>-3</sup>	kg CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> biogás	[37]
	N <sub>2</sub> O	1,62 · 10 <sup>-3</sup>	kg N <sub>2</sub> O /m <sup>3</sup> biogás	[37]
Antorcha	CH <sub>4</sub>	2,51 · 10 <sup>-4</sup>	kg CH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> biogás	[37]
Consumo petróleo	-	2,676	kg CO <sub>2eq</sub> /l	[38]

### 6.1.2 Matriz energética

Las emisiones de la matriz energética, o alcance N°2, son dadas por el consumo de energía eléctrica de la planta. El factor de emisión del SIC es distinto para el escenario N°3 que involucra la ampliación, debido a que la composición de la matriz es variable en el tiempo, y más aun con las políticas públicas propuestas actualmente como se explica en la Sección 3.4. La Tabla 7, entonces, muestra el factor de emisión del año 2016, el pronosticado para el año 2030 y, el del año 2024 calculado mediante la interpolación entre los años 2016 y 2030.

Tabla 7: Factor de emisión del SIC en distintos años

Año	Factor de emisión [kg CO <sub>2eq</sub> /kWh]
2016	0,40
2024	0,33
2030	0,24

### 6.1.3 Disposición de residuos

En la planta se producen dos tipos de residuos: los provenientes del tratamiento primario, que son principalmente residuos sólidos domiciliarios (grasas, arena, entre otros); y los lodos digeridos

deshidratados, llamados también biosólidos. Ambos residuos son retirados de planta y dispuestos en un relleno sanitario. Los factores de emisión asociados se presentan en la Tabla 8.

Además, se contabiliza en este ítem las emisiones de óxido nitroso emitidas luego de que el agua tratada es vertida en el cuerpo receptor, el río Mapocho. Este valor se estima en función del NKT del afluente y depende del medio receptor, si este es océano, estuario, humedales o río, utilizando la Ecuación (2), el factor de emisión es de  $0,0015 \text{ kgCO}_2/\text{kgNKT}_{\text{afluente}}$  para río [39].

Tabla 8: Factor de emisión por GEI para cada residuo generado en kg de GEI por kg de residuo.

Residuo	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	Referencia
Biosólidos	$6,36 \cdot 10^{-3}$	$9,44 \cdot 10^{-4}$	$2,80 \cdot 10^{-5}$	[37]
Residuos sólidos	$6,36 \cdot 10^{-3}$	$4,40 \cdot 10^{-4}$	$3,88 \cdot 10^{-6}$	[37]

### 6.1.4 Transporte

Esta actividad se subdivide en el transporte de reactivos para la planta (entradas) y el transporte de residuos a disposición (salidas). Para el cálculo de las emisiones se considera el tipo de transporte utilizado, la distancia y el número de despachos o retiros realizados anualmente. Los factores de emisión para cada medio de transporte se muestran en la Tabla 9.

Los químicos contabilizados son gas cloro, cloruro férrico y acrilamida. Los primeros dos son producidos en Chile, y la poliacrilamida es importada desde Corea del Sur.

Tabla 9: Factor de emisión medios de transporte

Medio de transporte	Factor de emisión	Unidad	Referencia
Camión de carga	3,858	kg CO <sub>2eq</sub> /t transportada	[40]
Barco de carga	3,219	kg CO <sub>2eq</sub> /t·km	[41]

### 6.1.5 Producción de químicos

Esta actividad abarca la producción de químicos utilizados en el proceso, específicamente, cloruro férrico como coagulante, gas cloro para la etapa de desinfección y poliacrilamida como floculante, los factores de emisión asociados a cada químico se ven en la Tabla 10.

Tabla 10: Factor de emisión de producción de químicos

Químico	Factor de emisión	Unidad	Referencia
Gas cloro	1,12	kg CO <sub>2eq</sub> /kg Cl <sub>2</sub>	[39]
Cloruro férrico	0,33	kg CO <sub>2eq</sub> /kg FeCl <sub>3</sub>	[42]
Poliacrilamida	1,50	kg CO <sub>2eq</sub> /kg PAM	[43]

## 6.2 Escenario N°2: cogeneración

En este escenario se presenta un cambio en la línea de lodos, el biogás ahora es combustionado en su totalidad en un motor de cogeneración de energía, este cambio se puede observar en la Figura 16, modelo del sistema para el Escenario N°2 - Cogeneración.

El equipo de cogeneración posee una potencia eléctrica total de 330 kWe y neta de 310 kWe, con una capacidad de operación de 7.920 horas anuales (90% del año, debido a mantención), cubriendo aproximadamente el 50% del requerimiento energético total de la planta, la Tabla 11 muestra los factores de emisión asociados a este equipo.

Tabla 11: Factor de emisión motor de cogeneración

<b>Equipo</b>	<b>GEI</b>	<b>Factor de emisión</b>	<b>Unidad</b>	<b>Referencia</b>
Motor de cogeneración	CH <sub>4</sub>	0,0011	kg CH <sub>4</sub> /kWh	[37]
	N <sub>2</sub> O	2,43·10 <sup>-5</sup>	kg N <sub>2</sub> O /kWh	[37]



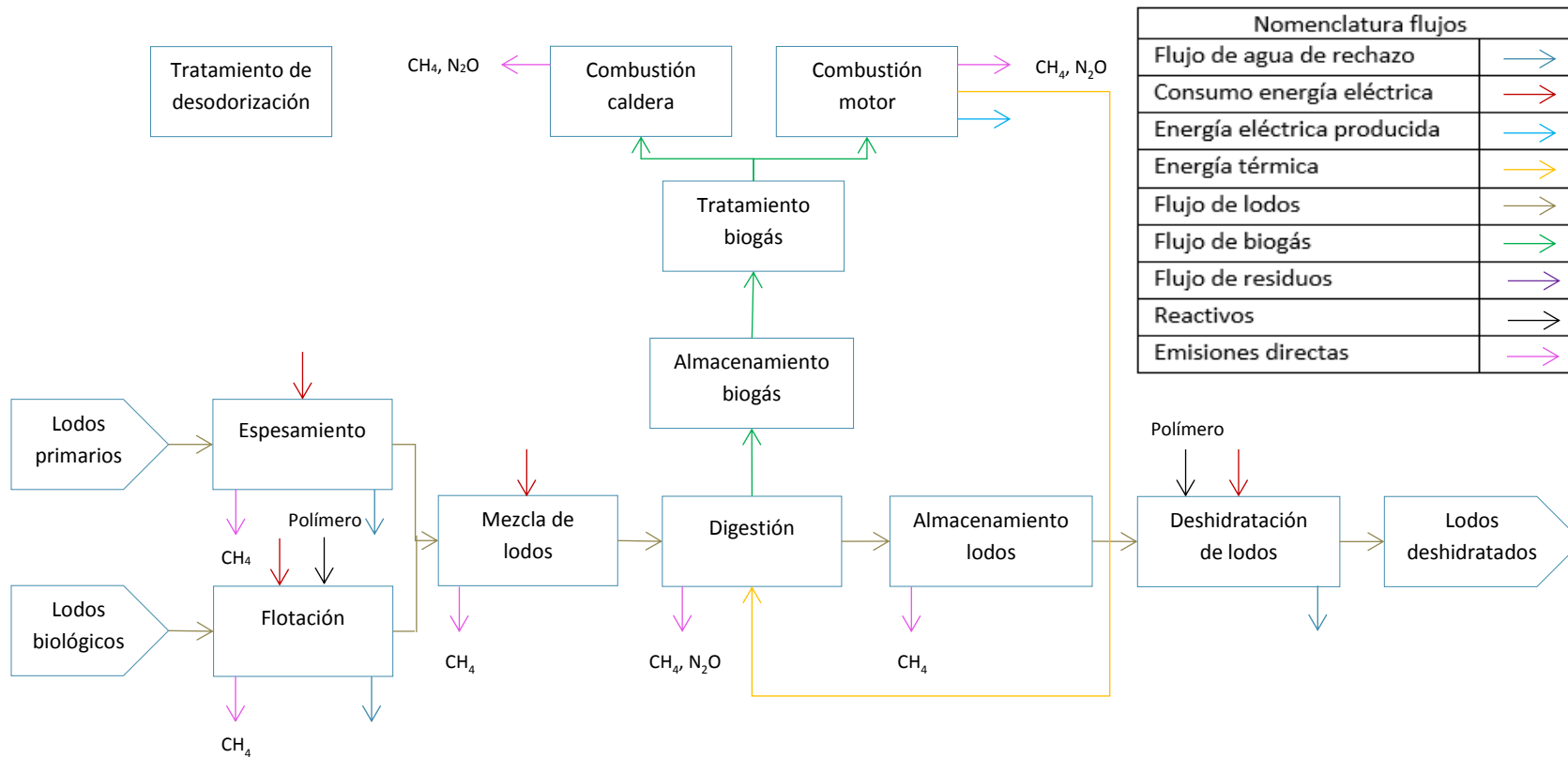


Figura 16: Modelo línea de lodos escenario N°2

### 6.3 Escenario 3: ampliación

Los datos que son necesarios para calcular el escenario ampliado son: caudal afluente y efluente, producción de biogás, requerimiento energético de la planta, consumo de químicos, producción de residuos y flujos intermedios de la línea de lodos. Se desarrollaron dos alternativas de escenario dependiendo del tipo de crecimiento del afluente, primero con crecimiento vegetativo y luego considerando la redistribución del afluente pronosticado por el área de redes de la empresa, presentado en la siguiente subsección.

Con este fin, para el crecimiento vegetativo, se tomaron supuestos y con ellos se calculó las variables necesarias. Los principales supuestos y resultados son:

1. Cálculo de la tasa de crecimiento del afluente de la planta en función de los datos del período 2011-2016, obteniéndose una tasa de crecimiento igual a 0,6%.
2. Cálculo de la tasa de crecimiento de la producción de biogás, para lo que se supone que el caudal afluente y la producción de biogás son variables directamente proporcionales. Se ajusta la tasa de crecimiento del afluente multiplicando por el coeficiente de correlación (0,95), obteniéndose la tasa de crecimiento anual, igual a 0,5% anual (para ver la correlación entre estas variables ir a Anexo A).
3. Las variables relacionadas con los flujos intermedios, consumo de químicos y producción de residuos fueron calculadas en función de la tasa de crecimiento del afluente.
4. El factor de emisión de la matriz energética se obtuvo de un estudio que consideraba políticas públicas actuales y proyectos en el SEIA para realizar el pronóstico (ver Sección 3.4.1), de estos se seleccionó el peor escenario, donde se estima que para el año 2030 el factor de emisión del SIC sería de 0,24. Así, realizando una interpolación lineal, el factor para el año 2024 es de 0,33 kgCO<sub>2eq</sub>/kWh.
5. Con respecto al consumo energético, se pronosticó según la tasa de consumo por metro cúbico actual, 0,28 kWh/m<sup>3</sup>.
6. La concentración de nitrógeno en el afluente y efluente se mantiene debido a que se supone no existen cambios en el proceso para aumentar la remoción de nitrógeno.
7. Los factores de emisión de los distintos escenarios se mantienen.
8. El excedente de biogás dada la capacidad del motor se considera que es combustionado en caldera para suplir los requerimientos del digestor, de ser necesario.

Finalmente, considerando todos los supuestos antes expuestos, las características del agua a tratar y el agua depurada de la planta para el año 2024 pueden verse en la Tabla 12.

Tabla 12: Características promedio del afluente y efluente de la planta del año 2024, considerando crecimiento vegetativo

Parámetro	Unidad	Afluente	Efluente
Caudal volumétrico	m <sup>3</sup> /año	13.915.602	13.215.602
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	568,33	118,93
Nitrógeno Total Kjeldhal (NKT)	mg/l	71,05	52,35

Además, la Tabla 13 muestra el consumo eléctrico pronosticado de la planta y la generación de biogás anual.

Tabla 13: Consumo eléctrico y generación de biogás de la PTAR Talagante en el año 2024, considerando crecimiento vegetativo

Parámetro	Unidad	Valor
Consumo eléctrico	MWh/año	3.896
Generación de biogás	Nm <sup>3</sup> /año	1.008.728

### 6.3.1 Variación del escenario ampliado

Además del escenario ampliado anterior, como se mencionó previamente, se presenta una variación de este dónde en vez de considerar crecimiento vegetativo por el aumento poblacional. En este caso se comprende la redistribución del afluente después de realizada la ampliación, por información obtenida mediante el área de redes de la empresa.

Los parámetros del proceso son estimados de la misma forma que el escenario ampliado anterior, con la diferencia que la tasa de crecimiento del afluente es igual al 2% en vez de 0,6%.

En función de los supuestos considerados, el nuevo caudal volumétrico se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14: Características promedio del afluente y efluente de la planta del año 2024, considerando redistribución afluente

Parámetro	Unidad	Afluente	Efluente
Caudal volumétrico	m <sup>3</sup> /año	15.321.696	14.621.696
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l	568,33	118,93
Nitrógeno Total Kjeldhal (NKT)	mg/l	71,05	52,35

En este caso, para el año 2024 la producción de biogás es mayor que la capacidad del motor, por lo que se considerará que el excedente será combustionado en caldera para la producción de energía térmica. La generación de biogás y el consumo eléctrico se ven en la Tabla 15.

Tabla 15: Consumo eléctrico y generación de biogás de la PTAR Talagante en el año 2024, considerando redistribución afluente

Parámetro	Unidad	Valor
Consumo eléctrico	MWh/año	4.290
Generación de biogás	Nm <sup>3</sup> /año	1.119.761

Hasta aquí se ha realizado el análisis de inventario del ACV, es decir, se han recopilado los datos de operación de la planta, el consumo de reactivos anuales, entre otros parámetros ligados a esta. Además, se ha estudiado cuáles son los gases emitidos y en qué cantidad, por la operación del proceso y las actividades que se encuentran dentro de los límites del sistema (obtención de factores de emisión). Todos estos datos corresponden a la materia prima que permite la contabilización de los GEI emitidos por el proceso.

## 7 Evaluación del impacto ambiental

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del cálculo de la huella de carbono para cada escenario, en función de los datos que se exponen en el capítulo anterior. Además, se realiza un análisis crítico a los resultados obtenidos, comparando con estudios y mediciones de las huellas de carbono de plantas locales, e identificando actividades que poseen el mayor impacto para así focalizar las recomendaciones. En el Anexo B se presentan ejemplos de cálculos para las distintas actividades abordadas y en el Anexo C los resultados específicos obtenidos para cada escenario.

### 7.1 Emisiones totales por escenario

En esta sección se pretende comparar las emisiones totales de los tres escenarios propuestos, así se podrá determinar el impacto del cambio en la gestión de los recursos energéticos de la planta. Además, se identificará cuáles son las actividades que tienen mayor preponderancia en función del escenario estudiado.

En los Gráfico 1, Gráfico 2 y Gráfico 3, se indica el total de emisiones anuales para cada escenario junto con la distribución porcentual de las emisiones por actividad.

Específicamente, en el Gráfico 1, se observa la distribución del escenario actual. Cabe destacar que las emisiones directas abarcan el 57% del total, y las emisiones dado el consumo energético desde la matriz energética, el 29%, siendo los principales aportes a la huella de carbono. El menor aporte corresponde al transporte.

Estos resultados dan cuenta que el consumo energético no es el responsable de la mayor proporción de emisiones de GEI, como se esperaba inicialmente, sino que las emisiones directas corresponden al mayor aporte. Esto, además, otorga importancia a los estudios que no exponen la totalidad de las emisiones directas en sus resultados.

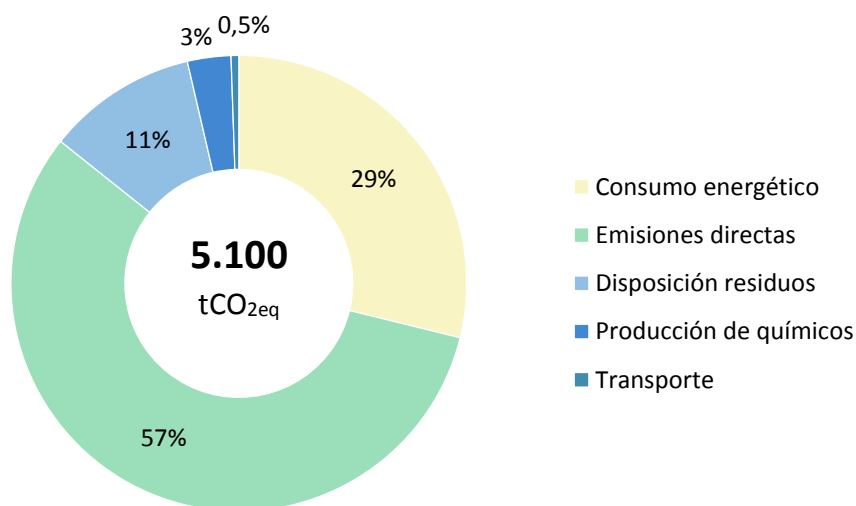


Gráfico 1: Distribución emisiones Escenario N°1- Base

En el Gráfico 2 puede verse la distribución del Escenario N°2 que incluye un motor de cogeneración de energía, lo que implica la disminución de consumo de energía eléctrica desde la

matriz, pasando de 1480 tCO<sub>2eq</sub> a 714 tCO<sub>2eq</sub> anuales y, en menor proporción, la disminución de las emisiones directas de la planta, donde el escenario base emite 2910 tCO<sub>2eq</sub> en comparación al escenario con cogeneración que emite 2730 tCO<sub>2eq</sub>.

La consecuencia inmediata es la disminución de un 17% del impacto total de la planta. Dada la disminución del consumo eléctrico desde la matriz al incorporar el motor de cogeneración, toman mayor relevancia las emisiones directas de la planta, alcanzando un 65% del total de la huella de carbono.

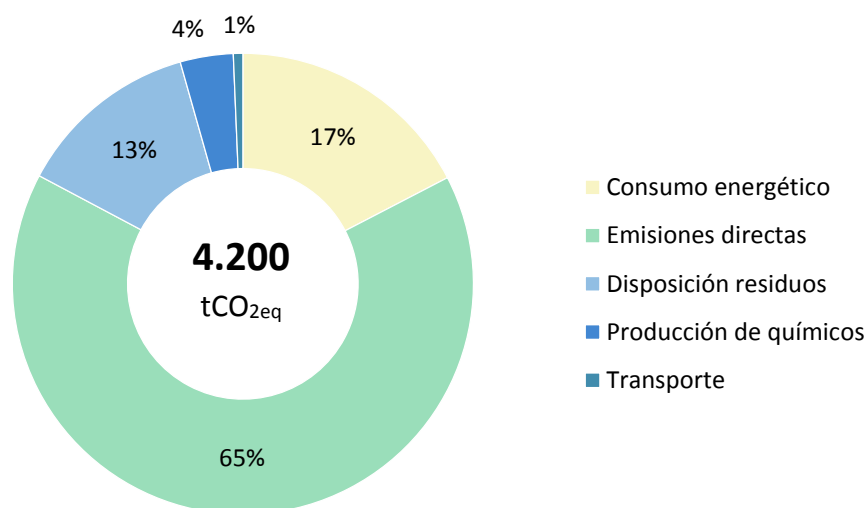


Gráfico 2: Distribución emisiones Escenario N°2- Cogeneración

A continuación, en el Gráfico 3, se encuentra el escenario ampliado estimado para el año 2024 considerando la redistribución del afluente (tasa de crecimiento de 2%). Se observa un aumento en las emisiones totales con respecto al escenario N°2, debido al aumento del afluente pronosticado. También se observa una leve disminución del aporte de las emisiones asociadas al consumo energético (55 toneladas aproximadamente), debido a la disminución pronosticada del factor de emisión del SIC dadas las políticas públicas actuales que apuntan a una diversificación de la matriz incluyendo nuevas tecnologías en base a energías renovables no convencionales.

Para el caso tomado con crecimiento vegetativo (tasa de crecimiento 0,6%), la distribución es la misma, sin embargo, el total es igual a 4.400 tCO<sub>2eq</sub>.

Ambos escenarios ampliados poseen una huella de carbono total menor que el escenario actual de la planta. No poseen cambios significativos sobre el escenario con cogeneración, es especial en cuanto a la distribución. La tasa de aumento del afluente otorgado por la empresa posee como consecuencia un aumento mayor en la huella de carbono de la planta.

A pesar de que los cambios no son significativos para este escenario, es necesario promover trayectorias de mitigación para disminuir el impacto total y así compensar el creciente afluente.

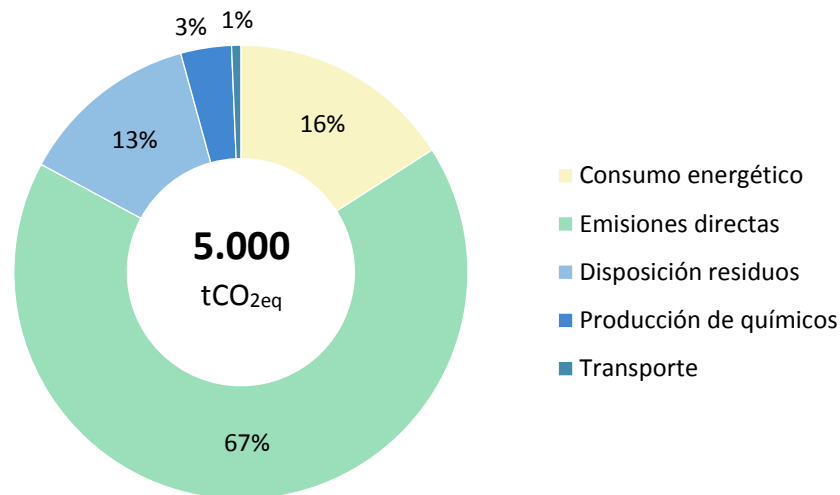


Gráfico 3: Distribución emisiones Escenario N°3- Ampliación con redistribución de afluente (tasa de crecimiento 2%)

A futuro se espera que el factor de emisión de la matriz energética vaya disminuyendo y con ello el aporte a la huella de carbono. La actividad que tomará mayor relevancia son las emisiones directas de la planta. Resultando valioso enfocarse en generar trayectorias de mitigación para esta actividad en particular desde un punto de vista ambiental.

En conclusión, se identifica que, entre los escenarios estudiados, el que posee mayor impacto asociado a las emisiones de GEI es el de la línea base con 5.100 tCO<sub>2eq</sub> emitidas el año 2016. Además, el Escenario N°2- Cogeneración presenta una disminución del 17% de las emisiones con respecto al escenario base, siendo positiva la inclusión del motor de cogeneración en el proceso. También, el Escenario N°3- Ampliado, considerando el aumento del afluente a tratar, no alcanza a sobrepasar las emisiones del escenario base debido a que cuenta con el motor de cogeneración eléctrica y, además, se espera que el factor de emisión de la matriz energética sea 18% menor que el actual.

Las emisiones directas poseen la mayor participación, siendo mayores al 50% en todos los escenarios analizados, y con mayor relevancia aun al incorporar el motor de cogeneración. Además, vale la pena las emisiones directas poseen un alto potencial de ser mitigadas debido a que se encuentran en el ámbito de acción de la empresa.

## 7.2 Distribución emisiones por alcance

En esta sección se analizará la distribución específica de las emisiones para los alcances N°1 y N°3, y los cambios observados según escenario. El alcance N°2 no se analiza debido a que corresponde a las emisiones dada el consumo de electricidad desde la matriz energética (no posee distribución).

Como se mencionó en la Sección 5.2.5, el alcance N°1 hace referencia a las emisiones directas de la planta y el N°3 a las emisiones indirectas que no poseen relación con el consumo de energía eléctrica.

En cuanto al aporte total por alcance, es evidente, dados los resultados generales, que el primer alcance (emisiones directas) posee un mayor aporte a la huella de carbono que el tercero, siendo un orden de magnitud mayor. Un ejemplo de esto se obtiene de los Gráfico 1 y Gráfico 2, y las ya mencionadas proporciones de emisión asociadas directamente al proceso.

### 7.2.1 Distribución emisiones alcance N°1

En la Sección 7.1 se concluyó que las emisiones directas poseen un aporte mayor al 50% en todos los escenarios estudiados. Esta sección tiene por objetivo determinar cuál operación unitaria del proceso posee el impacto más significativo y estimar su magnitud. Esto permitirá luego definir el curso que deberían seguir las recomendaciones. Además, se podrá analizar cuál es el efecto de implementar las medidas asociadas al Escenario N°1 – base con el N°2 – cogeneración.

El Gráfico 4 muestra la distribución de las emisiones directas según el equipo que las emite, el tratamiento secundario es el que presenta el aporte más significativo, representando más del 70% de las emisiones para todos los escenarios. De la línea de todos los principales aportes se dan desde la cámara de mezcla de lodos y el digestor, siendo en su mayoría fugas de metano.

La mayoría de los ítems no se ven afectados por la modificación entre el Escenario N°1 y N°2 como se esperaba, el cambio observado entonces tiene relación con las emisiones directas de la caldera, la antorcha y el uso de petróleo en la planta. Así, considerando el reemplazo de la caldera con la antorcha por el motor de cogeneración, se ven disminuidas las emisiones directas de la planta en un 5%. Lo anterior se explica por la diferencia en los factores de emisión del motor de cogeneración en comparación a la caldera, lo cual es apreciable en el Gráfico 4.

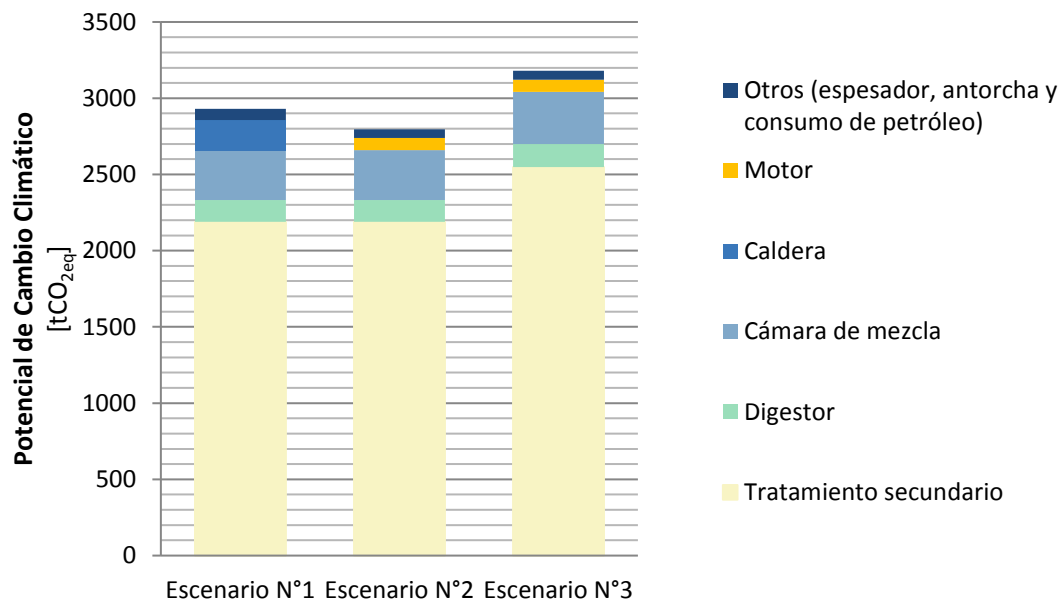


Gráfico 4: Distribución de emisiones directas o alcance N°1 para cada escenario

En la sección de análisis de inventario se encuentran los factores de emisión de cada tecnología, sin embargo, no son comparables dadas las unidades utilizadas. Considerando el poder calorífico del biogás igual a 6,5 kWh/m<sup>3</sup> [44], los coeficientes de emisión corresponden a los calculados en

la Tabla 16, donde se puede apreciar que en unidades de CO<sub>2</sub> equivalente, el motor de cogeneración posee un factor de emisión 56% menor que el de la caldera.

Tabla 16: Comparación factores de emisión de equipos de combustión

<b>Equipo</b>	<b>GEI</b>	<b>Factor de emisión [kgGEI/m<sup>3</sup> biogás]</b>	<b>Factor de emisión [kgCO<sub>2eq</sub>/ m<sup>3</sup> biogás]</b>
Caldera	CH <sub>4</sub>	$1,25 \cdot 10^{-3}$	0,514
	N <sub>2</sub> O	$1,62 \cdot 10^{-3}$	
Antorcha	CH <sub>4</sub>	$2,51 \cdot 10^{-4}$	0,006
Motor de cogeneración	CH <sub>4</sub>	$7,15 \cdot 10^{-3}$	0,226
	N <sub>2</sub> O	$1,58 \cdot 10^{-4}$	

Cabe mencionar que, como se explicó en capítulos anteriores, las emisiones de CO<sub>2</sub> dada la combustión de biogás no son contabilizadas debido a que se consideran parte del ciclo corto del carbono, por lo que no serían emisiones antropogénicas.

En síntesis, la operación unitaria que posee el impacto más significativo es el tratamiento biológico, aportando más del 70% de las emisiones totales para todos los escenarios, el gas ligado a esta operación es el óxido nitroso. Además, en las emisiones directas, se observa la disminución del impacto de uso de motor de cogeneración en vez del conjunto caldera más antorcha utilizado actualmente.

Finalmente, es importante destacar que las emisiones directas componen gran parte de las emisiones totales de la huella, presentando un significativo potencial de disminución de emisiones debido a que se encuentran en el ámbito de acción directa de la empresa.

### 7.2.2 Distribución emisiones alcance N°3

Las emisiones del alcance N°3, si bien no poseen un aporte significativo sobre la huella de Carbono, es interesante conocer cuáles actividades de este alcance poseen mayor aporte y qué gases están involucrados.

A continuación, en el Gráfico 5 se muestran las emisiones indirectas agrupadas en transporte, disposición de residuos y vertido del efluente en el cauce receptor con el objetivo de que se pudieran apreciar claramente sus impactos.

En primer lugar, las emisiones indirectas no se ven afectadas por el cambio de escenarios N°1 y N°2 debido a que la incorporación del motor no influye en la producción de lodos ni en la calidad del efluente. Sin embargo, en el tercer escenario se observa un aumento en el total de las emisiones debido al aumento del afluente, manteniéndose la distribución.



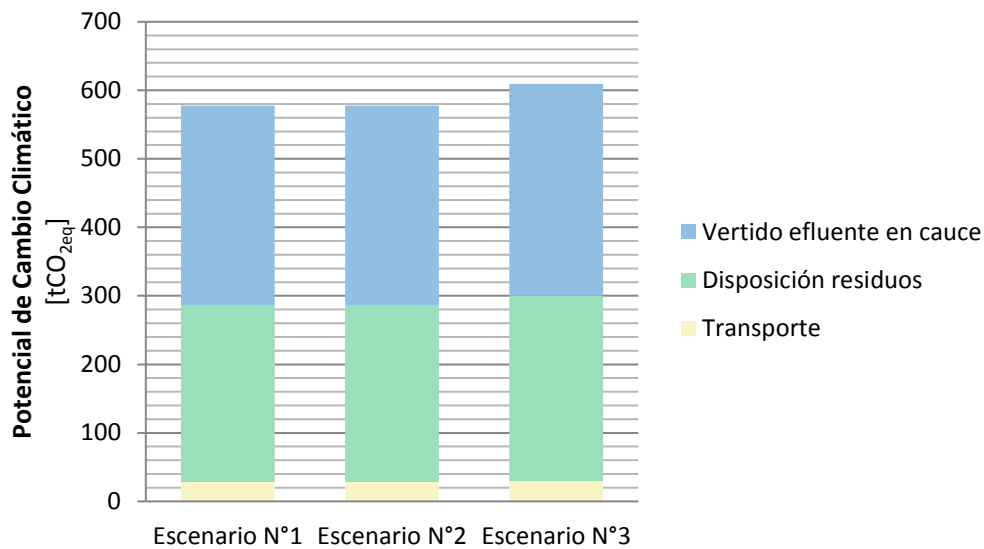


Gráfico 5: Emisiones alcance N°3 para cada escenario

En conclusión, el mayor aporte y que, por lo tanto, cumple un rol significativo en este alcance es la emisión de óxido nitroso una vez vertido el efluente en el cauce receptor. Seguido por las emisiones dada la disposición de residuos y el menor aporte está dado por el transporte de reactivos y residuos.

### 7.3 Emisiones por GEI

Es relevante analizar el aporte por GEI en el total de las emisiones dado que permite identificar cuál es el gas con mayor emisión y analizar a qué se debe. Así, con la información anterior, es posible definir cursos de acción para la generación de recomendaciones.

La distribución de emisiones por GEI se muestra en la Figura 17. El gas que es mayormente emitido es el óxido nitroso proveniente principalmente del tratamiento secundario de la planta, seguido del dióxido de carbono emitido en su mayoría por la matriz energética y finalmente, el metano producido en la línea de acondicionamiento de lodos.

Dado el cambio en el proceso entre escenarios, se observa que va tomando mayor relevancia las emisiones de óxido nitroso, y se espera que esta tendencia continúe debido a lo pronosticado para la matriz energética.

La estimación de las emisiones directas puede ser discutible dado el uso de un factor de emisión que no considera el contexto ni la variabilidad del sistema y del que se puede considerar un grado de incertidumbre del  $\pm 30\%$  [34]. La emisión de óxido nitroso de una PTAR es significativa en comparación con las emisiones de metano y dióxido de carbono, más aún si la matriz energética del país en cuestión posee un factor de emisión ligada a energías renovables no convencionales.

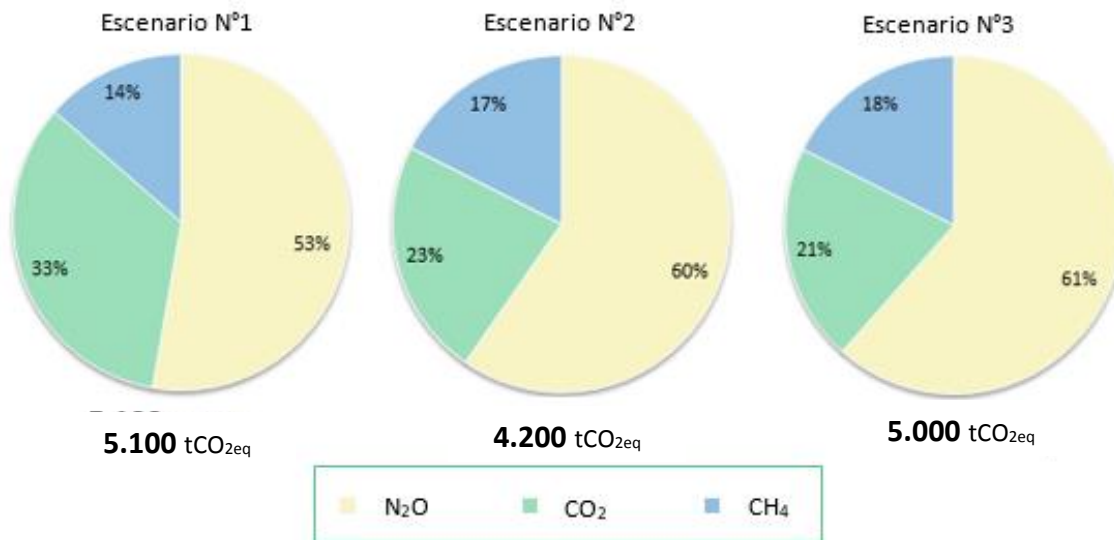


Figura 17: Proporción de GEI totales emitidos para cada escenario expresado en tCO<sub>2</sub>eq

El gas con mayor aporte en todos los escenarios es el óxido nitroso y por ello es relevante abarcar en la sección de recomendaciones. En la subsección siguiente se realiza un análisis de sensibilidad con respecto al factor de emisión directa de óxido nitroso de la planta, con el objetivo de conocer cuál es su influencia considerando su grado de incertidumbre.

### 7.3.1 Análisis de sensibilidad

Como se explicó anteriormente, el factor de emisión utilizado para estimar la emisión de óxido nitroso pertenece a un amplio rango de valores obtenidos de manera empírica en distintos sistemas de tratamiento de aguas residuales domiciliarias. Por esto se decide realizar un análisis de sensibilidad sobre el factor de emisión, para analizar su influencia en las emisiones totales de la planta.

Se tomó como referencia un rango del 30% mayor y menor con respecto al factor de emisión utilizado (0,005 kgN<sub>2</sub>O/kgTKN<sub>afluente</sub>), así, el caso optimista es que el factor de emisión de óxido nitroso es igual a 0,0035 kgN<sub>2</sub>O/kgTKN<sub>afluente</sub> y el pesimista es que el factor es igual a 0,0065 kgN<sub>2</sub>O/kgTKN<sub>afluente</sub>.

En el Gráfico 6 se pueden ver los resultados del análisis de sensibilidad el cual arroja que el mínimo aporte alcanzado por las emisiones directas de óxido nitroso en la PTAR es de 51% para el caso optimista en el Escenario N°1-Base. En el Escenario N°2-Cogeneración el mínimo aporte a las emisiones directas de la planta es de 59% en el caso optimista. Para el caso pesimista, el valor en el escenario base es de 62% y en el de cogeneración de 70%.

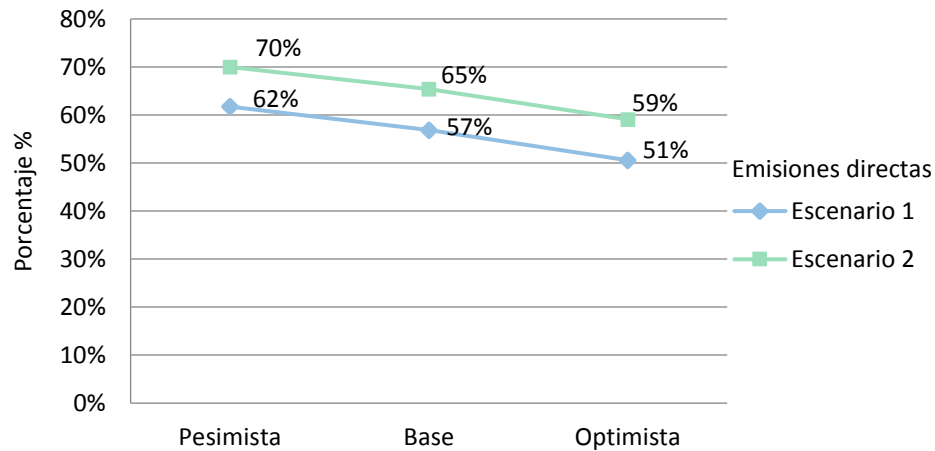


Gráfico 6: Análisis de sensibilidad sobre las emisiones directas de la planta, considerando en el caso pesimista un factor de emisión de 0,0065 kgN<sub>2</sub>O/kgTKN<sub>afluente</sub> y en el caso optimista de 0,0035 kgN<sub>2</sub>O/kgTKN<sub>afluente</sub>

Tomando un margen de incertidumbre de  $\pm 30\%$  sobre el factor de emisión, el óxido nitroso emitido en las emisiones directas de la planta (alcance N°1) aportan un mínimo de 59% en el caso optimista en el Escenario N°2- Cogeneración y un máximo de 70% en el mismo escenario. El análisis evidencia que el óxido nitroso sigue siendo una actividad donde dirigir la atención para la posible disminución de emisiones, tomando como referencia un aporte mayor al 50% para que sea significativo y que, además, supere el aporte de todas las otras actividades consideradas.

Por lo tanto, en cualquiera de estos escenarios, sigue siendo importante reducir las emisiones de óxido nitroso.

#### 7.4 Indicadores de emisión

En esta sección se normalizará las emisiones totales por escenario con respecto a la unidad funcional definida previamente, con el fin de facilitar la comparación con otras plantas y escenarios. Así, se podrá comparar el desempeño normalizado de los escenarios calculados y, además, comparar con los factores de emisión obtenidos en estudios anteriores realizados a plantas de Aguas Andinas S.A.

Para comparar el desempeño ambiental de la planta se calcula el indicador de emisión por metro cúbico de agua tratada para cada escenario en estudio, resultados presentados en el Gráfico 7.

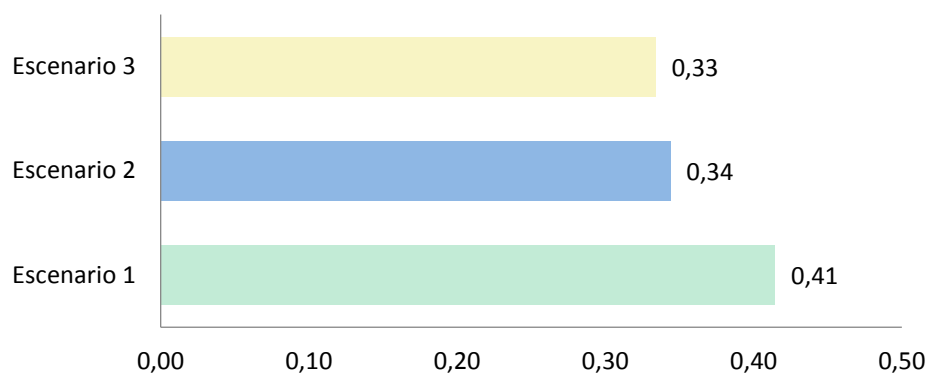


Gráfico 7 : Indicador de emisión en kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de agua tratada por escenario

Los resultados dan soporte a lo presentado anteriormente sobre la disminución de la huella de carbono en un 17% entre los escenarios N°1 y N°2. Además, dado a que se encuentra normalizado, permite comparar los escenarios N°2 y N°3 sin que influya entonces el aumento del afluente, así, entre estos escenarios existe la disminución de un 3% efectivo de la huella.

Ahora, en el Gráfico 8, se presenta una comparación entre los indicadores de emisión obtenidos en distintos estudios realizados por Aguas Andinas sobre distintas plantas de la empresa.

En primer lugar, está el cálculo de la huella de carbono empresarial (PTAR A.A. 2016), por lo tanto, el valor presentado está calculado en función de todas las plantas de aguas residuales de la empresa [45]. Luego el indicador calculado en el presente estudio para el Escenario N°2-cogeneración. Siguiendo con los indicadores obtenidos para las plantas Farfana y Mapocho – Trebal del año 2014 [46] [47].

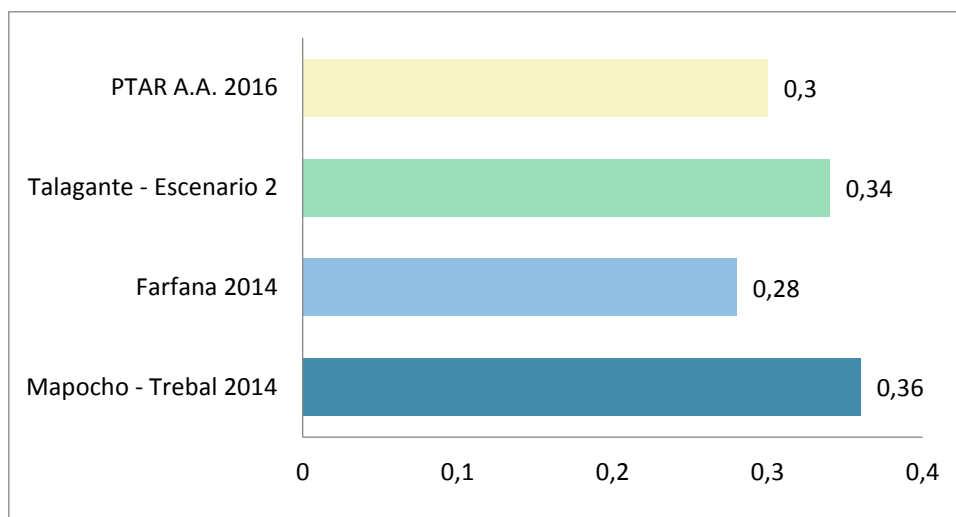


Gráfico 8: Indicador de emisión en kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de agua tratada según estudios realizados a plantas de tratamiento de Aguas Andinas y el calculado en el presente estudio.

Estos valores son referenciales y están sujetos a la metodología de cálculo y los factores de emisión utilizados. Aun así, son útiles como comparación, se puede observar que todos los resultados se encuentran en un rango cercano [0,28-0,36], validando el orden de magnitud de los resultados obtenidos en el presente estudio.

El consumo de energía eléctrica normalizado por metro cúbico tratado de las plantas es similar siendo 0,28 kWh/m<sup>3</sup> para la planta Talagante y, el promedio para las plantas de Aguas Andinas es de 0,27 kWh/m<sup>3</sup>. Las diferencias existentes en el ratio de consumo de energía eléctrica de las plantas dependen del proceso utilizado para el tratamiento y de la escala que poseen. naturalmente una planta de gran escala debería poseer un mayor consumo de energía eléctrica dados los edificios administrativos que poseen, pero, a su vez, trata un mayor caudal.

El factor de emisión de óxido nitroso utilizado en los estudios es el avalado por el IPCC. Sin embargo, como se analizó en la Sección 6.1.1, dicho factor se encuentra desactualizado. Ello podría corresponder a un agente que puede influir en la discordancia de los resultados.

Otra diferencia propia de la metodología de cálculo es que en estos estudios se consideran como emisiones evitadas o reducidas las provenientes de la producción de energía renovable y su autoconsumo mediante la cogeneración. Lo anterior no fue tomado en consideración en este estudio para poder observar el real aporte de las emisiones emitidas por la planta.

En particular, las plantas Farfana y Mapocho Trebal corresponden a las plantas de tratamiento con mayor caudal de Aguas Andinas. Ambas poseen procesos que mejoran la gestión energética de estas, la primera inyecta biogás a la línea de la empresa Metrogás y la segunda posee cogeneración de energía para autoconsumo. Ambas prácticas corresponden a actividades de reducción de emisiones. La diferencia entre ambas plantas se debió a deficiencias en el proceso biológico de la planta Mapocho Trebal resultando en sobre consumos eléctricos y disminución de biogás disponible para cogeneración.

Al comparar con los resultados de otros estudios realizados a PTAR de Aguas Andinas, los valores obtenidos se encuentran en el mismo orden de magnitud. Sin embargo, estos indicadores son solo referenciales debido a las diferencias existentes en la metodología de cálculo, el proceso utilizado en la planta y los factores de emisión utilizados.

Como cierre del capítulo, es claro notar la relevancia de las emisiones de óxido nitroso en la planta y el potencial que posee la empresa en la reducción de estas dado a que se encuentran dentro del ámbito de acción de la empresa.

## 8 Recomendaciones

En este capítulo se presentan recomendaciones que tienen el propósito de mejorar el desempeño ambiental de la PTAR. Estas son elaboradas apuntando a las actividades que poseen un mayor impacto según los resultados obtenidos y el análisis realizado en el capítulo anterior. Posterior a las recomendaciones se realiza un análisis de estas para conocer cuáles son las limitaciones y alcances de su implementación.

Las actividades con mayor aporte a la huella de carbono en todos los escenarios analizados son las emisiones directas de la planta, en particular, la emisión de óxido nitroso en el tratamiento biológico; le sigue el consumo de energía eléctrica proveniente del SIC, cuyo aporte se espera disminuya en el tiempo. Por lo tanto, en este capítulo se abarcarán trayectorias de mitigación de las emisiones de óxido nitroso.

Se analiza en primer lugar, de qué forma y en qué operaciones es producido el óxido nitroso en la PTAR. Para ello se propone realizar una campaña de medición de óxido nitroso en la PTAR debido a que los valores obtenidos en los resultados corresponden a una estimación que, si bien se considera certera en magnitud, no es específica del sistema en estudio. Sumado a lo anterior, estudios han demostrado que no es recomendable utilizar factores de emisión para estimar las emisiones de óxido nitroso. En distintos países se han desarrollado campañas de medición resultando en factores pertenecientes a un rango muy amplio (entre 0,001% a 14,6% del nitrógeno total del afluente) dependiendo del contexto y del proceso utilizado para la remoción de nitrógeno [48].

Luego, se plantea realizar cambios operativos y/o tecnológicos. Con respecto a la operación, se distingue cuáles parámetros de operación del tratamiento secundario influyen en una mayor o menor generación de óxido nitroso. Con ello se busca prevenir las emisiones e identificar posibles problemas de operación en la planta que desencadenen una mayor producción de óxido nitroso o si es posible ajustar los parámetros de operación con el objetivo de disminuir la formación de óxido.

Con respecto a la tecnología utilizada, como uno de los objetivos del tratamiento biológico es la remoción de nitrógeno orgánico del afluente, proceso que conlleva la producción de óxido nitroso. Se hace necesario investigar tecnologías de remoción que posean una menor emisión con respecto a los utilizados actualmente.

### 8.1 Producción de óxido nitroso en una PTAR

Como se desarrolla en la Sección 2.1.3.1, las aguas residuales urbanas se caracterizan por contener nitrógeno fundamentalmente en forma de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y nitrógeno orgánico (asimilado en moléculas orgánicas), que es parcialmente removido en el tratamiento secundario. Durante este tratamiento se emite óxido nitroso dados los procesos de nitrificación y desnitrificación: en la etapa de nitrificación, el óxido nitroso es un subproducto de la reacción y en la etapa de desnitrificación, el óxido nitroso es un intermediario (ver Figura 18).

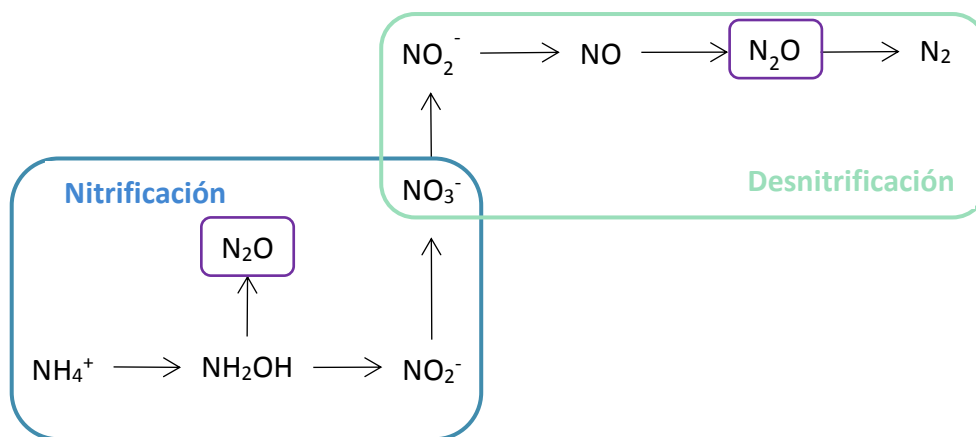


Figura 18: Producción de óxido nitroso en procesos de nitrificación y desnitrificación

En la tecnología de filtros biológicos ocurre mayormente el proceso de nitrificación debido a que posee aeración natural, sin embargo, también se da en una menor proporción la desnitrificación en zonas anóxicas [49]. Es prioritario analizar las condiciones de operación del filtro biológico de la planta, y cómo afectan estas a la mayor o menor producción de óxido nitroso.

A partir de la información sobre formación de óxido nitroso en el proceso, es posible generar recomendaciones para realizar cambios operativos y/o tecnológicos. Lo anterior se abordará en las secciones siguientes.

### 8.1.1 Campaña de medición óxido nitroso

Esta recomendación tiene como objetivo diagnosticar y verificar los niveles de emisión de óxido nitroso que posee la PTAR Para esto es necesario llevar a cabo una campaña de medición de óxido nitroso en la planta. Este tipo de campañas corresponden a una labor compleja debido a los diversos puntos de formación en el proceso (usualmente se emite de forma dispersa y a lo largo de todo el proceso) y la variabilidad que presenta en el tiempo. Por lo tanto, existen variados factores a tomar en consideración: periodo de muestreo, frecuencia, puntos de medición, fase en la que se realiza la medición, instrumento a utilizar, entre otros. A continuación, se establecerá una guía general para realizar la campaña.

**Periodo de muestreo:** debido a la variabilidad estacional que presenta la emisión de óxido nitroso observada en estudios anteriores [36] [50], se recomienda que la campaña sea de largo plazo, involucrando en ella las distintas estaciones del año. Así se evidenciará el efecto de las variables climáticas y cambios en la composición del afluente sobre la producción de óxido nitroso.

**Frecuencia:** según bibliografía, bajo un estudio estadístico que involucra distintas campañas de medición, se obtienen resultados más certeros cuando la frecuencia de toma de muestra es semanal, tomando la muestra en un día aleatorio cada vez. Además, se deja fuera del muestreo los días sábado y domingo debido a que presentan mayor variabilidad y no es representativo del sistema en estudio [50]. De todas formas, mientras más mediciones se puedan realizar, mejor estimación se tendrá. Lo más relevante es la consistencia en la toma de datos.

**Puntos de medición:** la producción de óxido nitroso se da durante toda la línea de agua, sin embargo, como se menciona en secciones anteriores, su formación se concentra en el tratamiento biológico bajo los procesos de nitrificación y desnitrificación. Por lo tanto, se recomienda que la medición se realice en el filtro biológico, tomando en consideración las fases líquida y gaseosa. En el caso de la fase líquida, la medición se debe realizar en el agua de salida del filtro. En el caso de la fase gaseosa el medidor puede ser instalado en la zona superior para asegurar el contacto del medidor con la fase, la zona debe ser decidida teniendo como objetivo principal obtener una concentración representativa de todo el reactor [51].

**Instrumento de medición:** se analizaron dos tecnologías utilizadas previamente en campañas de medición de óxido nitroso de otros países. El medidor SERVOPRO 4100 de Servomex el cual presenta una tecnología basada en un sensor infrarrojo de gases [52], y el medidor N<sub>2</sub>O-WW de Unisense es una tecnología de tipo Clark basada en ionización [53]. Ambos equipos fueron cotizados y sus precios se encuentran en la Tabla 17, en el Anexo D se presentan imágenes de las cotizaciones de ambos equipos en las Figura 22 y Figura 23.

Tabla 17: Cotización de equipos de medición

<b>Medidor</b>	<b>Precio [CLP]</b>
SERVOPRO 4100 [54]	15.000.000
N <sub>2</sub> O- WW Unisense [51]	7.500.000

Una variación del modelo SERVOPRO fue utilizado en campañas de medición en distintas plantas de Países Bajos [50]. Por otro lado, una variación de N<sub>2</sub>O- WW Unisense fue utilizado en campañas de medición en distintas plantas de Australia [36].

Ambos poseen la capacidad de medición tanto en la fase gaseosa como en la líquida, por lo que son adecuados para la campaña. Sin embargo, el equipo SERVOPRO no realiza la medición *in situ* como sí lo hace el N<sub>2</sub>O- WW, por lo que presenta mayor flexibilidad el uso del medidor Unisense.

En conclusión, realizar una campaña de medición del óxido nitroso emitido por una PTAR, es una labor compleja y se deben tomar ciertas consideraciones para tener mediciones representativas del sistema. Para esto se aconseja que el periodo de muestreo abarque distintas estaciones del año para ver la variabilidad con respecto a la variable climática, además, las mediciones se deberían realizar tanto en la fase gaseosa como líquida del tratamiento secundario de la planta. Finalmente, existen instrumentos de medición con los que se podría realizar la campaña y su precio se encuentra entre 7 y 15 millones de pesos.

## **8.2 Condiciones de operación**

Como se analizó en la Sección 7.1, si bien en el proceso de nitrificación no se produce óxido nitroso directamente, existen factores que favorecen su producción como subproducto en la nitrificación, al igual que en la etapa de desnitrificación como intermediario. En la Figura 19 se esquematizan los factores que implican una mayor producción de óxido nitroso en los procesos de nitrificación y desnitrificación.



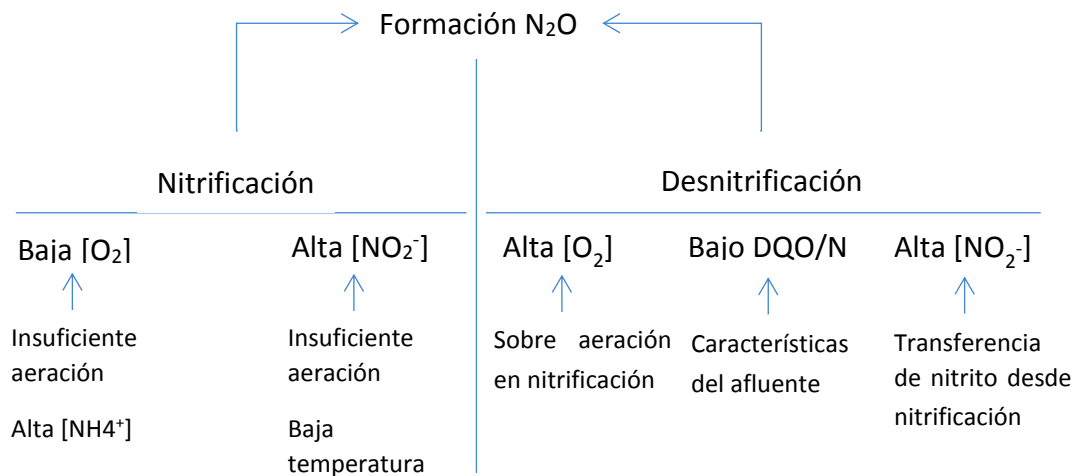


Figura 19: Variables que afectan la producción de óxido nitroso en procesos de nitrificación y desnitrificación. Adaptado de [55]

Se analizará en mayor profundidad los factores que afectan al proceso de nitrificación debido a que corresponde al proceso utilizado en la PTAR Talagante. Además, ninguna de las plantas operadas por Aguas Andinas S.A. utiliza el proceso de desnitrificación.

- **Concentración de oxígeno disuelto:** en el proceso de nitrificación una baja concentración de oxígeno disuelto (< 1 mg/l), promueve una mayor formación de óxido nitroso, debido a que las bacterias AOB utilizan el nitrito como aceptor de electrones con el fin de ahorrar oxígeno para la reacción de oxigenación del amoníaco, favoreciendo así la formación de óxido nitroso [56]. Al mismo tiempo, una sobre aeración en la etapa de nitrificación puede llevar a tener una alta concentración de oxígeno disuelto en la desnitrificación, si esta existiese. Por lo que es necesario un control adecuado de la aeración.
- **Concentración de nitrito:** una alta concentración de NO<sub>2</sub><sup>-</sup> en el afluente promueve la formación de óxido nitroso en ambos procesos: nitrificación y desnitrificación. Durante la nitrificación se favorece la reducción del nitrito a óxido nitroso y en la desnitrificación provoca la disminución de la tasa de reacción y por lo tanto, una acumulación de NO y N<sub>2</sub>O [56].
- **pH:** si el pH es básico (>8) se favorece la formación de N<sub>2</sub>O. Sin embargo, debido a que usualmente las aguas presentan un valor estable de pH en el rango [7,8], no se considera como un factor relevante [56].

Del análisis realizado, se propone que el parámetro de operación más relevante en la formación de N<sub>2</sub>O es la concentración de oxígeno disuelto. Además, el impacto de la concentración de oxígeno disuelto en la emisión de N<sub>2</sub>O indica que es recomendable poseer un control adecuado de este parámetro en el sistema de remoción de nitrógeno, en particular para este caso, en los filtros biológicos.

Sumado a lo anterior, el monitoreo de la concentración de oxígeno disuelto puede permitir tener niveles correctos de aeración que apuntan tanto a la disminución de emisión de óxido nitroso como

a mejorar la eficiencia energética del proceso, en especial en plantas donde el proceso de remoción posea sistema de aeración, como son los estanques de lodos activados.

En conclusión, el cambio operativo más significativo es el monitoreo y optimización de la concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento secundario, este presenta beneficios tanto en la emisión de óxido nitroso como en la eficiencia energética del sistema, más aun si este se implementa en plantas que posean tratamiento secundario que requieran aeración.

### **8.3 Tecnologías de remoción de nitrógeno**

Con el fin de disminuir la emisión de óxido nitroso en la planta se pueden realizar cambios operativos y/o tecnológicos. En la sección anterior se consideraron cambios operativos, mientras que en esta sección se abordará la posibilidad de realizar cambios tecnológicos.

La producción de óxido nitroso ocurre principalmente en las operaciones de remoción de nitrógeno debido a los procesos de nitrificación y desnitrificación. Por ello se deben analizar nuevas tecnologías de remoción que posean una menor tasa de producción de óxido nitroso.

Por otro lado, estudios anteriores han concluido que las plantas que logran una remoción de nitrógeno de alto nivel emitirían menos  $N_2O$ , en comparación con las plantas que poseen bajos niveles de eliminación de nitrógeno [48]. Además, una mayor remoción implica también que la emisión después de descargar el efluente en el cauce receptor disminuya (emisiones indirectas).

Así, considerando lo anterior, para la remoción de nitrógeno orgánico de las aguas residuales se han empleado, de forma convencional, reactores con distintas configuraciones que abarcan zonas aerobias, óxicas y anóxicas. Así se favorecen los procesos de nitrificación o desnitrificación, dependiendo del caso. Sin embargo, agregar nuevas etapas de nitrificación supone altos costos energéticos debido a la necesidad de airear el sistema, y agregar nuevas etapas de desnitrificación, supone la adición de fuentes de carbono orgánico. Además, estos procesos solo apuntan a la remoción de nitrógeno, sin considerar entonces el objetivo de disminuir las emisiones de óxido nitroso, aunque podrían potencialmente aportar a su disminución [57].

También existen distintos tratamientos que involucran la línea principal de agua, o bien, corrientes de rechazo provenientes de la línea de tratamiento de lodos, en particular, desde el digestor, la centrífuga y el espesador. Estas últimas son reintegradas al proceso previo al tratamiento secundario y dado a que usualmente poseen altas concentraciones de amonio, entre 500-1000  $mgNH_4^+/l$  [58], dificultan el proceso biológico del tratamiento secundario por su alta carga de nitrógeno. Por lo tanto, la tecnología se podría analizar tanto para la corriente principal como para las corrientes de rechazo.

En función de lo anterior, en la década del 1990 surge una nueva propuesta de proceso de remoción de nitrógeno basada en la oxidación anaeróbica de amonio. Este proceso se distingue de las propuestas anteriores debido a que no se encuentra basada en los procesos de nitrificación y desnitrificación. Esta tecnología, la posibilidad de ser utilizada, sus ventajas y desventajas, se analizan en la siguiente sección.

### 8.3.1 Proceso *Anammox*

El proceso de oxidación anaeróbica de amonio (*Anammox*, por su sigla en inglés), es un proceso biológico capaz de transformar anaeróbicamente el ión amonio presente en las aguas residuales a nitrógeno gaseoso, con nitrito como aceptor de electrones. Este proceso fue descubierto a fines de la década del 1990 en una planta piloto de desnitrificación, y desde ese momento ha sido extensamente estudiado con el fin de que pueda ser implementada en plantas de tratamiento de aguas [59].

A partir del año 2002 la tecnología comenzó a ser aplicada en distintas plantas de tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas del planeta. Hasta el año 2015 existían alrededor de 100 plantas (para ver su distribución ir a Figura 24 del Anexo E), en su mayoría ubicadas en países europeos [60]. Para el caso particular de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, al año 2015 el proceso *Anammox* ha sido utilizado solo para tratar corrientes provenientes de la línea de tratamiento de lodos, sin lograrse aún la implementación en la línea principal de agua.

A continuación, se abordará el proceso bioquímico y las ventajas y desventajas que presenta la implementación de este tipo de tecnología.

#### Proceso bioquímico

La remoción de nitrógeno mediante el proceso *Anammox* requiere de dos fases: nitrificación parcial y el proceso *Anammox* en sí mismo. El primero opera en condiciones óxicas y su objetivo es formar nitrito, mientras la segunda, opera en condiciones anóxicas con el objetivo de formar nitrógeno gaseoso. En la Figura 20 se presenta el ciclo del nitrógeno y la reacción que abarca el proceso *Anammox* dentro de este. En el esquema se puede notar que el proceso *Anammox* corresponde a un circuito corto para la formación de nitrógeno gaseoso, en vez de realizar los procesos de nitrificación y desnitrificación completos.

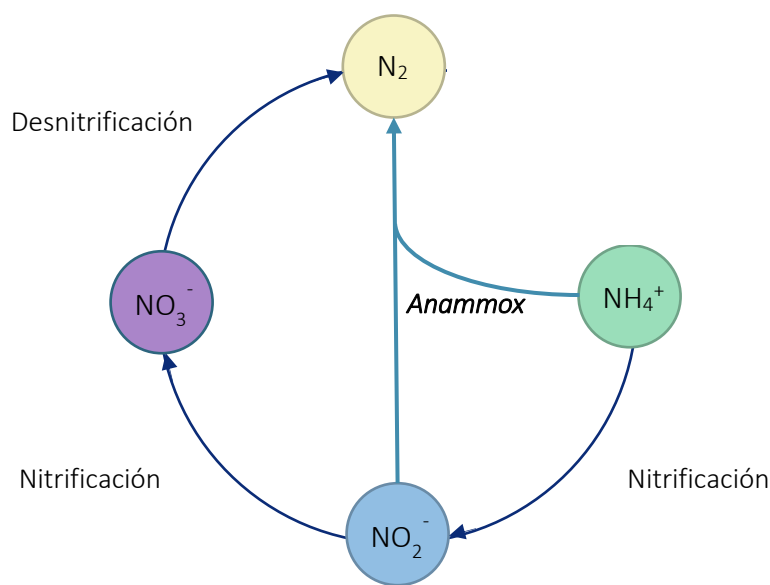
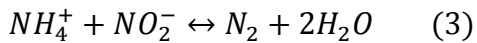


Figura 20: Esquema proceso *Anammox*

Así, la reacción global del proceso es la que sigue en la Ecuación 3 [61], donde los reactantes serían amonio y nitrito, y los productos nitrógeno gaseoso y agua. La temperatura óptima de operación es de 37°C, sin embargo, se ha estudiado que el complejo bacteriano puede adaptarse a la temperatura teniendo una correcta operación entre 25-40°C [57]. Otra condición de operación es poseer bajo ratio C/N, es decir, que el agua a tratar posea baja carga orgánica, debido a que si posee alta carga se favorece el proceso de desnitrificación en vez del *Anammox*.



Como se mencionó, el proceso consta de dos subprocesos, los cuales requieren de condiciones de operación diferentes. La nitrificación parcial requiere condiciones óxicas y el proceso *Anammox*, anóxicas.

Varios sistemas han sido propuestos para la operación de esta tecnología. Una de las principales diferencias es el número de reactores utilizado para el proceso (1 o 2), y otra diferencia es el tipo de crecimiento bacteriano que presenta la unidad: este puede ser en suspensión, *biofilm* o en gránulos [62].

La opción de llevar a cabo la operación en solo un reactor presenta ventajas dada la disminución de costos de inversión y consumo energético. De hecho, hasta el 2014, el 88% de las plantas que utilizan *Anammox* en sus procesos de tratamiento utilizan reactores de una sola etapa [63].

### **Análisis comparativo**

Según lo presentado previamente, el proceso *Anammox* corresponde a una alternativa novedosa para la remoción de nitrógeno de las aguas residuales. En particular, para tratar las corrientes de rechazo provenientes de la línea de lodos, debido a que estas presentan una alta carga de nitrógeno, bajo ratio C/N y mayor temperatura que el afluente (debido a que son provenientes de la digestión).

Se realizó un análisis comparativo entre las tecnologías Nitrificación parcial/*Anammox* y Nitrificación/Desnitrificación, en función del cual se elaboró la Tabla 18, con el fin de identificar las ventajas y desventajas del sistema propuesto.

Las principales ventajas que presenta la tecnología *Anammox* son: el bajo consumo energético, debido a que solo la etapa de nitrificación parcial opera en condiciones óxicas (suministro de oxígeno); no requiere adición de materia orgánica; alta eficiencia en la remoción de nitrógeno y menor emisión de óxido nitroso con respecto a tecnologías de nitrificación/desnitrificación.

Las desventajas asociadas son debidas principalmente a que las bacterias *Anammox* poseen una baja tasa de crecimiento bacteriano, lo que dificulta la puesta en marcha del sistema.

Tabla 18: Análisis comparativo entre tecnologías nitrificación parcial/ anammox y nitrificación/desnitrificación. Flechas azules indican ventaja y amarillas desventaja.

	<b>Nitrificación parcial/Anammox</b>		<b>Nitrificación/Desnitrificación</b>	
<b>Consumo energético</b>	↑	Bajo consumo energético. Solo la etapa de nitrificación parcial requiere aeración. Un 60% menor que sistema de lodos activados [63].	↓	Alto consumo energético. Requiere mayor aeración dado el proceso de nitrificación.
<b>Tasa de crecimiento</b>	↓	Bajas tasa de crecimiento de biomasa. $\mu_{\text{máx}}$ : 0,065 d <sup>-1</sup> , tiempo de duplicación: 11 días [59].	↑	Altas tasas de crecimiento de biomasa. $\mu_{\text{máx}}$ : 0,54 d <sup>-1</sup> para nitrosomas y $\mu_{\text{máx}}$ : 0,67 d <sup>-1</sup> para nitrobacter [65].
<b>Fuente de Carbono</b>	↑	Su fuente de carbono es CO <sub>2</sub> por lo que no requiere una fuente de carbono adicional [61].	↓	En ciertos casos es necesaria la adición de metanol como fuente carbono para la desnitrificación.
<b>Puesta en marcha</b>	↓	Lenta puesta en marcha del proceso en plantas de gran escala dada la baja tasa de crecimiento (entre 2 y 6 meses) [59].	↑	Rápida puesta en marcha debido a las altas tasas de crecimiento.
<b>Remoción de nitrógeno</b>	↑	Remoción eficiente de nitrógeno (Entre 80-90% de remoción de amonio) [63].	↑	Remoción eficiente de nitrógeno (Sobre 90% de remoción)
<b>Emisión óxido nitroso</b>	↑	Menor producción de óxido nitroso debido a que este es producido principalmente en la nitrificación parcial (70% del total) [64].	↓	Mayor producción de óxido debido a que es producido intensamente en ambos procesos (nitrificación y desnitrificación).

Dada la información y contextualizando en el caso de estudio, se recomienda estudiar la prefactibilidad de la implementación de la tecnología *Anammox* en la PTAR para tratar las corrientes de rechazo provenientes de las operaciones de espesamiento y centrifugación de lodos. Así, al disminuir su contenido de nitrógeno se facilita entonces el tratamiento biológico posterior. Según lo investigado, se disminuiría la emisión de óxido nitroso y, además, permitiría disponer el afluente con mejor calidad que la actual (menor concentración de nitrógeno). En la Figura 21 se presenta un esquema simplificado del proceso incorporando la operación de tratamiento de las líneas de agua de rechazo provenientes del tratamiento de lodos.

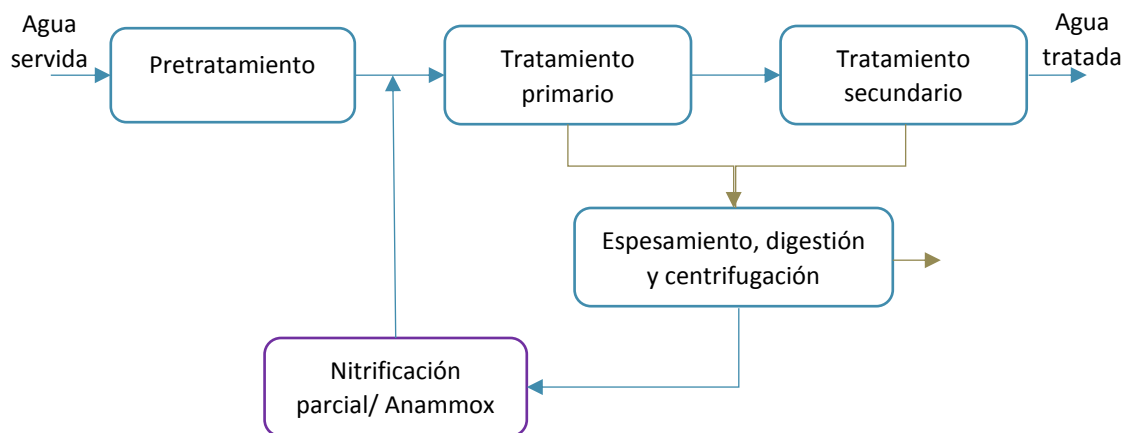


Figura 21: Esquema de recomendación incorporación tecnología *Anammox*. Flechas azules corresponden a agua y las cafés a lodo.

A modo de síntesis, la tecnología *Anammox* se presenta como una alternativa novedosa de remoción de nitrógeno que a diferencia de la tecnología convencional en base a nitrificación/desnitrificación requiere solo nitrito y amonio para formar nitrógeno gaseoso. Además, es eficiente energéticamente, su emisión de óxido nitroso es menor que la tecnología usada actualmente y posee una alta remoción de nitrógeno.

Las condiciones de operación necesarias son favorables para tratar corrientes de rechazo que posean una alta carga de nitrógeno y temperatura mayor a 20°C. Por lo que se recomienda estudiar la prefactibilidad de incorporar al proceso el tratamiento de las corrientes de agua provenientes del espesamiento y centrifugación de lodos.

## 8.4 Análisis de recomendaciones

A continuación, se presenta un análisis de las recomendaciones generadas con el fin de facilitar la toma de decisión y conocer cuáles son las limitaciones y alcances de la implementación.

En primer lugar, estas recomendaciones pueden ser implementadas en cualquiera de las plantas de tratamiento de aguas servidas de la empresa, dependiendo del proceso que estas tengan, el impacto generado será mayor o menor. En la Tabla 19 se realiza un análisis de distintos factores de decisión sobre las recomendaciones propuestas, los tiempos estimados son referenciales y pueden poseer un amplio rango de variación.

Tabla 19: Factores de decisión sobre la realización de las recomendaciones

Factor de decisión	Campaña de medición de óxido nitroso	Ajustar parámetros de operación	Tecnología de remoción de nitrógeno
Tiempo a invertir [año]	1	< 1	> 5
Impacto sobre la huella de carbono	Diagnóstico	Bajo	Alto
Interdependencia	Independiente	Independiente	Aconsejable realizar posterior a la campaña de medición.

Sobre la campaña de medición de óxido nítrico, es una recomendación de diagnóstico que, si bien es posible realizar en cualquiera de las plantas, es aconsejable realizar en la que posea la tecnología más utilizada, por ejemplo, lodos activados.

La optimización de las condiciones de operación, específicamente la aeración del tratamiento secundario es aconsejable de realizar en las plantas que posean sistemas con aeración forzada, debido a que además de disminuir las emisiones corresponde a una medida de eficiencia energética.

Por último, la tecnología *Anammox* se puede decidir implementar en plantas que posean altas cargas de nitrógeno en el efluente y/o, con el fin de disminuir la huella de carbono empresarial, en plantas que posean altos flujos de agua a tratar. Así, se tendrá una mayor reducción de impacto asociado la emisión de GEI.

Cabe notar, que para el caso específico de la planta Talagante, su calidad tanto del afluente como del efluente ha bajado en cuanto a la concentración NKT (ver Gráfico 9). Si este comportamiento se mantuviera, se sugiere ejecutar las recomendaciones en esta instalación.

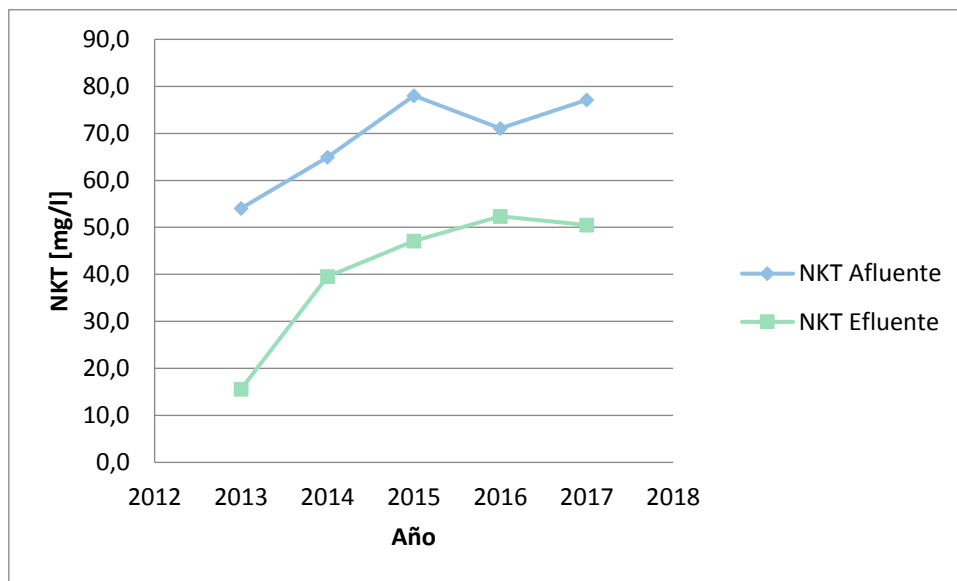


Gráfico 9: Concentración NKT del afluente y efluente para la planta Talagante en el período 2013-2017

Según lo presentado, hay múltiples factores que se deben considerar previo a la ejecución de las recomendaciones propuestas en las subsecciones anteriores. Todas ellas deben ser discutidas y analizadas para obtener como resultado la mayor disminución de emisiones de óxido nítrico a nivel empresarial.

## 9 Conclusiones

La emisión antropogénica excesiva de GEI es la principal causa del cambio climático, problemática medioambiental que afecta a nivel global y posee graves consecuencias sobre el ecosistema terrestre, para contener el cambio climático es necesario reducir de forma sustancial las emisiones continuas de GEI, proponiendo trayectorias de mitigación.

Bajo este contexto, fue realizado un Análisis de Ciclo de Vida enfocado en el Potencial de Calentamiento Global para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Talagante, que trata actualmente 0,6 m<sup>3</sup>/s. La evaluación se realizó sobre el escenario actual de tratamiento, un escenario con cogeneración de energía a partir del biogás producido y el escenario futuro para el año 2024 que considera la ampliación de la planta. El propósito fue evaluar el cambio en el uso del biogás producido en la planta y generar recomendaciones que permitieran disminuir el impacto asociado a la emisión de GEI.

Se modeló el sistema considerando solo la etapa de operación. Dentro de sus límites se encuentra la producción de energía eléctrica desde el Sistema Interconectado Central, la producción de químicos utilizados en el proceso y su transporte hasta la planta, las emisiones directas de la planta, el transporte de lodos y residuos sólidos desde la planta hasta el lugar de disposición y su posterior disposición y, por último, la disposición del efluente en el cauce receptor.

Los resultados arrojaron que el escenario base emite un total de 5.100 tCO<sub>2eq</sub>. Considerando un nuevo escenario con cogeneración Las emisiones totales de la planta disminuyen en un 17%. La incorporación del motor de cogeneración disminuiría el consumo de energía eléctrica desde el SIC en un 60%. Para el escenario ampliado, considerando una tasa de aumento del afluente del 2% anual, se obtiene un total de 5.000 tCO<sub>2eq</sub> para el año 2024.

Las emisiones directas de la planta contribuyen sobre el 60% del total en todos los escenarios analizados. Les siguen en participación las emisiones provenientes del consumo de energía eléctrica desde el SIC, luego la disposición de residuos. Las actividades que poseen el menor aporte corresponden al transporte y la producción de químicos.

El gas emitido en mayor medida es el óxido nitroso proveniente, principalmente, del tratamiento biológico de la planta. Este gas aporta sobre el 50% del PCG<sub>Total</sub> en todos los escenarios analizados y aumenta su relevancia relativa dada la incorporación del motor de cogeneración.

Luego de las emisiones de óxido nitroso, las emisiones de dióxido de carbono son las que le siguen en magnitud debido al consumo de energía eléctrica proveniente del SIC. Este valor disminuye al incorporar el motor de cogeneración para consumo de biogás. Además de poseer beneficios económicos, la puesta en marcha de un cogenerador es una medida que disminuye el impacto ambiental de la planta con respecto al Potencial de Calentamiento Global.

En función de los resultados, se identificó la necesidad de definir trayectorias de mitigación para las emisiones directas de óxido nitroso, gas que posee 298 veces el potencial del calentamiento global del dióxido de carbono. En primer lugar, se recomienda realizar campañas de medición de óxido nitroso en las plantas. Si bien es una labor compleja, es necesario verificar las emisiones de este gas dada la incertidumbre del factor de emisión utilizado. Así se podrá cuantificar su aporte real a la Huella de Carbono.



Se recomienda ajustar parámetros operativos para optimizar la concentración de oxígeno disuelto en el tratamiento secundario. Esta medida, además de permitir disminuir las emisiones de óxido nitroso, corresponde a una estrategia de eficiencia energética, dado el alto consumo eléctrico que significa la aeración en el tratamiento biológico.

Se analizaron tecnologías de remoción de nitrógeno que posean menor emisión de óxido nitroso que las convencionales. En función de esto se propone la implementación de la tecnología *Anammox* en conjunto con nitrificación parcial. Este proceso se presenta como una alternativa eficiente energéticamente, con alta remoción de nitrógeno y con menor emisión de óxido nitroso que las tecnologías en base a procesos de nitrificación y desnitrificación. Se aconseja que sea aplicado a las corrientes de agua de rechazo provenientes desde la línea de lodos, debido a que éstas poseen una alta carga de nitrógeno y condiciones operativas favorables para la tecnología *Anammox*.

Sobre las recomendaciones, se concluye que es importante analizar en qué PTAR es favorable su implementación. Dependiendo de esto se tendrá mayor o menor impacto sobre la Huella de Carbono empresarial.

Además, este tipo de evaluación se deben efectuar de manera responsable, como se mencionó previamente, otros estudios donde se calcula el Potencial de Calentamiento Global de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales omiten las emisiones directas de óxido nitroso en la difusión de sus resultados generales, recalando principalmente las emisiones indirectas dado el consumo eléctrico de la planta. Si bien la emisión de óxido nitroso es un campo que no se ha estudiado con profundidad, es más responsable verlo, analizarlo y crear posibles maneras de mitigar sus emisiones.

Como proyección, se sugiere calcular el Potencial de Calentamiento Global empresarial de forma periódica, con el objetivo de que se considere esta arista en la toma de decisiones. Además, se propone realizar un estudio para identificar posibles focos de mejora, y con esto implementar de forma efectiva trayectorias de mitigación sobre las actividades que presenten un mayor aporte.

## Bibliografía

- [1] Daw, J y Hallet, K. 2012. Energy efficiency strategies for municipal wastewater treatment facilities. National renewable energy laboratory.
- [2] IPCC. 2014. Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad.
- [3] Ministerio del Medio Ambiente. 2016. Segundo informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático.
- [4] Comisión Nacional de Energía . 2017. Anuario estadístico de energía 2016.
- [5] Aguas Andinas S.A. Aguas Andinas: Nuestra Organización. [en línea]. <<https://www.aguasandinas.cl/la-empresa/que-hacemos/nuestra-organizacion>> [Consulta: 21 diciembre 2016].
- [6] Superintendencia de Servicios Sanitarios. 2016. Informe de Gestión del Sector Sanitario.
- [7] Aguas Andinas S.A. 2017. Reporte de sustentabilidad.
- [8] Metcalf & Eddy. 1995. Ingeniería de aguas residuales. 3ra ed. Madrid. McGraw-Hill. 823 p.
- [9] Spellman, F. 2014. Handbook of ater and wastewater treatment plant operations. 3ra ed. Nueva York. CRC Press. 924 p.
- [10] Kampschreur, M et al. 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. Water research 43: 4093-4103.
- [11] Jern, W. 2006. Industrial Wastewater treatment. Imperial College Press. 164 p.
- [12] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 2007. Environmental management- Life cycle assessment. Requirements and guidelines: ISO 14040.
- [13] International Organization for Standardization. 1998. Environmental management- Life cycle assessment- Goal and scope definition and inventory analysis: ISO 14041.
- [14] International Organization for Standardization. 2000. Environmental management- Life cycle assessment- Life cycle impact assessment: ISO 14042.
- [15] International Organization for Standardization. 2000. Environmental management- Life cycle assessment- Life cycle interpretation: ISO 14043.
- [16] ESU-Services. Ecoinvent Database. [en línea]. <<http://esu-services.ch/data/ecoinvent/>> [Consulta: 21 diciembre 2016].
- [17] The facts about. Life cycle thinking in depth. [en línea]. <[http://m.thefactsabout.co.uk/life-cycle-thinking-\(lct\)-in-depth/content/200](http://m.thefactsabout.co.uk/life-cycle-thinking-(lct)-in-depth/content/200)>. [Consulta: 11 abril 2017].
- [18] Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. 2014. Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad.
- [19] Generadoras de Chile. 2017. Boletín del mercado eléctrico. Sector generación.
- [20] Ministerio de Energía. 2015. Energía 2050: Política energética de Chile.

- [21] Comité técnico de la plataforma escenarios energéticos 2030. 2013. Escenarios energéticos Chile 2030.
- [22] Scientific Applications International Corporation. 2006. A brief history of life cycle assessment.
- [23] Corominas, L et al. 2013. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art. *Water research* 47: 5480-5492.
- [24] Biskailab. 2012. Metodología para el análisis de ciclo de vida de depuradoras de aguas residuales.
- [25] Buonocore, E et al. 2016. Life cycle assessment indicators of urban wastewater and sewage sludge treatment. *Ecological indicators*.
- [26] Seiffert, N. 2014. Análisis de ciclo de vida de la industria de detergente de lavado textil con estudio de caso empresa ENVATEC. Memoria de Ingeniería Civil Industrial. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 122 p.
- [27] Muñoz, C y Quiroz, F. 2014. Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación de hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bio, Chile. *Hábitat sustentable Vol.4 2*: 16-25.
- [28] Moreno, S. 2016. Evaluation of the integration of solar and mining industries through a life cycle assessment. Memoria de Ingeniería Civil Química. Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 63 p.
- [29] Comisión Nacional de Energía. Factores de emisión SIC – SING. [en línea]. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>. [Consulta: 8 mayo 2017].
- [30] IPCC. 2013. *Climate change: The physical Science Basis*.
- [31] Environmental Protection Agency. 2010. *Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for Biogenic Emissions for Selected Source Categories: Solid Waste Disposal Wastewater treatment Ethanol Formation*.
- [32] World Resources Institute. 2001. *The Greenhouse Gas Protocol*.
- [33] Chandran, K. 2010. *Greenhouse Nitrogen Emissions from Wastewater Treatment Operations: Interim Report*. Water Environment Research Foundation.
- [34] Thomsen, M y Lyck, E. 2005. *Emission of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from Wastewater treatment Plants (6B)*. National Environmental Research Institute. 46 p.
- [35] R+I Alliance. 2010. *Carbon footprint and energy efficiency across wastewater and sludge treatment*.
- [36] Global Water Research Coalition. 2011. *N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from Wastewater collection and treatment systems: Technical report*.
- [37] Wernet, G, Bauer, C, Steubing, B, Reinhard, J, Moreno-Ruiz, E, y Weidema, B. 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life*

Cycle Assessment. [en línea] 21(9), pp.1218–1230. <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>> [Consulta: 21 Marzo 2017].

[38] Ministerio de Energía. Factor de emisión combustibles. [en línea]. <<http://huelladecarbono.minenergia.cl/>>. Consulta: 21 Marzo 2017].

[39] De Hass, D, Foley, J y Lant, P. 2009. Energy and greenhouse footprints of wastewater treatment plants in south- east queensland. En: AWA Oxwater conference. Melbourne, Australia. University of Queensland. 16 p.

[40] Ministerio de Energía. Factor de emisión transporte terrestre. [en línea]. <<http://huelladecarbono.minenergia.cl/transporte-camiones-a-combustibles>>. [Consulta: 3 Junio 2017]

[41] Ministerio de Energía. Factor de emisión transporte marítimo. [en línea]. <<http://huelladecarbono.minenergia.cl/transporte-maritimo>>. [Consulta: 3 Junio 2017]

[42] Joint Research Centre. 2012. Assessing GHG default emissions from biofuels in EU legislation.

[43] Chai, C et al. 2015. Carbon Footprint Analyses of Mainstream Wastewater treatment technologies under different sludge treatment scenarios in China. *Water* 7: 918-938.

[44] Varnero, M. 2011. Manual de Biogás. Ministerio de Energía.

[45] Aguas Andinas S.A. 2017. Cálculo de la huella de Carbono de Aguas Andinas año 2016. Gerencia de planificación.

[46] EDAM. 2014. Informe de huella de Carbono 2014: Planta de tratamiento de aguas servidas La Farfana.

[47] EDAM. 2014. Informe de huella de Carbono 2014: Planta de tratamiento de aguas servidas Mapocho Trebal.

[48] Foley, J. et al. 2010. Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants. *Water Research* 44: 831-844.

[49] Bureau of water supply and wastewater management. Wastewater treatment plant Operator Certification Training. Module: 20.

[50] Daelman, M. 2014. Emission of methane and nitrous oxide from full-scale municipal wastewater treatment plants. Memoria de doctorado en Bioingeniería. Universidad Tecnológica de Delft. 186 p.

[51] Habitch, K. Quotation of microsensors – quote 05013. En: <[sales@unisense.com](mailto:sales@unisense.com)> Miércoles 28 Junio 2017. [Consulta: 10 Julio 2017]

[52] Servomex. Servopro safe area 4100. [en línea]. <<http://www.servomex.com/gas-analyzers/product-ranges/servopro/servopro-4100>>. [Consulta: 31 Mayo 2017]

[53] Unisense environment. N<sub>2</sub>O Wastewater system. [en línea]. <[http://www.unisense-environment.com/N2O\\_Sensor](http://www.unisense-environment.com/N2O_Sensor)>. [Consulta: 31 Mayo 2017]

- [54] Villanueva, J. Analizadores de gas Servomex. En: <juanvillanueva@tecnagent.com> Miércoles 28 Junio 2017. [Consulta: : 10 Julio 2017]
- [55] Law, Y. et al. 2012. Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 367: 1265- 1277.
- [56] Kampschreur, M. et al. 2009. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water research* 43: 4093- 4103.
- [57] Dapena, A. 2007. Wastewater treatment by anammox process: A short circuit in the natural nitrogen cycle. Tesis Doctoral Ingeniería Química. Santiago de Compostela. Universidad de Santiago de Compostela. 254 p.
- [58] Castillo, H. 2008. Desarrollo del proceso Anammox para el tratamiento de lixiviados: puesta en marcha y aplicación. Tesis doctoral Ingeniería Química. Gerona de Cataluña. Universidad de Girona. 180 p.
- [59] Li, X. 2014. Nitrogen removal by combined nitrification- anammox process in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. Tesis de Master en ciencias, ingeniería medioambiental Iowa. Iowa State University 94 p.
- [60] Ali, M. 2015. Anammox- based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up and remaining issues. *Chemosphere* 141: 144-153.
- [61] Szatkowska, B. y Paulsrud, B. 2014. The Anammox process for nitrogen removal from wastewater – achievements and future challenges. *Vann* 02: 186- 194.
- [62] Larrea, L. 2012. Pasado, presente y futuro de tecnologías para la eliminación de nutrientes en EDAR. *Ingeniería civil* 168: 81- 92.
- [63] Lackner, S. 2014. Full-scale partial nitrification/anammox experiences- an application survey. *Water Research* 55: 292- 303.
- [64] Ali, M. 2016. Source identification of nitrous oxide emission pathways from a single- stage nitrification- anammox granular reactor. *Water research* 102: 147-157.
- [65] Blackburne, R. 2007. Determination of growth rate and yield of nitrifying bacteria by measuring carbon dioxide uptake rate. *Water Environment Research* 79(12): 37-45.

## Anexos

### Anexo A: Pronóstico escenario ampliado

El escenario ampliado fue calculado bajo dos supuestos, el primero supone crecimiento vegetativo del afluente y el segundo considera una tasa de aumento del afluente del 2% anual, valor suministrado por el área de redes de la empresa.

Los datos que son necesarios para calcular el escenario ampliado son: caudal afluente y efluente, producción de biogás, requerimiento energético de la planta, producción de residuos, flujos intermedios de la línea de lodos.

Con este fin, para el caso de crecimiento vegetativo, en primer lugar se debe considerar la tasa de crecimiento del afluente de la planta, calculada en función de los datos del período 2011-2016, obteniéndose una tasa de crecimiento igual a 0,6%.

Luego, para obtener la tasa de crecimiento de la producción de biogás, se calculó el coeficiente de determinación entre el caudal afluente y la producción de biogás resultando 0,95 (ver Gráfico 10). Así, se obtuvo la tasa de crecimiento anual de la producción de biogás, igual a 0,5% anual. Considerando el mismo valor del coeficiente de determinación, se calculó la tasa de crecimiento para la variación del escenario ampliado, igual a 1,9% anual.

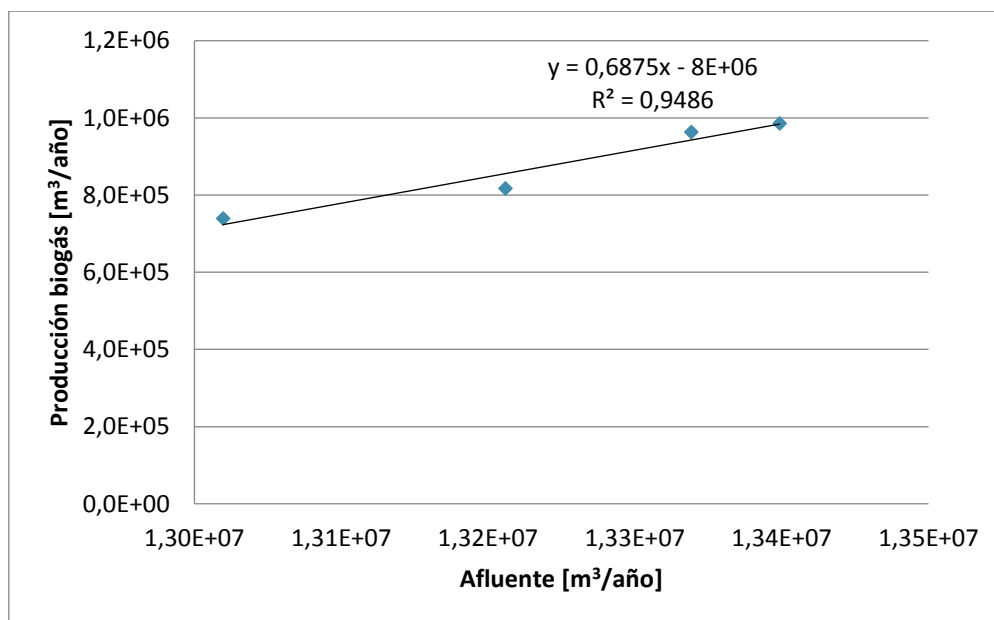


Gráfico 10: Producción de biogás en función del caudal afluente.

## Anexo B: Ejemplos de cálculo

En esta sección se presentará un ejemplo de cálculo de cada una de las actividades abordadas en el estudio, los cálculos fueron desarrollados en un conjunto de planillas *Excel* separadas por actividad y agrupadas por escenario.

El escenario que se abordará es el Escenario N°3 – Ampliación, debido a que engloba los otros escenarios calculados. Para cada una de las actividades se utilizaron los factores de emisión presentados en el capítulo Análisis de inventario ponderado por el flujo.

### Anexo B.1: Emisiones directas

Para las emisiones directas se tomaron las emisiones del tratamiento secundario y línea de lodos, también las asociadas a los equipos de combustión donde se utiliza el biogás producido.

Se presentará el cálculo de las emisiones del tratamiento secundario y un ejemplo de la línea de lodos junto con los resultados de todos los equipos, esto porque el cálculo se realiza de forma idéntica.

- **Tratamiento secundario:** se utiliza la Ecuación (2) presentada en el capítulo de Análisis de inventario. El desarrollo es el siguiente, reemplazando los ítems con los datos del sistema:

$$N_2O_{PTAR} = Q \cdot TKN \cdot EF_{N_2O} \cdot \frac{44}{28} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

$$N_2O_{PTAR} = 15.321.696 \frac{m^3}{año} \cdot 71,05 \frac{mg_{TKN}}{l} \cdot 0,005 \frac{kg_{N_2O}}{kg_{TKN}} \cdot \frac{44}{28} \cdot \frac{10^{-6}kg}{mg} \cdot \frac{10^3 l}{m^3}$$

$$N_2O_{PTAR} = 8.552,75 \frac{kg_{N_2O}}{año}$$

- **Línea de lodos:** se presentará el cálculo para el digester debido a que posee emisiones de metano y óxido nitroso. Se utiliza la Ecuación (4) para calcular la emisión de cada GEI.

$$Emisión\ GEI = Flujo\ actividad \cdot Factor\ de\ emisión \cdot Factor\ de\ conversión \quad (4)$$

Para el caso específico del digester, el factor de emisión se encuentra en base al DQO de los lodos, por lo tanto, la ecuación queda como sigue:

$$Emisión\ GEI = Flujo_{lodos} \cdot DQO_{lodos} \cdot Factor\ de\ emisión \cdot Factor\ de\ conversión$$

Reemplazando con los datos del sistema, para la emisión de óxido nitroso:

$$Emisión\ N_2O = 71.268,80 \frac{m^3}{año} \cdot 467,26 \frac{mg}{l} \cdot 1,51 \cdot 10^{-5} \frac{kg_{N_2O}}{kg_{DQO}} \cdot \frac{10^{-6}kg}{mg} \cdot \frac{10^3 l}{m^3}$$

$$\text{Emisión } N_2O = 1,08 \frac{kgN_2O}{\text{año}}$$

Reemplazando con los datos del sistema, para la emisión de metano:

$$\text{Emisión } CH_4 = 71.268,80 \frac{m^3}{\text{año}} \cdot 467,26 \frac{mg}{l} \cdot 0,2 \frac{kgCH_4}{kgDQO} \cdot \frac{10^{-6}kg}{mg} \cdot \frac{10^3l}{m^3}$$

$$\text{Emisión } CH_4 = 6.660,16 \frac{kgCH_4}{\text{año}}$$

De forma similar se calculan las emisiones de metano y óxido nitroso para cada uno de los equipos involucrados en la línea de lodos, en la Tabla 20 se muestran los resultados específicos.

Tabla 20: Emisiones directas de metano y óxido nitroso del Escenario N°3- Ampliación

Operación unitaria	kgCH <sub>4</sub> /año	kgN <sub>2</sub> O/año
Tratamiento secundario	-	8.552,75
Espesador	22,16	-
Cámara de mezcla	15.251,52	-
Almacenamiento de lodos	2.599,30	-
Digestor	6.660,16	1,08
Caldera	288,16	372,91
Motor de cogeneración	2.079,67	45,43
<b>Total [kgGEI/año]</b>	<b>26.900,96</b>	<b>8.972,17</b>

Finalmente, con el objetivo de calcular el potencial de calentamiento global, se utiliza la Ecuación (1) donde se pondera las emisiones de determinado gas con su factor de

$$CO_{2eq} = \sum_{i=1}^n GHG_i \cdot GWPI_i \quad (1)$$

$$CO_{2eq} = 26.900,96 \frac{kgCH_4}{\text{año}} \cdot 25 \frac{kgCO_{2eq}}{kgCH_4} + 8.972,17 \frac{kgN_2O}{\text{año}} \cdot 298 \frac{kgCO_{2eq}}{kgN_2O}$$

$$CO_{2eq} = 3.346.231,67 \frac{kgCO_{2eq}}{\text{año}}$$

## Anexo B.2: Consumo energía eléctrica

Para el consumo de la energía eléctrica se considera el consumo total de la planta menos el aporte realizado por el motor de cogeneración. El factor de emisión en este caso ya posee unidades de dióxido de carbono equivalente, por lo que el cálculo se desarrolla como sigue:

$$\text{Emisión } CO_{2eq} = \text{Flujo actividad} \cdot \text{Factor de emisión}_{SIC} \cdot \text{Factor de conversión}$$

$$\text{Emisión } CO_{2eq} = (\text{Consumo eléctrico} - \text{Energía motor}) \cdot \text{Factor de emisión}_{SIC}$$



$$Flujo actividad = \left( 4.290.074,9 \frac{kWh}{año} - 1.871.702,0 \frac{kWh}{año} \right) \cdot 0,33 \frac{kgCO_{2eq}}{kWh}$$

$$Emisión CO_{2eq} = 797.579,40 \frac{kgCO_{2eq}}{año}$$

### Anexo B.3: Disposición

Para la actividad de disposición se calculan las emisiones por la disposición de lodos deshidratados, residuos del pretratamiento y la disposición del efluente en el curso receptor.

Para la disposición de lodos y residuos sólidos, se utilizó la Ecuación (4), los cálculos son similares a los presentados anteriormente cambiando los factores de emisión. Para el caso de las emisiones de la disposición del afluente en el Río Mapocho, se utiliza la Ecuación (2) con la diferencia de que el TKN utilizado es el que presenta el efluente de la planta en vez del afluente. Los resultados de estos cálculos se encuentran en la Tabla 21.

Tabla 21: Emisiones de disposición de residuos Escenario N°3- Ampliación

Disposición de residuos	kgCO <sub>2</sub> /año	kgCH <sub>4</sub> /año	kgN <sub>2</sub> O/año
Biosólidos	47.232,95	7.010,68	207,94
Residuos sólidos	5.492,76	380,00	3,35
Vertido afluente en cauce	-	-	1.148,23
<b>Total</b>	<b>52.725,71</b>	<b>7.390,68</b>	<b>1.359,53</b>

Teniendo las emisiones por GEI, se utiliza la Ecuación (1) para calcular el Potencial de Calentamiento Global total de la actividad, como sigue:

$$CO_{2eq} = 52.725,7 \frac{kgCO_2}{año} \cdot 1 \frac{kgCO_{2eq}}{kgCO_2} + 7.390,6 \frac{kgCH_4}{año} \cdot 25 \frac{kgCO_{2eq}}{kgCH_4} + 1.359,5 \frac{kgN_2O}{año} \cdot 298 \frac{kgCO_{2eq}}{kgN_2O}$$

$$CO_{2eq} = 642.632,04 \frac{kgCO_{2eq}}{año}$$

## Anexo B.4: Transporte

En esta actividad se calcularon las emisiones del transporte de químicos desde su centro de producción hasta la planta y los residuos desde la planta hasta su lugar de disposición. Si bien el factor de emisión utilizado considera la masa trasladada en vez de la distancia de traslado, en la Tabla 22 se puede ver el lugar de origen y destino de los residuos y químicos.

Todos los cálculos se realizaron de manera semejante a diferencia del traslado en barco de la poliacrilamida, debido a que su lugar de producción es Corea del sur.

A continuación, se presenta el ejemplo de cálculo de los biosólidos.

$$\text{Emisión } CO_{2eq} = \text{Flujo actividad} \cdot \text{Factor de emisión} \cdot \text{Factor de conversión}$$

$$\text{Emisión } CO_{2eq} = 7.426,56 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \cdot 3,858 \frac{\text{kgCO}_{2eq}}{\text{ton}}$$

$$\text{Emisión } CO_{2eq} = 28.651,69 \frac{\text{kgCO}_{2eq}}{\text{año}}$$

Tabla 22: Resultados emisiones de transporte de residuos y químicos del Escenario N°3- Ampliación

Residuos y químicos	Empresa	Desde	Hasta	Distancia [km]	kgCO <sub>2eq</sub>
Biosólidos	Aguas Andinas	Talagante	KDM Santa Marta	82	28.651,69
Residuos sólidos	Aguas Andinas	Talagante	KDM Santa Marta	82	3.331,93
Gas cloro	OxyChile	Talcahuano	Talagante	495	386,27
Cloruro férrico	OxyChile	Talcahuano	Talagante	495	285,72
Poliacrilamida - importado	Aguas alquimia	Corea del sur	Valparaíso	18.385	47,14
Poliacrilamida - importado	Aguas alquimia	Valparaíso	Talagante	145	59,30
<b>Total</b>					<b>32.762,04</b>

## Anexo B.5: Producción de químicos

Sobre la actividad de producción de químicos, se calcularon las emisiones de la producción de cloruro férrico, gas cloro y poliacrilamida. El factor de emisión utilizado ya se encuentra en unidades de dióxido de carbono equivalente por lo que solo se utilizó la ecuación (4) para obtener los resultados, en la Tabla 23 se muestran los resultados obtenidos para el Escenario N°3- Ampliación.

Tabla 23: Resultados emisiones producción de químicos del Escenario N°3- Ampliación

Químico	kgCO <sub>2eq</sub>
Cloruro férrico	25.652,05
Gas cloro	131.852,55
Poliacrilamida	23.055,00
<b>Total</b>	<b>180.559,60</b>

## Anexo C: Resultados específicos de la huella de carbono

En este anexo se presentan los resultados específicos de cada escenario evaluado, en función de estos resultados fueron confeccionados los gráficos del capítulo de Evaluación de impacto.

Tabla 24: Resultados Escenario N°1 - Base

Actividad	CO <sub>2</sub> [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	N <sub>2</sub> O [kg]	Total [kgCO <sub>2eq</sub> ]
Consumo energético	-	-	-	1.486.131,39
Emisiones directas	13.033,76	543.376,09	2,37E+06	2.930.880,97
Disposición residuos	4,54E+04	1,59E+05	3,45E+05	549.459,96
Producción de químicos	-	-	-	158.943,11
Transporte	-	-	-	28.294,43
<b>Total</b>				<b>5.153.709,86</b>

Tabla 25: Resultados Escenario N°2 - Cogeneración

Actividad	CO <sub>2</sub> [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	N <sub>2</sub> O [kg]	Total [kgCO <sub>2eq</sub> ]
Consumo energético	-	-	-	743.065,69
Emisiones directas	-	590.099,76	2,20E+06	2.795.042,57
Disposición residuos	4,54E+04	1,59E+05	3,45E+05	549.459,96
Producción de químicos	-	-	-	158.943,11
Transporte	-	-	-	28.294,43
<b>Total</b>				<b>4.274.805,77</b>

Tabla 26: Resultados Escenario N°3 - Ampliación

Actividad	CO <sub>2</sub> [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	N <sub>2</sub> O [kg]	Total [kgCO <sub>2eq</sub> ]
Consumo energético	-	-	-	797.579,40
Emisiones directas	-	672.524,07	2,67E+06	3.346.231,67
Disposición residuos	5,27E+04	1,85E+05	4,05E+05	642.632,04
Producción de químicos	-	-	-	180.559,60
Transporte	-	-	-	32.762,04
<b>Total</b>				<b>4.999.764,75</b>

Tabla 27: Resultados Escenario N°3 – Ampliación. Crecimiento vegetativo

Actividad	CO <sub>2</sub> [kg]	CH <sub>4</sub> [kg]	N <sub>2</sub> O [kg]	Total [kgCO <sub>2eq</sub> ]
Consumo energético	-	-	-	667.112,37
Emisiones directas	-	607.931,26	2,38E+06	2.992.805,63
Disposición residuos	4,75E+04	1,66E+05	3,66E+05	579.634,20
Producción de químicos	-	-	-	166.758,41
Transporte	-	-	-	29.575,49
<b>Total</b>				<b>4.435.886,10</b>

## Anexo D: Cotización equipos de medición de óxido nítrico

Anguas Andinas  
Santiago de Chile,

Att: Dr. Javiera Pilar Riffo Rivas

Chile

### QUOTATION

Number: QUO-05013-W4Z5Z0  
Accountnumber: 10009  
Your ref:  
Our ref: KHA  
Date: 28. juni 2017

ItemNo	Product	Quantity	Price	Discount %	Sub Total
E-WW CONTROLLER	Wastewater Controller	1,00	5.800,00 €		5.800,00 €
E-N2O WW SENSOR	N2O Wastewater Sensor Complete	1,00	3.200,00 €		3.200,00 €
	N2O Wastewater Sensor Complete Consists of a sensor body with a 5 meter cable and a replaceable sensor head.				
E-N2O WW CAL KIT	N2O Wastewater Calibration kit  (2 Vials, 2 needles, 1 syringe)	1,00	90,00 €		90,00 €
E-N2O-WW CABLE	Cable for N2O-WW  5+5= 10m total sensor cable	5,00	11,00 €		55,00 €
E-CIP	Carriage and Insurance Paid	1,00	712,00 €		712,00 €
E-HANDLING	Packing and Handling	1,00	75,00 €		75,00 €
Total amount excluding VAT					9.932,00 €

By ordering you accept General Terms of Sale and Delivery of Unisense Environment A/S - please refer to [www.unisense-environment.com](http://www.unisense-environment.com)  
All prices are excluding VAT, import duties and taxes.

Payment: Net 30 days  
Expected delivery time: 2 weeks from order acknowledgement  
Quote valid: 2 months

Figura 22: Cotización de N<sub>2</sub>O - WW Unisense, no incluye IVA [51]

Item	Cant	Descripción	Precio Unit.	TOTAL USD
01	1	<b>ANALIZADOR SERVOMEX N2O MOD.4100</b> Voltage EUR 85-132V 50/60Hz Background Gas <b>Module 1 0-50/500vpm N2O</b> Sample System Module 1 Pressure Driven Chassis Type Short Chassis Left Flowmeter 2500ml/min Fitted to Module 1 Right Flowmeter Not Fitted Internal Sample Filter Not Fitted Autocalibration Not Fitted Mounting 19" Rack Mount Ears Only User Manual Spanish  <b>SERVOMEX</b>	\$ 23.200,00	\$ 23.200,00
		<b>TOTAL Bodega SIGSIG S.A.</b>	<b>USD + IVA</b>	<b>\$ 23.200,00</b>

Figura 23: Cotización de Analizador Servomex N<sub>2</sub>O, no incluye IVA [54]

## Anexo E: Información adicional sobre tecnología Anammox

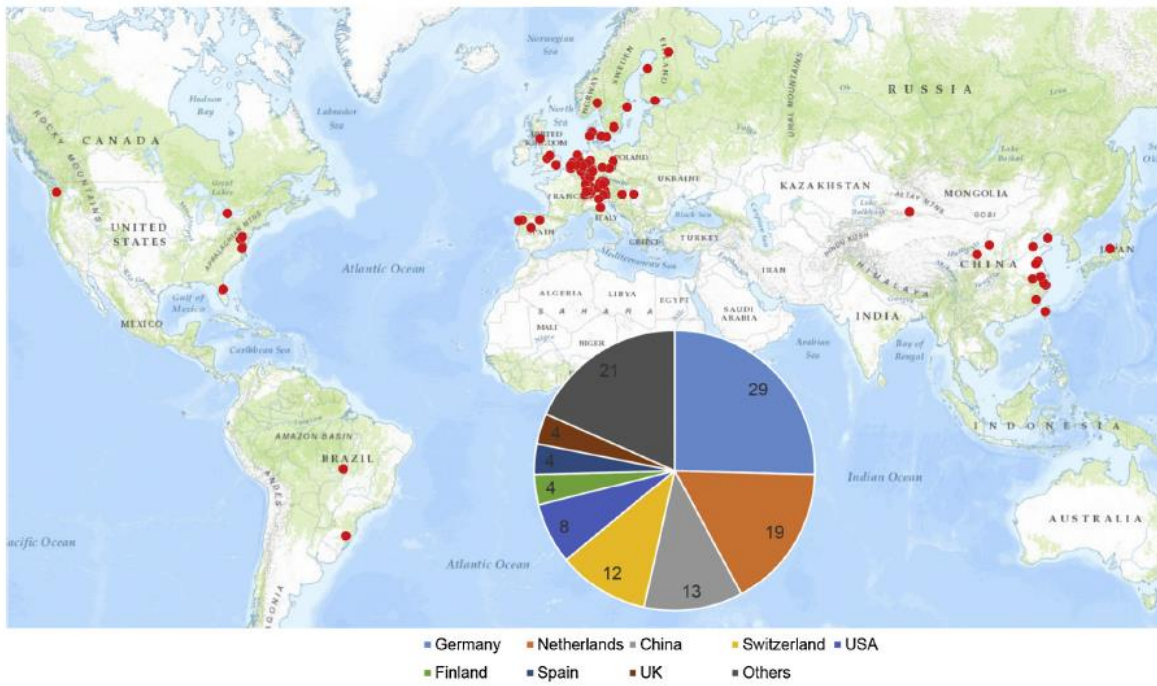


Fig. 3. Geographical distribution of full-scale anammox plants around the world.

Figura 24: Distribución geográfica de plantas industriales que utilizan la tecnología anammox alrededor del planeta al año 2015 [60]