



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

PROYECCIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE NUEVAS PLANTAS DE
TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA REGIÓN METROPOLITANA:
FORMULACIÓN DE UN MODELO A PARTIR DE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO

MATÍAS FELIPE NEIRA OROSCO

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO OLIVERA NAPPA
CRISTIÁN SALGADO HERRERA

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO
POR: MATÍAS FELIPE NEIRA OROSCO
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: FELIPE DÍAZ ALVARADO

PROYECCIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DE NUEVAS PLANTAS DE
TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA REGIÓN METROPOLITANA:
FORMULACIÓN DE UN MODELO A PARTIR DE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.

Chile, como otros países, se verá afectado por la escasez de agua a nivel mundial, siendo el Cambio Climático su principal causante. Frente a esta problemática han nacido alternativas para enfrentar y mitigar el impacto del Cambio Climático en la disponibilidad y uso del recurso hídrico. Una estrategia consiste en la optimización desde un enfoque económico y ambiental de los sistemas de tratamiento de agua o redes urbanas, lo que se traduce en la evaluación de nuevas tecnologías, modificaciones en la red de distribución, construcción y/o desmantelamiento de plantas, entre otras actividades.

La construcción de un problema de optimización con una componente ambiental requiere una evaluación previa de las emisiones asociadas al proceso de tratamiento de agua, por lo tanto, se convierte en una necesidad realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) de las distintas configuraciones y tecnologías incluidas en los procesos de tratamiento, estudiando las emisiones asociadas a los flujos de entrada y salida que componen cada proceso.

El presente trabajo de título busca construir un modelo que cuantifique las emisiones provenientes de nuevas plantas de tratamiento de agua en la Región Metropolitana y cuya implementación será parte de un problema de optimización multiobjetivo. Además, con el fin de entregar un acercamiento a los resultados esperados de las estimaciones de la red, se realiza una evaluación ambiental de dos escenarios propuestos, un caso base con dos plantas de tratamiento calidad descarga y un escenario óptimo que se constituye por cuatro plantas de calidad irrigación y cuatro plantas calidad consumo.

Los resultados corresponden a catorce funciones de estimación de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, una para cada configuración. Las mayores estimaciones corresponden a las configuraciones “Consumo 2” con un valor de 1,028 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ y “Consumo 4” con un valor 0,990 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$, ambos normalizados por metro cúbico de agua producido. Por otra parte, la evaluación ambiental de los escenarios base y óptimo arroja emisiones anuales de 150.000 y 280.000 $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ respectivamente. Las principales categorías que contribuyen a las emisiones son el consumo energético con un aporte de anual de 99.000 $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ para el escenario base y 175.000 $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ para el escenario óptimo. En segundo plano, se encuentran las emisiones directas con un aporte de alrededor de 47.000 $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ por año y 58.000 $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ por año para los escenarios base y óptimo respectivamente.

Destacar que los resultados de este trabajo corresponden a una aproximación de las emisiones generadas por nuevas plantas de tratamiento de agua. Se establece como proyección la implementación de estas funciones matemáticas en un solver de optimización. Por otro lado, estas estimaciones pueden acercarse aún más a la realidad nacional mediante el uso total de información referente al contexto chileno, por lo que se recomienda la construcción e implementación de un inventario exclusivo para realizar ACV en la industria chilena.

A mi hermana, por quién vivo.

Agradecimientos

Es el final de una etapa y el inicio de otra. ¿Suena obvio no? Pero si lo piensas bien, no es tan obvio. ¿Quién te asegura que al cerrar una puerta esta volverá a abrirse? ¿Y si nunca más alguien entra o sale por ella? ¿Y si no hay más puertas que cruzar? ¿Puede ocurrir eso con una etapa? ¿Acabar para siempre con un ciclo? Son cosas en las que pienso en estos momentos, sin ánimo de desmotivarte. Solo quiero dejar un registro. En fin, luego de esta introducción vamos a dar gracias, que es algo que de verdad deseo de corazón.

A mi mamá y mi papá, porque me han amado más de lo que yo alguna vez pude, puedo y podré imaginar. Ellos son la prueba irrefutable de que si hay algo por lo que vivir y morir en este mundo, es por amor, es por ellos.

A mi hermana, por todo el cariño y apoyo que me brinda, por motivarme cada día a intentar ser una mejor persona. Se que ella es el futuro, y en el fondo me llena de paz saber que el futuro está en buenas manos.

A mis abuelos, mis tatas, la experiencia y transcurso del tiempo, las raíces de mi familia y símbolos de amor y respeto.

Al Robert, por esas tardes de boxeo, y por permitirme conocer a dos personitas cargadas de amor y sueños, Mahina y Thiare.

A los Feeders, porque sin ellos la vida no tendría esos tintes de bizarra (en el sentido anglosajón de la palabra) que la hacen tan atractiva de vivir.

A mis amigos, con lo que he compartido, he discutido una formación o con los que simplemente me he reido a más no poder.

Al Team, porque esos primeros años de la U fueron más amenos y simples gracias a ustedes.

A la gente del departamento en general, trabajadores, compañeros, docentes.

A Esteban Efraín Paredes Quintanilla, por todos esos goles marcados con la camiseta de Colo Colo.

A los que ya no están, tu sabes quienes son, cuánto los conociste y lo importante que fueron para que seas la persona que eres hoy.

A Dios.

Tabla de Contenido

Índice de Tablas	ix
Índice de Ilustraciones	xi
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Ciclo urbano del agua	1
1.1.2. Optimización red de agua en la RM	3
1.1.3. Tecnologías aplicadas al proyecto	3
1.1.4. Escenarios propuestos	4
1.2. Estado del arte	6
1.2.1. ACV en la industria de tratamiento de aguas	6
1.2.2. ACV en la optimización de procesos industriales	10
1.3. Objetivos	11
1.3.1. Objetivo General	11
1.3.2. Objetivos Específicos	11
1.3.3. Alcances	11
2. Marco metodológico	12
2.1. Metodología preeliminar	12
2.1.1. Revisión bibliográfica	12
2.1.2. Realización del ACV	12
2.1.3. Construcción de la función objetivo	13
2.1.4. Evaluación de escenarios	13
3. Conceptos	14
3.1. Análisis de Ciclo de Vida	14
3.1.1. Objetivo y alcances	15
3.1.2. Análisis de Inventario	16
3.1.3. Evaluación de Impactos	16
3.1.4. Interpretación de impactos	18
3.2. Tecnologías de tratamiento de agua	19
3.2.1. Tratamiento Preliminar	20
3.2.2. Tratamiento primario	20
3.2.3. Tratamiento secundario	20
3.2.4. Tratamiento terciario	22
3.2.5. Tratamiento avanzado	22

3.2.6. Desinfección	23
4. Objetivos y alcances del ACV	25
4.1. Objetivos del ACV	25
4.2. Unidad funcional	25
4.3. Indicador y categoría de impacto	26
4.4. Alcances y supuestos	26
4.5. Línea de agua y configuraciones	28
4.5.1. Calidad descarga	28
4.5.2. Calidad irrigación	28
4.5.3. Calidad fuente	28
4.5.4. Calidad consumo	29
4.6. Línea de lodos	29
5. Análisis de inventario	30
5.1. Línea de agua	30
5.1.1. Emisiones de CO ₂	30
5.1.2. Emisiones de N ₂ O	33
5.2. Línea de lodos	34
5.2.1. Emisiones de CO ₂	34
5.2.2. Emisiones de CH ₄	34
5.2.3. Emisiones de N ₂ O	35
6. Evaluación Ambiental	36
6.1. Estimación ambiental	36
6.1.1. Análisis de estimadores de PCG	37
6.1.2. Comparación con casos bibliográficos	40
6.2. Elección de configuraciones para los escenarios	42
6.2.1. Distribucion de emisiones por configuración	42
6.2.2. Emisiones por equipos	45
6.3. Evaluación de escenarios	48
6.3.1. Distribución de emisiones por escenarios	48
6.3.2. Emisiones por equipo	50
7. Conclusiones	52
Bibliografía	54
A. Acrónimos	58
B. Resumen marco regulatorio chileno	59
C. Emisiones de N₂O línea de agua	60
D. Estimación producción lodos	61
E. Construcción de las funciones	64

Índice de Tablas

1.1.	Configuración y tecnologías empleadas para alcanzar distintos niveles de calidad de agua.	4
1.2.	Características de los escenarios base y óptimo.	5
1.3.	Magnitud de los flujos tratados por las plantas para los escenarios base y óptimo.	5
3.1.	Ejemplificación de los distintos componentes de la etapa de evaluación ambiental.	18
3.2.	Tecnologías utilizadas en los procesos de tratamiento de agua.	20
3.3.	Tabla comparativa entre distintos procesos de separación por membrana.	22
5.1.	Dosificación óptima de productos químicos utilizados en el tratamiento de agua. Elaboración propia.	31
5.2.	Especificaciones distancia de transporte de insumos químicos. Elaboración propia.	32
5.3.	Consumo energético para cada tecnología. Elaboración propia	33
5.4.	Factores de emisión promedio para el SIC y SING. Elaboración propia.	33
5.5.	Factores de producción de lodo para las entradas a los procesos de espesamiento y digestión. Elaboración propia.	34
5.6.	Consumo energético por m ³ de lodo tratado. Elaboración propia.	34
5.7.	Concentraciones estimadas de sólido para distintos tipos de lodos. Elaboración propia.	35
5.8.	Factores de emisión de CH ₄ para cada etapa. Elaboración propia.	35
5.9.	Factor de emisión de N ₂ O. Elaboración propia.	35
6.1.	Funciones de emisión de CO _{2eq} obtenidas para cada configuración	36
6.2.	Resumen de los estudios utilizados como referencia comparativa.	40
6.3.	Comparación de las emisiones por categoría para las configuraciones “Irrigación 3” e “Irrigación 4” evaluadas en el escenario óptimo.	44
6.4.	Comparación de las emisiones por categoría para las configuraciones “Consumo 3” y “Consumo 4” evaluadas en el escenario óptimo.	45
6.5.	Comparación de las emisiones por categoría para los escenarios base y óptimo.	49
6.6.	Comparación de las emisiones más importantes para los escenarios base y óptimo.	51
B.1.	Resumen del marco regulatorio chileno.	59
D.1.	Información asociada a Planta Tratamiento La Farfana.	61
D.2.	Concentraciones estimadas de sólido para distintos tipos de lodos. Elaboración propia.	61

D.3. Factores de producción de lodo para las entradas a los procesos de espesamiento y digestión. Elaboración propia.	63
E.1. Información utilizada para realizar la regresión lineal de “Fuente 1”.	69

Índice de Ilustraciones

1.1. Ciclo urbano del agua esquematizado.	2
3.1. Marco metodológico de un ACV.	15
3.2. Metodología y elementos que componen la etapa de evaluación ambiental en un ACV.	17
3.3. Categorías de impacto intermedio (midpoints) y categorías de impacto final o áreas de protección (endpoints).	18
3.4. Esquema simplificado proceso de lodos activados.	21
3.5. Esquema filtro percolador.	22
3.6. Esquema intercambio iónico.	23
4.1. Límites del sistema global. Elaboración propia.	27
4.2. Configuración calidad descarga. Elaboración propia.	28
4.3. Configuración calidad irrigación. Elaboración propia.	28
4.4. Configuración calidad fuente. Elaboración propia.	29
4.5. Configuración calidad consumo. Elaboración propia.	29
4.6. Configuración tratamiento lodos. Elaboración propia.	29
6.1. Comparación entre estimaciones ambientales ordenados por calidad.	37
6.2. Comparación entre estimaciones de PCG para plantas pequeñas de producción de agua potable.	41
6.3. Comparación entre estimaciones de PCG para plantas grandes de producción de agua potable.	42
6.4. Gráfico de distribución de emisiones configuración “Irrigación 3” para el escenario óptimo.	43
6.5. Gráfico de distribución de emisiones configuración “Irrigación 4” para el escenario óptimo.	43
6.6. Gráfico de distribución de emisiones configuración “Consumo 3” para el escenario óptimo.	44
6.7. Gráfico de distribución de emisiones configuración “Consumo 4” para el escenario óptimo.	45
6.8. Distribución de emisiones por equipos para casos irrigación.	47
6.9. Distribución de emisiones por equipos para casos de consumo.	47
6.10. Gráfico de distribución de emisiones escenario base.	48
6.11. Gráfico de distribución de emisiones escenario óptimo.	49
6.12. Distribución de emisiones por equipos para ambos escenarios.	50

E.1. Flujos correspondiente a la configuración fuente.	65
E.2. Parámetros globales del modelo.	65
E.3. Interfaz de un proceso productivo.	66
E.4. Creación de un sistema productivo.	66
E.5. Sistema productivo.	67
E.6. Interfaz de Información General.	68
E.7. Propiedades de cálculo.	68
E.8. Anaálisis de inventario.	69
E.9. Resultados regresión lineal “Fuente 1”.	70

Capítulo 1

Introducción

El Cambio Climático es uno de los principales causantes de la escasez hídrica que afecta al planeta, alterando diferentes fuentes de agua dulce, lo que se traduce en un deterioro de la calidad del recurso [1].

La situación actual en Chile no es ajena al contexto mundial. La fuerte sequía que afecta al país desde el año 2010 ha tenido impacto en las precipitaciones esperadas para la Región Metropolitana (RM), con un déficit de hasta un 96% durante el año 2018 [2]. Bajo este contexto, es lógico pensar en un posible escenario de escasez hídrica para toda la RM.

Frente a los escenarios de escasez hídrica, la optimización de procesos concentra sus esfuerzos en mantener un uso sustentable del agua. Así, la industria de tratamiento de agua en la RM está fuertemente ligada a la optimización en el uso y reutilización del recurso.

En la actualidad, el diseño de un sistema de tratamiento de agua óptimo es el objetivo general del Proyecto Fondecyt "*Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation*", trabajo que consiste en una optimización multiobjetivo económica y ambiental [3].

El presente trabajo de título busca construir una función objetivo ambiental que cuantifique las emisiones provenientes de nuevas plantas de tratamiento de agua (PTA) en la RM y cuya implementación será parte del proyecto Fondecyt. Para lograr este cometido se requiere aplicar un análisis de ciclo de vida (ACV) a las distintas tecnologías que componen los procesos de tratamiento.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Ciclo urbano del agua

Si bien los seres humanos administramos el agua en nuestras ciudades, existe un ciclo hidrológico global, un sistema natural que mueve el agua en el planeta. Este ciclo consiste

en una transformación continua del recurso hídrico entre los distintos estados de la materia a través de procesos como la evaporación, condensación, transpiración y precipitación. Si bien este ciclo abastece las fuentes de agua para el ser humano, se ha enfrentado al continuo crecimiento de la población, condicionando la sostenibilidad del recurso.

El ciclo urbano del agua es un proceso que inicia con la captación del recurso desde distintas fuentes de agua dulce (sumideros, deshielos, precipitaciones, lagos), sigue el tratamiento de agua con distintos propósitos (consumo humano, uso industrial, riego), la distribución, recolección y tratamiento de aguas residuales para su posterior reciclaje y/o retorno del recurso a las fuentes naturales. En la Figura 1.1 extraída de literatura [3] se presenta un esquematización del ciclo urbano del agua.

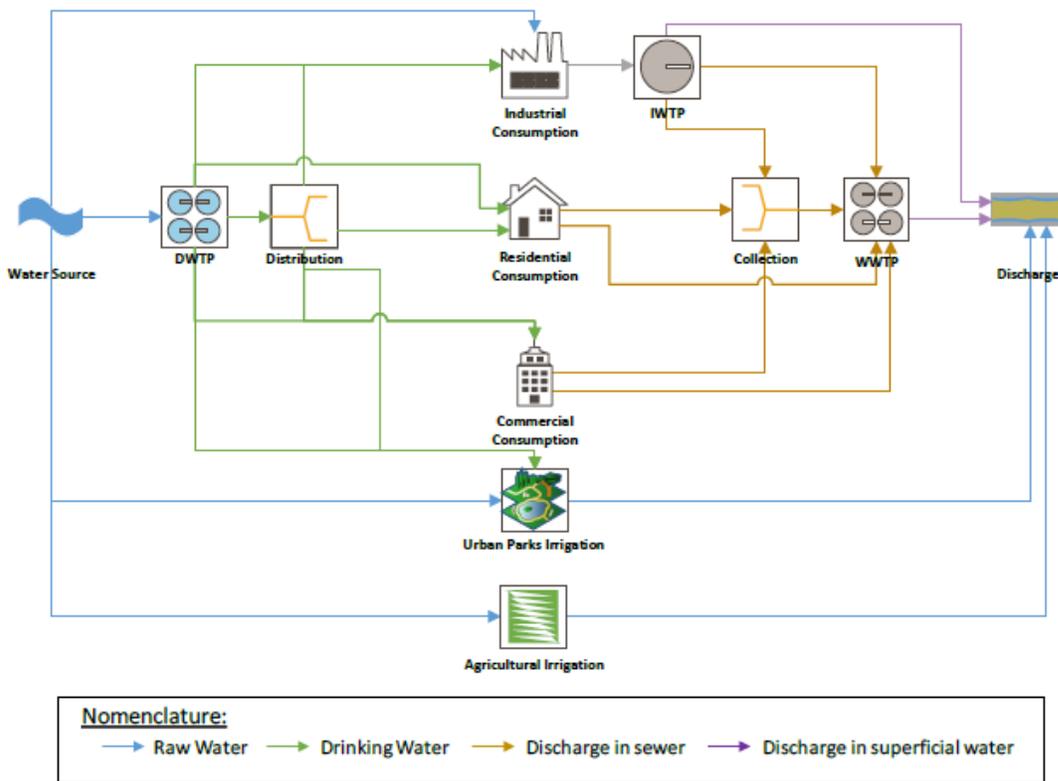


Figura 1.1: Ciclo urbano del agua esquematizado.

Notar que el ciclo urbano es un proceso continuo que requiere importantes esfuerzos para mantenerse funcional. Una gran cantidad de recursos materiales y energéticos son empleados, lo que deriva en costos económicos e impactos ambientales. Por lo tanto, no solo basta con asegurar el funcionamiento de la red, también es necesario disponer de una configuración óptima de la misma.

1.1.2. Optimización red de agua en la RM

El presente trabajo de título forma parte del proyecto Fondecyt “*Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation*” (en adelante referido como “el proyecto”), del Departamento de Ingeniería Química, Biotecnología y Materiales (DIQBM) de la Universidad de Chile [3].

En líneas generales, el desarrollo de este proyecto tiene como objetivo formular y resolver un problema de optimización no lineal multi-objetivo con un enfoque económico y ambiental. Una vez resuelto, se busca proponer modificaciones futuras a la red de agua de la RM [3]. Por otra parte, el trabajo de título se enmarca en uno de los objetivos específicos: decidir el indicador ambiental a emplear dentro de la función objetivo del problema. Este indicador tendrá un enfoque en el ciclo de vida de la red, es decir, cuantificará los impactos ambientales asociados a la parte operativa presente en el sistema de tratamiento de agua.

La red de agua de la RM puede modelarse como una estructura conformada por participantes (nodos) conectados entre sí. Los participantes de esta red se resumen en 6 conjuntos; fuentes de agua bruta, nodos de consumo, plantas de tratamiento, nodos de distribución, nodos de recolección, sumidero de descarga.

Los nodos de consumo representan los distintos usos que puede tener el agua: doméstico, comercial, industrial, agricultura y riego. Por otra parte, las plantas de tratamiento albergan tres tipos de plantas: plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), plantas de tratamiento de agua industrial (PTAI) y plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), cada una desarrolla distintos procesos de tratamiento.

1.1.3. Tecnologías aplicadas al proyecto

Dentro del ciclo urbano de agua en la RM, etapas como la producción de agua para consumo y/o uso por el ser humano junto con el tratamiento de aguas residuales definen tres tipos de plantas de acuerdo a la calidad de agua requerida. PTAR, PTAP y PTAI tal como se plantean en la subsección anterior. Cada una de estas plantas posee distintas tecnologías acopladas una tras la otra, generando un sistema de tratamiento por barreras o etapas.

Con el fin de asegurar el reciclaje completo del agua dentro de la red, es necesario que las nuevas plantas de tratamiento de agua puedan alcanzar (en su conjunto) cuatro calidades de salida establecidas por la normativa chilena: descarga, irrigación, fuente y consumo [3]. Ver Anexo B para tener un resumen del marco regulatorio en Chile.

A partir de las concentraciones definidas por cada calidad de salida, en adición a la madurez tecnológica de los distintos procesos de tratamiento estudiados en el proyecto, se definen catorce configuraciones de tratamiento de agua. En la Tabla 1.1, adaptada de [3], se puede apreciar un resumen de las tecnologías aplicables a nuevas plantas en la RM según la calidad de salida requerida.

Cabe destacar que cada planta de tratamiento puede alcanzar una única calidad mediante

distintas configuraciones que se diferencian en el tipo de tecnología y en la magnitud del flujo de agua tratado. A partir de este último punto, existe una distinción entre plantas dependiendo del afluente que ingresa al sistema, teniéndose plantas cuya configuración les permite tratar flujos “pequeños” de agua, desde 0 a 50.000 m³/d y plantas cuyo arreglo de tecnologías permiten un tratamiento de flujos “grandes” de agua, de 50.000 a 1.000.000 m³/d [3].

La elección de los rangos que definen la magnitud de las plantas no es una decisión arbitraria, dado que existe un criterio establecido por el proyecto [3]. Para el caso de las plantas encargadas de tratar altos flujos, la cota superior corresponde a un flujo de 1.000.000 m³/d que se determina asumiendo la existencia de una planta capaz de tratar la demanda total de agua de la RM, mientras que la cota inferior de 50.000 m³/d busca respetar el orden de magnitud de aquellas plantas que tratan los mayores flujos de agua en la RM. Por otro lado, la escala establecida para las plantas pequeñas corresponde a una forma de complementar y abarcar el rango de tratamiento restante (plantas menores a 50.000 m³/d).

Calidad esperada	N	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario	Desinfección	Tratamiento avanzado
Descarga	1	Lodos activados	-	Cloración	-
	2	Filtro percolador	-	Cloración	-
Irrigación	1	Lodos activados	Filtración	Cloración	-
	2	Lodos activados	Micro-filtración	Cloración	-
	3	Filtro percolador	Filtración	Ozonización	-
	4	Filtro percolador	Micro-filtración	Ozonización	-
Fuente	1	Lodos activados	Osmosis inversa	Cloración	-
	2	Lodos activados	Nanofiltración	Cloración	-
	3	Filtro percolador	Osmosis inversa	Ozonización	-
	4	Filtro percolador	Nanofiltración	Ozonización	-
Consumo	1	Lodos activados	Osmosis inversa	Cloración	Intercambio iónico
	2	Lodos activados	Nanofiltración	Cloración	Filtración GAC
	3	Filtro percolador	Osmosis inversa	Ozonización	Intercambio iónico
	4	Filtro percolador	Nanofiltración	Ozonización	Filtración GAC

Tabla 1.1: Configuración y tecnologías empleadas para alcanzar distintos niveles de calidad de agua.

1.1.4. Escenarios propuestos

Actualmente, el proyecto trabaja con una simplificación de la RM, agrupando y dividiendo la zona geográfica en cuatro cuadrantes. Bajo esta premisa se proponen dos escenarios cuyo estudio es relevante para el presente trabajo de título.

El primero de los escenarios se conoce como “escenario base” y está constituido por dos PTA para calidad descarga. El segundo escenario, corresponde a un resultado de la optimización inicial de la red de agua y se conoce como “escenario óptimo”, este propone nuevas plantas de tratamiento, cuatro para calidad irrigación y cuatro para calidad fuente.

Es preciso señalar que el escenario óptimo corresponde al resultado de una optimización que minimiza el flujo de agua extraído desde la fuente y los costos operacionales de las plantas de tratamiento, sin considerar los costos de inversión de las plantas ni los impactos

ambientales asociados a la operación de estas. Justamente en el último ítem se enmarca este trabajo de título.

En la Tabla 1.2 se presenta un resumen con las características de ambos escenarios, mientras que en la Tabla 1.3 se especifican los flujos que ingresan a cada planta.

	Escenario	
	Base	Óptimo
Flujo de ingreso al sistema [m ³ /a]	782.673.062	463.695.277
Número de plantas	2	8
Calidad	Descarga	Irrigación y Consumo
Tipo de plantas	Grandes	Pequeñas

Tabla 1.2: Características de los escenarios base y óptimo.

	Escenario									
	Base		Óptimo							
Calidad	Descarga		Irrigación				Consumo			
Flujo [m ³ /s]	1,23	7,76	0,11	0,02	0,05	0,06	1,03	3,82	2,81	2,95

Tabla 1.3: Magnitud de los flujos tratados por las plantas para los escenarios base y óptimo.

1.2. Estado del arte

La presente sección entrega una revisión bibliográfica sobre la realización de ACV en estudios e investigaciones previas desde dos perspectivas: la aplicación de ACV en la industria de tratamiento de agua, y por otra parte, la optimización de procesos industriales.

1.2.1. ACV en la industria de tratamiento de aguas

Desde los años 90, la aplicación del ACV en la industria de tratamiento de agua ha tenido un crecimiento considerable. Una revisión bibliográfica realizada por Corominas et al., 2013 [4], muestra la existencia de 45 publicaciones científicas solo ligados al ACV de procesos de tratamiento de aguas residuales. De acuerdo a los estudios revisados, se reportan cuatro grandes razones para efectuar un ACV; (i) rendimiento y evaluación ambiental de tecnologías convencionales (lodos activados), (ii) evaluación de tecnologías poco convencionales, (iii) evaluación de nuevas estrategias aplicables al ciclo urbano del agua y al tratamiento de aguas residuales, y finalmente (iv) el análisis comparativo de estrategias en el manejo y disposición de lodos.

Tras la revisión realizada por Corominas et al., se presentan algunas conclusiones relevantes respecto a la realización de un ACV en PTAR.

- El 60% de los estudios define como unidad funcional 1 m^3 de agua tratada. Si bien corresponde a la unidad más común, existen casos en los que la unidad varía dependiendo del caso de estudio (volumen de lodo producido o kg de PO_4^{3-} generado).
- Solo 23 de 45 estudios consideran dentro de los límites del sistema la contribución al medio ambiente proveniente de la etapa de construcción, el resto de los estudios considera que su aporte es despreciable. Además, entre los 23 estudios que incluyen la fase de construcción, solo 6 reportan un aporte que vale la pena considerar. En los casos restantes la influencia de la fase de construcción es despreciable con respecto a las cargas generadas por la operación de la planta.
- 36 de 45 estudios consideran dentro de los límites del sistema el tratamiento de lodos y su disposición final. A su vez, 30 de los 36 casos tiene como desenlace la aplicación final de los lodos en el área de la agricultura, considerando y evaluando los impactos positivos en el suelo (presencia de nutrientes y reducción de emisiones al emplear el lodo como alternativa a fertilizantes artificiales) como también los impactos negativos asociados a la presencia de metales pesados en los lodos.
- Los indicadores que recibieron mayor atención corresponden al potencial de calentamiento global (PCG), acidificación y eutrofización, indicadores evaluados por 38, 27 y 28 de los 45 estudios respectivamente.

Un caso de estudio particular y contemporáneo corresponde a Raghuvanshi et al., 2017 [5]. Este trabajo se resume a continuación.

El desarrollo de este trabajo consiste en la aplicación de un ACV a una PTAR en un campus universitario ubicado al noroeste de India. A partir del ACV se busca encontrar los puntos críticos con respecto a las emisiones asociadas al proceso de tratamiento. Los límites del estudio establecen el tratamiento de agua residual, desde la energía y materias primas consumidas hasta el uso del agua tratada en la irrigación de campos. Entre los supuestos utilizados, no se considera como parte de los límites del sistema a los equipos e infraestructura necesaria para llevar a cabo el proceso de tratamiento. Por otra parte, la unidad funcional empleada son 1.500 m³ de agua tratada al día.

La obtención de datos se realiza mediante mediciones en el lugar y bajo entrevistas semi-estructuradas con los operarios de la planta. La información faltante respecto a consumos energéticos o materiales se extrae por literatura. Los principales supuestos radican en que la calidad del combustible utilizado para la generación eléctrica de la planta no varía durante el año, los flujos de insumos a la entrada corresponden a valores promedio mensuales y el impacto ambiental debido al transporte de lodos es despreciable ya que se realiza mediante carretas tiradas por bueyes. Para el tratamiento de la información se emplea el software Umberto NXT Universal junto con la base de datos Ecoinvent 3.0.

La evaluación ambiental contempla el estudio de más de un indicador (potencial ecotóxico terrestre, potencial de calentamiento global, potencial de desgaste de ozono, entre otros). El resultado final es similar en todos los indicadores, arrojando a las etapas de tratamiento por lodos activados, distribución de agua tratada y recolección de agua como los principales generadores de impactos. Las causas de este escenario se explican por el alto requerimiento energético asociado al tanque de aireación, bombas de distribución, tanque colector y la tecnología de filtración empleada en la remoción de sólidos suspendidos.

Por otro lado, existen estudios respecto al uso de ACV en plantas de tratamiento de agua potable, como son los casos presentados por Bonton et al., 2011 [6] y Ortiz et al., 2016 [7]. A continuación, se entrega un resumen con la descripción y principales conclusiones de cada estudio.

Corresponde a un ACV comparativo de dos PTAP; una con tecnología convencional (diseñada virtualmente) y la segunda con tecnología de nanofiltración (NF) operativa al norte de Quebec hace más de 10 años.

El principal objetivo es comparar el tratamiento convencional con carbón activado regular (CONV-GAC) versus NF. La unidad funcional se define como 1 m³ de agua potable tratada, mientras que los límites del sistema consideran la construcción de las PTAP (incluye transporte y materiales, excluye equipos para el edificio), operación de la planta (incluye consumo eléctrico, insumos y manejo de desechos), y desmantelamiento de la planta.

Para el caso de la planta de NF, los datos se recolectan a partir del monitoreo completo de la planta durante el periodo 2002-2003. Mientras que el diseño de la PTAP CONV-GAC se realiza mediante metodologías variadas (literatura, aproximación, bases de datos). Además, se emplea la base de datos Ecoinvent 2.0 para obtener información respecto a materiales como acero, PVC y fibra de vidrio que constituyen los componentes principales durante la etapa de desmantelación. El software de tratamiento de la información empleado corresponde a SimaPro.

Entre las principales conclusiones se tiene que el sistema NF utiliza más energía que el sistema CONV-GAC (0,55 contra 0,16 kWh/m³ de agua respectivamente) pero su impacto no es considerable debido a la naturaleza de la matriz energética en el norte de Quebec. La producción de GAC es el mayor contribuyente en cuanto a impactos, un 62% en el área de protección *salud humana* y un 88% en el área de *cambio climático*. Esto se explica debido a que la fuente de producción de GAC considerada para este análisis es a partir de carbón.

El estudio corresponde a la aplicación de un ACV a cuatro PTAP (A,B,C y D) ubicadas al noreste de Colombia con el fin de obtener un detalle de las cargas e impactos ambientales asociadas a cada una de ellas. La unidad funcional es definida como 1 m³ de agua producida. Con respecto a los límites establecidos para el sistema, se deja en claro que cada planta contiene una o más etapas del proceso de tratamiento de agua potable, siendo complementarias entre ellas. Además, se toman ciertos supuestos relativos a la vida útil de la infraestructura, definida en 50 años, y a la composición de la matriz energética, siendo en su mayoría hidroeléctrica. Por otra parte, el indicador ambiental escogido es el PCG.

El análisis de inventario considera una extracción de la información a partir de mediciones hechas en cada una de las plantas, complementándose con información genérica obtenida de la base de datos Ecoinvent 3.01. Se emplea el software LCA Data-Manager para realizar la etapa de evaluación ambiental del estudio.

En el caso de A, un 82 % del total de impactos generados (PCG) por esa planta provienen del uso de agentes coagulantes. Para la planta B, el uso de coagulantes contribuye en un 46 % del impacto total. Para las plantas C y D es el consumo eléctrico que concentra la contribución al impacto total, siendo mayor a un 90 % en cada una de estas PTAP. Esta diferencia entre los principales responsables de generar cargas contra el medio se explica en que las plantas A y B tienen como principal operación unitaria la floculación y solo emplean energía eléctrica en el bombeo y limpieza de filtros, por lo que su consumo eléctrico es bajo en comparación a C y D, cuyo proceso incluye sistemas de monitoreo y control, compresores neumáticos y sistemas de suministro a través de la succión de agua.

1.2.2. ACV en la optimización de procesos industriales

Como se explicó en la sección 1.1.2, la realización de un ACV es una tarea fundamental que antecede la formulación de una función objetivo que permita transformar la información de entrada (flujos de materia prima, volúmenes de agua, tipo de tecnología) en un valor que cuantifique las emisiones provenientes de la red. Sin embargo, la aplicación de un ACV con estos fines es poco frecuente en la literatura correspondiente. Con el fin de entregar una referencia cercana a lo que se busca resolver durante este trabajo, se presenta como antecedente el estudio efectuado por Kantor et al., 2015 [8].

Kantor et al.

El caso de estudio propuesto y desarrollado por Kantor y sus colaboradores corresponde a un problema de optimización no lineal multiobjetivo (MINLP) cuyo principal propósito es modelar un parque eco-industrial ubicado en Corea del Sur, considerando los intercambios de materia y energía entre procesos, minimizando los costos económicos junto con las emisiones asociadas al ciclo de vida del proyecto. Si bien el caso de estudio no tiene relación con el tratamiento de agua (los procesos se enfocan en la gasificación, combustión, captación de gases y producción de amoníaco y urea), el ACV se realiza con el objetivo final de modelar la función objetivo que integra toda la información relacionada a impactos ambientales.

El ACV es utilizado para cuantificar las emisiones de distintos contaminantes (gases de efecto invernadero, residuos sólidos, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno) en función de CO_2_{eq} . Estas emisiones son producidas dada la construcción de una planta de producción y debido a la operación de la misma.

Las emisiones originadas por la construcción de una planta se calculan como la ponderación entre una variable binaria (0 si la planta no se construye, 1 en caso contrario) y un factor asociado a la construcción de la planta, obtenido mediante el ACV y que depende del tipo de proceso que alberga la planta. Para cuantificar las emisiones provenientes de la operación se calcula de acuerdo a la ponderación entre la capacidad operativa de la planta, su vida útil y un factor de emisión relacionado a la operación de la planta. Este factor es un valor particular para cada nodo de producción que depende del tipo de proceso evaluado y se obtiene a gracias a la realización de un ACV del proceso. Las emisiones totales para cada planta corresponden a la suma de las emisiones provenientes de operación y construcción, por lo tanto, las emisiones totales del sistema será una sumatoria de emisiones totales por planta. Finalmente, la función objetivo se modela como un razón entre las emisiones totales de dos sistemas, normalizado por un factor asociado al número de contaminantes.

1.3. Objetivos

A continuación se presenta el objetivo general y los objetivos específicos abordados en el trabajo de título.

1.3.1. Objetivo General

Construir una función matemática que permita proyectar los impactos de nuevas plantas de tratamiento de agua (PTA).

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los procesos de tratamiento de agua que podrían ser implementados en la RM.
- Realizar un ACV de las tecnologías involucradas en las distintas configuraciones que puedan conformar una nueva PTA. Los pasos detallados a seguir para efectuar este ACV se describen en el Capítulo 3 del presente documento.
- Proponer un modelo que permita reproducir datos y proyectar impactos de nuevas PTA para cada una de sus tecnologías, es decir, formular una expresión matemática que entregue las emisiones totales de contaminantes (a través del indicador PCG) a partir de la tecnología empleada y flujo de agua tratado. La realización de esta tarea será mediante el uso del software OpenLCA (herramienta de apoyo para efectuar ACV).
- Evaluar la calidad de la función matemática mediante su aplicación y comparación con resultados reportados en bibliografía.
- Cuantificar las emisiones de los casos conocidos como *Escenario Base* y *Escenario Optimizado*, mediante la aplicación de las funciones matemáticas obtenidas.
- Realizar una evaluación ambiental comparativa de ambos escenarios utilizando la herramienta OpenLCA.

1.3.3. Alcances

El propósito del presente trabajo es hacer posible la selección de tecnologías de tratamiento de agua a partir de los impactos generados mediante la implementación de la función matemática en un sistema de optimización. Por esta razón, la función matemática construida para estimar el impacto ambiental deberá ser sencilla de evaluar e, idealmente, lineal, facilitando con ello este tipo de cálculos en un solver de optimización.

Capítulo 2

Marco metodológico

2.1. Metodología preeliminar

La metodología propuesta para el cumplimiento de los objetivos se detalla a continuación.

2.1.1. Revisión bibliográfica

- Contextualizar, presentar y explicar las distintas tecnologías que componen el sistema de tratamiento de aguas de la RM propuestas en el proyecto "Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation".
- Presentar el estado del arte en el uso del ACV: Reportar antecedentes en el uso de ACV aplicado a la industria de tratamiento de agua.
- Presentar el estado del arte en el uso del ACV en la optimización de procesos industriales: Reportar estudios similares en los cuáles el uso de la herramienta ACV se haya empleado como antecedente a la formulación de la función objetivo de un problema de optimización en la industria química . Además, se presentan los resultados y conclusiones principales de estos estudios.

2.1.2. Realización del ACV

Comprende el cumplimiento de cada una de las etapas que componen la metodología de aplicación de un ACV.

- Objetivos y alcance: Se definen los objetivos y límites del sistema de estudio, incluyendo los casos o escenarios propuestos. Además, se establece la unidad funcional de trabajo, junto con la metodología de evaluación ambiental y fuentes de información empleadas y debidamente justificadas [9].
- Análisis de inventario: Recopilación de datos utilizados en los flujos de entrada y salida del sistema de estudio [10]. Este ejercicio consiste en la medición o recolección in situ

de la información, extracción bibliográfica, estimación o uso de bases de datos como Ecoinvent [11].

- Evaluación de impacto ambiental: Se evalúa el nivel de criticidad asociado a los resultados del análisis de inventario, vale decir, cargas ambientales y riesgos asociados [10]. Para efecto de este trabajo la evaluación ambiental se realiza mediante el uso del software de ACV conocido como Open LCA v 1.7.4 [12]. Este programa permite modelar sistemas productivos para las distintas configuraciones de tratamiento de agua.
- Interpretación de resultados: Corresponde a un ejercicio transversal a lo largo del ACV. Este proceso se traduce en conclusiones y recomendaciones para facilitar la toma de decisiones a partir de los potenciales impactos medio ambientales del caso de estudio [10].

2.1.3. Construcción de la función objetivo

Formular la función objetivo consiste en proponer un modelo a través de una regresión lineal de los resultados del ACV para cada planta, es decir, trabajar con las entradas y salidas obtenidas en cada configuración y encontrar una función que transforme volúmenes de agua (unidad funcional) en un flujo másico de emisiones. Este proceso permitirá obtener una función global que inicialmente, debiese ser la suma o ponderación de las funciones específicas de cada configuración.

2.1.4. Evaluación de escenarios

La evaluación ambiental de los escenarios se realiza utilizando las configuraciones de tratamiento previamente diseñadas en el programa OpenLCA durante la etapa de ACV, por lo tanto, la metodología consiste en ingresar los flujos de agua a tratar por planta y extraer los resultados de interés arrojados por el programa. Estos resultados se recopilan y ordenan en una planilla Excel para facilitar su análisis y conversión gráfica.

Capítulo 3

Conceptos

3.1. Análisis de Ciclo de Vida

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta de evaluación ambiental, estandarizada por la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés). El ACV permite examinar, identificar, y evaluar la energía, materias primas e implicaciones ambientales de un proceso, producto o sistema a lo largo de su vida útil (desde la creación hasta la disposición), convirtiéndose en un instrumento empleado en la toma de decisiones a lo largo de un proyecto.

La metodología del ACV se encuentra estandarizada por la serie de normas ISO 14.040, 14.041, 14.042 y 14.043 (1997-2002) [13]. Con el fin de perfeccionar y profundizar la información entregada en estas normas se han publicado 2 ediciones, correspondientes a la norma ISO 14040:2006 y norma ISO 14.044:2006. Estas normas revisadas anulan y reemplazan lo establecido en la serie iniciada en 1997 [9]. La información entregada por ambas normas se resume a continuación:

- ISO 14040:2006 Establece los objetivos, requerimientos, fases, campos de aplicaciones, descripción y marco metodológico general del ACV [9].
- ISO 14044:2006 Profundiza en la metodología del ACV, presentando y explicando las 4 bases que enmarcan la realización de un ACV: (i) objetivo y alcances, (ii) análisis de inventario, (iii) evaluación de impactos e (iv) interpretación de impactos [10]. Esta metodología puede representarse gráficamente a través de la Figura 3.1, adaptada a partir de la norma ISO 14040:2006 [9].

En las siguientes subsecciones de este trabajo se explicarán cada una de las bases que componen un ACV.

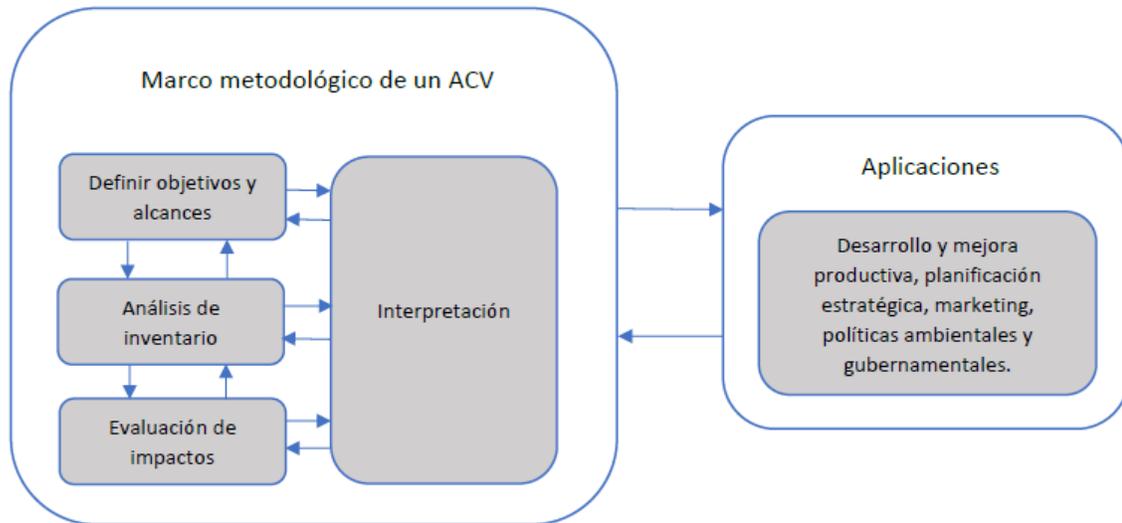


Figura 3.1: Marco metodológico de un ACV.

3.1.1. Objetivo y alcances

Consiste en presentar el tema de estudio y el propósito del ACV. Además, es necesario establecer el público objetivo (participantes a quienes se les comunicarán los resultados) y las intenciones tras los resultados del ACV (divulgación, análisis comparativo).

Los alcances de un ACV se deben acoplar a los objetivos del estudio. Entre los alcances es fundamental establecer; la unidad funcional, flujos de referencia, los límites del sistema, el método de evaluación de impacto ambiental, información requerida, calidad de la información, supuestos y limitaciones. Aquellos puntos más relevantes se describen brevemente a continuación.

- **Unidad funcional:** Un sistema de estudio posee un número determinado de funciones. Definir cuál será la función a estudiar en un sistema depende del objetivo del ACV. A modo de ejemplo, se tiene el sistema de estudio “toalla de papel”, cuya función escogida puede ser “secar un par de manos”. Por otra parte, se hace necesario elegir una unidad funcional, cuya finalidad es entregar una referencia entre la información de entrada y salida del sistema al que se le aplica el ACV. Esto permite definir una forma de cuantificar el rendimiento asociado a la función seleccionada previamente. Siguiendo con el ejemplo inicial, la función “secar manos” tiene como unidad funcional “número de manos secas por rollo de papel” [9]. Por último, se debe definir los flujos de referencia a la función escogida dentro de un sistema, es decir, los flujos de materia o energía que requiere el sistema para cumplir la función. Continuando con el ejemplo, la función “secar un par de manos” requiere una cantidad promedio de masa de papel.
- **Límites del sistema:** Permite acotar y definir las operaciones unitarias que describirán el sistema. Idealmente, los flujos de entrada y salida del sistema deben ser modelados como flujos elementales. Además, los criterios para omitir, retirar o incluir un flujo deben ser reportados de manera clara, evaluando los efectos que cada decisión tenga en

el sistema con respecto al caso original de estudio (análisis de sensibilidad).

- Metodología de evaluación de impacto ambiental: Consiste en la elección de la categoría de impacto, indicador asociado y modelo característico empleados en el ACV. Cada uno de estos factores se explicará con mayor profundidad en la sección 3.1.3.
- Fuentes y calidad de la información: La información necesaria para llevar a cabo un ACV puede extraerse de distintas fuentes, ya sea de forma directa mediante mediciones in situ de las distintas operaciones unitarias incluidas en los límites del sistema de estudio o mediante el cálculo y/o estimación a partir de fuentes bibliográficas. La composición final de los datos empleados también responderá a una calidad requerida en función de los objetivos y alcances del ACV, por lo tanto, es importante tener en cuenta factores como la antigüedad de la información, su alcance geográfico, precisión en caso de corresponder a una medición e incertidumbre asociada (supuestos, toma de decisiones, omisiones, restricciones) [10].

Es importante destacar que debido a la naturaleza iterativa del ACV, los alcances de un estudio pueden redefinirse a lo largo del proceso.

3.1.2. Análisis de Inventario

La segunda etapa de un ACV consiste en la recolección de datos (mediciones, estimaciones o cálculos) utilizados para cuantificar los flujos de entrada y salida de una operación unitaria específica. Las principales categorías bajo las cuales se clasifica la información corresponden a:

- Entradas de energía, materias primas u otras entradas físicas.
- Productos, subproductos y residuos.
- Emisiones hacia el aire, la tierra y el agua.
- Otros aspectos ambientales (ruido).

Considerando la modalidad iterativa de un ACV, el análisis de inventario posee características similares. Si bien el proceso inicia con la recolección de datos, estos deben ser validados, por ejemplo, entregando evidencia sobre la calidad de los datos empleados. La información posteriormente debe incorporarse a la operación unitaria en la que se está trabajando para finalmente relacionar estos datos con la unidad funcional definida para el sistema. Ya en una etapa final, se logra cuantificar las entradas y salidas, lo que termina por refinar la frontera del sistema, es decir, generar cambios en los límites previamente establecidos (necesidad de una operación unitaria adicional, manufactura de un insumo, reciclaje o reutilización energética).

3.1.3. Evaluación de Impactos

Durante esta etapa toda la información recolectada a lo largo del análisis de inventario se transforma en indicadores de impacto. Estos indicadores son una forma de cuantificar las cargas al medio ambiente asociadas al proceso de estudio.

Evaluar los potenciales impactos ambientales de un proceso requiere seguir una metodología, tal como se representa en la Figura 3.2, adaptada desde la norma ISO 14040:2006 [9]. En particular, esta metodología consiste en una serie de pasos obligatorios, tal como se detalla en la norma ISO 14044:2006 [10], estos son; (i) la selección de una categoría de impacto, indicador y modelo característico; (ii) la asignación de los resultados de análisis de inventario a la categoría de impacto correspondiente (clasificación) y finalmente (iii) el cálculo de los resultados asociados al indicador (caracterización). Existe otro grupo de elementos opcionales cuyo desarrollo permite otorgar una mayor profundidad al proceso de evaluación ambiental, este grupo lo componen: ponderación, normalización, agrupación y análisis de la calidad de datos.

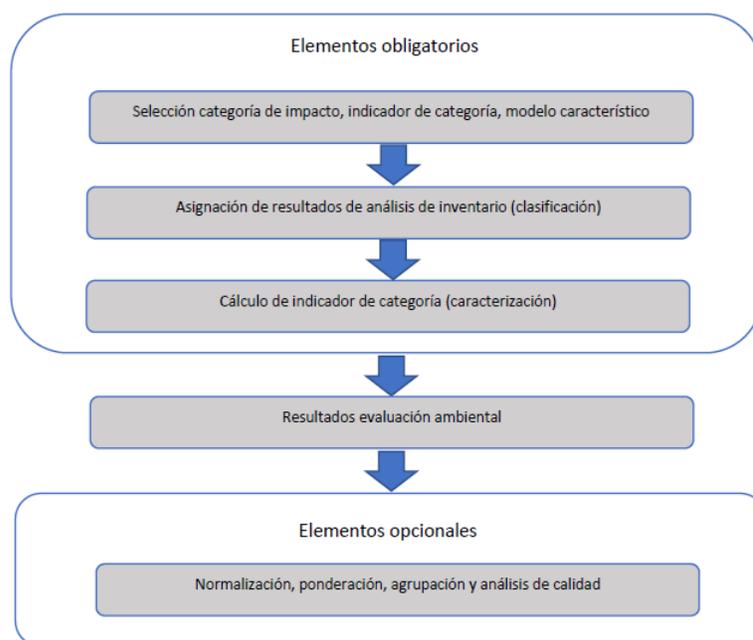


Figura 3.2: Metodología y elementos que componen la etapa de evaluación ambiental en un ACV.

Seleccionar una categoría de impacto permite describir los efectos que tendrá en el ambiente el consumo de recursos, emisiones y disposición de desechos asociados al ACV de un proceso de estudio. Las categorías de impacto se dividen en dos grupos; impactos intermedios o midpoints e impactos finales o endpoints. La diferencia entre ambas categorías radica en que las categorías intermedias se enfocan en un conflicto ambiental específico (calentamiento global) mientras que los indicadores finales describen los efectos de los impactos ambientales en tres grandes conjuntos conocidos como áreas de protección: salud humana, ecosistema, recursos naturales. Estas áreas de protección reciben los impactos asociados a una o más categorías intermedias, tal como se representa gráficamente en la Figura 3.3, adaptada de [14].

Cada categoría junto a sus respectivas subcategorías tendrá asociado un método de evaluación, instrumento presente en los distintos software de ACV, como lo es OpenLCA para el presente estudio. Estos métodos permiten simplificar y optimizar el proceso de evaluación ambiental [15].

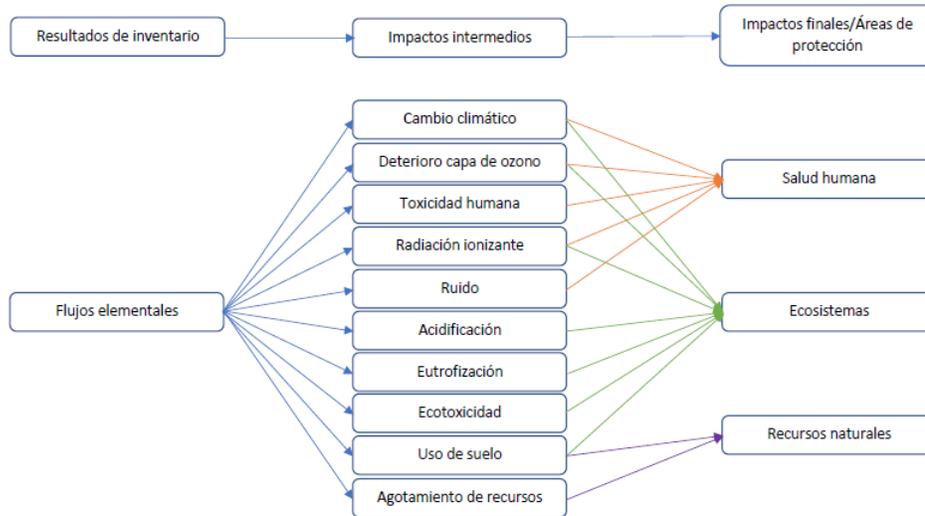


Figura 3.3: Categorías de impacto intermedio (midpoints) y categorías de impacto final o áreas de protección (endpoints).

La evaluación continúa con la asignación de los flujos elementales (determinados durante el análisis de inventario) a una o más categoría de impacto, dependiendo de su contribución al medio.

Durante la caracterización, los impactos provenientes del sistema de estudio son modelados y cuantificados basándose en un método de evaluación. El impacto final se refleja en la obtención de un indicador de impacto a través de un factor característico, elemento que permite homogeneizar los impactos de un proceso y representarlos bajo una unidad de medida particular.

En la Tabla 3.1, adaptada de [9], se entrega un caso de ejemplo con el fin de obtener una visión más clara del proceso de evaluación, partes que lo componen y sus respectivos significados e importancia.

Término	Ejemplo
Categoría de impacto	Cambio climático
Método	CML
Resultados análisis de inventario	Cantidad de gases de efecto invernadero por unidad funcional
Modelo característico	Modelo de línea base con un horizonte de 100 años por el el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)
Factor característico	Kg de CO ₂ equivalente (1 Kg de CO ₂ =1 Kg de CO _{2eq} mientras que 1 Kg de CH ₄ = 20 Kg de CO _{2eq})
Indicador de categoría	Kg de CO ₂ equivalente por unidad funcional
Categoría de impacto final	Ecosistemas

Tabla 3.1: Ejemplificación de los distintos componentes de la etapa de evaluación ambiental.

3.1.4. Interpretación de impactos

La toma de decisiones con respecto a un sistema de estudio requiere una interpretación transversal de los resultados obtenidos en cada etapa del ACV. De esta manera, es posible

identificar que fuentes de energía, operaciones, insumos u otros participantes del proceso estudiado son los responsables de generar mayores (o menores) impactos al medio ambiente. La interpretación permite además generar reflexiones y posteriores conclusiones con respecto al caso de estudio, conservando un enfoque de acuerdo a lo preestablecido en la definición de los objetivos y alcances del ACV.

3.2. Tecnologías de tratamiento de agua

En general, las PTA operan siguiendo un enfoque multibarrera, que se define como un sistema integrado de procedimientos, procesos y herramientas que en conjunto previenen o reducen la contaminación del agua potable [16].

Un sistema de tratamiento está definido por las características del afluente y por la calidad esperada para el efluente. Una vez se identifican las composiciones de ambas corrientes, se escoge una secuencia de operaciones físicas, químicas y/o biológicas que cumplan con el tratamiento del agua.

Para el caso de la red de tratamiento de la RM, el sistema se modela bajo la selección de tres categorías de contaminantes representativos. A continuación, se incluye la justificación en cada elección.

- Sólidos suspendidos totales (SST): Material particulado de tamaño mayor a 2 micrones que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua y que contribuye a la turbidez del recurso [17]. Su presencia en ríos tiende a ser mayor que en lagos y otras fuentes, por lo que se considera como un contaminante relevante debido a que las principales fuentes de agua superficial en la RM son el río Maipo y el río Mapocho [18].
- Materia orgánica: Comprende todo compuesto que contenga carbono en su estructura. El resultado de la cuantificación del oxígeno consumido en el agua al quinto día se denomina “Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días” DBO₅. Es importante remover la materia orgánica presente en el agua ya que puede causar daños a la salud humana e impactos al medio ambiente [19].
- Material disuelto: Se considera dos metales pesados que pueden producir daños y toxicidad en los seres vivos: plomo (Pb) y arsénico (As). El plomo es un metal presente en aguas residuales provenientes de distintos procesos industriales, siendo seleccionado como un metal representativo [20]. Por otro lado, la elección de arsénico viene dada por los altos niveles presentes en algunas fuentes naturales de la RM. [21]

Existe una amplia variedad de tecnologías capaces de remover los contaminantes seleccionados. En la tabla 3.2 se presentan algunas de las tecnologías utilizadas en la industria de tratamiento de agua [22].

Con el fin de reducir el número de combinaciones tecnológicas aplicables al modelo de estudio, se realiza una selección particular de procesos de tratamiento, los que finalmente se

Contaminante removido	Tipo de tratamiento	Tecnología
Sólidos suspendidos	Primario	Coagulación/Floculación/Sedimentación
	Terciario	Filtración
		Micro-filtración
Materia orgánica	Secundario	Lodos activados
		Filtro percolador
		Biodiscos
		Fosa séptica
		Oxidación química
Material disuelto	Terciario	Nanofiltración
		Ósmosis inversa
	Avanzado	Electrofloculación
		Intercambio iónico
		Filtración GAC

Tabla 3.2: Tecnologías utilizadas en los procesos de tratamiento de agua.

observan en la Sección 1.1.3, Tabla 1.1. Esta selección se efectúa bajo el criterio de madurez tecnológica asociada a cada proceso, es decir, su aplicación a mediana y gran escala en plantas existentes a nivel nacional como internacional.

3.2.1. Tratamiento Preliminar

Engloba 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.

3.2.2. Tratamiento primario

El agua ingresa a un tanque de asentamiento en donde los sólidos más pesados decantan mientras que los sólidos más ligeros flotan. Los sólidos se eliminan como lodos y escoria respectivamente.

3.2.3. Tratamiento secundario

El principal objetivo de este proceso es lograr una mayor remoción de la carga orgánica con respecto al tratamiento primario. Las tecnologías evaluadas en este trabajo corresponden al proceso de lodos activados y filtro percolador.

Lodos activados

La remoción de carga orgánica es un proceso continuo que se realiza mediante dos estanques conectados en serie, el primero corresponde a un *estanque de aireación* y el segundo es un *estanque de sedimentación o clarificador*. Una representación del proceso se observa en la Figura 3.4 [23].

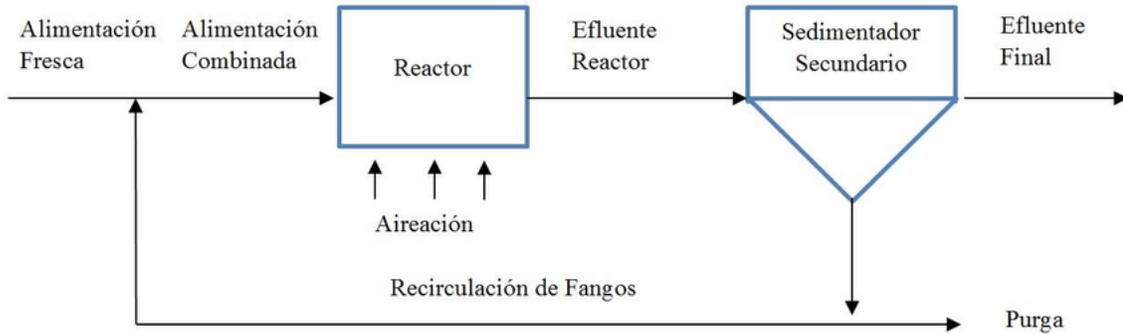


Figura 3.4: Esquema simplificado proceso de lodos activados.

Previo a su ingreso al estanque de aireación, la corriente de agua se mezcla con el flujo de lodos activados reciclados desde el clarificador. En el primer estanque, la mezcla recibe una inyección de aire, lo que permite que los microorganismos presentes en los lodos actúen y flocculen naturalmente la materia orgánica. Posteriormente, la mezcla pasa al segundo estanque, dónde los microorganismos decantan debido a su tamaño y son reciclados. En caso de que exista una sobrepoblación de microorganismos, estos se eliminan del procesos como lodos activados residuales.

Filtro percolador

El flujo de agua a tratar se distribuye mediante una regadera hidráulica sobre una cama de material poroso recubierta por microorganismos tal como se observa en la Figura 3.5 [24]. El agua rociada fluye a través de los espacios recibiendo un flujo continuo de aire. Bajo estas condiciones, los microorganismos metabolizan la materia orgánica, descomponiendo los sólidos y generando más microorganismos. En caso de existir un crecimiento excesivo, estos se desprenden y caen con el flujo de agua, por lo que se requiere un procesos de clarificación auxiliar en un estanque de sedimentación.

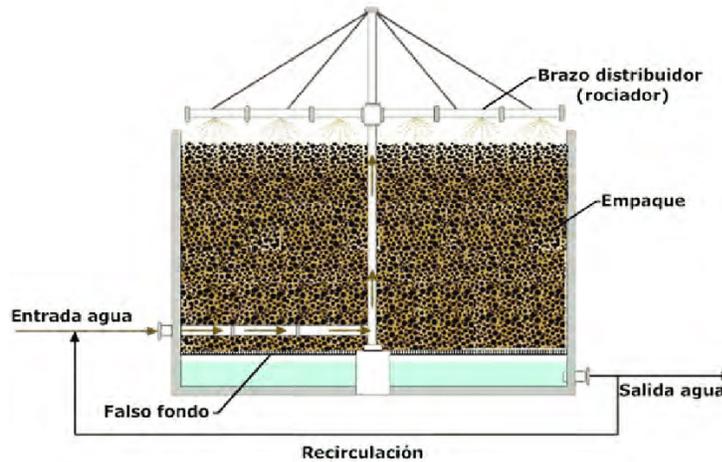


Figura 3.5: Esquema filtro percolador.

3.2.4. Tratamiento terciario

Tratamientos que incluyen procesos de separación física mediante el uso de una o más membranas semipermeables. Durante esta operación se remueven sólidos suspendidos y partículas coloidales cuyo tamaño sea superior a la apertura de poro de la membrana utilizada. Una vez se retiene material, su acumulación reduce el tamaño de poro, lo que mejora la eficiencia de separación hasta cierto límite (limpieza del filtro).

En la tabla 3.2.4 se presenta un resumen de los tipos de membranas evaluadas en este trabajo y su respectivo rango de remoción.

Nombre	Tamaño de corte [μm]	Contaminantes removidos
Filtración	10	Partículas pequeñas
Microfiltración	0,1	Células, bacterias, grasas
Ultrafiltración	0,01	Polisacáridos, proteínas, virus
Nanofiltración	0,005	Monómeros, ADN
Osmosis inversa	0,001	Iones, sales minerales

Tabla 3.3: Tabla comparativa entre distintos procesos de separación por membrana.

3.2.5. Tratamiento avanzado

Corresponden a métodos de remoción de contaminantes que no pueden ser eliminados mediante los tratamientos biológicos convencionales. Además, estos sistemas se encargan de retirar compuestos nitrogenados, ricos en fósforo y metales.

Filtración GAC

La filtración por carbón granular activado (GAC por sus siglas en inglés) es un proceso utilizado en la remoción de material refractario, es decir, compuestos orgánicos difíciles de eliminar mediante el uso de procesos biológicos y/o fisicoquímicos convencionales. Durante el proceso de remoción, el flujo de agua pasa por una o más columnas que contienen carbón en polvo en su interior que gracias a sus propiedades y un tiempo de contacto suficiente, adsorbe los compuestos orgánicos refractarios. La eficiencia de la adsorción disminuye con el uso del carbón, por lo que es necesario regenerar (procesos de desorción) o sustituirlo.

Intercambio iónico

El intercambio iónico trabaja bajo el principio de sustitución de una partícula cargada indeseada (contaminante) por otra partícula menos nociva. La remoción de contaminantes se realiza mediante el uso de resinas poliméricas eléctricamente neutras. Esta resina está compuesta por iones fijos (partículas con carga positiva o negativa) y por iones móviles, por cada ión fijo existirá un contra-ión (ión móvil) de carga opuesta. Al entrar en contacto el agua con la resina, los iones móviles se sustituyen por una partícula externa de carga opuesta (contaminante). Al intercambiar posiciones, la resina conserva su estado eléctricamente neutro y atrapa el contaminante. A modo de ejemplo, en la Figura 3.6 [25], se observa el proceso de descationización, donde todos los cationes son reemplazados por H^+ .

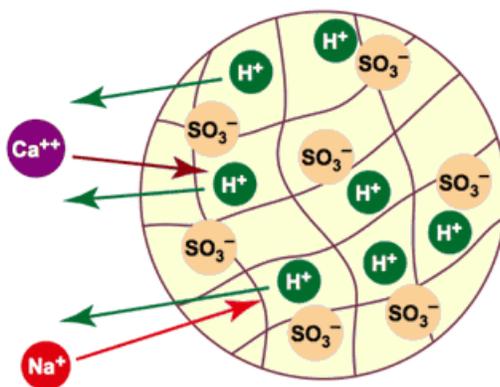


Figura 3.6: Esquema intercambio iónico.

3.2.6. Desinfección

El principal objetivo de la desinfección de agua es eliminar la presencia de patógenos que puedan causar enfermedades. La eficacia de la desinfección se mide de acuerdo a los niveles de las bacterias coliformes.

Cloración

La adición de cloro o de compuestos clorados permite la destrucción de organismos patógenos, inhibiendo su reproducción. Además, su aplicación previene el crecimiento de otros organismos no deseados, como algas, protozoos y aporta en la remoción de hierro y magnesio. El cloro puede reaccionar con otros elementos presentes en el agua, como la amonía, generando cloraminas, sustancias residuales que funcionan como barrera frente a una posible recontaminación del agua. Los niveles de este compuesto deben ser medidos y regulados debido a los efectos negativos que pueden generar en la salud de las personas y en el ecosistema.

Ozonización

El ozono es un gas con excelentes propiedades oxidantes que reacciona con materia orgánica e inorgánica. Su aplicación es más efectiva que el cloro ya que destruye y evita la reaparición de microorganismos. Además, el ozono se descompone rápidamente, por lo que no genera residuos adicionales. Su principal desventaja es el alto costo operacional con respecto al uso de desinfectantes convencionales y a su potencial tóxico y corrosivo.

Capítulo 4

Objetivos y alcances del ACV

4.1. Objetivos del ACV

Con el propósito de aplicar herramientas de optimización para configurar la mejor red de agua posible, es necesario construir un modelo que cuantifique las emisiones asociadas a la operación de las nuevas plantas de tratamiento. La formulación de este modelo requiere la aplicación de un ACV a cada una de las posibles configuraciones presentadas en Tabla 1.1. Cada configuración está diseñada para cumplir con una calidad de agua particular, por lo que se tienen cuatro escenarios, cada uno con distintas combinaciones, tal como se reportó en la Sección 1.1.3, Tabla 1.1 y en la Sección 3.2.

Para este estudio, se utiliza el software Open LCA v 1.7.4. [12] y la base de datos para ACV Ecoinvent 3.3 [11]. Además, se emplea la metodología de evaluación ambiental Open LCIA 1.5.7.

4.2. Unidad funcional

La unidad funcional elegida para este estudio corresponde a 1 m³ de agua tratada. Esta medida se aplica a todo el sistema, lo que incluye cada escenario y sus respectivas combinaciones de tecnologías.

La magnitud de la unidad funcional se elige en base al estado del arte desarrollado en la Sección 1.2.1 y con el fin de facilitar el análisis y la comparación de los resultados.

4.3. Indicador y categoría de impacto

Los gases de efecto invernadero (GEI) producen un aumento en la temperatura del planeta mediante la retención de energía y su prolongada estadía en la atmósfera.

El potencial de calentamiento global (PCG) es un indicador que permite medir la cantidad de energía que es absorbida por una tonelada de gas de efecto invernadero durante un período de tiempo determinado, generalmente 100 años. Se trabaja con una medida común, equivalente a una tonelada de CO₂, por lo tanto, el factor característico corresponde a 1 tonelada de CO₂_{eq} [26].

En base a los objetivos y alcances de este estudio, se escoge el indicador de estudio PCG, por lo tanto, la categoría de impacto intermedia que posee mayor afinidad corresponde a *cambio climático*.

Durante el proceso de evaluación ambiental, la caracterización de impactos se realiza en el software Open-LCA, empleando el método CML-línea base con un horizonte de 100 años establecido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC).

4.4. Alcances y supuestos

El ACV considera exclusivamente la operación de una PTA de vida útil indefinida, desestimando su construcción y desmantelamiento. Esta decisión se toma en base a lo reportado en investigaciones previas detalladas en la Sección 1.2.1, con un aporte despreciable de estas etapas en comparación a la operación de la planta.

Dentro de la operación de la planta, se considera la línea de agua y línea de lodos, procesos detallados en la subsección 4.5 y subsección 4.6 respectivamente. Las entradas al sistema incluyen el ingreso de agua, la producción de insumos necesarios para cada proceso, y el consumo energético de las distintas operaciones unitarias. Las salidas contemplan el agua producida con distintas concentraciones y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). En la Figura 4.4 se presenta un esquema con los límites del sistema.

Las emisiones de CO₂ provienen del consumo energético del proceso y de la producción y transporte de insumos. Las emisiones de CH₄ corresponden a emisiones fugitivas provenientes del proceso de tratamiento de lodos. Por último, la emanación de N₂O tiene su origen en el nitrógeno presente en el afluente tratado en la línea de agua y generado en la digestión de lodos.

Para la línea de agua se asume una pérdida de agua del 5 % con respecto al afluente. Este valor se extrae desde el *Estudio Tarifario de Aguas Andinas* [27].

La línea de tratamiento de lodos residuales considera solo los lodos provenientes del tratamiento biológico (lodos secundarios), desestimando los lodos generados en el tratamiento primario (lodos primarios). El sistema se simplifica a un proceso de flotación de los lodos

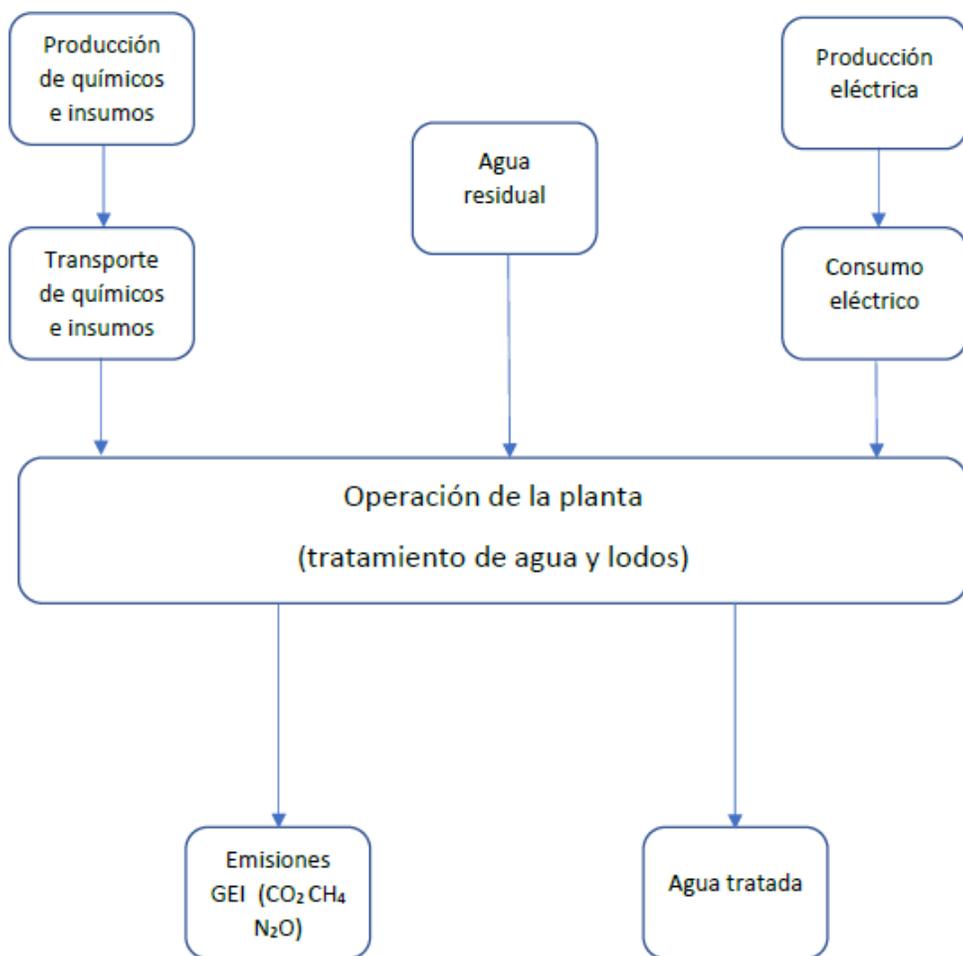


Figura 4.1: Límites del sistema global. Elaboración propia.

secundarios, digestión y deshidratación de los lodos digeridos. El biogás producido por la etapa de digestión no forma parte de los límites del sistema, desestimando sus posibles aplicaciones energéticas. Tampoco se consideran las emisiones generadas por el transporte y disposición de biosólidos, debido a la incertidumbre que existe con respecto a la ubicación de las nuevas plantas. Por otra parte, los flujos volumétricos y másicos de lodo se cuantifican en base a información referida por la *Planta de Tratamiento la Farfana* e información extraída desde literatura. El tratamiento de esta información concluye en la obtención de factores de producción de lodo normalizados por el caudal que ingresa a la línea de agua. El detalle de la obtención de los factores se presenta en el Anexo D.3.

Con respecto a las fuentes de información utilizadas, no existe medición de datos directa debido a que las plantas evaluadas por ACV no existen en la actualidad, por lo tanto, la mayoría de los datos se recolectan desde la base de datos Ecoinvent 3.3 y documentos bibliográficos extranjeros (publicaciones científicas, manuales, libros), con la excepción de la línea de lodos, cuyas estimaciones se realizan en base a información de una planta real. Esta decisión puede afectar la exactitud de los resultados obtenidos, por lo que será materia de reflexión en secciones posteriores del trabajo.

4.5. Línea de agua y configuraciones

El ACV se aplicará a cuatro configuraciones de tratamiento de agua, con sus respectivas variaciones de tecnología. Todos los escenarios tienen en común las etapas de tratamiento preliminar y primario. A continuación, se caracteriza cada escenario.

4.5.1. Calidad descarga

Comprende de un tratamiento preliminar junto a un tratamiento primario convencional, seguido por un tratamiento biológico que contempla dos alternativas: un proceso de lodos activados para plantas de gran escala o la aplicación de un filtro percolador en plantas de menor escala. La configuración termina con la desinfección de agua mediante cloración. En la Figura 4.2 se presenta un esquema simplificado de este escenario.



Figura 4.2: Configuración calidad descarga. Elaboración propia.

4.5.2. Calidad irrigación

Este sistema añade una etapa de tratamiento terciario que contiene dos tecnologías excluyentes, filtración y microfiltración, ambas se complementan con un proceso de desinfección que consiste en la adición de cloro para plantas de gran escala y ozonización en el caso PTA de escala mediana. En total, cuenta con 4 combinaciones de tecnologías. En la Figura 4.3 se presenta un esquema simplificado de este escenario.

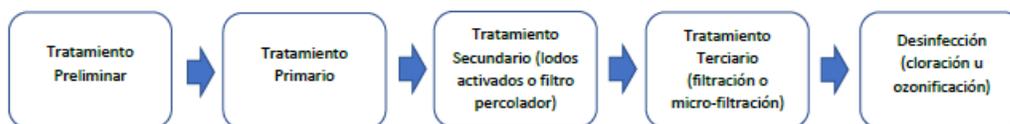


Figura 4.3: Configuración calidad irrigación. Elaboración propia.

4.5.3. Calidad fuente

Análogo al proceso anterior, el caso de calidad fuente solo sustituye las tecnologías del tratamiento terciario por membranas de nanofiltración y osmosis inversa. Con el fin de evitar el efecto de fouling en estas membranas, se añade una operación de micro-filtración entre el tratamiento secundario y terciario [28] [29]. En la Figura 4.4 se presenta un esquema simplificado de este escenario.

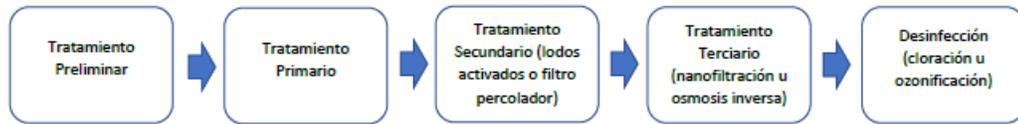


Figura 4.4: Configuración calidad fuente. Elaboración propia.

4.5.4. Calidad consumo

Este sistema es una versión similar al escenario calidad fuente. Se caracteriza por incluir una etapa de tratamiento avanzado que busca eliminar material disuelto perjudicial para la salud humana (metales). Las tecnologías de esta etapa alternan entre un proceso de intercambio iónico o una filtración mediante carbón activado. En la Figura 4.5 se presenta un esquema simplificado de este escenario.



Figura 4.5: Configuración calidad consumo. Elaboración propia.

4.6. Línea de lodos

Tal como se adelanta en la Sección 4.4, la línea de lodos se compone de una secuencia de operaciones unitarias fijas que buscan tratar los lodos activados generados en la etapa de tratamiento biológico, finalizando en la producción de un lodo deshidratado y enviado a disposición conocido como biosólido. En la figura 4.6 esquematiza de forma simplificada el proceso de tratamiento de los lodos activados considerado para este estudio.



Figura 4.6: Configuración tratamiento lodos. Elaboración propia.

Capítulo 5

Análisis de inventario

Durante este capítulo se reportan los datos utilizados dentro del ACV para cada configuración, factores de emisión, fuentes de información y los principales supuestos considerados.

5.1. Línea de agua

Las emisiones generadas por la línea de agua son dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (N_2O). La información necesaria para calcular las emisiones de CO_2 corresponde a la dosificación de químicos utilizados, consumo energético de las tecnologías y transporte de insumos.

5.1.1. Emisiones de CO_2

Los productos químicos necesarios en la línea de agua son cloruro férrico (FeCl) utilizado como coagulante en la etapa de tratamiento primario; ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$), hipoclorito sódico (NaClO), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sodio (NaOH) y dióxido de azufre (SO_2) aplicados en el lavado químico de las membranas de microfiltración; cloro gaseoso (Cl_g) y ozono (O_3) empleados como desinfectante. La dosificación y fuente bibliográfica de los insumos químicos se presentan en la Tabla 5.1.

Si bien la dosificación de cada sustancia corresponde a valores óptimos reportados por literatura, existen excepciones en el uso de algunos insumos, debido a que la base de datos de Ecoinvent no posee información respecto a factores de emisión de estas sustancias. A partir de lo anterior, se procede a descomponer los insumos sin información en dos sustancias químicas cuyo factor de emisión esté presente en Ecoinvent y que cumplan con ser uno de los principales componentes en la producción de dicho insumo (no necesariamente todos sus componentes). Estos casos corresponden al metabisulfito de sodio [I] que se descompone en hidróxido de sodio y dióxido de azufre, dividiendo la dosificación en partes iguales, siguiendo

la lógica reportada en la bibliografía [30]. Esta misma metodología se aplica para los casos del hidróxido de calcio [II], bicarbonato de sodio [III] y alumbre [IV], descomponiendo cada insumo en dos componentes y asignando la mitad de la dosificación a cada uno..

Tecnología	Insumo	Dosificación óptima [g/m ³]	Referencia
Clarificación	Cloruro férrico	8,000	[31]
Microfiltración	Hipoclorito sódico	1,630	[30]
	Ácido cítrico	0,282	[30]
	Ácido sulfúrico	0,686	[30]
	Hidróxido de sodio [I]	0,036	[30]
	Dióxido de azufre [I]	0,036	[30]
Nanofiltración	Ácido fosfórico	1,100	[6]
	Dióxido de carbono	15,000	[6]
	Cloruro de calcio [II]	3,500	[6]
	Hidróxido de sodio [II]	3,500	[6]
	Cloro gas	0,600	[6]
	EDTA	4,200	[6]
	Hidróxido de sodio [III]	1,700	[6]
Osmosis Inversa	Dióxido de carbono [III]	1,700	[6]
	Ácido Cítrico	0,655	[30]
	Detergente	0,003	[30]
Ozonización	Hidróxido de sodio	76,680	[30]
	Ozono	2,150	[32]
Cloración	Cloro gaseoso	6,000	[22]
Filtración GAC	Carbón activado (gránulos)	76,000	[6]
	Cloro gas	0,600	[6]
	Dióxido de carbono (líquido)	14,000	[6]
	Hidróxido de sodio	60,000	[6]
	Ácido fosfórico	1,100	[6]
	Poliacrilamida	0,300	[6]
	Cloruro de calcio [II]	3,500	[6]
	Hidróxido de sodio [II]	3,500	[6]
	Sulfato de potasio [IV]	40,000	[6]
Sulfato de aluminio [IV]	40,000	[6]	
Intercambio Iónico	Resina catiónica	0,767	[33]
	Ácido clorhídrico	4,867	[33]

Tabla 5.1: Dosificación óptima de productos químicos utilizados en el tratamiento de agua. Elaboración propia.

Con el fin de cuantificar las emisiones de CO₂ provenientes del transporte de las sustancias se asume que Oxychile será la empresa proveedora de todos los insumos químicos, a excepción del CO₂, resina catiónica y ozono. Oxychile es una empresa especializada en la producción y distribución de productos químicos ubicada en Talcahuano. Dentro de su catálogo de productos se encuentra el cloruro férrico y gas cloro [34]. Además, Oxychile es el proveedor de estos insumos para Aguas Andinas [35]. Con respecto al CO₂ utilizado en la etapa de nanofiltración, este es transportado desde Indura Market S.A., empresa encargada de la

comercialización de CO₂ [36]. Por otro lado, se asume que la resina catiónica empleada en el proceso de intercambio iónico proviene desde Aguasin, empresa especializada en la comercialización de resinas de intercambio iónico a escala industrial en Chile [37]. Con respecto al ozono, se asume una producción interna del insumo, por lo que se desestiman las emisiones generadas por su transporte.

La distancia recorrida por el transporte de químicos, resina y CO₂ se estima utilizando el servicio de Google Maps, considerando una ruta terrestre entre cada proveedor y un punto de llegada común, que se asume como la bodega de recepción de Aguas Andinas S.A [35]. El factor de emisión utilizado proviene de la base de datos Ecoinvent, asumiendo un transporte por camiones de carga de 16-32 toneladas métricas para el caso de los insumos químicos y camiones de 7,5-16 toneladas métricas con sistemas de refrigeración para el transporte de CO₂. La distancia total de cada caso se presenta en la Tabla 5.2.

Dirección de inicio	Dirección de destino	Distancia [km]
Oxy Chile Talcahuano - Av. Rocoto 2625, Talcahuano, Región del Bío Bío.	Lira 2370, San Joaquín, Santiago, Región Metropolitana.	505
Indura Market - Av. Pedro Aguirre Cerda 7060, Cerrillos, Región Metropolitana.	Lira 2370, San Joaquín, Santiago, Región Metropolitana.	9,6
Aguasin - Panamericana 18900, Lampa, Región Metropolitana.	Lira 2370, San Joaquín, Santiago, Región Metropolitana.	24,4

Tabla 5.2: Especificaciones distancia de transporte de insumos químicos. Elaboración propia.

Los factores de emisión asociados a la producción y transporte de estos químicos son entregados por la base de datos Ecoinvent 3.3.

Para cuantificar las emisiones de CO₂ provenientes de cada tecnología se necesita conocer el consumo energético asociado a cada operación y el factor de emisión correspondiente a la matriz energética chilena.

La eficiencia energética de cada tecnología se extrae a partir de bibliografía, principalmente informes e investigaciones reportadas en procesos de tratamiento de agua en E.E.U.U. y China. Toda la información se encuentra normalizada por m³ de agua que ingresa al sistema y se presenta en la Tabla 5.3.

Finalmente, se utiliza un factor de emisiones de CO₂ normalizado por kWh de energía consumida por cada proceso. Este dato refleja las emisiones directas provenientes de la matriz energética chilena [41]. En la Tabla 5.4 se presentan los factores promedio del año 2017 (última actualización) para el Sistema Interconectado Central (SIC) y para el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING).

Se trabaja con el factor de emisiones del SIC ya que el suministro energético de la Región Metropolitana proviene desde este sistema [41].

Tratamiento	Tecnología	Proceso	Consumo energético reportado [kWh/m ³]	Consumo energético promedio [kWh/m ³]	Referencia
Previo	Varias	Tecnología general	0,0090-0,0120	0,0105	[32]
Primario	Clarificación	Adición de coagulante	0,4000-0,7000	0,5500	[32]
		Mezclado	0,0080-0,0220	0,0150	[32]
Secundario	Lodos Activados	Aireación y agitación	0,3300-0,6000	0,4650	[38]
		Recirculación de lodos	0,0110	0,011	[32]
	Filtro percolador	Tecnología general	0,1800-0,4200	0,3000	[32]
Terciario	Filtración	Tecnología general	0,0050-0,0140	0,0095	[32]
	Microfiltración	Tecnología general	0,1100	0,1100	[32]
	Osmosis Reversa	Tecnología general	0,4000-0,5000	0,4500	[39]
	Nanofiltración	Bombeo y limpieza	0,4944	0,4944	[6]
Desinfección	Ozonización	Tecnología general	0,0300-0,1500	0,0900	[32]
	Cloración	Adición y mezclado	$2 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	[40]
Avanzado	Filtración GAC	Bombeo, mezcla y limpieza	0,0664	0,0664	[6]
	Intercambio Iónico	Bombeo y regeneración resina	0,0380	0,0380	[33]

Tabla 5.3: Consumo energético para cada tecnología. Elaboración propia

Sistema Interconectado	Año	Factor de emisión promedio [kgCO _{2eq} /kWh]
Central	2017	0,3364
Norte grande	2017	0,7730

Tabla 5.4: Factores de emisión promedio para el SIC y SING. Elaboración propia.

5.1.2. Emisiones de N₂O

Las emisiones de N₂O en la línea de agua provienen de la carga de nitrógeno que trae consigo el afluente. En particular, los procesos de nitrificación y desnitrificación ocurridos en la etapa de tratamiento biológico son la fuente de producción de óxidos nitrosos.

Para estimar las emisiones de este GEI se utiliza la ecuación 5.1 propuesta por Chandran [42]. Esta expresión se encuentra en función del afluente y de la concentración de nitrógeno presente, que se monitorea midiendo el Nitrógeno Total Kjeldhal (TKN). Para efecto de este estudio se trabaja con una concentración de TKN reportada por la *Planta de Tratamiento La Farfana* durante el año 2017 [43]. Un ejemplo de cálculo para las emisiones de este contaminante se presenta en el Anexo C.

$$E_{N_2O} = Q_e \cdot TKN \cdot EF_{N_2O} \cdot \frac{44}{28} \cdot 10^{-3} \quad (5.1)$$

Dónde:

- E_{N_2O} : Emisiones de N₂O [kg/año]
- Q_e : Caudal afluente línea de agua [m³/año]
- TKN: Concentración de TKN en el afluente, equivalente a 0,071 [kg/m³]
- EF_{N_2O} : Factor de emisión de N₂O, equivalente a 0,005 [kg N₂O/kg TKN] [42]
- 44/28: Conversión de peso molecular, gramos de N₂O por gramos de nitrógeno emitido como N₂O.
- 10⁻³: Factor de conversión de unidades.

5.2. Línea de lodos

La línea de lodos incluye un aporte de CO_2 proveniente del consumo energético de los equipos; CH_4 correspondiente a emisiones fugitivas de los procesos de tratamiento y N_2O cuya única fuente es la etapa de biodigestión.

5.2.1. Emisiones de CO_2

Para cuantificar las emisiones de CO_2 en cada proceso, se necesita conocer los flujos volumétricos de lodos que ingresan a cada operación en la línea de lodos. Se asume que los factores de producción de lodos no sufren variación respecto de la tecnología de tratamiento secundario empleada (lodos activados o filtro percolador).

Los factores de producción empleados se presentan en la Tabla 5.5. El detalle de la obtención de estos datos se presentan en el Anexo D.

Tipo de lodo	Factor de producción [m^3 de lodo/ m^3 agua]
Lodos a flotación	0,00342
Lodos a biodigestor	0,00060
Lodos a deshidratación	0,06263

Tabla 5.5: Factores de producción de lodo para las entradas a los procesos de espesamiento y digestión. Elaboración propia.

El consumo energético de los procesos de tratamiento de lodos se obtiene por bibliografía y se resume en la Tabla 5.6. Se utiliza el factor de emisión de CO_2 eq propuesto por el SIC bajo el mismo criterio que el presentado en la Sección 5.1.1.

Proceso	Consumo energético reportado [kWh/m^3 de lodo]	Consumo energético promedio [kWh/m^3]	Referencia
Espesamiento	0,0019-0,0021	0,0020	[44]
Biodigestión (mezclado y bombeo)	0,0255	0,0255	[45]
Deshidratación	0,015-0,035	0,025	[44]

Tabla 5.6: Consumo energético por m^3 de lodo tratado. Elaboración propia.

5.2.2. Emisiones de CH_4

Estimar las emisiones de CH_4 requiere conocer los flujos volumétricos de lodo tratado e información adicional, correspondiente a la concentración de sólidos y los factores de emisión de CH_4 para cada operación, normalizado por unidad másica de sólido. En la Tabla 5.7 se presentan las concentraciones de sólidos reportadas en bibliografía. Por otra parte, la Tabla 5.8 reporta los factores de emisión recolectados y utilizados en este trabajo.

Tipo de lodo	Concentración de sólidos [kg sólidos/m ³ lodo]	Referencia
Lodos a flotación	8	[46]
Lodos a biodigestor	45	[47]
Lodos a deshidratación	10	[47]

Tabla 5.7: Concentraciones estimadas de sólido para distintos tipos de lodos. Elaboración propia.

Etapa	Factor de emisión [kg CH ₄ /kg de sólido]	Referencia
Flotación	$5,74 \cdot 10^{-4}$	[48]
Biodigestor	$1,80 \cdot 10^{-4}$	[49]

Tabla 5.8: Factores de emisión de CH₄ para cada etapa. Elaboración propia.

5.2.3. Emisiones de N₂O

Las emisiones de N₂O provienen de una fuente única, que corresponde a la etapa de biodigestión. En la Tabla 5.9 se presenta el factor de emisiones del proceso.

Etapa	Factor de emisión [kg CH ₄ /kg de sólido]	Referencia
Biodigestión	$1,51 \cdot 10^{-8}$	[50]

Tabla 5.9: Factor de emisión de N₂O. Elaboración propia.

Capítulo 6

Evaluación Ambiental

Este capítulo se dividirá en dos partes; en primer lugar se entregarán las funciones que cuantifican las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para cada configuración, en segundo lugar se entregará la evaluación ambiental de los escenarios base y optimizado. Ambas secciones se complementan con las discusiones pertinentes.

6.1. Estimación ambiental

En la Tabla 6.1 se presentan las funciones de estimación de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ al año por m^3 de agua producido al año por el sistema de tratamiento (V), calculado para cada configuración. Un ejemplo de los pasos a seguir al en OpenLCA y los cálculos correspondientes se presenta en el Anexo E.

Calidad esperada	N	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario	Desinfección	Tratamiento avanzado	Estimación del PCG [$\text{kgCO}_{2\text{eq}}$]
Descarga	1	Lodos activados	-	Cloración	-	0,5588·V
	2	Filtro percolador	-	Cloración	-	0,4981·V
Irrigación	1	Lodos activados	Filtración	Cloración	-	0,5634·V
	2	Lodos activados	Micro-filtración	Cloración	-	0,5995·V
	3	Filtro percolador	Filtración	Ozonización	-	0,5517·V
	4	Filtro percolador	Micro-filtración	Ozonización	-	0,5878·V
Fuente	1	Lodos activados	Ósmosis inversa	Cloración	-	0,8606·V
	2	Lodos activados	Nanofiltración	Cloración	-	0,8143·V
	3	Filtro percolador	Ósmosis inversa	Ozonización	-	0,8486·V
	4	Filtro percolador	Nanofiltración	Ozonización	-	0,8023·V
Consumo	1	Lodos activados	Ósmosis inversa	Cloración	Intercambio iónico	0,8809·V
	2	Lodos activados	Nanofiltración	Cloración	Filtración GAC	1,0283·V
	3	Filtro percolador	Ósmosis inversa	Ozonización	Intercambio iónico	0,8706·V
	4	Filtro percolador	Nanofiltración	Ozonización	Filtración GAC	0,9896·V

Tabla 6.1: Funciones de emisión de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ obtenidas para cada configuración

6.1.1. Análisis de estimadores de PCG

Para realizar un análisis de las funciones ambientales presentadas en la Tabla 6.1 se evalúa cada función en 1 m³. De esta manera, es posible comparar el aporte por categoría entre todas las funciones, observándose el aporte de emisiones de CO_{2eq} procedentes de *Emisiones directas*, *Transporte*, *Insumos* y *Consumo energético*. Esta última categoría se separa por tecnología.

Las estimaciones se comparan clasificándolas por configuración: descarga, irrigación, fuente y consumo. Esta descomposición se presenta gráficamente en la Figura 6.1.

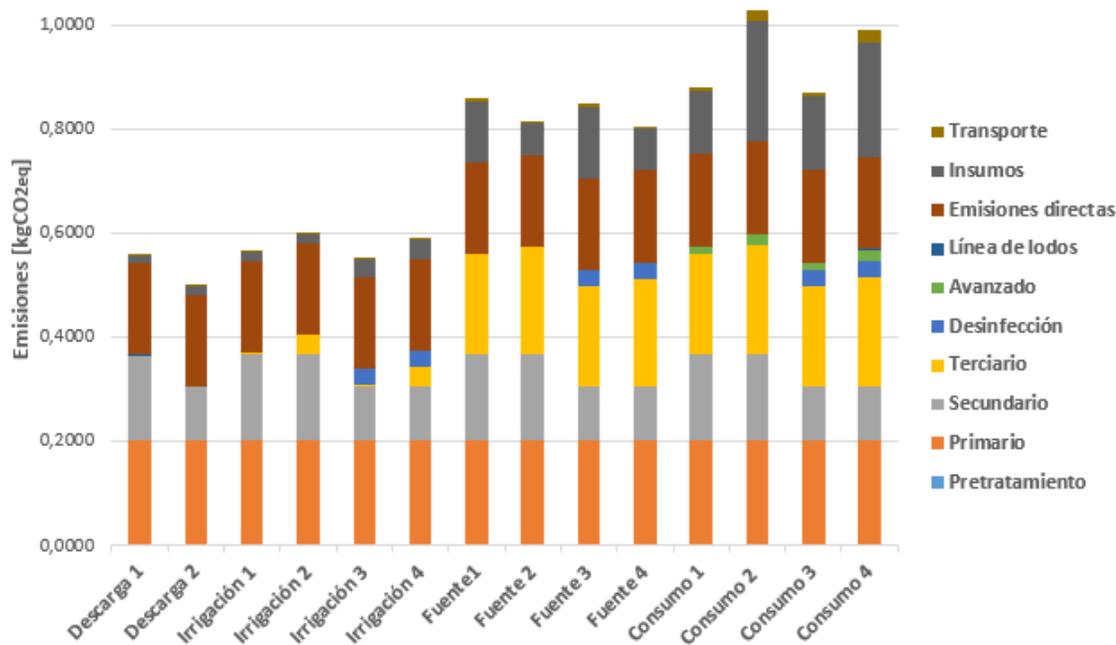


Figura 6.1: Comparación entre estimaciones ambientales ordenados por calidad.

Para comenzar, es importante analizar un supuesto transversal a la construcción de todas las funciones presentadas en la Figura 6.1 que corresponde a las pérdidas de agua entre el caudal de entrada y el flujo producido. Este supuesto asume pérdidas del 5% lo que afecta las emisiones que provienen del consumo eléctrico de los equipos ya que los factores de consumo están normalizados por metro cúbico de agua que ingresa a cada proceso. Para ejemplificar, producir 1 m³ de agua en la configuración descarga requiere un caudal de entrada de 1,05 m³ al proceso de pretratamiento (primera etapa del sistema), 1,04 m³ al tratamiento primario, 1,026 m³ al tratamiento secundario y 1,013 m³ a la desinfección. Por otro lado, suponiendo una pérdida menor, por ejemplo de un 3%, el flujo de agua necesario para producir 1 m³ de agua disminuye de 1,05 a 1,03 m³. Los flujos que entran a las etapas de tratamiento primario, secundario y desinfección serían respectivamente 1,023, 1,015 y 1,007 m³ de agua. De esta forma, variar la pérdida con la que se modela el sistema modifica el consumo eléctrico por etapas y finalmente, las emisiones que aporta esta categoría a la construcción de las funciones mediante una retroalimentación positiva (menores pérdidas implican menores emisiones).

También es importante reflexionar con respecto a la aplicación de factores de emisión entregados por Ecoinvent, tanto para los insumos del sistema como el transporte. Los factores utilizados representan valores y actividades consideradas como un promedio válido para todos los países del mundo ya que no existen factores específicos para Chile u otros países latinoamericanos que puedan tomarse como referencia, por lo que las emisiones generadas por transporte y producción de insumos corresponden solo a una aproximación y no a un resultado fidedigno, debido a las diferencias que existen entre la industria nacional y extranjera, tanto en cadena de suministros, manufactura, matriz energética y tecnología. Es más, para la estimación de emisiones por transporte se emplean factores cuantificados a partir de información europea (fabricación de camiones, componentes, gasolina) lo que finalmente afecta los aportes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

Con respecto al análisis específico de las estimaciones de PCG, en la Figura 6.1, se observa un crecimiento en la magnitud de las funciones al pasar desde la configuración descarga a irrigación ya que se añade una etapa de tratamiento terciario, que corresponde a una filtración o microfiltración, lo que contribuye a un incremento en el consumo energético de estos sistemas. Además, existe una mayor demanda de insumos usados, dado el uso de sustancias químicas para la limpieza de filtros en el proceso de microfiltrado.

Por otro lado, el cambio de tecnología desde las configuraciones irrigación a fuente se traduce en una modificación de las operaciones de tratamiento terciario, sustituyendo los equipos de filtración/microfiltración por un proceso de osmosis inversa (“Fuente 1” y “Fuente 3”) o membranas de nanofiltración (“Fuente 2” y “Fuente 4”), ambas tecnologías con un consumo energético superior en un orden de magnitud al consumo de un equipo de filtración, y cuatro veces mayor al de un equipo de microfiltrado, información que se reportó en la Tabla 5.3 y que finalmente se ve reflejado al observar gráficamente el aporte del tratamiento terciario en las estimaciones de calidad fuente. Asimismo, existe un aumento en el aporte de emisiones por insumos debido al uso de químicos en el lavado de membranas. En particular, las configuraciones “Fuente 1” y “Fuente 3” presentan las mayores contribuciones por insumos, considerando las altas dosis de hidróxido de sodio en el lavado químico de membranas de osmosis (ver Tabla 5.1).

Las plantas que adoptan las configuraciones calidad consumo presentan los mayores indicadores debido a la adición de etapas de tratamiento avanzado. En particular, la construcción de los arreglos “Consumo 1” y “Consumo 3” corresponde a la adición de un proceso de intercambio iónico a las configuraciones “Fuente 1” y “Fuente 3”. De forma análoga, los casos “Consumo 2” y “Consumo 4” son procesos similares a “Fuente 2” y “Fuente 4” que añaden una etapa de filtración GAC. La principal diferencia entre las estimaciones para consumo radican en el aporte de emisiones por demanda de insumos, en donde las configuraciones con filtración GAC duplican en aportes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ a los arreglos que incluyen intercambio iónico.

Es preciso señalar que no todas las plantas se encuentran igual de bien caracterizadas, ya que algunos procesos han sufrido modificaciones o supuestos importantes. En particular, el proceso de intercambio iónico fue simplificado al momento de modelarse en OpenLCA debido a la falta de información reportada con respecto al tipo de resina utilizadas, las capacidades de adsorción, factores de emisión y los insumos requeridos para su correcta implementación.

En consecuencia, el proceso solo toma en cuenta una resina catiónica cuya dosificación por metro cúbico y regeneración mediante el uso de ácido clorhídrico se reporta en bibliografía [33]. Esta decisión se respalda en que las características de la resina junto con la cantidad utilizada cumplen con alcanzar concentraciones de arsénico y plomo acordes a los estándares de la Unión Europea [51], concentraciones menores a los valores establecidos por la norma de consumo chilena, lo que puede tener efecto en una sobreestimación de la resina necesaria requerida por las configuraciones “Consumo 1” y “Consumo 3”. Por otro lado, al no tener más información del tipo o nombre específico de la resina utilizada en el estudio citado, se trabaja con un factor de emisión para una resina catiónica genérica, valor entregado por la base de datos Ecoinvent 3.3 en OpenLCA, por lo que las emisiones asociadas al uso, producción y regeneración de resina pueden estar subestimadas, hecho que podría compensar la sobreestimación discutida previamente. Finalmente, se considera necesario ahondar en el diseño de esta operación de tratamiento dada la incertidumbre tras su diseño. Una alternativa es a través de mediciones de una resina particular y conocida en distintas plantas nacionales, con el fin de obtener una estimación de mayor confiabilidad en cuánto a dosificación de este insumo.

Otro de los elementos que afecta de forma transversal a todas las configuraciones corresponde al diseño de la línea de lodos y la cuantificación de emisiones de N_2O provenientes de la línea de agua. En específico, el tratamiento de lodos se somete a simplificaciones, tales como despreciar la producción y tratamiento de lodos primarios (provenientes del tratamiento primario de la línea de agua). Además, la línea de lodos se reduce a tres operaciones unitarias y sus respectivas emisiones se calculan en base a flujos estimados a partir de un caso específico, como lo es el sistema de tratamiento de lodos de la *Planta de Tratamiento La Farfana*, asumiendo que el material sólido presente en cada uno los flujos que componen el sistema es equivalente a un valor promedio extraído desde bibliografía. En cuánto a las emisiones de N_2O de la línea de agua, estas se cuantifican a partir de una expresión empírica como lo es la Ecuación 5.1 pero que utiliza como datos de entrada la concentración de nitrógeno (TKN) del afluente de la *Planta de Tratamiento La Farfana*, información que data desde el año 2017. Utilizar esta concentración permite obtener una estimación de la emisiones provenientes de la línea de agua bajo un contexto atingente a la zona geográfica en que se enmarca este trabajo (RM). Aún así, no se debe olvidar que la información empleada está desactualizada y que la composición del afluente que ingresa a la *Planta de Tratamiento La Farfana* puede alejarse de los flujos que ingresan a las PTA propuestas en este trabajo.

A partir de lo expuesto anteriormente, es evidente que la metodología empleada para obtener las emisiones de la línea de lodos y línea de agua puede perfeccionarse. En el caso de la línea de lodos se propone una construcción completa del sistema de tratamiento de lodos que incluya los efluentes provenientes del tratamiento primario y por lo tanto, contabilizar las emisiones que provienen de los lodos primarios. También se sugiere recolectar información sobre los sistemas de tratamiento de lodos y la composición de los flujos de lodos de diferentes PTA de la RM con el fin de obtener información más afín al diseño de las configuraciones de este trabajo. De forma similar, se recomienda utilizar mediciones de TKN realizadas en los afluentes de las principales PTA de la RM durante los últimos doce meses.

Si bien la construcción de estas funciones se basan en resultados originados a partir de estimaciones o bibliografía ajena al contexto nacional, estos resultados cumplen con ser una

aproximación inicial para un ACV en nuevas plantas de tratamiento en Chile. Además, la toma de decisiones y uso de información internacional permite reflexionar con respecto a la necesidad de construir una base de datos o inventario a nivel país, con el fin de facilitar, potenciar y acercar aún más a la realidad la aplicación de un ACV en la industria chilena en general.

6.1.2. Comparación con casos bibliográficos

En esta subsección se comparan los indicadores obtenidos para las configuraciones de calidad consumo con indicadores de plantas de producción de agua potable reportados en bibliografía. La elección de comparar exclusivamente este tipo de configuraciones radica en que agrupan el mayor número de etapas de tratamiento y por ende, los aportes más altos. En la Tabla 6.2 se resume información pertinente de estos estudios.

La agrupación de los indicadores al momento de comparar se realiza en base a los flujos de agua producidos por cada planta (véase Sección 1.1.3). En la Figura 6.2 se comparan los indicadores para plantas pequeñas mientras que en la Figura 6.3 se presenta la misma información para plantas grandes.

Autor	Flujo [m ³ /d]	Resumen	Referencia
Bonton et al.	2.000	Corresponde a una planta de tratamiento por filtración GAC ubicada en Canadá.	[6]
Van der Laan et al.	6.575	ACV para dos configuraciones de potabilización de agua en Holanda; un proceso mediante el uso de membranas (Holanda 1) un proceso convencional con intercambio iónico y desinfección UV (Holanda 2).	[33]
Ortiz et al.	+520.000	Plantas de tratamiento de agua ubicadas en el norte de Colombia que en su conjunto generan agua potable mediante un proceso convencional con un tratamiento terciario de filtrado.	[7]
Garfí et al.	432.000	El estudio se lleva a cabo en España y consiste en la potabilización de agua bajo dos escenarios: un proceso de tratamiento convencional (España 1) y el mismo proceso con una etapa de osmosis inversa más remineralización (España 2).	[52]

Tabla 6.2: Resumen de los estudios utilizados como referencia comparativa.

De la Figura 6.2 se observa que las estimaciones de PCG para “Consumo 3” y “Consumo 4” son estimaciones dentro del orden de magnitud reportado por literatura. Es más, el caso de “Consumo 3”, cuya configuración presenta una osmosis inversa e intercambio iónico se asemeja al valor reportado por “Holanda 1”, planta de potabilización holandesa que emplea dentro de su proceso etapas de separación por membranas e intercambio iónico. Para “Consumo 4”, el punto de comparación más cercano en cuanto a configuración viene dado por el indicador “Canadá”, observándose una diferencia clara entre ambos. Una de las razones que pueden contribuir a esta desigualdad radica en que el proceso reportado por literatura presenta como tratamiento terciario una filtración convencional, operación que posee un consumo energético y de insumos inferior a la separación por nanofiltración utilizada en la construcción de “Consumo 4”.

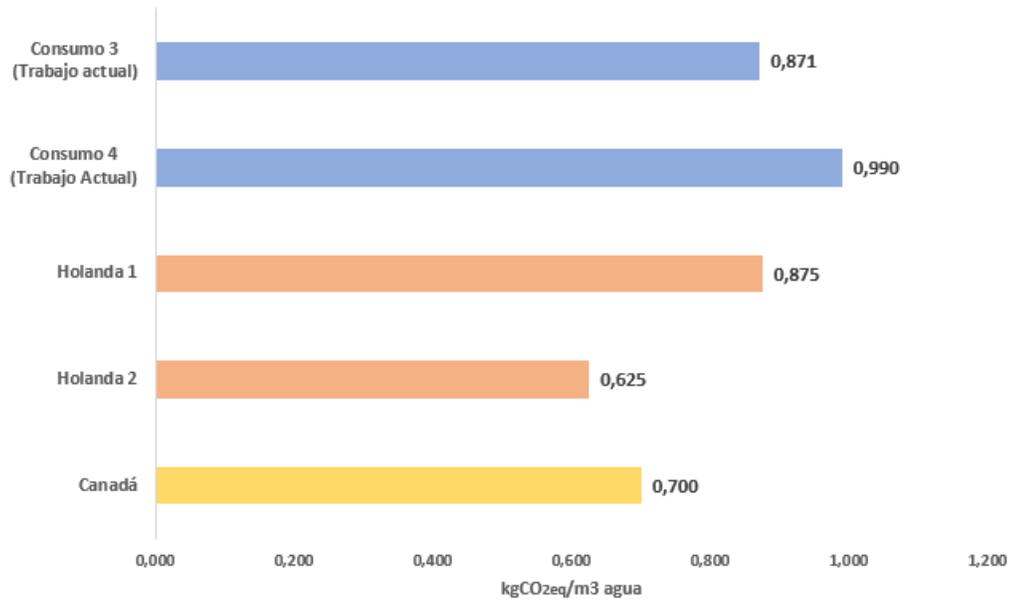


Figura 6.2: Comparación entre estimaciones de PCG para plantas pequeñas de producción de agua potable.

En la Figura 6.3 si bien se observan diferencias con respecto a los indicadores de tratamiento referenciados, “Consumo 1” y “Consumo 2” se ubican en un punto intermedio entre los indicadores referenciados, situación que tiene sentido considerando que tanto los casos “Colombia” y “España 1” se constituyen de procesos de potabilización estándar mientras que el escenario “España 2” presenta un proceso de separación por membrana junto a un tratamiento avanzado.

Por último, tanto los indicadores de consumo como cualquiera de las funciones obtenidas en este trabajo pueden presentar un grado de sobrestimación con respecto a los indicadores extraídos de bibliografía. Este fenómeno se debe a que una parte importante de las emisiones de CO₂eq proviene desde las emisiones de N₂O de la línea de agua, que para el caso de las funciones obtenidas en este trabajo se estimó mediante la Ecuación 5.1, expresión empírica que toma en cuenta emisiones de N₂O provenientes de distintas fuentes (residuos industriales, domiciliarios, procesos de tratamiento biológico). Por otra parte, varios de los estudios que cuantifican emisiones de GEI se basan en organizaciones como el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), instituciones que utilizan factores de emisión construidos a partir del nitrógeno presente en el consumo proteico de la población, desestimando otras fuentes de nitrógeno.

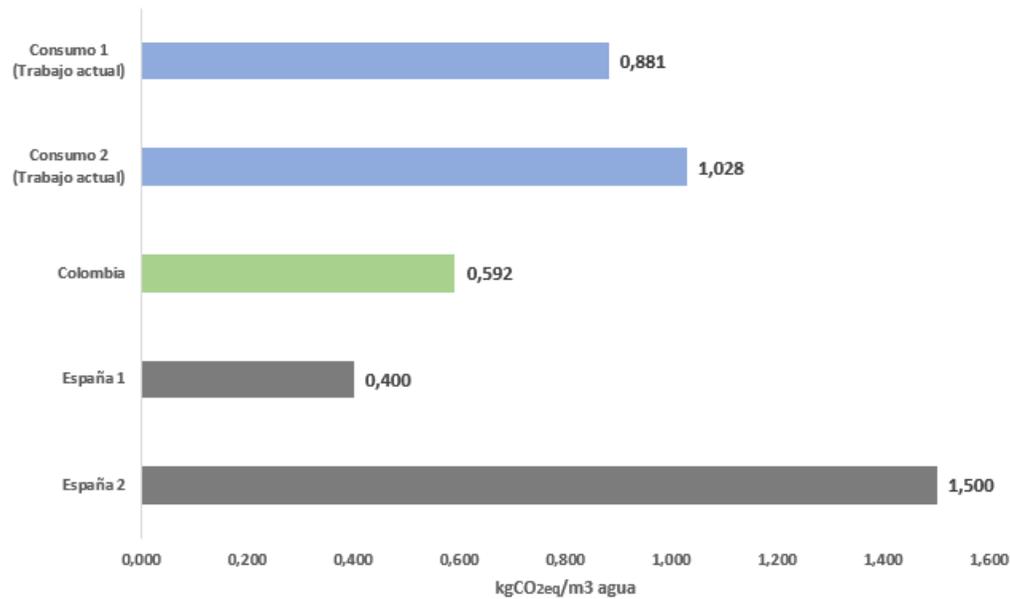


Figura 6.3: Comparación entre estimaciones de PCG para plantas grandes de producción de agua potable.

6.2. Elección de configuraciones para los escenarios

Tal como se presentó en la Tabla 1.3, se observa que los escenarios base y óptimo están conformados por una o más configuraciones de tratamiento. El escenario base se compone por dos plantas de tratamiento grandes, por lo tanto, ambas plantas poseen un único set de tecnologías, “Descarga 1”. En cuanto al escenario óptimo, este se constituye de ocho plantas de tratamiento pequeñas, cuatro de calidad irrigación y cuatro de calidad consumo, abriendo la posibilidad de combinar los arreglos “Irrigación ” e “Irrigación 4” con los sets “Consumo 3” y “Consumo 4”. En las próximas subsecciones se presentarán las razones al decidir entre una combinación u otra.

6.2.1. Distribucion de emisiones por configuración

Con el fin de cuantificar las emisiones de las configuraciones involucradas en el escenario óptimo, se realiza una evaluación ambiental con el software OpenLCA.

En la Figura 6.4 y Figura 6.5 se presentan las emisiones totales de CO₂eq de las configuraciones “Irrigación 3” e “Irrigación 4” para el escenario óptimo, junto a la distribuciones porcentual de emisiones de cada uno. Precisar que las emisiones se cuantifican evaluando cada uno de los flujos presentados en la Tabla 1.3 para cada tecnología y sumando sus emisiones totales. Esta metodología es idéntica en las configuraciones ”Consumo 3“ y ”Consumo 4“.

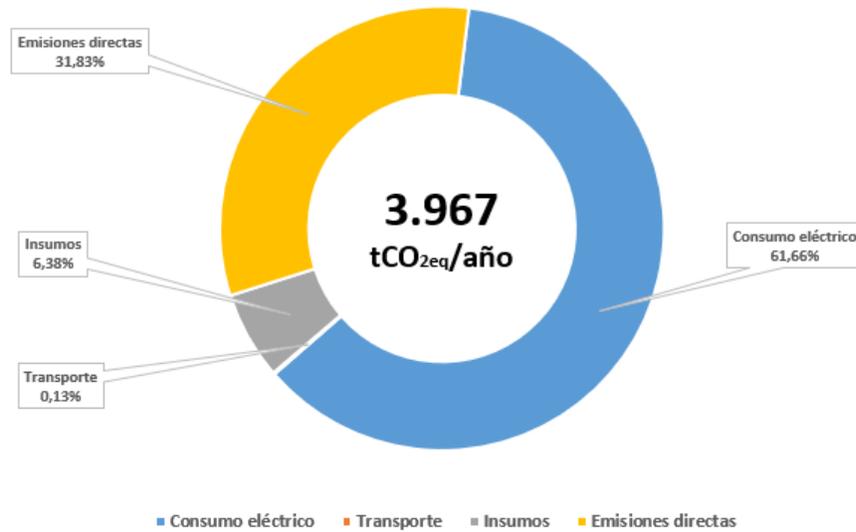


Figura 6.4: Gráfico de distribución de emisiones configuración “Irrigación 3” para el escenario óptimo.

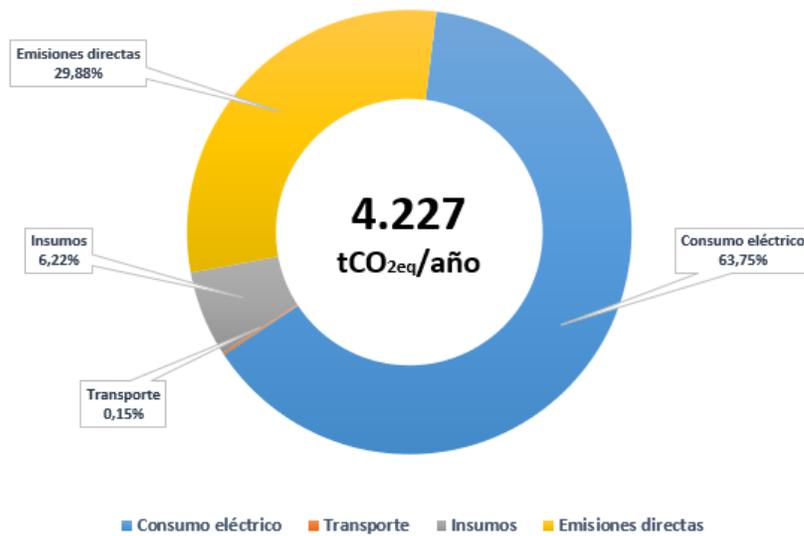


Figura 6.5: Gráfico de distribución de emisiones configuración “Irrigación 4” para el escenario óptimo.

Al comparar los resultados presentados en las Figuras 6.4 y 6.5 se observa que si bien la distribución de emisiones es similar en ambas configuraciones, las emisiones totales de las plantas tipo “Irrigación 3” son levemente inferiores al conjunto de plantas “Irrigación 4”, aproximadamente en 300 tCO_{2eq} por año.

En la Tabla 6.3 se presenta la contribución de CO_{2eq} por categoría para cada caso. Notar que la diferencia de emisiones coincide con lo presentado en la Sección 6.1.1, pues “Irrigación

4” posee un tratamiento terciario por microfiltrado que consume más energía e insumos que el filtrado convencional de “Irrigación 3”. Así pues, se elige “Irrigación 3” como primera tecnología aplicada escenario óptimo.

	Escenario óptimo	
	Irrigación 3	Irrigación 4
Emisiones por transporte [tCO ₂ /a]	5,12	6,45
Emisiones por insumos [tCO ₂ /a]	253,01	262,72
Emisiones directas [tCO ₂ /a]	1.263,00	1.263,00
Emisiones por consumo energético [tCO ₂ /a]	2.446,00	2.694,00

Tabla 6.3: Comparación de las emisiones por categoría para las configuraciones “Irrigación 3” e “Irrigación 4” evaluadas en el escenario óptimo.

Siguiendo un análisis similar, la Figura 6.6 y Figura 6.7 entregan información relacionada con las emisiones totales de las plantas “Consumo 3” y “Consumo 4”, con una diferencia cercana de 40.000 tCO_{2eq} por año en favor de las plantas que adoptan la configuración “Consumo 3”. Además, se observa una modificación en la distribución de los emisores de CO_{2eq}, principalmente en la influencia de los insumos y su transporte.

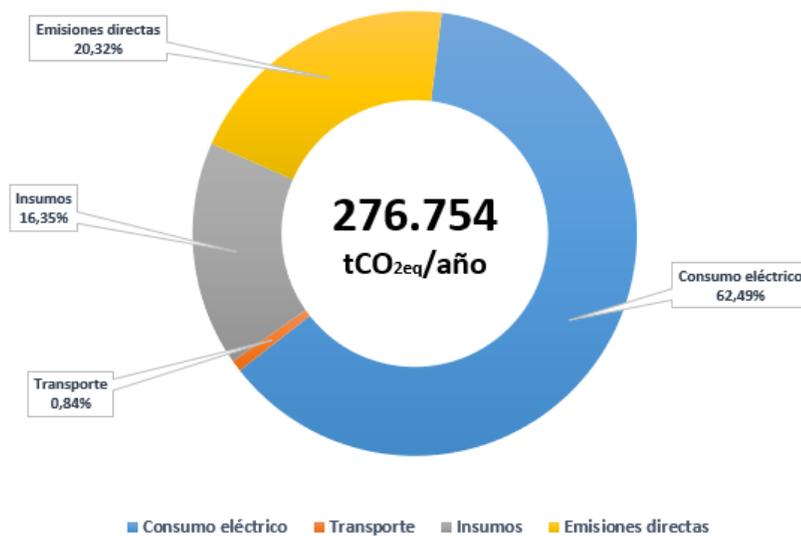


Figura 6.6: Gráfico de distribución de emisiones configuración “Consumo 3” para el escenario óptimo.

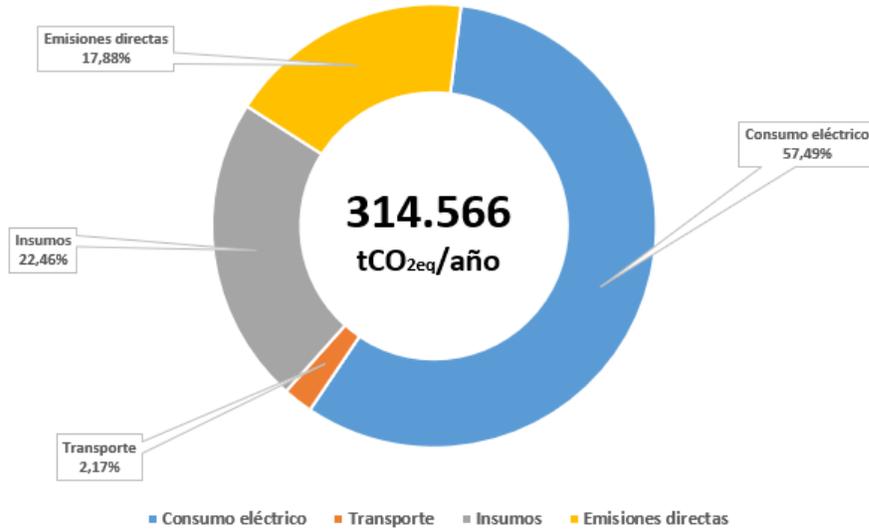


Figura 6.7: Gráfico de distribución de emisiones configuración “Consumo 4” para el escenario óptimo.

En la Tabla 6.4 se presenta la contribución de CO_{2eq} por categoría para cada caso. Nuevamente, la diferencia de emisiones coincide con lo presentado en la Sección 6.1.1, con la influencia ligada al aumento en cantidad de insumos entre una tecnología y otra. De esta manera, se elige “Consumo 3” como tecnología aplicada a las plantas de calidad consumo del escenario óptimo.

	Escenario óptimo	
	Consumo 3	Consumo 4
Emisiones por transporte [tCO ₂ /a]	2.330	6.829
Emisiones por insumos [tCO ₂ /a]	45.243	70.645
Emisiones directas [tCO ₂ /a]	56.241	56.241
Emisiones por consumo energético [tCO ₂ /a]	172.939	180.848

Tabla 6.4: Comparación de las emisiones por categoría para las configuraciones “Consumo 3” y “Consumo 4” evaluadas en el escenario óptimo.

Teniendo en cuenta estos resultados se decide continuar con escenario óptimo formado por cuatro plantas de tratamiento “Irrigación 3” y cuatro plantas de tratamiento “Consumo 3”. El análisis comparativo de este escenario óptimo con respecto al escenario base se lleva a cabo en la Sección 6.3.

6.2.2. Emisiones por equipos

Como se presentó en la sección anterior, en todas las configuraciones la mayor contribución de emisiones proviene del consumo eléctrico de los equipos. Con el fin de realizar un análisis

más completo, se presenta la distribución de emisiones por equipo mediante un estudio comparativo.

En la Figura 6.8 se comparan las emisiones de “Irrigación 3” e “Irrigación 4”, considerando los equipos de la línea de agua y agrupando las emisiones de los equipos de la línea de lodos en una categoría debido a su escaso aporte. A partir de los gráficos se desprende que las emisiones por tratamiento primario y secundario (filtro percolador) son los equipos que más contribuyen, dado su alto consumo eléctrico con respecto al resto de tecnologías. La mayoría de las clases no presentan modificación entre configuraciones, a excepción del tratamiento terciario que aumenta sus emisiones de “Irrigación 3” a “Irrigación 4” dada la sustitución del filtro convencional por una membrana de microfiltración de mayor demanda energética por volumen de agua ($0,1100 \text{ kWh/m}^3$ contra $0,0095 \text{ kWh/m}^3$). Todas las eficiencias energéticas se reportan en la Tabla 5.3.

En la Figura 6.9 se comparan las emisiones de “Consumo 3” y “Consumo 4”. Los principales emisores son las etapas de tratamiento primario y terciario, con aportes similares en magnitud. Como se explicó en la Sección 4.5, el tratamiento terciario se conforma por una membrana de microfiltración que entrega un pretratamiento al flujo de agua que ingresa a las membranas de osmosis inversa o nanofiltración (dependiendo de la configuración). Las tecnologías de nanofiltración y osmosis poseen factores de consumo cercanos a los $0,5 \text{ kWh/m}^3$, si a esto se le suma el consumo de $0,11 \text{ kWh/m}^3$ del microfiltrado, la etapa completa bordea una demanda energética aproximada de $0,6 \text{ kWh/m}^3$ magnitud similar al consumo total del tratamiento primario ($0,565 \text{ kWh/m}^3$). Todas las eficiencias energéticas se reportan en la Tabla 5.3.

Al examinar las diferencias de emisiones por equipo, se observa que las únicas modificaciones se dan en el tratamiento terciario y avanzado, ya que al pasar de “Consumo 3” a “Consumo 4” se reemplazan los procesos de osmosis inversa por nanofiltración e intercambio iónico por filtración GAC, en donde la mayor diferencia está en los procesos de tratamiento avanzado, pues la filtración GAC posee un consumo eléctrico 1,75 veces mayor que el intercambio iónico.

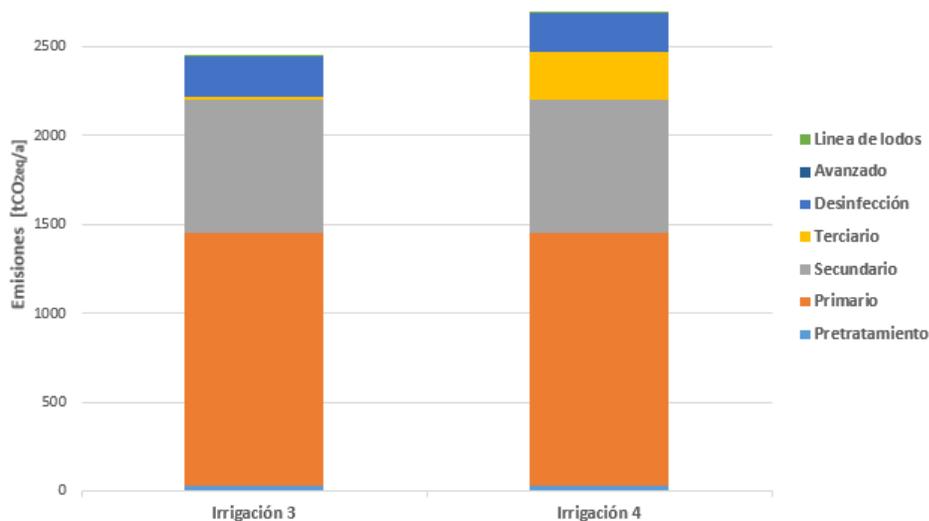


Figura 6.8: Distribución de emisiones por equipos para casos irrigación.

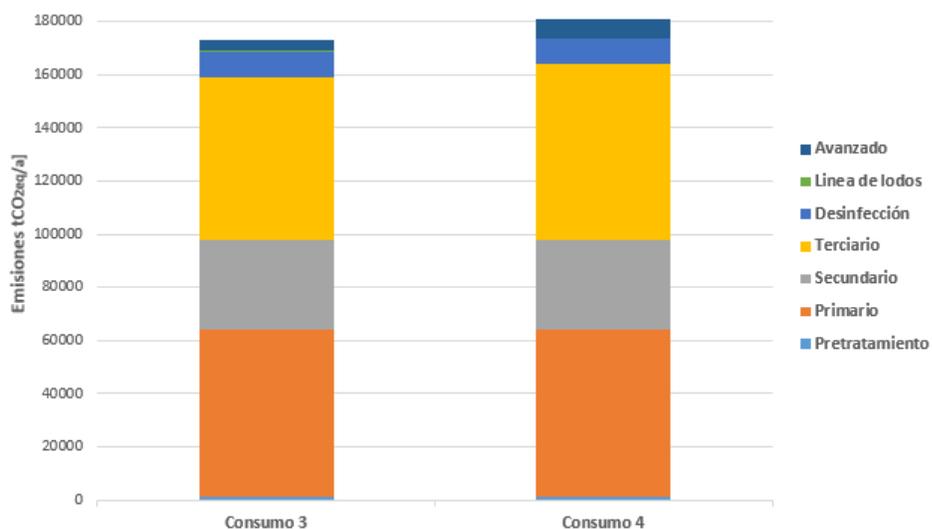


Figura 6.9: Distribución de emisiones por equipos para casos de consumo.

6.3. Evaluación de escenarios

En este apartado se continúa con la evaluación ambiental del escenario base y del escenario óptimo. Recalcar que desde esta sección en adelante el escenario óptimo evaluado corresponde a una combinación lineal de dos funciones tal como se detalló al final de la Sección 6.2.

6.3.1. Distribución de emisiones por escenarios

En la Figura 6.10 y Figura 6.11 se presenta la distribución porcentual de las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ asociadas a los escenarios base y óptimo.

En particular, en la Figura 6.10 se observa que el escenario base emite un flujo aproximado de 150.500 $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ por año. Las principales fuentes de emisión corresponden al consumo energético de los equipos, con un 65,52 % y las emisiones directas (asociadas a la generación de N_2O y CH_4) con un 31,43 %.

Por otra parte, en la Figura 6.11 se observa que el escenario óptimo emite un flujo aproximado de 281.000 $\text{tCO}_{2\text{eq}}$ por año. Nuevamente, las principales fuentes de emisión son el consumo energético de los equipos, con un 62,48 % y las emisiones directas con un 20,48 %.

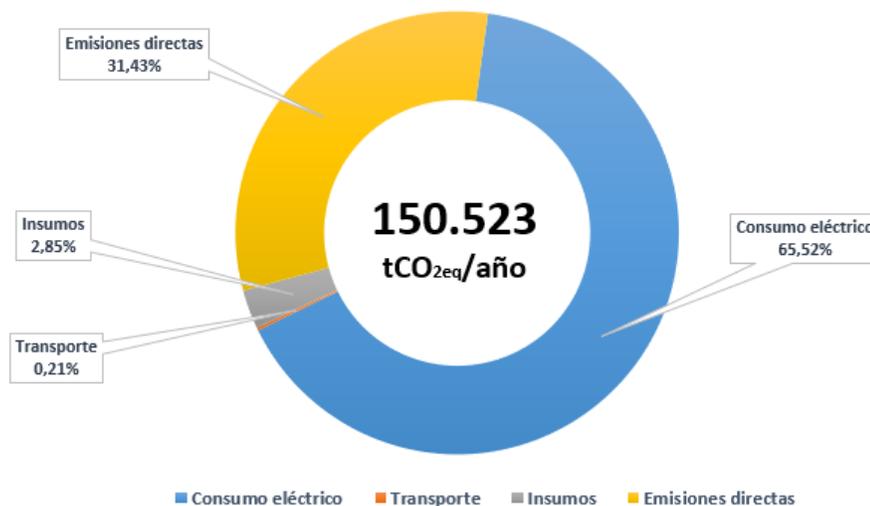


Figura 6.10: Gráfico de distribución de emisiones escenario base.

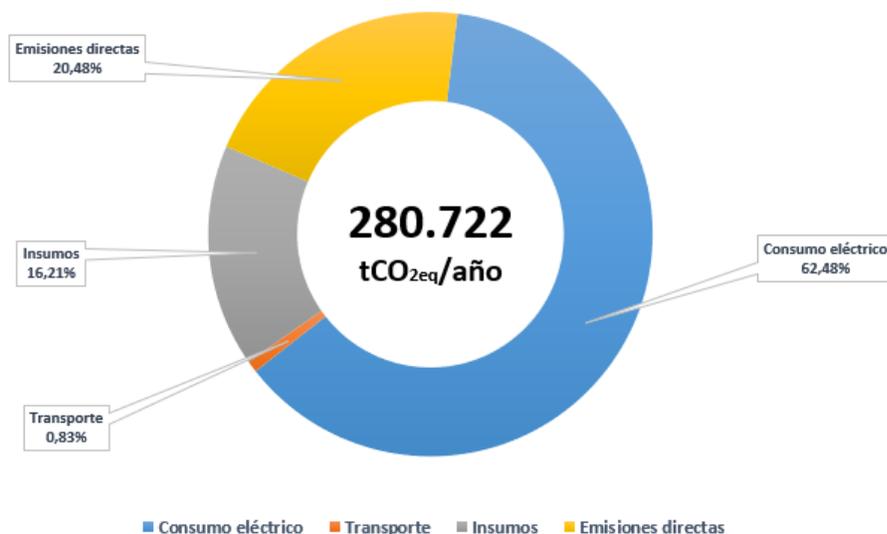


Figura 6.11: Gráfico de distribución de emisiones escenario óptimo.

Al comparar las Figuras 6.10 y 6.11, existe un incremento aproximado de 130.000 tCO_{2eq} en las emisiones anuales. Este resultado se condice con lo esperado ya que el escenario óptimo posee un mayor número de plantas de tratamiento (ocho contra dos) que incluyen nuevas tecnologías como lo son el tratamiento terciario, avanzado y ozonización en lugar de cloración. Estas etapas adicionales implican un mayor consumo energético total del sistema y un aumento de la cantidad de insumos utilizados en los procesos de separación por membrana o en la reposición de la resina empleada durante el tratamiento avanzado. En consecuencia, una mayor demanda de insumos genera un incremento de las emisiones provenientes del transporte, debido a que será necesario trasladar una mayor masa de sustancias químicas. También es importante destacar que si bien el consumo total de agua del escenario óptimo es menor gracias al reciclaje del recurso, las emisiones directas provenientes del sistema incrementan debido a que estas dependen exclusivamente del flujo de agua con presencia de nitrógeno que ingresa a cada planta de tratamiento (agua reciclada) y no al sistema completo.

En la Tabla 6.5 se entrega un resumen comparativo entre ambos casos de estudio.

	Escenario	
	Base	Óptimo
Flujo de total que ingresa al sistema [m ³ /a]	782.673.062	463.695.277
Emisiones por transporte [tCO _{2eq} /a]	309	2.335
Emisiones por insumos [tCO _{2eq} /a]	4.283	45.496
Emisiones directas [tCO _{2eq} /a]	47.308	57.505
Emisiones por consumo energético [tCO _{2eq} /a]	98.623	175.385

Tabla 6.5: Comparación de las emisiones por categoría para los escenarios base y óptimo.

Notar que el crecimiento de las emisiones por consumo energético en el escenario óptimo podría estar sub o sobreestimado dado que no se toma en cuenta que las tecnologías de tratamiento pueden presentar variaciones en sus eficiencias energéticas (consumo energético

por volumen de agua) frente a distintos rangos de operación del caudal de entrada. Para los cálculos correspondientes en OpenLCA, se trabaja con eficiencias energéticas promedio fijas, valores que no necesariamente coinciden con lo que se reporta en una planta de tratamiento real, bajo condiciones de operación similares a las propuestas en el escenario óptimo. Además, el hecho de considerar una pérdida de agua del 5% al momento de modelar el sistema es un supuesto que repercute en las emisiones provenientes del consumo eléctrico de los equipos ya que disminuir o incrementar estas pérdidas modifica el gasto energético total mediante una retroalimentación positiva, tal como se discute en la Sección 6.1.1.

Otra categoría de interés en el escenario óptimo corresponde al transporte de insumos. Las emisiones calculadas para esta categoría pueden estar subestimadas ya que no contabiliza el transporte del ozono, insumo que para efecto de este trabajo se asume como un producto generado en las dependencias de cada planta de tratamiento que lo utilice, por lo que no se requiere su traslado desde un proveedor externo.

6.3.2. Emisiones por equipo

De forma análoga a lo presentado en la Sección 6.2.2, se realiza un análisis detallado de las emisiones por consumo energético.

En la Figura 6.12 se presenta una comparación gráfica entre la distribución de emisiones por equipo entre ambos escenarios. El escenario óptimo emite 80.000 tCO_{2eq} más que el escenario base por año. Las principales diferencias radican en la distribución de las emisiones por tratamiento secundario y el aporte asociado a la inclusión de etapas de tratamiento terciario y avanzado.

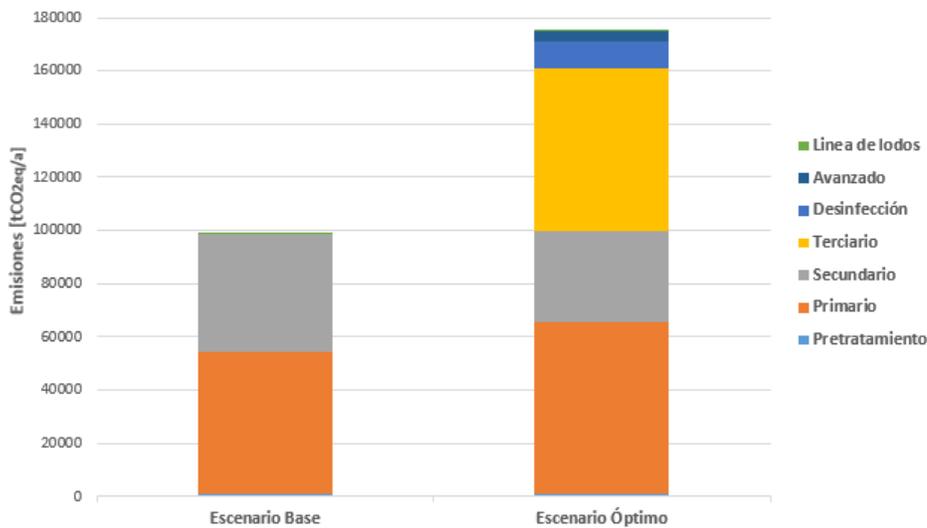


Figura 6.12: Distribución de emisiones por equipos para ambos escenarios.

El aporte del tratamiento terciario es el principal añadido del sistema, con cerca de 60.000 tCO_{2eq} de las 80.000 tCO_{2eq} totales (75%). En segundo plano están las emisiones por

desinfección, considerando que todas las plantas del escenario óptimo trabajan con equipos de ozonización cuyos factores de consumo son dos órdenes de magnitud superior que los factores referidos a la desinfección por cloro en el escenario base.

Un resumen de los aumentos de emisiones por equipo se presenta en la Tabla 6.6.

	Escenario	
	Base	Óptimo
Pretratamiento [tCO _{2eq} /a]	1.001	1.217
Tratamiento primario [tCO _{2eq} /a]	53.199	64.555
Tratamiento secundario [tCO _{2eq} /a]	44.248	34.025
Tratamiento terciario [tCO _{2eq} /a]	0	61.324
Tratamiento avanzado [tCO _{2eq} /a]	0	4.096
Desinfección [tCO _{2eq} /a]	24	9.986
Línea de lodos [tCO _{2eq} /a]	151	183

Tabla 6.6: Comparación de las emisiones más importantes para los escenarios base y óptimo.

A modo de reflexión final, los resultados de la evaluación ambiental de ambos escenarios cumple con el propósito de ser un acercamiento a los resultados esperados a la implementación de las funciones de estimación de PCG en el problema de optimización de la red de tratamiento de agua de la RM.

Capítulo 7

Conclusiones

La escasez hídrica es un fenómeno latente en la actualidad, cuyo principal causante es el Cambio Climático. Algunas alternativas para mitigar estos eventos son el reciclaje de agua y disminuir las emisiones de contaminantes. En el plano local, estas soluciones pueden implementarse mediante el diseño de una red de tratamiento optimizada que permita el reciclaje del agua mediante la construcción de nuevas plantas de tratamiento con el fin de optimizar los costes económicos y cargas ambientales.

Para la optimización ambiental, se construyen catorce funciones de estimación de PCG que permiten cuantificar las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ de nuevas plantas de tratamiento de agua. Estas funciones se elaboran mediante un ACV a las distintas configuraciones tecnológicas aplicables, trabajo que se realiza diseñando los sistemas de tratamiento de agua en el software OpenLCA.

Entre los supuestos más fuertes que definen la elaboración de las funciones se encuentran: las pérdidas de agua del sistema global, la estimación de las emisiones de N_2O mediante la ecuación de Chandran y el uso de información internacional extraída de la base de datos Ecoinvent. Estos supuestos inciden en las estimaciones de PCG, afectando los aportes de las categorías consumo eléctrico, emisiones directas, transporte e insumos.

Las estimaciones de PCG obtenidas siguen una tendencia creciente al agregar etapas desde una configuración a otra. Los principales aportes de emisiones provienen de las etapas de tratamiento primario, secundario y emisiones directas. En los casos particulares de las configuraciones fuente y consumo se observan aportes relevantes provenientes desde el tratamiento terciario (nanofiltración y osmosis inversa) y por los insumos utilizados. Los resultados de esta sección arrojan como las mayores estimaciones de PCG a las plantas de calidad consumo, vale decir, “Consumo 1”, “Consumo 2”, “Consumo 3” y “Consumo 4”. Los valores asociados a cada configuración son 0,881, 1,028, 0,871 y 0,990 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ por m^3 de agua producida respectivamente. Estos resultados se comparan con estimaciones bibliográficas, observándose que se ajustan dentro del orden de magnitud y rangos reportados en literatura.

La evaluación de escenarios se aplica sobre un escenario base conformado por dos plantas de configuración “Descarga 1” y un escenario óptimo constituido por cuatro PTA “Irrigación 3” y

cuatro PTA “Consumo 3”. El resultado de la evaluación arroja flujos de emisiones de 150.000 y 280.000 tCO_{2eq} por año para los casos base y óptimo respectivamente. La distribución de emisiones en ambos casos presenta como principal emisor el consumo energético con un aporte de aproximadamente 99.000 tCO_{2eq} al año para el escenario base y 175.000 tCO_{2eq} al año para el escenario óptimo. En segundo plano, se encuentran las emisiones directas con un aporte de alrededor de 47.000 tCO_{2eq} por año y 58.000 tCO_{2eq} por año para los escenarios base y óptimo respectivamente.

Por último, se concluye que la falta de una base de datos para ACV ligada al ámbito nacional es una de las principales dificultades al momento de realizar este trabajo. Varios procesos y sus componentes (insumos, factores de emisión) que forman parte de la elaboración de las funciones corresponden a información internacional, lo que resta exactitud a los resultados. La construcción de un inventario nacional para el ACV permitiría perfeccionar y acercar aún más los resultados obtenidos en este trabajo al contexto chileno.

Bibliografía

- [1] United Nations. Water and Climate Change. [en línea]. <<http://www.unwater.org/water-facts/climate-change/>>. [consulta: 20 febrero 2019].
- [2] Ramirez, Felipe. ¿Cómo puede enfrentar nuestro país la escasez hídrica?. universidad de chile. [en línea] <<http://www.uchile.cl/noticias/143666/como-puede-enfrentar-nuestro-pais-la-escasez-hidrica>>. [consulta: 20 febrero 2019].
- [3] Díaz, Felipe. Progress report: Sustainable and Resilient Water Networks: a Process Systems Approach for Climate Change Adaptation. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2018.
- [4] Corominas, L., et al. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art. *Water Research* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.049>.
- [5] Raghuvanshi, S et al. 2017. Waste water treatment plant life cycle assessment: treatment process to reuse of water. En: The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Department of Mechanical Engineering, Department on Chemical Engineering. Birla Institute of Technology Science, Pilani, Rajasthan, India BITS Pilani, Rajasthan. 2017.
- [6] Bonton, A et al. 2011. Comparative life cycle assessment of water treatment plants. Elsevier B.V. *Desalination* 284 (2012) 42–54.
- [7] Ortiz, O et al. 2016. Life cycle assessment of four potable water treatment plants in northeastern Colombia. *Ambiente Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*. Vol. 11 n. 2 Taubaté Abr/Jun 2016.
- [8] Kantor, I et al. 2015. Generalized mixed-integer nonlinear programming modeling of eco-industrial networks to reduce cost and emissions. *Journal of Cleaner Production* 99 (2015) 160e176.
- [9] International Organization for Standardization. 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework: ISO 14040:2006.
- [10] International Organization for Standardization. 2006. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines: ISO 14044:2006.
- [11] Ecoinvent - the world's most consistent transparent life

- cycle inventory database. [en línea]. <<https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-33/ecoinvent-33.html>>[Consulta: 4 julio 2019].
- [12] OpenLCA – The Life Cycle and Sustainability Modeling Suite. [en línea]. <<http://www.openlca.org/openlca/>>[Consulta: 4 julio 2019].
- [13] Scientific Applications International Corporation (SAIC). Life cycle assessment: Principles and Practice. Cincinnati, Ohio, 2006.
- [14] 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: 27 febrero 2019].
- [15] Menoufi, Karim. Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art. Tesis (Màster en Ciències Aplicades a l'Enginyeria). Lleida, España. Universitat de Lleida Escola Politècnica Superior, 2011.
- [16] Federal Provincial Territorial Commite on Drinking Water. From source to tap: The multi-barrier approach to safe drinking water, 2002.
- [17] Fondriest Environmental, Inc. Turbidity, Total Suspended Solids Water Clarity. [en línea]. <<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>>[Consulta: 12 marzo 2019].
- [18] BCN, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Hidrografía Región Metropolitana de Santiago. [en línea]. <<https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region13/hidrografia.htm>>[Consulta: 12 marzo 2019].
- [19] Rivera, J. 2011. Evaluacion de la materia orgánica en el río Frío soportada en el QUAL2K. Dyna, año 78, Nro. 169, pp. 131-139 (2011).
- [20] Mohsen, Arbabi, S., Hemati, M., Amiri. Removal of lead ions from industrial wastewater: A review of removal methods. International Journal of Epidemiologic Research, 2015.
- [21] Cooperativa, El agua potable de 14 comunas de Chile no cumple con la norma sanitaria. [en línea]. <<https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/servicios-basicos/agua/el-agua-potable-de-14-comunas-de-chile-no-cumple-con-la-norma-sanitaria/2016-02-15/070858.html>>[Consulta: 12 marzo 2019].
- [22] Spellman, F. Water and Wastewater Treatment Plant Operations, 3 edición, 923p, 2014.
- [23] Rodriguez, J et al. 2016. Tratamiento biológico del agua residual doméstica: Evaluación del proceso en una planta en la ciudad de Mexicali. En libro Avances en investigación ambiental en la UABC. Conociendo nuestro ambiente. 2016, 1 Edición. Universidad Autonoma de Baja California.
- [24] Noyola, A et al. 2013. Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas. Universidad Nacional

Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.

- [25] Dardel, F. Contaminant El intercambio iónico, principios básicos. [en línea]. <<http://dardel.info/IX/IX-Intro-ES.html>>[Consulta: 13 marzo 2019].
- [26] Understanding Global Warming Potentials. [en línea]. <<https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>>[Consulta: 2 abril 2019].
- [27] Aguas Andinas S.A., Determinación de Tarifas 2015 – 2020 Estudio Tarifario Definitivo. 2015.
- [28] Shon, H et al. 2013. Nanofiltration for waterand wastewater treatment a mini review. Drinking Water Engineering and Science, 6(1): 47-53.
- [29] Jamaly, S et al. 2014. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. Desalination, 354: 30-38.
- [30] Biswas, W. Life Cycle Assessment of Seawater Desalinization in Western Australia. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Economics and Management Engineering Vol 3, Number 8, 2009.
- [31] Choi, Y et al. Determination of Optimum Coagulants (Ferric Chloride and Alum) for Arsenic and Turbidity Removal by Coagulation. Journal of the Environmental Sciences, 931-940, 2010.
- [32] Plappally, A., Lienhard, J. Energy requirements for waterproduction, treatment,end use,reclamation, and disposal. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 4818–4848, 2012.
- [33] Van der Laan, H Zipp, M. Life Cycle Assessment of two drinking water production schemes. National Institute for Public Health and the Environment, 2015.
- [34] Oxychile. Productos y Servicios. [en línea]. <<https://www.oxychile.cl/opensite20073.aspx> > [Consulta : 11abril2019].
- [35] Aguas Andinas Ecoriles S.A., Condiciones generales de compra.
- [36] Indura S.A. Grupo Air Products. Centro de Servicio al Cliente. Manual de gases. 2015.
- [37] Afuasin S.A. Una empresa de la familia ChemTreat. [en línea]. <<http://www.aguasin.com/category/areas/02-PQ/resinas.php>>[Consulta: 5 junio 2019].
- [38] Wakeel, M et al. Energy consumption for water use cycles in different countries: A review. Applied Energy 178, 868–885, 2016.
- [39] Pearce, G. UF/MF pre-treatment to RO in seawater and wastewater reuse applications: a comparison of energy costs, Desalination 222, 66–73, 2008.

- [40] Arkpe, A., Hutzler, N. Domestic Water Use in the United States A Life-Cycle Approach. *Journal of Industrial Ecology* Volume 10, Number 1–2, 169–184, 2006.
- [41] Ministerio de Energía. Energía Abierta BETA. [en línea]. <<http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>>[Consulta: 2 abril 2019].
- [42] Environmental Protection Agency. 2010. Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for Biogenic Emissions for Selected Source Categories: Solid Waste Disposal Wastewater treatment Ethanol Formation = 10, 23-12-2018.
- [43] Trumper, B. Universidad de Chile Solicitud proyecto [en línea] Jueves, 24 de mayo de 2018 a la(s) 12:25. <BTrumper@aguasandinas.cl>[Consulta: 27 abril 2019,
- [44] Smith, K Liu, S. Energy for Conventional Water Supply and Wastewater Treatment in Urban China: A Review. *Global Challenges* ,2006.
- [45] Tassou, S. Energy Conservation and Resource Utilisation in Waste-Water Treatment Plants. *Applied Energy* 30, 113-129, 1988.
- [46] Asano. T et al., *Water Reuse Issues, Technologies, and Applications*. 2007,
- [47] Andreoli, V. *Sludge Treatment and Disposal*, 6 edición, 256p, 2007.
- [48] R+I Alliance. 2010. Carbon footprint and energy efficiency across wastewater and sludge treatment, 23-12-2018.
- [49] Pradel, E. Reverdy, A. Assessing GHG emissions from sludge treatment and disposal routes: The method behind GESTABoues tool. ORBIT2012, Global assessment for organic resources and waste management, Rennes, France. 9 p., 2012. <hal-00781673
- [50] 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 65 Cycle Assessment*. [en línea] 21(9), pp.1218–1230. <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>>[Consulta: 1 Mayo 2019]
- [51] Electronic Irish Statute Book. [en línea]. <<http://www.irishstatutebook.ie/eli/2014/si/122/made/en/print>>[Consulta: 29 mayo 2019].
- [52] Garfí, M et al. 2016. Life cycle assessment of drinking water: Comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and plastic bottles. GEMMA Group - *Journal of Cleaner Production* 137 (2016) 997e1003.

Apéndice A

Acrónimos

- ACV: Análisis de ciclo de vida.
- ADN: Ácido desoxirribonucleico.
- CONV: Convencional.
- DBO: Demanda biológica de oxígeno.
- EDTA: Ácido etilendiaminotetraacético.
- EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.
- E.E.U.U. : Estados Unidos de América.
- DS: Decreto supremo.
- GAC: Gránulos de carbón activado.
- GAC: Gases de efecto invernadero.
- IPCC: Panel intergubernamental sobre Cambio Climático.
- ISO: Organización Internacional de Normalización.
- MILNP: Programación no lineal mixta.
- NCh: Norma chilena.
- NF: Nanofiltración.
- NTU: Unidad nefelométrica de turbidez
- PCG: Potencial de calentamiento global.
- PTA: Planta de tratamiento de agua.
- PTAI: Planta de tratamiento de agua industrial.
- PTAP: Planta de tratamiento de agua potable.
- PTAR: Planta de tratamiento de agua residual.
- PCV: Policloruro de vinilo.
- RM: Región Metropolitana.
- SIC: Sistema Interconectado Central.
- SING: Sistema Interconectado del Norte Grande.
- SST: Sólidos suspendidos totales.
- TKN: Nitrógeno Total Kjeldhal.
- V: Volumen de agua producido.

Apéndice B

Resumen marco regulatorio chileno

Tipo de contaminante	Contaminante	Tipo de agua/descarga			
		Agua potable NCh 409	Descarga a aguas superficiales DS 90	Descarga a alcantarillado DS 609	Riego NCh 1333
Tipo I	Turbiedad	<2 UNT	-	-	-
	Coliformes totales	Exenta	<1000 NMP/ 100 ml	-	<1000 NMP/ 100 ml
	DBO 5	-	<35 mgO ₂ /l	300 mgO ₂ /l	-
Tipo II	Nitrógeno Total Kjeldahl	-	<50 mg/l	-	-
	Nitrógeno amoniacal	<1,5 mg/l	-	80 mg/l	-
	Plomo	<0.05 mg/l	<0.05 mg/l	1 mg/l	-
	Arsénico	<0.01 mg/l	<0.05 mg/l	<0.5 mg/l	-
	Aceites y grasas	-	20 mg/l	150 mg/l	-
Tipo IV	pH	6.5 - 8.5	6 - 8.5	5 - 5.9	5.5 - 9.0
	Sólidos disueltos	<1500 mg/l	-	-	500 <s <1500 mg/l
	Sólidos suspendidos totales	-	<80 mg/l	<300 mg/l	-
Tipo V	Cloro residual	<2 mg/l	-	-	-

Tabla B.1: Resumen del marco regulatorio chileno.

Apéndice C

Emisiones de N₂O línea de agua

Para cuantificar las emisiones de óxido nitroso para la línea de agua se trabaja con la ecuación C.1, expresión que se ingresa dentro de los procesos modelados en OpenLCA.

$$E_{N_2O} = Q_e \cdot TKN \cdot EF_{N_2O} \cdot \frac{44}{28} \cdot 10^{-3} \quad (C.1)$$

Dónde:

- E_{N_2O} : Emisiones de N₂O [kg/año]
- Q_e : Caudal afluente línea de agua [m³/año]
- TKN: Concentración de TKN en el afluente, equivalente a 0,071 [kg/m³]
- EF_{N_2O} : Factor de emisión de N₂O, equivalente a 0,005 [kg N₂O/kg TKN] [42]
- 44/28: Conversión de peso molecular, gramos de N₂O por gramos de nitrógeno emitido como N₂O.
- 10⁻³: Factor de conversión de unidades.

Para un caso particular, con un flujo a tratar de 10.000.000 m³/año de agua a tratar, se puede estimar las emisiones de N₂O usando la ecuación C.1

$$E_{N_2O} = 10.000.000 \text{ m}^3/\text{a} \cdot 0,071 \text{ kg TKN}/\text{m}^3 \cdot 0,005 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{kg TKN} \cdot \frac{44}{28} \cdot 10^{-3}$$

$$E_{N_2O} = 5,58 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{a}$$

Apéndice D

Estimación producción lodos

La línea de lodos corresponde a un área de tratamiento constituida por un proceso de flotación, biodigestión y deshidratación de los lodos provenientes de las etapas de tratamiento biológico de la línea de agua. Para estimar los flujos de lodo generados por las nuevas plantas de tratamiento se emplea información entregada vía correo electrónico por la Jefatura de Aguas Andinas [43]. Los datos utilizados se presentan en la Tabla D.1.

Información	Magnitud
Afluente [m ³ /a]	275.624.640
Producción biosólido [kg/a]	172.624.000
Lodos a flotación [m ³ /a]	945.350
Producción biogás [m ³ /a]	33.216.000

Tabla D.1: Información asociada a Planta Tratamiento La Farfana.

Además, es necesario conocer el porcentaje de sólidos presente en los distintos flujos de lodo. Esta información se presenta en la Tabla D.2.

Tipo de lodo	Concentración de sólidos [kg sólidos/m ³ lodo]	Referencia
Lodos a flotación	8	[46]
Lodos a biodigestor	45	[47]
Lodos a deshidratación	10	[47]

Tabla D.2: Concentraciones estimadas de sólido para distintos tipos de lodos. Elaboración propia.

Notar que, no existe información con respecto a los flujos volumétricos de lodo que ingresan a los procesos de biodigestión y deshidratación. Estos flujos intermedios pueden calcularse mediante un balance de masa de material sólido en el deshidratador y en el biodigestor tal como en la ecuación D.1.

$$M_{des}^e = M_{des}^s \quad (D.1)$$

Con

- M_{des}^e : Flujo másico de material sólido que ingresa al proceso de deshidratación [kg/a]
- M_{des}^s : Flujo másico de material sólido que sale del proceso de deshidratación [kg/a]

El flujo másico de sólido a la entrada puede calcularse como la ponderación entre el flujo volumétrico de lodo a la entrada y su concentración de lodos D.2. Por otro lado, el flujo másico de sólido a la salida es conocido, y equivale al flujo másico de biosólido producido.

$$M_{des}^e = V_{des}^e \cdot C_{des}^e \quad (D.2)$$

Donde

- V_{des}^e : Flujo volumétrico de lodo que ingresa al proceso de deshidratación [m³/a]
- C_{des}^e : Concentración de material sólido presente en los lodos que ingresan al proceso de deshidratación [kg/[m³]]

Reemplazando ecuaciones D.2 en la ecuación D.1 se tiene la ecuación D.3

$$V_{des}^e = \frac{M_{des}^s}{C_{des}^e} \quad (D.3)$$

Reemplazando se obtiene

$$V_{des}^e = \frac{172.624.000 \text{ kg/a}}{10 \text{ kg/m}^3}$$

$$V_{des}^e = 17.262.400 \text{ m}^3/\text{a}$$

De forma análoga, es posible obtener el flujo volumétrico de lodo que ingresa al biodigestor.

$$M_{dig}^e = M_{dig}^s \quad (D.4)$$

Las entradas corresponden a lodos que ingresan al proceso de flotación y las salidas corresponden a lodos dirigidos al biodigestor. Luego la ecuación D.4 puede escribirse como D.5.

$$V_{flo}^s \cdot C_{flo}^s = V_{dig}^e \cdot C_{dig}^e \quad (D.5)$$

Se busca despejar el volumen de lodo que ingresa al biodigestor, por lo que se tiene

$$V_{dig}^e = \frac{945.350 \text{ kg} \cdot 8 \text{ kg/m}^3}{45 \text{ kg/m}^3}$$

$$V_{dig}^e = 168.062,22 \text{ m}^3/\text{a}$$

Conociendo los flujos de entrada al biodigestor y deshidratador, se pueden calcular los factores de producción de lodo (f) mediante la ecuación D.6 que consiste en el cociente entre los flujos de lodo y el afluente de la Planta La Farfana.

$$f_{etapa}^e = \frac{V_{etapa}^e}{Q} \quad (D.6)$$

a A modo de ejemplo, el factor de producción de lodos que ingresan al biodigestor equivale

$$f_{dig}^e = \frac{168.062,22 \text{ m}^3 \text{ lodo}/a}{275.624.640 \text{ m}^3 \text{ agua}/a}$$

$$f_{dig}^e = 0,00060 \text{ m}^3 \text{ lodo}/\text{m}^3 \text{ agua}$$

De forma análoga para cada flujo intermedio, se obtienen los factores de producción de lodo a la entrada del espesador, biodigestor y proceso de deshidratación. Los resultados se presentan en la Tabla D.3.

Tipo de lodo	Factor de producción [m ³ de lodo/m ³ agua]
Lodos a flotación	0,00342
Lodos a biodigestor	0,00060
Lodos a deshidratación	0,06263

Tabla D.3: Factores de producción de lodo para las entradas a los procesos de espesamiento y digestión. Elaboración propia.

Apéndice E

Construcción de las funciones

Para formular una función o estimación ambiental es necesario seguir una serie de pasos que conllevan la construcción de un proceso en OpenLCA, la evaluación ambiental y posterior regresión lineal de los resultados entregados por el programa. En este apartado se entrega una síntesis de las tareas llevadas a cabo para obtener una función, a modo de ejemplo, la estimación para la configuración “Fuente 1”.

El caso de ‘Fuente 1’ corresponde a una configuración de tratamiento que incluye un pretratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario, desinfección y los procesos involucrados en la línea de lodos. Antes de iniciar con el diseño de cada proceso, es necesario identificar los flujos que ingresan y salen del sistema, estos son agua, insumos, emisiones de contaminantes y energía eléctrica. Todos los flujos involucrados en el sistema son creados y almacenados en su respectiva carpeta, tal como se observa en la Figura E.1.

Parte importante es definir los parámetros globales utilizados en la evaluación ambiental (factores de emisión, distancias, eficiencias). Este ejercicio corresponde a una tarea iterativa a lo largo de la construcción del sistema en OpenLCA, por lo que no es obligatorio tener todos los parámetros definidos desde el comienzo. Con el fin de mantener un orden se asigna una carpeta con los distintos parámetros usados. En la Figura E.2 se muestran las carpetas con los parámetros usados por calidad y para el tratamiento de lodos.

Al poseer un mínimo de información con respecto a flujos y parámetros se inicia con la creación de un proceso. Los procesos pueden modelarse como bloques con distintos flujos creados en OpenLCA, funcionando como entradas y salidas. La puesta de varios procesos en serie o en paralelo da origen a lo que se conoce como un sistema productivo o en este caso, un sistema de tratamiento de agua. En este trabajo, las principales entradas son flujos de agua, insumos, consumo energético y las salidas involucran agua y emisiones. Cada proceso se diseña a partir de un flujo de salida de agua, ya que la unidad funcional del sistema se define como 1 m³ de agua producida, por lo tanto, si se desea elaborar un sistema productivo el diseño de la red inicia con el último proceso de la configuración a modelar, es decir, la cloración. La interfaz de diseño del proceso se muestra en la Figura E.3.

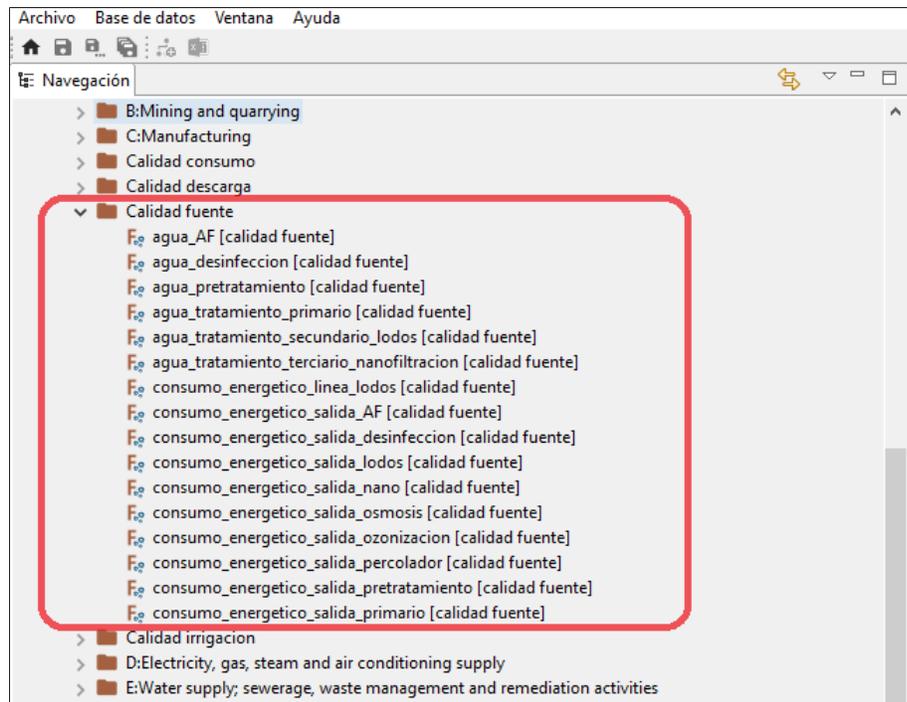


Figura E.1: Flujos correspondiente a la configuración fuente.

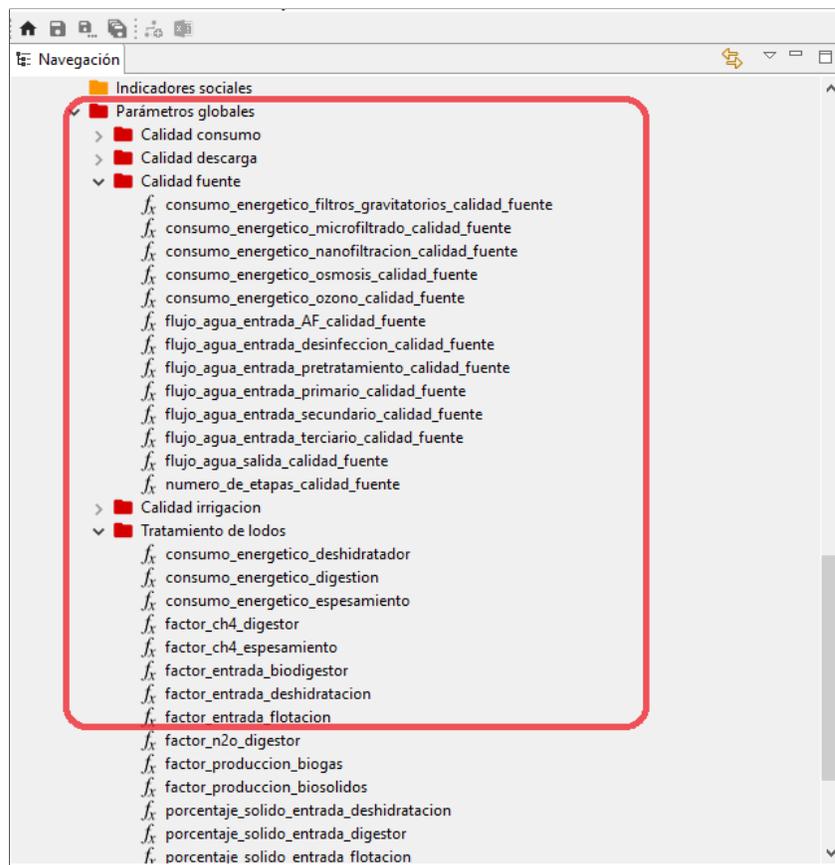


Figura E.2: Parámetros globales del modelo.

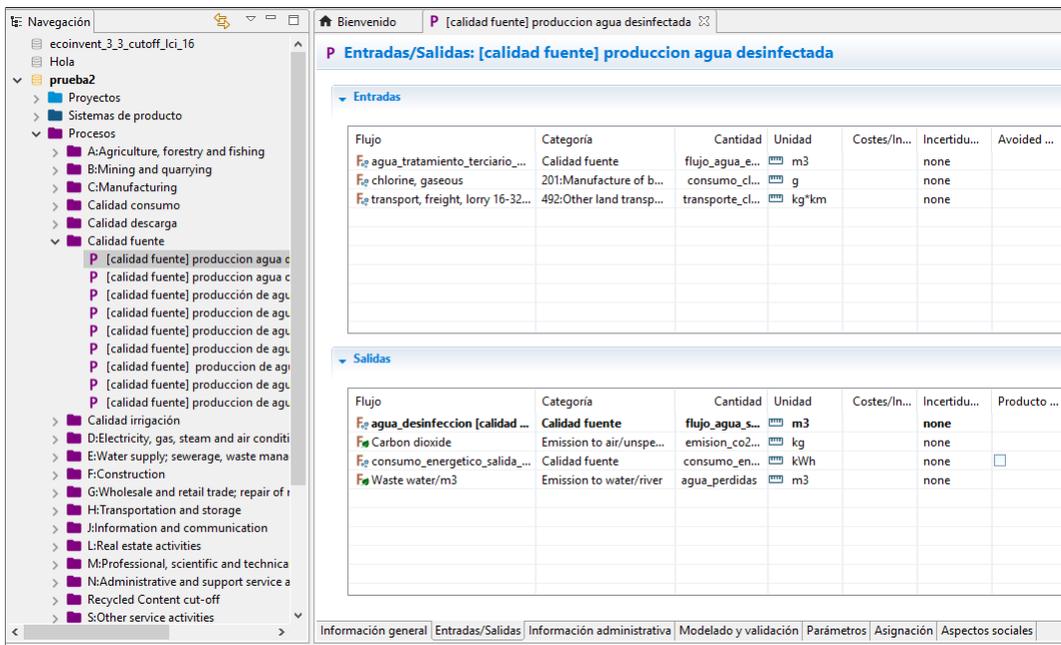


Figura E.3: Interfaz de un proceso productivo.

Una vez se tiene todos los procesos que componen una configuración, se inicia con la creación de un sistema productivo a partir de la unidad funcional, en este caso, el flujo de agua producida en el proceso de cloración. OpenLCA permite conectar automáticamente los flujos de entrada y salida de los procesos, lo que también incluye los insumos necesarios que hayan sido ingresados en cada operación y sus respectivas cadenas de suministros.

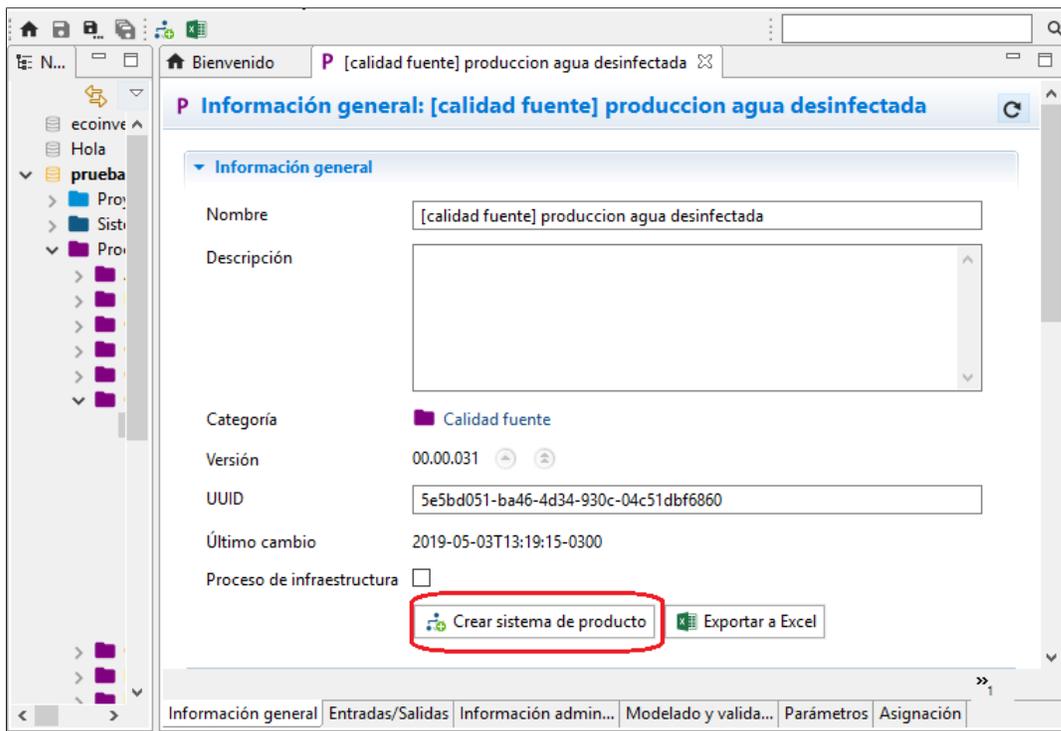


Figura E.4: Creación de un sistema productivo.

Una vez se crea un sistema productivo, es posible observar y modificar las conexiones entre los procesos visitando la pestaña *Diagrama del sistema*. En el caso de la calidad “Fuente”, existen cuatro arreglos de tecnologías que pueden fomularse copiando el sistema productivo y editando sus conexiones dependiendo de la configuración que se desea llegar. En la Figura E.5 se muestra como ejemplo el diagrama reducido de la configuración “Fuente 1”.

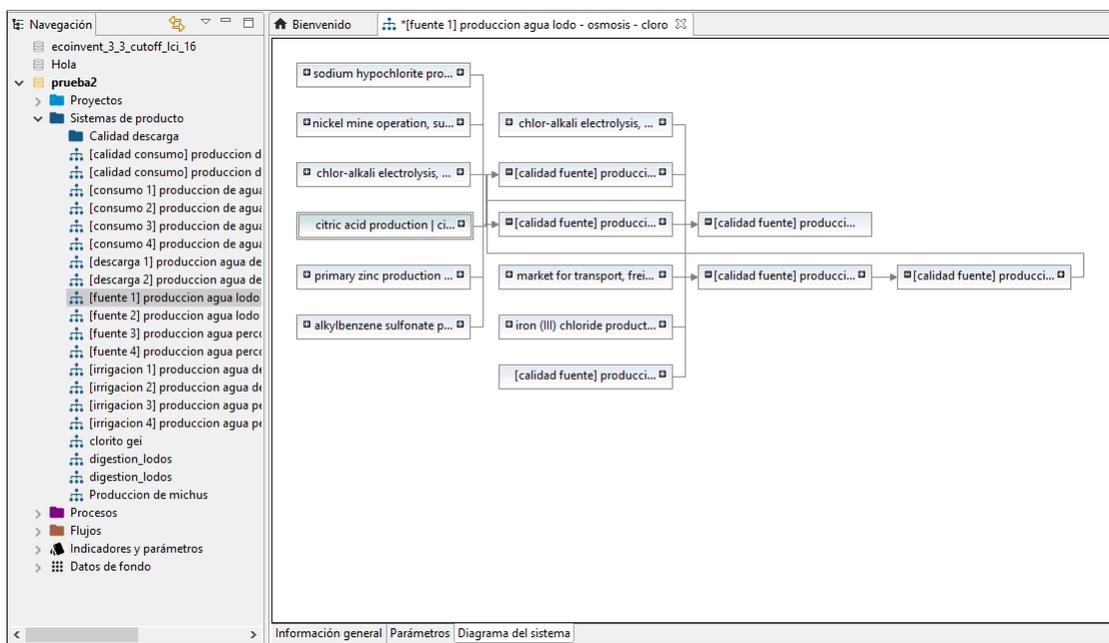


Figura E.5: Sistema productivo.

Una vez se tiene un sistema productivo, se procede a calcular el indicador ambiental de la configuración “Fuente 1”, para eso, se trabaja en la pestaña *Información general*. En esta ventana existen dos casillas claves, *Cantidad objetivo*, en dónde se ingresa el flujo de agua que se desea producir y *Calcular*, opción que permite calcular las emisiones de CO_{2eq}. Un ejemplo se presenta en la Figura E.6.

Para construir la función se realiza el cálculo de las emisiones para diez flujos de producción que estén dentro del rango definido para planta grande. Es importante tener en cuenta que al momento de iniciar con el cálculo se debe elegir la opción *Análisis* y el método de evaluación de impacto *CML Baseline v4.4 January 2015* tal como se muestra en la Figura E.7.

Tras un intervalo de tiempo variable, el programa terminará su operación de cálculo, las emisiones totales y por proceso se presentan en la pestaña *Análisis de Resultados*, como se observa en la Figura E.8.

En la Tabla E.1 se muestran los resultados de emisiones arrojados por OpenLCA asociados a su respectivo flujo producido para la configuración “Fuente 1”. Esta información se recopila y trabaja en Microsoft Excel con la herramienta *Análisis de datos*, con el fin de realizar una regresión lineal entre el flujo producido y la cantidad de emisiones. En la Figura E.9 se muestra el resultado de esta regresión.

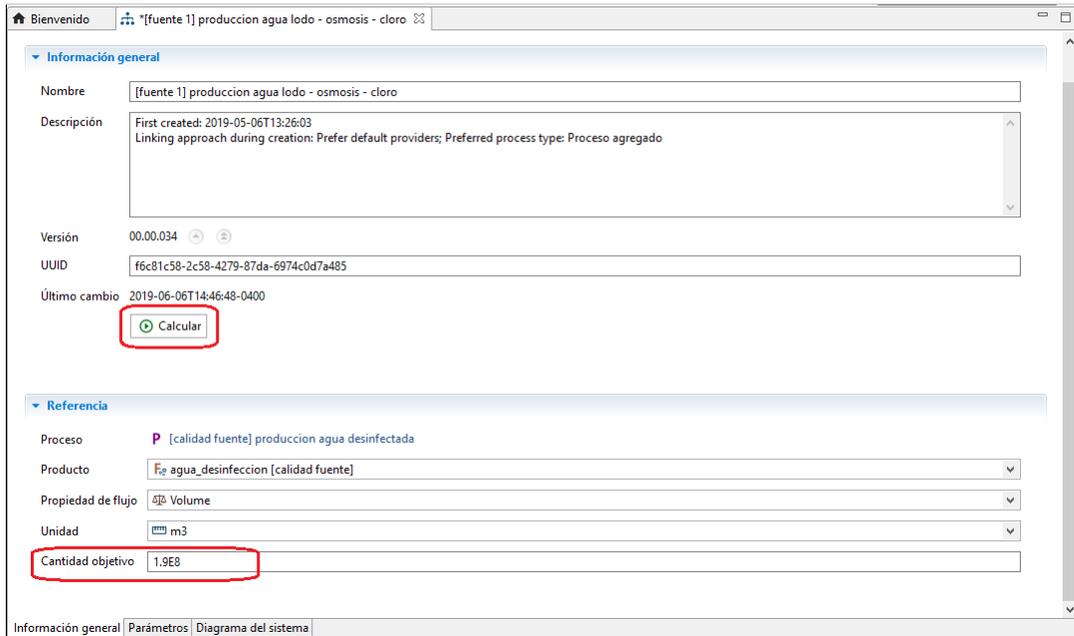


Figura E.6: Interfaz de Información General.

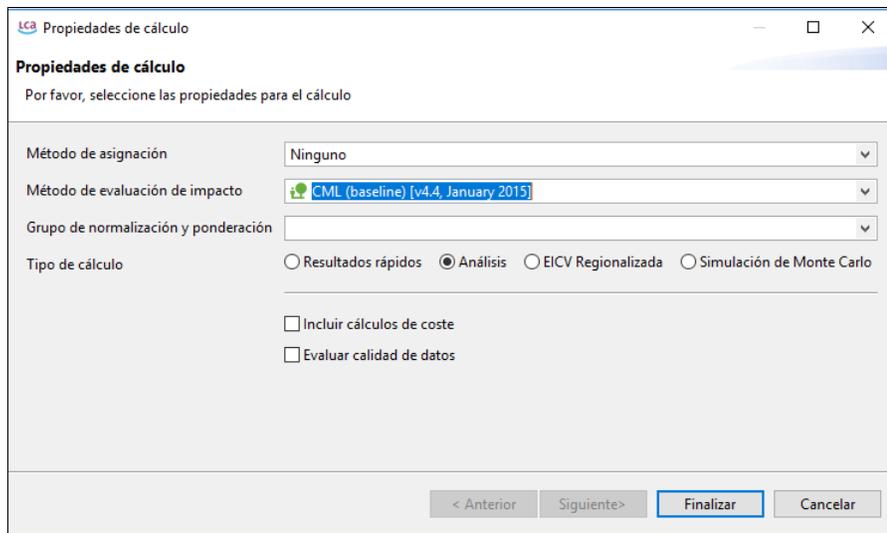


Figura E.7: Propiedades de cálculo.

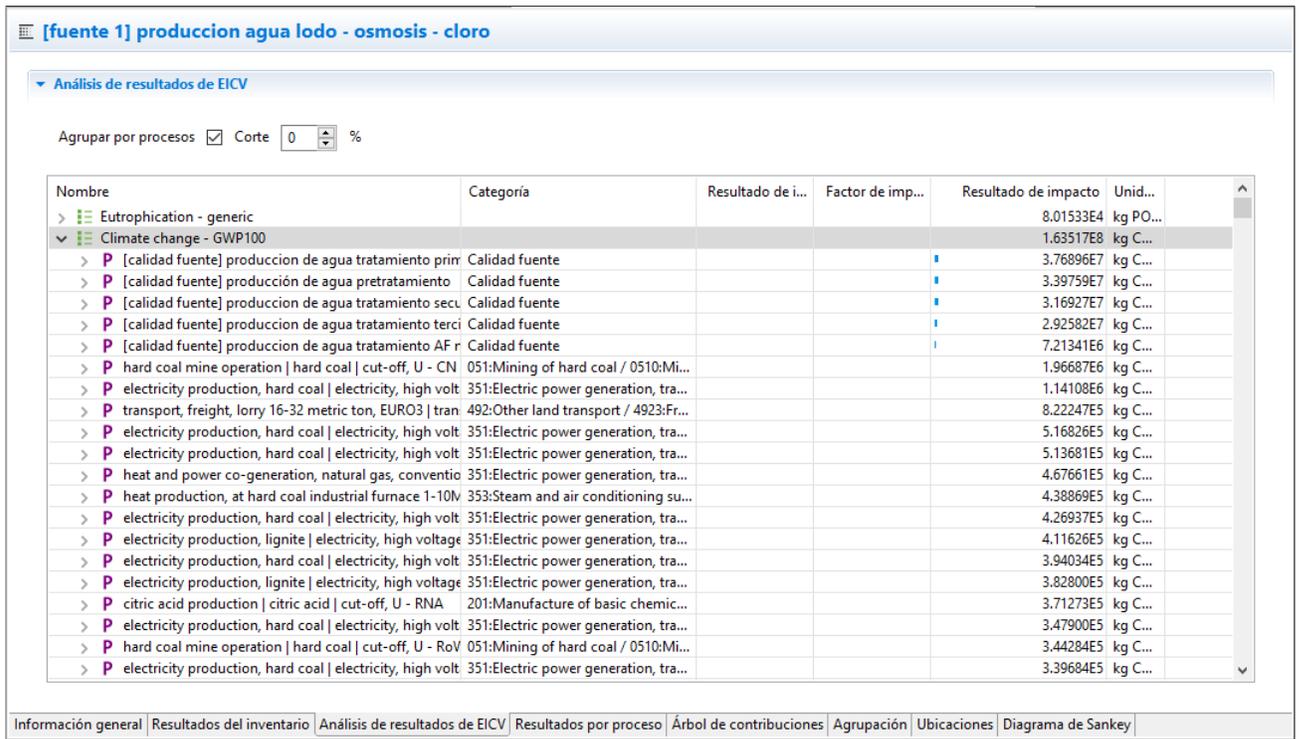


Figura E.8: Análisis de inventario.

Flujo de entrada [m ³ /a]	Flujo tratado [m ³ /a]	Emisiones Totales [kg CO _{2eq} /a]
18.250.000	17.337.500	14.921.000
36.500.000	34.675.000	29.841.900
73.000.000	69.350.000	59.683.800
109.500.000	104.025.000	89.525.800
146.000.000	138.700.000	119.368.000
182.500.000	173.375.000	149.210.000
219.000.000	208.050.000	179.052.000
255.500.000	242.725.000	208.893.000
292.000.000	277.400.000	238.735.000
365.000.000	346.750.000	298.419.000

Tabla E.1: Información utilizada para realizar la regresión lineal de “Fuente 1”.

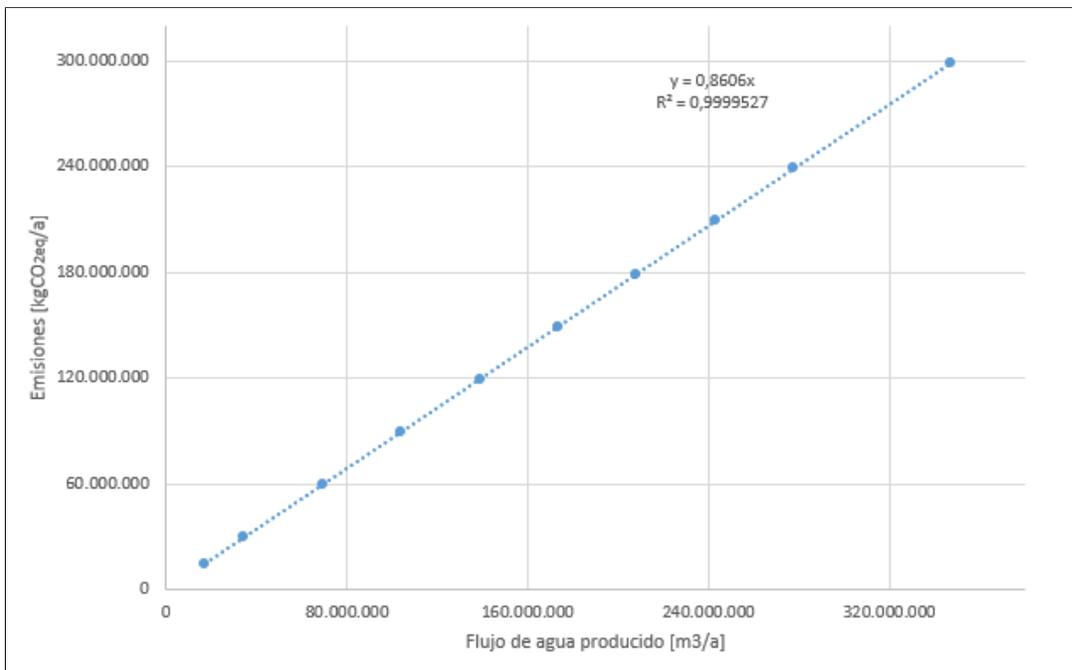


Figura E.9: Resultados regresión lineal “Fuente 1”.