



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

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ESCENARIOS DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES Y PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE. CASO
DE ESTUDIO: INDUSTRIA VITIVINÍCOLA, CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA E INGENIERA
CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA

JAVIERA DEBORAH CARRASCO INZUNZA

PROFESOR GUÍA:
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ANA LUCÍA PRIETO SANTA
ÁLVARO OLIVERA NAPPA

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA E
INGENIERA CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA
POR: JAVIERA DEBORAH CARRASCO INZUNZA
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: FELIPE DÍAZ ALVARADO

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ESCENARIOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE. CASO DE ESTUDIO: INDUSTRIA VITIVINÍCOLA, CHILE

Entendiendo el nexo agua - energía y la crisis de ambos por su disponibilidad e impacto ambiental, es que en los últimos años se han explorado nuevas tecnologías y planificación para salvaguardar el potencial productivo y disminuir los efectos del cambio climático.

La industria de tratamiento de aguas es responsable por el 1,6 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) alrededor del mundo, y del 3 % del consumo energético. Es en este contexto que se realiza un estudio de impacto ambiental para diferentes tecnologías de tratamiento de aguas, considerando como caso de estudio la industria vitivinícola, pues sus RIIes con alta carga orgánica presentan el potencial de producir H_2 .

El principal objetivo de este trabajo es caracterizar y evaluar ambientalmente los escenarios propuestos, empleando metodologías reportadas en la literatura, tales como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el Concepto Integrativo de Desarrollo Sostenible (ICoS), incluyendo otros indicadores sistémicos. Los tratamientos estudiados corresponden a los reactores de lodos activados (caso base), además de los reactores membrana (MBR y AnMBR) y una línea de aprovechamiento de H_2 para su uso *in-situ* como energía eléctrica.

Entre los principales resultados se encuentra que al menos en términos de GEI, todas las alternativas propuestas presentan potenciales ahorros de emisiones por sobre las 7.000 ton CO_{2eq} a lo largo del ciclo de vida definido en 20 años, en comparación con el caso base. Sin embargo, cuán significativo es este ahorro entre las diferentes alternativas depende de las consideraciones empleadas, una de las cuales consiste en el incluir o no el CO_2 definido como biogénico por el IPCC.

En términos de los indicadores ICoS, se obtuvo que es necesario expandir las dimensiones evaluadas y generar la jerarquización de estas. Por otro lado, los indicadores sistémicos construidos agrupan los beneficios e impactos de cada caso, en donde los escenarios productores de H_2 sobresalen obteniendo puntajes sobre 10 veces mayores que el resto. Particularmente, el caso con uso de H_2 *in-situ*, presenta beneficios anuales evaluados en \$800.000 aprox., mientras que las emisiones son del orden de las 800 [ton CO_{2eq}/a], y el consumo de hormigón para la construcción ronda las 1.050 [ton], estableciéndose como el escenario más ventajoso.

Finalmente, una de las conclusiones es que si bien este trabajo presenta alternativas que permitirían disminuir las emisiones de GEI, se requieren estudios a mayor profundidad.

*No os conforméis a este siglo, sino
transformaos por medio de la renovación
de vuestro entendimiento (...)*

Agradecimientos

En este momento de la vida, luego tanto, quisiera expresar mi profunda gratitud a Dios.

Agradecerles a mis padres, hermanas, cuñados y sobrinitas, por su inmenso cariño, soporte y cuidados. Los amo mucho a cada uno de ustedes, gracias por siempre estar para mí.

Gracias a Pablo por convertirse en una persona tan especial.

A mis amigas y amigos por las risas, comprensión y bonitos momentos de la vida.

A Felipe Díaz, por todas las largas conversaciones, la confianza entregada y el conocimiento impartido.

Y a la profesora Ana Lucía Prieto por la oportunidad de desarrollo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos planteados	4
1.1.1. Objetivo general	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
2. Estado del Arte	5
2.1. LCA en sistemas de tratamiento de aguas	5
2.2. Aplicaciones de ICoS	7
3. Antecedentes	11
3.1. Tratamientos de efluentes de la industria vitivinícola	11
3.2. Producción de Hidrógeno Verde	12
3.3. Contexto Vitivinícola en Chile	13
4. Metodología	14
4.1. Metodología del estudio	14
4.1.1. Análisis de Ciclo de Vida - ACV; LCA	16
4.1.2. Concepto Integrativo de Desarrollo Sostenible - ICoS	19
5. Caracterización del caso de estudio	22
5.1. Conclusiones parciales	27
6. LCA Operacional	28
6.1. Balances de masa	30
6.1.1. Procesos anaeróbicos	32
6.1.2. Procesos aeróbicos	33
6.1.3. Resultados relevantes	34
6.2. Emisiones directas	35
6.3. Consumo energético	37
6.4. Emisiones indirectas	43
6.5. Resultados del LCA Operacional por escenario	43
6.6. Conclusiones parciales	46
7. LCA de la Construcción	48
7.1. Inventario de construcción	48
7.1.1. Reactor de Lodos Activados y Sedimentador	48
7.1.2. MBR y AnMBR	50
7.1.3. PSA	51

7.1.4. Celda de combustible - <i>Fuel cell</i>	52
7.1.5. Vida útil	54
7.2. Resultados del LCA Construcción por escenario	54
7.2.1. Resultados <i>Endpoint</i>	54
7.2.2. Resultados categorías <i>Midpoint</i>	56
7.3. Conclusiones parciales	59
8. LCA Global	61
8.1. Conclusiones parciales	65
9. Aplicación metodología ICoS	67
9.1. Propuesta de los indicadores	67
9.2. Cuantificación de los indicadores	69
9.3. Conclusiones parciales	73
10. Propuestas de mejora	75
10.1. Potenciales usos del H_2	75
10.1.1. Simbiosis industrial	75
10.1.2. Desarrollo de la industria química nacional	76
10.2. Mejoras en las tecnologías	76
11. Comparación de sistemas y reflexiones	78
11.1. Indicadores sistémicos	78
11.2. Reflexiones generales	81
12. Conclusiones	84
Bibliografía	86
Anexos	93
Anexo A. Material complementario	93
Anexo B. Balances de masa	94
B.1. Procesos anaeróbicos	94
B.2. Procesos aeróbicos	103
B.3. Comentarios	109
Anexo C. LCA operacional - Memoria de cálculo	111
C.1. Emisiones Directas	111
C.2. Consumo Energético	112
C.3. Emisiones Indirectas	113
Anexo D. LCA operacional - Sensibilidad días de operación	115
D.1. Estimación CO_2 biogénico	115
D.2. Emisiones directas	116
D.3. Consumo energético	116
D.4. Emisiones indirectas	118
D.5. Resultados LCA operacional	118

Anexo E. EcoInvent	120
E.1. Reactor de Lodos Activados y Sedimentador	120
E.2. MBR y AnMBR	122
E.3. PSA	123
E.4. Fuel Cell	123
Anexo F. LCA construcción - Memoria de cálculo resultados parciales	125
F.1. Memoria de cálculo	125
F.2. Resultados	125
F.2.1. <i>Endpoint</i>	125
F.2.2. <i>Midpoint</i>	128

Índice de Tablas

2.1.	Algunos de los indicadores planteados por Rodríguez et al., para el objetivo 1 - Asegurar la existencia humana. [Elaboración propia con datos de [25]]	9
2.2.	Algunos de los indicadores planteados por Rodríguez et al., para el objetivo 2 - Mantener el potencial productivo de la sociedad. [Elaboración propia con datos de [25]]	9
2.3.	Algunos de los indicadores planteados por Rodríguez et al., para el objetivo 3 - Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad. [Elaboración propia con datos de [25]]	10
4.1.	Resumen de los objetivos y cada una de sus reglas, definidos por ICoS . [Elaboración propia con datos de [35] y [36]].	20
5.1.	Fragmento de la tabla de caracterización del afluente de la planta Concha y Toro - Chimbarongo. Parámetros reportados en el trabajo de M. Escudero. [41]. . .	23
5.2.	Resumen y siglas de los escenarios propuestos para la evaluación de impacto ambiental.	27
6.1.	Caracterización de los flujos globales de entrada y salida.	30
6.2.	Caracterización de los flujos de salida del reactor AnMBR. Válido para los escenarios #2 y #3 [41].	31
6.3.	Caracterización de los gases emitidos por el reactor AnMBR [41].	32
6.4.	Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. $\alpha = 0, 2$	34
6.5.	Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. $\alpha_{esc. \#0 \text{ y } \#1} = 0, 34$ y $\alpha_{esc. \#2 \text{ y } \#3} = 0, 2$	35
6.6.	Factores de emisión de N_2O para diferentes tratamientos de aguas. [Elaboración propia con datos de [20]].	36
6.7.	Potencial de calentamiento de gases de efecto invernadero con respecto al CO_2	36
6.8.	Estimación de las emisiones directas de GEI para cada uno de los tratamientos secundarios propuestos y su homólogo en términos de CO_{2eq}	37
6.9.	Caracterización consumo energético planta Concha y Toro - Lontué y estimaciones para escenario #0	38
6.10.	Consumos energéticos de los reactores de membranas, recopilados por bibliografía.	39
6.11.	Estimaciones respecto de los consumos energéticos anuales para cada una de las tecnologías de tratamiento secundario.	40
6.12.	Consumos energéticos del PSA, a diferentes condiciones de operación, recopilados por bibliografía.	41
6.13.	Caracterización de la operación del equipo de PSA	41
6.14.	Estimaciones respecto de la producción energética por concepto de la conversión del H_2 producido.	41
6.15.	Estimaciones del balance de energía asociado a la purificación y conversión del H_2 (PSA + <i>fuel cell</i>).	42

6.16.	Fracciones de energía ahorrada con respecto al escenario # 0, en donde se utiliza la tecnología de Lodos Activados.	42
6.17.	Consumo energético y emisiones indirectas de GEI en cada uno de los escenarios de estudios.	43
6.18.	Resultados LCA operacional - Cuantificación de emisiones del tipo GEI.	43
6.19.	Fracciones de emisiones totales de GEI ahorrada con respecto al escenario # 0, en donde se utiliza la tecnología de Lodos Activados.	44
6.20.	Resultados LCA operacional - Cuantificación de emisiones del tipo GEI incluyen del CO_2 biogénico, la fracción de ahorro con respecto al escenario #0. Valor de $\alpha = 0,2$ para todos los escenarios.	45
6.21.	Resultados LCA operacional - Cuantificación de emisiones del tipo GEI incluyen del CO_2 biogénico, la fracción de ahorro con respecto al escenario #0. Valor de α diferenciado según el escenario (0,34 o 0,2).	45
7.1.	Estimación de materiales - Inventario del Reactor de Lodos Activados.	50
7.2.	Estimación de materiales - Inventario del MBR y AnMBR.	51
7.3.	Estimaciones de materiales - Inventario del equipo PSA.	52
7.4.	Estimaciones de materiales - Inventario de la celda de combustible (<i>Fuel Cell</i>). CR: Caso Reportado [66], CE: Caso de Estudio.	53
7.5.	Vida útil y cantidad de reemplazos requeridos por equipos.	54
7.6.	Estimaciones de los puntajes <i>endpoint</i> (E) de la metodología ReCiPe para la construcción de los diferentes escenarios propuestos, además de su referencia con respecto al escenario #0 (reactor de Lodos Activados + Sedimentador).	55
7.7.	Fracciones de los impactos ReCiPe - Midpoint (E) con respecto al escenario #0 (reactor de Lodos Activados + Sedimentador)	57
8.1.	Resumen de los resultados de las emisiones GEI operacionales y de construcción para cada caso.	62
8.2.	Análisis de los resultados de emisión total de GEI por operación y construcción. Consideración: no se contabiliza el CO_2 biogénico	63
8.3.	Análisis de los resultados de emisión total de GEI por operación y construcción. Consideración: se contabiliza el CO_2 biogénico y se define $\alpha = 0,2$ para todos los escenarios.	64
8.4.	Análisis de los resultados de emisión total de GEI por operación y construcción. Consideración: se contabiliza el CO_2 biogénico y se define $\alpha = 0,34$ o $\alpha = 0,2$, dependiendo del escenario.	65
9.1.	Propuesta de indicadores para el objetivo 1 de ICoS: Asegurar la existencia humana.	68
9.2.	Propuesta de indicadores para el objetivo 2 de ICoS: Mantener el potencial productivo de la sociedad.	68
9.3.	Propuesta de indicadores para el objetivo 3 de ICoS: Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad.	69
9.4.	Resumen y siglas de los escenarios propuestos para la evaluación de impacto ambiental.	70
9.5.	Cuantificación de los indicadores relativos al objetivo 1 de ICoS, Asegurar la existencia humana.	70
9.6.	Cuantificación de los indicadores relativos al objetivo 2 de ICoS, Mantener el potencial productivo de la sociedad.	72

9.7.	Cuantificación de los indicadores relativos al objetivo 3 de ICoS, Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad.	73
11.1.	Recopilación tasa de producción y precios de mercado de los productos	79
11.2.	Requerimientos de hormigón para la construcción de cada planta.	79
11.3.	Estimaciones del indicador sistémico propuesto en base a la masa de hormigón empleada en la construcción.	79
11.4.	Emisiones GEI operacionales y de construcción anualizadas en los 20 años de vida útil de las plantas de tratamiento.	80
11.5.	Estimaciones del indicador sistémico propuesto en base a las emisiones GEI operacionales y de construcción.	80
B.1.	Caracterización de los flujos sólidos y líquidos del reactor AnMBR.	94
B.2.	Caracterización de los gases emitidos por el reactor AnMBR.	95
B.3.	Caracterización de los flujos globales de entrada y salida.	104
B.4.	Caracterización de los flujos de salida del reactor AnMBR. Válido para los escenarios #2 y #3 [41].	104
B.5.	Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. Valor de $\alpha_{Caso A} = \alpha_{Caso B} = 0,2$	109
B.6.	Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. Valor de $\alpha_{Caso A} = 0,34$ y $\alpha_{Caso B} = 0,2$	110
D.1.	Sensibilidad - Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. Valor de $\alpha = 0,2$ para todos los escenarios.	116
D.2.	Sensibilidad - Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. Valor de $\alpha_{Caso A} = 0,34$ y $\alpha_{Caso B} = 0,2$	116
D.3.	Sensibilidad - Estimación de las emisiones directas de GEI para cada uno de los tratamientos secundarios propuestos.	116
D.4.	Sensibilidad - Estimaciones respecto de los consumos energéticos anuales para cada una de las tecnologías de tratamiento secundario.	117
D.5.	Sensibilidad - Estimaciones del balance de energía asociado a la purificación y conversión del H_2 (PSA + <i>fuel cell</i>).	117
D.6.	Sensibilidad - Fracciones de energía ahorrada con respecto al escenario # 0, en donde se utiliza la tecnología de Lodos Activados.	117
D.7.	Sensibilidad - Estimaciones de las emisiones indirectas de GEI en cada uno de los escenarios de estudios.	118
D.8.	Sensibilidad - Resultados LCA operacional - Cuantificación de emisiones del tipo GEI.	118
D.9.	Sensibilidad - Fracciones de emisiones totales de GEI ahorrada con respecto al escenario # 0, en donde se utiliza la tecnología de Lodos Activados.	118
E.1.	Selección de materiales en la base de datos de EcoInvent - Inventario del Reactor de Lodos Activados y Sedimentador.	121
E.2.	Selección de materiales en la base de datos de EcoInvent - Inventario del MBR y AnMBR.	122
E.3.	Selección de materiales en la base de datos de EcoInvent - Inventario del PSA y tanque de almacenamiento de H_2	123
E.4.	Selección de materiales en la base de datos EcoInvent - Inventario <i>Fuel cell</i> . . .	124
F.1.	Estimación de los impactos ReCiPe - Endpoint (E)	126
F.2.	Fracciones de los impactos ReCiPe - Endpoint (E) con respecto al escenario #0 (reactor de Lodos Activados + Sedimentador	127

F.3. Estimación de los impactos ReCiPe - Midpoint (E).	128
--	-----

Índice de Ilustraciones

1.1.	Diagrama de bloque de la planta de tratamiento de RILes vitivinícolas, incorporando la tecnología a AnMBR para la generación de H_2	3
4.1.	Interconexión entre cada una de las fases de desarrollo de un LCA [13].	17
4.2.	Interconexión entre los indicadores <i>midpoint</i> y <i>endpoint</i> declarados en ReCiPe [33]. Se debe agregar al listado la categoría de impacto de: eutrofización marina [32].	18
5.1.	Diagrama de bloque del tratamiento secundario basado en la tecnología de lodos activados (escenario #0), análogo al caso de Concha y Toro - Lontué [45].	24
5.2.	Diagrama de bloque para el reactor MBR (escenario #1).	25
5.3.	Diagrama de bloque para el proceso AnMBR + MBR (escenario #2).	25
5.4.	Diagrama de bloque para el proceso AnMBR + MBR + Producción energética (escenario #3).	26
B.1.	Simulación en Simba# del diagrama de flujo para el reactor AnMBR (escenario #2 y#3). Programa realizado en el trabajo de M. Escudero [41].	96

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad, la seguridad hídrica y energética son parte de la agenda global. La seguridad energética de las comunidades se ha convertido en un requerimiento esencial en la sociedad moderna, cuyos principales desafíos están en términos de la estabilidad de producción de las energías renovables no convencionales (ERNC) [1]. Mientras que en relación a la disponibilidad de agua, el cambio climático ha provocado incertidumbre global, lo que se expone en eventos de inundación y sequía al rededor del mundo, afectando diversas dimensiones de la vida, entre ellas, la agricultura, industrias y energía, como también a los ecosistemas [2].

Entre los pronósticos que alertan, está el realizado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), exponiendo que al menos la mitad de la población mundial vivenciará un estrés hídrico severo para el 2030 [2].

A la vez, se debe tener en cuenta que todas las formas de generación de energía requieren agua para la operación, a excepción de las instalaciones eólicas. En el caso de los tratamientos de aguas, al igual que para el suministro hídrico potable o de riego, se necesita energía [3]. Debido a la conexión anterior, en la literatura se plantea el Nexo Agua-Energía como un concepto que permite explorar proyectos híbridos.

Se predice que tanto los recursos hídricos, como energéticos se verán sometidos a estrés, dado el crecimiento demográfico y la tendencia a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que no necesariamente va de la mano con la reducción de la huella hídrica [4].

Por otro lado, se tiene que los tratamientos de aguas son variados, pero en términos generales se tienen las siguientes etapas: **Pretratamiento** para el retiro de sólidos masivos, **Tratamiento Primario** usualmente compuesto por un sedimentador que permite la separación de arenas, para luego dar lugar al **Tratamiento Secundario** en donde se logra disminuir significativamente la demanda química de oxígeno (DQO; COD), utilizando métodos biológicos o químicos [5]. En ciertos caso, puede requerirse un **Tratamiento Terciario** para disminuir la carga de algunas moléculas orgánicas como lo son el nitrógeno y fósforo u otras del tipo inorgánicas [5]. Dependiendo del origen del effluente podría ser necesaria la etapa de **Desinfección**, la que correspondería a la adición de soluciones cloradas [5].

Concentrándose en la etapa de **Tratamiento Secundario** con métodos biológicos, se presentan variadas opciones asociadas a las condiciones de operación, principalmente referido a la presencia o ausencia de oxígeno, y el tipo de reactor utilizado [6].

Al operar con microorganismos, estos metabolizarían la materia orgánica y dentro de los productos de fermentación, dependiendo de las condiciones aeróbicas o anaeróbicas, se podrían obtener diversas fracciones de gases en una mezcla de metano (CH_4), monóxido y dióxido de carbono (CO , CO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), además de hidrógeno molecular (H_2) [7]. Estos fluidos pueden ser utilizados como combustible bajo ciertas condiciones [7].

Hoy en día, la producción de hidrógeno verde (H_2v) constituye un desafío tecnológico del que aún no se obtiene una solución definitiva. La versatilidad del H_2 es su mayor atractivo, permitiendo la síntesis de variados compuestos de interés denominados *E-Fuels*, como también la producción directa de energía térmica y eléctrica mediante el uso de convertidores [8].

Se debe tener en mente, que los gases anteriormente mencionados no son los únicos productos de la digestión, sino que también existen otros como, el óxido nitroso (N_2O), el cual corresponde a un gas de efecto invernadero (GEI), por lo que los tratamientos de aguas generan contaminación atmosférica [9]. A la vez, existen impactos socioambientales, ejemplo de esto es la emisión de olores, bioacumulación, aumento en la demanda de combustibles y/o otras sustancias.

Considerando todo lo anterior, la pregunta es si un proceso de producción de hidrógeno integrado con el tratamiento de aguas residuales podría tener un buen desempeño en términos del balance energético, potencial de calentamiento global (GWP) e integración en la comunidad, en comparación con el escenario base de tratamiento convencional. El cuestionamiento, vendría validado no solo por el desarrollo sustentable, sino también por compromisos internacionales que Chile ha adquirido; entre los que se encuentra la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [10].

Dado el amplio abanico de opciones en los procesos de tratamiento de agua, los potenciales productos y la posibilidad de generar energía a partir de ellos, es que para el desarrollo de este trabajo se estableció como caso de estudio: el tratamiento de residuos industriales líquidos (RILes) de la industria vitivinícola chilena, teniendo como objetivo la producción de H_2 en el tratamiento biológico.

Los RILes vitivinícolas se deben principalmente al lavado de equipos [11]. Estos efluentes presentan una composición uniforme pero distinguible entre los períodos de cosecha y no-cosecha; en ambos, la carga orgánica es alta en comparación a otros efluentes industriales [12]. Estas características los hacen atractivos para la implementación de tecnologías de tratamiento y captación de gases de fermentación que podrían ser utilizados como combustible.

Entonces, para estimar el desempeño del caso de estudio, es que se propone evaluarlo con respecto a un análisis de ciclo de vida (ACV; LCA en inglés), dado su amplio uso, científico y comercial, en el ámbito de cuantificación de impactos ambientales. Además de implementar la metodología ICoS, como una herramienta en vías de desarrollo que presenta ventajas por

ser una evaluación multidimensional, no solo enfocada en el área ambiental. En las siguientes secciones se retomará la justificación de esta selección.

LCA corresponde a una herramienta para la cuantificación del impacto ambiental, como lo son las emisiones de GEI y eutrofización [13], entre otras; permitiendo un análisis cuantitativo y posterior comparación de escenarios.

La metodología ICoS, *Integrative Concept of Sustainable Development*, está enfocada en evaluar la sustentabilidad de un proyecto no solo en el ámbito de recursos utilizados / desechos generados, sino también teniendo consideraciones sociales y de incidencia en la capacidad futura. Un ejemplo del ámbito comunitario trataría de responder cómo sería la incorporación y valoración del proyecto en la comunidad, si es que afectaría su modo de vida o toma de decisiones, etc; mientras que un ejemplo de la incidencia futura, estaría enfocado en parametrizar el efecto del proyecto en los posibles escenarios de desarrollo futuro que se pueden ir adoptando, y cómo el haberlo ejecutado permitiría o coartaría la realización de otros planes [14].

Para realizar la evaluación planteada, se propone analizar un bioreactor anaeróbico de membrana (AnMBR), en particular, el caso de un *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) con un módulo de membranas *side-streamed*. Esto se debe a que consiste en un tratamiento recomendado para el caso de efluentes con alta carga orgánica, además de que privilegia la producción de H_2 [15]; sin embargo, podría no ser suficiente para disminuir la DQO exigida por normativa, por eso se plantea como una etapa previa al tratamiento biológico convencional. En la fig. 1.1 se muestra un esquema de lo planteado.

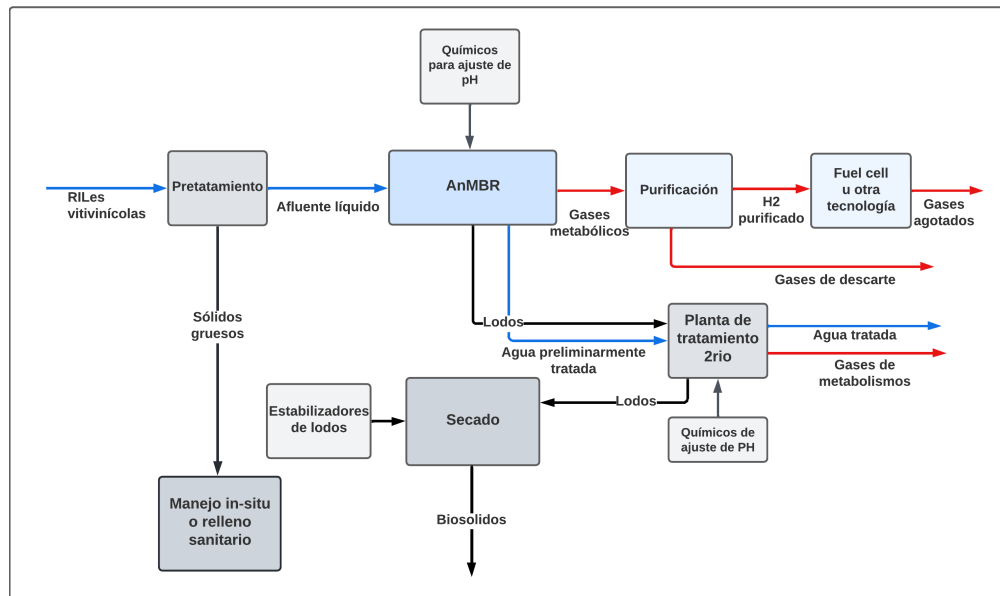


Figura 1.1: Diagrama de bloque de la planta de tratamiento de RILes vitivinícolas, incorporando la tecnología a AnMBR para la generación de H_2 .

Debe ser mencionado que para el uso del biogás rico en H_2 , se debe realizar procesos de

purificación llamados *upgrading*, de manera de obtener H_2 en niveles de pureza necesarios para el uso como combustible.

1.1. Objetivos planteados

Para realizar una evaluación de impacto que no solo considere la emisión de gases de efecto invernadero, sino también otros indicadores ecológicos, tecnológicos y socialmente relevantes, es que se propone la realización de un LCA, para posteriormente incorporar la metodología ICoS, lo que permitiría una comparación multidimensional, estructurada y con un procedimiento previamente validado.

1.1.1. Objetivo general

Evaluar ambientalmente escenarios tecnológicos de tratamiento de aguas residuales y producción de hidrógeno verde (H_2v) mediante membranas bioactivas (BMR), utilizando la metodología de ICoS SA (KIT).

1.1.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar la industria vitivinícola y los escenarios de tratamiento y producción de H_2v mediante un diagrama de flujos para cada escenario.
2. Identificar los principales impactos discutidos en la literatura y decidir una categoría vectorial de impacto ambiental que represente dichos impactos.
3. Aplicar la metodología ICoS SA para evaluar el impacto ambiental de los escenarios de producción de H_2v y tratamiento de aguas residuales.
4. Proponer mejoras al mejor escenario evaluado, sobre la base de los resultados de la evaluación.

Capítulo 2

Estado del Arte

La industria de tratamiento de aguas aporta el 1,6% de las emisiones de GEI a nivel mundial. Más aún, constituyen aproximadamente el 5% de los GEI-no- CO_2 , dentro de los que se encuentran el metano (CH_4) y óxido de nitrógeno (N_2O), los cuales presentan potenciales de calentamiento significativamente mayores que el dióxido de carbono (CO_2) [16]. Además, la operación de estos procesos utiliza del orden del 3% de la energía global [16].

Teniendo en cuenta lo anterior, es que existe la motivación de mejorar las plantas de tratamiento de aguas, tanto en términos de la recuperación de los gases generados durante el tratamiento biológico, como también, la búsqueda de ahorro energético.

Sin embargo, el problema trasciende al sistema de tratamiento. La eficiencia de los procesos no es la única dimensión que debe tenerse en cuenta a la hora de decidir, sino también otros tipos de impacto (por ejemplo, disponibilidad de recursos, impacto en las comunidades, etc), los que cobran relevancia según el caso de estudio.

Dos metodologías de evaluación que han ido tomando trascendencia son los Análisis de Ciclo de Vida (ACV; LCA, por sus siglas en inglés) y el Concepto Integrador de Desarrollo Sostenible (ICoS, por sus siglas en inglés). Ambas evaluaciones consideran todo el ciclo de vida del producto/operación en cuestión, además de una amplia gama de impactos ambientales. No obstante, presentan diferentes alcances, lo que se traduce en que mientras el LCA solo cuantifica impactos ambientales, ICoS propone una mirada más transversal a la sostenibilidad, incluyendo aspectos económicos y sociales.

Como es de preveer, ambas herramientas presentan sus pros y contras, por lo que no existe una jerarquía clara respecto de ellas, pero se reconocen las ventajas de emplearlas.

A continuación, se expone el estado del arte de los LCA e ICoS.

2.1. LCA en sistemas de tratamiento de aguas

Los Análisis de Ciclo de Vida son una metodología ampliamente usada en diferentes contextos, entre ellos para productos tales como, empaques, tecnología, agricultura, etc.

A la fecha, existen LCA realizados para los tratamientos de aguas, mayoritariamente enfocados en la construcción de plantas para el tratamiento de aguas municipales, entre los que se destaca el trabajo de Doka et al. [17]. Su publicación, además de considerarse como compilado importante de datos y discusión de supuestos, normaliza los insumos para la construcción de plantas de tratamiento, en base a estimaciones respecto del hormigón necesario.

Lo anterior, constituye un gran aporte para el desarrollo de inventarios y posteriores LCA. Sin embargo, se debe tener en cuenta la dependencia de los análisis respecto al lugar en donde serían implementados los proyectos, debido a variados factores de eficiencia, normativa, métodos de operación, etc. En el trabajo de Doka et al., los datos expuestos son referidos a reportes de plantas de tratamiento suizas, por lo que se pueden esperar desviaciones en el caso de implementarlo en Chile.

Además, se encontró en bibliografía trabajos como el de Foley et al. [18], el cual emplea los factores para insumos de Doka et al. [17] como piso mínimo para la realización de los inventarios de plantas de tratamiento de aguas, sin importar el tipo de tecnología que se esté empleado en el tratamiento secundario.

Otras maneras empleadas en la literatura para la estimación de inventarios de construcción, es mediante la extrapolación de los valores reportados en la base de datos de Ecoinvent, utilizando el caudal de diseño o la masa de hormigón como variable independiente. Sin embargo, en el trabajo de Morera et al. [19], queda en evidencia lo que la acumulación de errores puede generar en el inventario de materiales y posterior análisis de los impactos ambientales.

Luego, entrando en lo existente para diferentes tecnologías de tratamiento, se tiene que lo más común en aplicación son los reactores de lodos activados, por lo que la mayoría de los LCA consideran ese tratamiento secundario, o incluso, dada la escasez de detalle en los registros de plantas construidas, la mayoría de veces se estudia el conjunto reactor de lodos activados y sedimentador.

Respecto de los reactores de membrana, MBR o AnMBR, la literatura está principalmente enfocada en el estudio de la eficiencia de reducción de la demanda química de oxígeno y otros nutrientes, además de los requerimientos energéticos asociados, puesto que incluso estos puntos no están del todos saldados, encontrándose grandes diferencias en los rangos reportados, además de una usual combinación entre los datos de las etapas del tratamiento secundario y la línea de lodos.

Como se mencionó anteriormente, los inventarios de construcción son los mayoritarios, sin considerar que distintos tipos de tratamiento pueden generar grandes cambios operacionales.

Una de las principales guías para la cuantificación de impacto operacional es la establecida por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) [20]. No obstante, su mayor foco se encuentra en las emisiones de gases de efecto invernadero, descuidando otros impactos ambientales.

Existen otros estudios asociados a las emisiones generadas en los tratamientos secundarios, tales como los trabajos de Baresel et al. [21] y Flores L. et al. [22], pero este tipo de estimaciones no son abundantes en las referencias consultadas, además de encontrarse subestimadas en magnitud con respecto a los valores reportados por el IPCC.

Frente a la situación expuesta para los LCA existentes, se presenta el trabajo de Coraminas et al [23], quienes desarrollaron una guía general para uniformizar de cierto modo los LCA de tratamientos de aguas incluyendo las etapas de construcción, operación y fin de vida, además, de las consideraciones usualmente empleadas, las que dependerán del objetivo y alcance del estudio, y de la disponibilidad y calidad de la información. Adicionalmente, se expone un *review* con los trabajos más citados.

En términos generales, se divide el inventario en los listados a continuación:

- Inventario de Construcción
- Inventario de Operación, emisiones al agua, aire y suelo
- Inventario de Operación, energía
- Inventario de Operación, químicos
- Mantenimiento y Fin de Vida

Dado el estado del arte de los LCA de tratamientos de agua, este trabajo se presenta como una manera de consolidar ciertos datos reportados para diferentes tecnologías de reactores, además de poner el foco en las aguas industriales (RILes), específicamente de la industria vitivinícola, puesto que de alguna forma este tipo de salidas de los procesos terminan siendo olvidadas al momento de innovar, y se siguen viendo como un problema en términos de desechos y no de reutilizamiento.

Considerando al agua como un recurso limitado y teniendo en cuenta los impactos ambientales que pueden generar las líneas de tratamientos, se plantea la necesidad de ampliar las áreas de estudio dentro de los tratamientos de agua y diversificarlos para realmente obtener una solución equilibrada.

Entendiendo lo anterior y los complejos escenarios económico-sociales que se viven en el mundo, el ámbito ambiental no es el único relevante, sino que existen otros indicadores que deben ser incluidos al momento de tomar una decisión informada. Desde aquí nace el exponer a ICoS como una herramienta de evaluación prometedora al momento de integrar las diferentes aristas del problema.

2.2. Aplicaciones de ICoS

Tal como se expuso anteriormente, el Concepto Integrador de Desarrollo Sostenible se presenta como un marco de estudio, con una mirada transversal respecto de los impactos ambientales, económicos y sociales. Sus evaluaciones tienen en consideración tres metas

planteadas como esenciales [14]: asegurar la existencia humana, mantener el potencial productivo de la sociedad, y, preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad.

ICoS no ha sido tan ampliamente utilizado como los LCA, dado que su desarrollo es más reciente y algunos indicadores requieren una cantidad significativa de tiempo para su estimación. Aún así, ya hay variados estudios publicados que aplican esta nueva metodología, principalmente por ser un acercamiento más concreto a la sostenibilidad.

Un ejemplo del empleo de ICoS es el trabajo de Fuss et al. [24], en donde se plantea un marco evaluador de sostenibilidad para el eventual diseño de gestión de residuos sólidos municipales en Belo Horizonte, Brasil.

Dentro de sus principales resultados, tanto estadísticos como de entrevistas realizadas a las partes interesadas, expertos y tomadores de decisión del caso de estudio, se obtuvo que el desarrollo de este tipo de pautas evaluativas permite establecer una interconexión entre un concepto más abstracto como lo es la sostenibilidad, con un conjunto de criterios cuantificables y fácilmente entendibles, tales como la disminución de impactos ambientales en términos de la contaminación del aire, dados diferentes escenarios tecnológicos. Además de monitorear continuamente los procesos actualmente empleados, de manera de distinguir cuáles son las áreas a las que se les debe prestar mayor atención, pero que en caso de querer implementarlos, se requiere la presión gubernamental.

Por otro lado, se resalta que si bien es factible mejorar la evaluación en uno de los objetivos planteados por ICoS, el aumento en todos a la vez es particularmente complejo.

Lo anterior, se visibiliza con mayor fuerza en sociedades con economías emergentes, en donde los intereses suelen diverger entre los tomadores de decisiones, por lo que no se logra el desarrollo transversal.

Respecto de bibliografía referente a tratamientos de agua e ICoS, se tiene el trabajo de Rodríguez et al. [25] en donde se proponen indicadores de sostenibilidad para la evaluación de la tecnología de reactores MBR, con un caso de estudio de reutilización de aguas en Chile.

Dentro de los principales aportes del trabajo de Rodríguez et al. [25], además del conjunto de indicadores propuestos (tablas 2.1, 2.2 y 2.3), se encuentran las conclusiones relacionadas con la factibilidad de aplicación del marco evaluador, priorizando el rendimiento del sistema propuesto. Las dificultades se presentan en la adquisición de datos para el desarrollo de un LCA, la incertidumbre en temas relacionados con el desarrollo económico y político del país, lo que afectará a la valorización de este tipo de proyectos en los agentes tomadores de decisiones, la complejidad y costos asociados a la medición de algunos de los indicadores propuestos, y la falta de marcos regulatorios sólidos para las aguas residuales regeneradas.

Tabla 2.1: Algunos de los indicadores planteados por Rodríguez et al., para el objetivo 1 - Asegurar la existencia humana. [Elaboración propia con datos de [25]] .

Indicadores para objetivo 1 - ICoS		
Regla	Indicador	Unidad
Protección de la salud humana	Carga patógena de bacterias en los cursos de agua locales	<i>E. Coli</i> : CFU/100 ml
	Emisiones y olores	H_2S y/o CH_4 [%v/v] [ppm]
Garantizar la satisfacción de las necesidades básicas	Nutrientes recuperados en los biosólidos	ton/a de P, N, K, o, masa de nutrientes en los sólidos
	Fuentes de energía alternativas	Número de tipos de fuentes de energía
Distribución justa de las oportunidades de uso de los recursos naturales	Potencial de calentamiento global	t CO_{2eq} /a

Tabla 2.2: Algunos de los indicadores planteados por Rodríguez et al., para el objetivo 2 - Mantener el potencial productivo de la sociedad. [Elaboración propia con datos de [25]] .

Indicadores para objetivo 2 - ICoS		
Regla	Indicador	Unidad
Uso sostenible de recursos no renovables	Demanda neta de combustibles fósiles	ton <i>Petroleo_{eq}</i>
Uso sostenible del medio ambiente como sumidero	Potencial de eutrofización de los cuerpos de agua	kg <i>P_{eq}</i> /a
	Potencial de acidificación	kg SO_2 /a
Desarrollo sostenible de bienes, habilidades y conocimiento	Contribución al conocimiento de la población respecto a los retos del agua y la energía	Declaración cuantificada
	Costos de construcción, operación y mantenimiento	$\$/m^3$

Tabla 2.3: Algunos de los indicadores planteados por Rodríguez et al., para el objetivo 3 - Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad. [Elaboración propia con datos de [25]] .

Indicadores para objetivo 3 - ICoS		
Regla	Indicador	Unidad
Conservación de los recursos sociales (tolerancia, solidaridad, etc.)	Fomento de la responsabilidad social	Declaración cuantificada
Conservación de la función cultural de la naturaleza	Especies endémicas preservadas	Número de especies por año

Considerando las ventajas y el tipo de conclusiones que se pueden obtener de aplicar la metodología ICoS, es que se expone como uno de los objetivos de este trabajo, teniendo en cuenta la cercanía técnica con el trabajo de Rodríguez et al. [25], por lo que el mayor aporte será su adaptación a este nuevo caso de estudio.

Capítulo 3

Antecedentes

Las referencias que se consideran adecuadas para comprender el contexto del estudio, se concentran en los tres siguientes ejes: Tratamientos de efluentes de la industria vitivinícola, Producción de Hidrógeno Verde, y, Contexto Vitivinícola en Chile.

A continuación se procede a profundizar en cada uno de ellos.

3.1. Tratamientos de efluentes de la industria vitivinícola

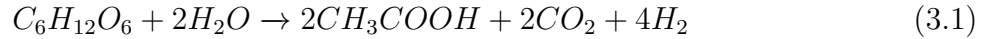
Los efluentes de la industria vitivinícola son considerados uno de los más intensos en términos de las concentraciones de materia orgánica, siendo ricos en azúcares, proteínas y disponibilidad de nutrientes en general [12]. Es por esto, que deben ser tratados antes de verterlos en cuerpos de agua, según lo expresa la normativa (ej. el Decreto Supremo - 90 [26]).

Los métodos de tratamiento secundario usualmente empleados son variados, dentro de los que se distinguen el uso de humedales artificiales, lodos activados, biorreactores de membrana y digestores anaeróbicos [27]. Dependiendo del caudal y ciertas características de la planta, se recomienda el uso de algunos de ellos por sobre otros; por ejemplo, los humedales artificiales son tecnoeconómicamente factibles en el caso de plantas vitivinícolas pequeñas [27].

Respecto de la digestión anaeróbica, esta puede operar en modalidad batch, semi-batch o continua, además de en diversas configuraciones de reactores, entre los que se encuentran los *continuous stirred tank reactor* (CSTR), *anaerobic filter* (AnF), *up-flow anaerobic sludge blanket* (UASB), y *anaerobic membrane bioreactor* (AnMBR) [6]. Este último tipo, corresponde a un reactor CSTR que presenta un módulo de micro o ultrafiltración, ya sea sumergido o *side-streamed*.

Todas las configuraciones anteriormente mencionadas permitiría el tratamiento de RILes con altos valores de DQO [12], promoviendo las vías metabólicas de fermentación oscura, e incluso las de la fotofermentación en caso de haber presencia lumínica [6].

La reacción enzimática simplificada de la fermentación oscura es la que se expone a continuación[6]:



Como es posible notar, los productos de la reacción son hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y ácido acético (CH_3COOH). Sin embargo, la digestión podría continuar hasta la fase metanogénica, en donde, además, se produciría metano (CH_4). Todo dependerá del tipo celular del cual sea privilegiada la proliferación, lo que está en directa relación con las condiciones de operación del reactor.

Considerando la tendencia mundial en el uso del H_2 como el combustible del futuro, es que el presente estudio se centrará en la producción de este gas. Para lograrlo, se implementará un reactor AnMBR, puesto que permite altos rendimientos en la remoción de DQO, bajas tasas de retención hidráulicas y aumento en la retención de biomasa en comparación con otras configuraciones antes mencionadas [6]. Si bien, este tipo de tecnología presenta mayores costos de inversión, además de otras desventajas operacionales como lo es el recambio de membranas, se presenta aquí como una alternativa a considerar dentro de la potencial matriz de producción de H_2 .

3.2. Producción de Hidrógeno Verde

El hidrógeno concentra un gran atractivo tecno-científico-económico, dado que es uno de los reactantes principales para la generación de *E-Fuels*, dentro de los que se encuentra el amoníaco (NH_3), metano (CH_4) y metanol (CH_3OH), además de otros productos de Fischer-Tropsch [8]. Estas sustancias están presentes en diversos ámbitos de la vida de manera directa o indirecta, como es el caso del amoníaco, principal molécula para la síntesis de fertilizantes y explosivos utilizados en minería.

Por otro lado, el H_2 puede ser directamente consumido para la generación de energía térmica y eléctrica, mediante el uso de convertidores [28].

Dependiendo del proceso productivo del cual se haya obtenido el H_2 y las emisiones/captura de GEI realizadas, se le asigna un color, los cuales pueden ser gris, azul o verde [29].

El H_2v es aquel que no genera GEI de manera directa, dado que proviene de la electrólisis del agua efectuada con energías renovables no convencionales (ERN) [29], pero sí existen emisiones asociadas al ciclo de vida de los equipos y/o mantenciones realizadas. Considerando el parque eólico-solar que presenta Chile, es que se plantea una estrategia nacional de H_2v , con el objetivo de posicionarse como uno de los países líderes en la producción, el uso, y la exportación de hidrógeno [8].

Sin embargo, se debe tener en mente que la electrólisis no es la única vía de producción, sino que existen formas variadas, tales como: reformado de gas natural, fotocatalisis, procesos

termoquímicos, y biológicos, entre otros [7].

En particular, los procesos biológicos surgen de la capacidad de ciertos microorganismos como los pertenecientes a los géneros *Enterobacter*, *Bacillus* y *Clostridium* para producir H_2 como producto de la fermentación [7].

Si bien los rendimientos de cada una de los métodos de producción son variados, se deben tener en consideración otros aspectos para la evaluación, dentro de los que se encuentra el impacto medio ambiental, social y las tendencias de desarrollo.

3.3. Contexto Vitivinícola en Chile

En Chile, las áreas agrícolas destinadas a la plantación de vid corresponden a 141.000 hectáreas, de las cuales el 72 % se encuentra en las regiones de O'Higgins y del Maule [30].

El potencial nacional de producción de vino es cercano a los 1.200 millones de litros [30]. Chile se presenta como el cuarto exportador mundial de vino, lo que se expone en las estadísticas de exportación; por ejemplo el año 2021 se superaron los 908,8 millones de litros exportados, equivalente a USD 2.037,3 millones [31].

Los RILes vitivinícolas se deben principalmente al lavado de equipos [11], y la tasa de generación de estos efluentes depende de las políticas y metodologías de la planta, pudiendo producirse entre 0,5 a 14 lts de RILes por litro de vino [11].

Capítulo 4

Metodología

El presente trabajo tiene como principal objetivo evaluar ambientalmente escenarios tecnológicos de tratamiento de aguas residuales y producción de H_2 mediante membranas bioactivas (BMR), utilizando la metodología de ICoS SA (KIT).

Para llevar a cabo el estudio, se estableció como caso de estudio la industria vitivinícola chilena, incorporando dentro del análisis sus requerimientos energéticos, además de la tasa de tratamiento de afluentes y composición orgánica.

En pos de cumplir con los objetivos específicos propuestos en la sección 1.1.2, se establece la siguiente metodología.

4.1. Metodología del estudio

1er obj. específico: Caracterización del caso de estudio

Se debe comenzar con la definición de los casos de estudio y parámetros relevantes para caracterizar el sistema. Para esto, se debe tener en cuenta el objetivo del trabajo, de manera de describir claramente sus fronteras, alcances y limitaciones.

Para la adquisición de datos respecto de efluentes del proceso productivo y descarga, tipos de tratamiento de aguas usualmente empleados y normativa, se plantea como recurso una revisión bibliográfica, además de la posibilidad de consultar criterio experto a través de entrevistas a personas del rubro vitivinícola y/o tratamiento de aguas.

Luego, es necesario esclarecer el potencial de producción de H_2 y su pureza esperada, como también la calidad del agua de salida del proceso de generación de este, de manera de construir un escenario tecnológico que permita el empleo del H_2 para la generación de energía eléctrica, y a la vez cumpla la normativa de liberación de aguas de proceso. Parte de estas estimaciones se pueden realizar utilizando el software Simba#; en caso contrario, mediante revisión bibliográfica.

Entonces, es posible plantear el balance de energía eléctrica de cada uno de los escenarios

propuestos y establecer la capacidad de autoabastecimiento del H_2 .

2do obj. específico: Estimaciones del LCA

De manera de realizar las estimaciones del LCA, en primer lugar se debe interiorizar la metodología de esta herramienta, la que se encuentra disponible en mayor detalle en la sección 4.1.1. A continuación, se expone a modo general su aplicación en este trabajo.

Para llevar a cabo el objetivo, se tiene que tener en consideración el estado del arte de los análisis de ciclo de vida empleado para tratamientos de aguas, de manera de definir las categorías de impacto que serán implementadas dados los alcances del estudio, la disponibilidad de datos bibliográficos y la base de datos EcoInvent.

Luego, es necesaria información respecto de los requerimientos de materiales para la construcción de las plantas, criterios de escalamiento, parámetros de conversión y rendimientos, entre otros. Todos estos deben ser obtenidos mediante bibliografía o criterio experto, de manera de poder construir los inventarios correspondientes.

Una vez que los inventarios de masa y energía estén completos y los factores de impacto ambiental hayan sido seleccionados, es posible estimar las categorías de impacto escogidas para cada uno de los escenarios planteados. Al momento de analizar los resultados, se debe tener en consideración la incidencia de los supuestos y la calidad de la información recopilada.

De ser posible, se sugiere la comparación de los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura.

3er obj. específico: Aplicación metodología ICoS

Para la aplicación de la metodología ICoS es necesario comprender la lógica y reglas de la describen, esto se encuentra detallado en la sección 4.1.2. A continuación, se expone a modo general su aplicación en este trabajo.

La implementación esperada dado el alcance de esta investigación, consiste en una revisión bibliográfica respecto del estado del arte de la metodología, para posteriormente seleccionar los indicadores propuestos en la literatura que sean atingentes al caso de estudio.

Los indicadores escogidos deben ser cuantificados, siendo posible que se nutra de los resultados del LCA, requiera de la búsqueda y/o estimación de ciertos parámetros del proceso o deba ser valorizado por criterio experto.

Se puede iterar respecto de las propuestas en función de la disponibilidad de datos, y se sugiere la comparación de los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura.

4to obj. específico: Propuesta de mejora

En función de los resultados y discusiones desarrolladas al emplear las herramientas de LCA e ICoS, se podrán identificar los puntos críticos de la operación y construcción, con el

objetivo de disminuir los impactos detectados por cada una de las metodologías utilizadas.

Dado el análisis anterior, se deben proponer recomendaciones al caso de estudio, las que permitan mejores desempeños ambientales y/o socio-económicos, además de presentar respaldo bibliográfico respecto de su validez y aplicabilidad.

4.1.1. Análisis de Ciclo de Vida - ACV; LCA

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV; LCA en inglés), consiste en una evaluación sistematizada por la norma ISO 14.040 [13] (y otras normas del mismo instituto), cuyo objetivo es abordar los aspectos e impactos ambientales de un proceso o producto. Es por esto que permite la comparación entre diferentes escenarios, de manera de que la toma de decisiones sea fundamentada y atingente al escenario local de aplicación.

Para su realización se debe definir el **objetivo del estudio y su alcance**, estableciendo los límites del sistema físico, como también discutiendo cuáles serán las fases que se considerarán, construcción, operación y/o desmantelamiento, dependiendo del sentido de la evaluación.

Cada una de las fases seleccionadas tiene asociado el proceso de recopilación de datos que permitan la elaboración y posterior **análisis de inventario de materia y energía**. La mayor dificultad que se presenta en esta etapa corresponde a la disponibilidad de datos y la incertidumbre asociada a cada uno de ellos.

Otro punto a definir, conjuntamente con el alcance, consiste en la unidad funcional. Esta corresponde a la unidad por la cual se normalizarán los flujos/inventarios/impactos, y tendrá gran incidencia a la hora de evaluar y comparar escenarios, puesto que establece una referencia/punto en común.

En general, se habla del LCA como un proceso iterativo, altamente dependiente de la información disponible, y que por lo tanto, se retroalimenta cada vez que se profundiza en la investigación. Esto se bosqueja en la fig. 4.1.

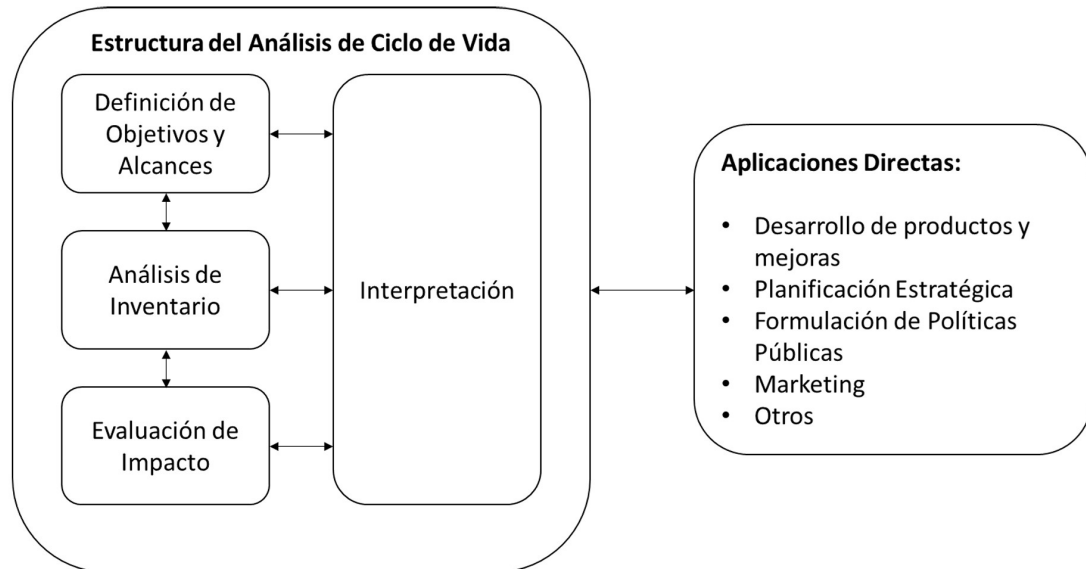


Figura 4.1: Interconexión entre cada una de las fases de desarrollo de un LCA [13].

Para la **evaluación de impacto ambiental** dado el inventario consolidado, existen diversas metodologías, las cuales generan estimaciones de cada uno de los factores de emisión de acuerdo al conjunto de niveles de perturbación, *midpoint* y *endpoint* considerados. Los niveles *midpoint* son los que guardan una relación causa-efecto directa y fácilmente descriptible, exponiendo un problema medioambiental particular; mientras que los niveles *endpoint* son la asociación de los indicadores anteriores, de manera de estimar el impacto global generado sobre algunas de las áreas de protección definidas. Esto simplifica la interpretación y comparación de resultados.

Una de estas metodologías de evaluación de impactos corresponde a ReCiPe [32], la cual considera 18 indicadores *midpoint*, los que se interrelacionan de manera de establecer 3 categorías *endpoint*, englobadas en: salud humana, biodiversidad y escasez de recursos. En la fig. 4.2 se expone un esquema de lo anterior.

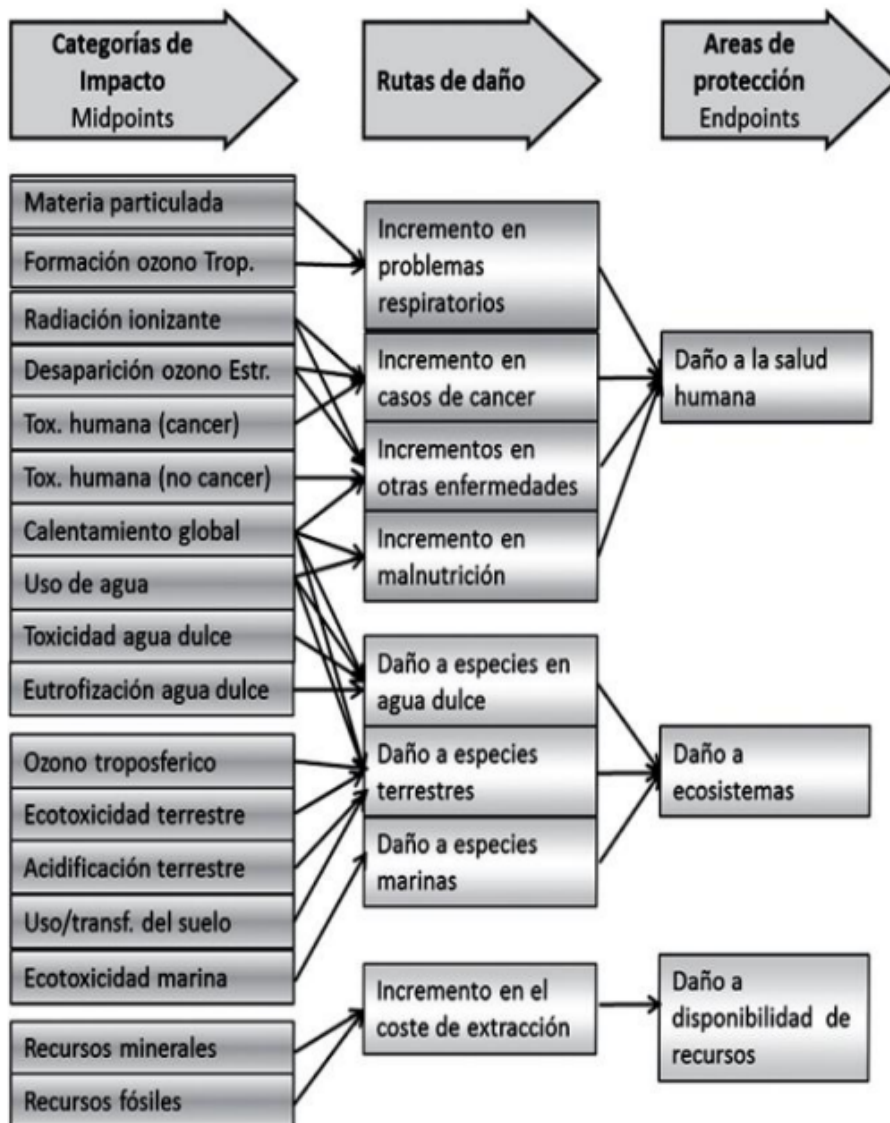


Figura 4.2: Interconexión entre los indicadores *midpoint* y *endpoint* declarados en ReCiPe [33]. Se debe agregar al listado la categoría de impacto de: eutrofización marina [32].

Por lo anterior, se tiene que para la realización de un LCA se deben definir las categorías *midpoint* y/o *endpoint* que serán evaluados.

Como se mencionó anteriormente, esta metodología requiere el empleo de factores de emisión, los que pueden ser calculados o encontrados en bases de datos tales como EcoInvent [34]. Sin embargo, se debe tener en consideración que estos son tiempo-lugar específicos, pero que en algunos casos se utilizan los factores globales debido a la complejidad para estimarlos y a la escasa disponibilidad de datos.

Posterior a las estimaciones, es posible proponer una **interpretación de los resultados**, tanto del inventario generado, como de la evaluación de impacto ambiental. Frente a

esta propuesta, se debe tener presente la incidencia de los supuestos y simplificaciones consideradas, además de la calidad de los datos y sensibilidad de los resultados.

Luego de la reflexión anterior, es posible discutir la suficiencia de los resultados para concluir con respecto al objetivo y alcance del estudio. Esto podría generar propuestas de mejoras al proceso o identificación del proceso/producto con menor impacto ambiental dado los indicadores considerados.

4.1.2. Concepto Integrativo de Desarrollo Sostenible - ICoS

El Concepto Integrativo de Desarrollo Sostenible (ICoS en inglés; *Integrative Concept of Sustainable Development*), desarrollado por la Asociación Helmholtz, corresponde a un marco de evaluación de la sustentabilidad que busca la integración de criterios (ecológicos, sociales, económicos, etc), de manera de que estos no se vean superpuestos y su respectiva valorización sea comprendiendo su transdimensionalidad, por lo tanto, englobando su complejidad.

La base de esta metodología se asienta en tres objetivos [14]: asegurar la existencia humana, mantener el potencial productivo de la sociedad, y, preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad. Cada uno de estos objetivos tiene asociadas cinco reglas; un resumen de estas se encuentra en la tabla 4.1. Estas reglas tienen un sentido ético y sustentable, nutriéndose principalmente del informe Brundtland, la Declaración de Río y la Agenda 21 [14].

Para mayor comprensión de las reglas ICoS, se sugiere revisar el documento desarrollado por ITAS, *Institute for Technology Assessment and Systems Analysis* [35].

Tabla 4.1: Resumen de los objetivos y cada una de sus reglas, definidos por ICoS . [Elaboración propia con datos de [35] y [36]].

Objetivos generales de la sostenibilidad		
Asegurar la existencia humana.	Mantener la capacidad de la sociedad de manufacturar productos o proveer servicios.	Preservar las opciones de desarrollo y acción.
Reglas de la sostenibilidad		
Proteger la salud humana.	Usar los recursos y las fuentes de energía renovables de manera sostenible.	Proveer igualdad de oportunidades en educación, empleo, acceso a cargos públicos e información.
Asegurar la satisfacción de las necesidades básicas.	Usar los recursos y las fuentes de energía no-renovables de manera sostenible.	Facilitar la participación en procesos sociales de toma de decisiones.
Garantizar una existencia autónoma e independiente.	Usar el medio ambiente sin dañar su capacidad de sumidero.	Preservar el patrimonio y la diversidad cultural.
Ofrecer a todas las personas iguales oportunidades de disfrutar de los beneficios del medio ambiente.	Evitar riesgos técnicos inaceptables.	Conservar la naturaleza y el paisaje como bienes culturales.
Compensar las disparidades extremas en la distribución de ingresos y riquezas.	Desarrollar bienes, habilidades y conocimiento de manera sostenible.	Mantener la cohesión social.

La aplicación de esta metodología permite determinar si es que el proyecto en cuestión contribuye, o no, hacia un desarrollo sostenible. Al igual que el LCA, se tiene que el proceso es iterativo y que depende principalmente de la disponibilidad de información, profundidad y objetivo del estudio.

Para la ejecución de ICoS [24] [37], en pos de desarrollar y ejecutar un marco evaluador del sistema seleccionado en cuanto a sostenibilidad, se requiere en primer lugar de la definición del caso de estudio, tecnologías, límites y alcances.

Posteriormente, se deben establecer los criterios de evaluación. En ellos se busca que sean entendibles, aplicables, la implementación pueda ser prevista, presenten relación con la sostenibilidad y exista disponibilidad de información. Se obtienen mediante revisión bibliográfica, o en entrevistas con las partes interesadas y expertos, considerando las normativas vigentes, aspectos científicos, económicos, industriales, sociales y otros.

Los criterios deben ser llevados a indicadores que permitan efectuar la evaluación, es decir, que puedan ser cuantificables directa o indirectamente a través de encuestas de valorización. Se debe chequear la relevancia de los indicadores con el caso, además de compatibilizar y asignar cada uno de ellos a un objetivo y regla de ICoS, de manera de argumentar que tienen relación con la evaluación de la sostenibilidad.

Para defender la trascendencia de los criterios e indicadores seleccionados, además de generar nuevas propuestas, se plantea en el estudio de Fuss et al. [24] el responder las siguientes preguntas en el contexto de estudio:

- ¿Qué es sostener?
- ¿Por qué debería ser sostenido?
- ¿Quién está preocupado?
- ¿Qué reemplazos se permiten en el sistema actual?

Finalmente, se debe cuantificar cada uno de los indicadores propuestos de la manera que corresponda, para luego compararlo con el valor ideal del escenario sostenible. Esto último puede que no siempre sea posible; en tal caso, solo se deben reportar los valores y discutir respecto de su magnitud. Se sugiere el análisis de los indicadores por separado según el objetivo al que correspondan, dado que permite analizar en mayor detalle las debilidades y fortalezas del sistema.

Capítulo 5

Caracterización del caso de estudio

En este capítulo se expone la caracterización del caso de estudio, es decir, caudales y concentraciones de RILes de la industria vitivinícola, además de propuestas de escenarios con diferentes tecnologías de tratamiento secundario.

Como se dijo anteriormente, los RILes de la industria vitivinícola son principalmente producidos por el lavado de equipos, por lo que su composición y caudal varía ampliamente dependiendo de cada planta.

Respecto de la composición de estos efluentes, se puede decir que depende tanto del tipo de vino producido, como del período del año, diferenciándose así la cosecha (febrero, marzo y abril) del resto.

En un principio, se intentó modelar el funcionamiento de una planta promedio, por lo que se consultaron varias referencias [38][39][40], pero las concentraciones requeridas para las estimaciones presentaban amplios rangos y no se declaraba una interrelación entre los componentes. Es decir, podría fijarse una concentración de azúcares promedio, pero no es directo decir que la composición de nitrógeno también sería promedio.

Por lo anterior, para fijar la composición se utilizó la información reportada en la tesis de Macarena Escudero [41], la cual correspondía a la Bodega de Concha y Toro - Chimbarongo (tabla 5.1). Esto permite que la línea base del estudio sea con información de un caso nacional. Además, cabe mencionar que Macarena desarrolló un modelo de producción de hidrógeno para un AnMBR (*Aerobic Membrane BioReactor*), resultados que fueron utilizados más adelante para la propuesta de escenarios.

Tabla 5.1: Fragmento de la tabla de caracterización del afluente de la planta Concha y Toro - Chimbarongo. Parámetros reportados en el trabajo de M. Escudero. [41].

Caracterización de afluentes, Concha y Toro - Chimbarongo				
Parámetro	Unidad	Período de cosecha	Período de no-cosecha	Promedio ponderado por tiempo
COD	mg/L	18.522	3.030	8.240
TP	mg/L	15	15	15
TKN	mg/L	80	80	80

En relación al caudal, revisando diferentes Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) y fiscalizaciones del Sistemam Nacional de Información de Fiscalización Ambiental (Snifa) para grandes vitivinícolas, se encontró que cada planta trata sus RILes, los cuales son liberados a diferentes tipos de cuerpos de agua, por lo que cumplen diferentes calidades, todas ellas descritas en el Decreto Supremo 90 [26]. Dentro de los informes seleccionados, los caudales eran del orden de cientos de litros por día.

La tecnología de reactores de membrana (MBR y AnMBR) presenta ventajas operativas respecto de otros tipos de reactores en el contexto de vitivinícolas [42]. No obstante, también presenta grandes costos de capital. La bibliografía expone que tanto el CAPEX [43] como el OPEX [44] de reactores de membrana, presentan un comportamiento decreciente del tipo exponencial, estabilizándose aproximadamente a los $5000[m^3/d]$.

En primera instancia, se intentó proponer un caso de estudio que fuese tecnoeconómicamente factible, por lo que surgió la idea de formación de *clusters* vitivinícolas. Para esto, se fijó la comuna de Molina para evaluar la viabilidad. Sin embargo, las empresas allí presentes liberan sus RILes a diferentes cuerpos de aguas y calidades, por lo que deja de ser atractiva la iniciativa, tanto por las regulaciones respecto de las concentraciones, como por los derechos de agua asociados.

Para resolver lo anterior, es que se fijó el caudal de los casos de estudio en $1000[m^3/d]$, de manera de ser el punto medio entre magnitudes atractivas para la tecnología de membrana y eventualmente factibles para una vitivinícola.

La alta desviación de los datos reportados para los tratamientos de aguas también está presente a la hora de buscar información respecto de los consumos energéticos.

Por las dificultades aquí expuestas es que como caso base se escogió la línea de tratamiento de Concha y Toro - Lontué, de la cual se obtuvo, mediante una entrevista [45], tanto la descripción verbal del diagrama de flujo presente en la fig. 5.1, como valores de consumo energético y potencia aparente, que serán útiles en la realización del inventario.

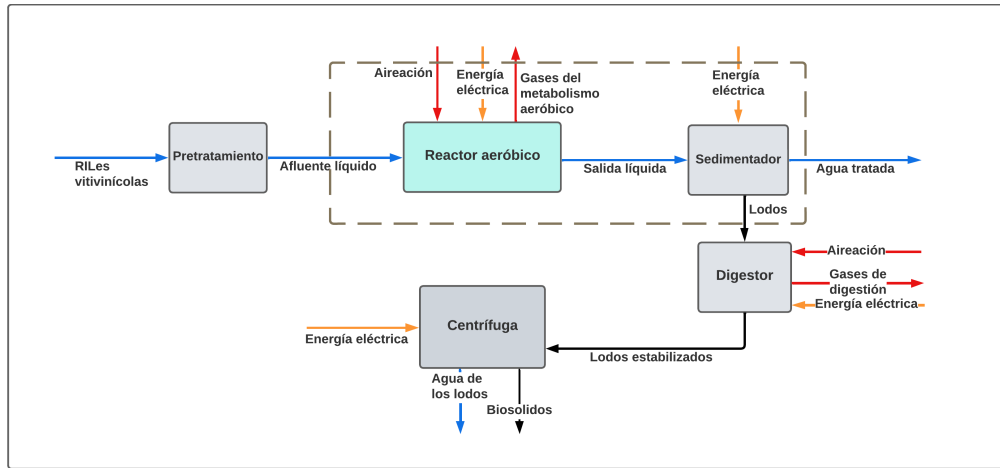


Figura 5.1: Diagrama de bloque del tratamiento secundario basado en la tecnología de lodos activados (escenario #0), análogo al caso de Concha y Toro - Lontué [45].

De la entrevista con un representante de Concha y Toro, se pudo dilucidar que el principal foco de atención para ellos es la seguridad energética, pero que a largo plazo la seguridad hídrica tomará relevancia dado los pronósticos de sequía.

Entonces, dado todos los antecedentes recopilados es que se plantean los siguientes escenarios de estudio. Todos serán evaluados para las concentraciones iniciales promedio expuestas en la fig. 5.1 y un caudal de $1000[m^3/d]$. Además, en términos generales, la línea de lodos se mantendrá con respecto al escenario base, a excepción del sedimentador, el cual solo es necesario para el reactor de lodos activados; por lo que se demarca con línea segmentada en la figura 5.1 las operaciones que se ven modificadas entre cada uno de los casos, y que por lo tanto serán los límites del sistema.

- **Escenario base: Reactor de lodos activados + Sedimentador**

Este caso se basa en lo que actualmente se encuentra emplazado en la planta de Concha y Toro - Lontué, dado que corresponde a la tecnología más frecuentemente aplicada. Para mayor detalle, mirar la fig. 5.1.

- **Escenario 1: MBR**

Se reemplaza el reactor del escenario anterior por un reactor aeróbico de membrana, por lo que ya no se requiere del equipo de sedimentación. La idea es evaluar si es que aún cuando un MBR (Membrane BioReactor) puede tener a priori costos de inversión mayores, es capaz de competir en términos energéticos y de análisis de ciclo de vida, con una tecnología más simple como lo es el reactor de lodos activados.

El diagrama resultante puede observarse en la fig. 5.2.

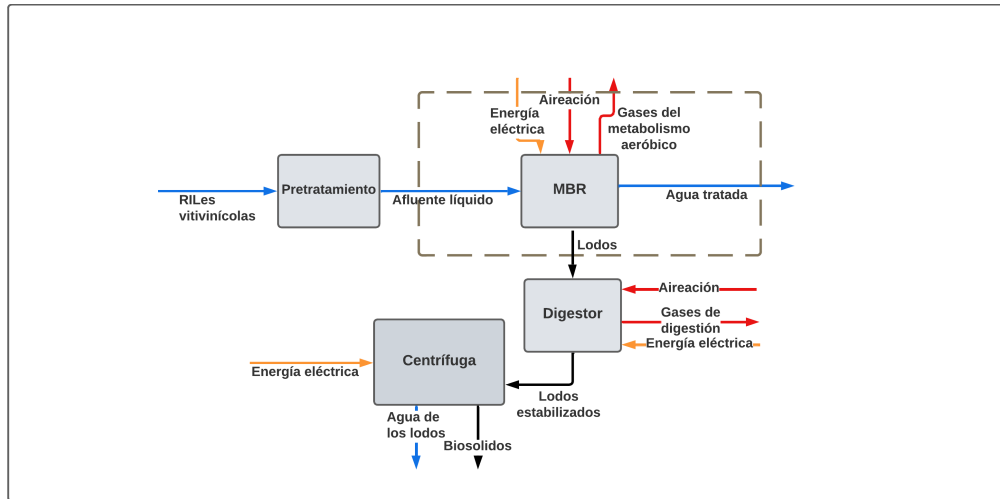


Figura 5.2: Diagrama de bloque para el reactor MBR (escenario #1).

- **Escenario 2: AnMBR + MBR**

Se plantea el uso de un reactor del tipo AnMBR para la producción de hidrógeno como subproducto, tal como se modeló en la tesis de Macarena Escudero [41]; esto podría ser beneficioso para el sistema en términos de disminuir las emisiones directas del tren de tratamiento.

Sin embargo, según los resultados reportados del modelo [41], la salida es considerada aún alta en términos de carga orgánica, por lo que se plantea la implementación de un reactor aeróbico de membrana (MBR), de manera de cumplir con la regulación.

El diagrama resultante puede observarse en la fig. 5.3.

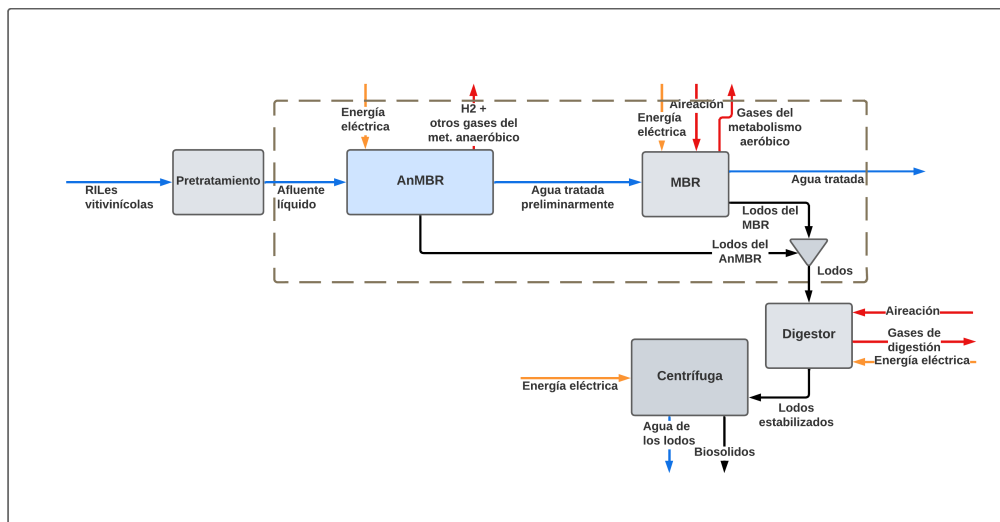


Figura 5.3: Diagrama de bloque para el proceso AnMBR + MBR (escenario #2).

- **Escenario 3: AnMBR + MBR + Producción energética**

Considerando que el sistema anterior produce hidrógeno a una tasa de $68,3 [g_{H_2}/m^3_{afluente}/d]$, se plantea su utilización *in-situ*. Para lograrlo, se requiere un sistema de purificación y de conversión a energía eléctrica.

Respecto de la purificación, se escogió el proceso PSA (*Pressure Swing Adsorption*), dado que los principales gases liberados en el AnMBR son hidrógeno y dióxido de carbono, y existe bibliografía que respalda la capacidad del proceso para purificar hidrógeno en tales condiciones.

Luego, para la generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno se escogió una celda de combustible (*fuel cell*), de manera de lograr altos rendimientos de conversión y poder dotar al sistema de un bono energético.

El diagrama resultante puede observarse en la fig. 5.4.

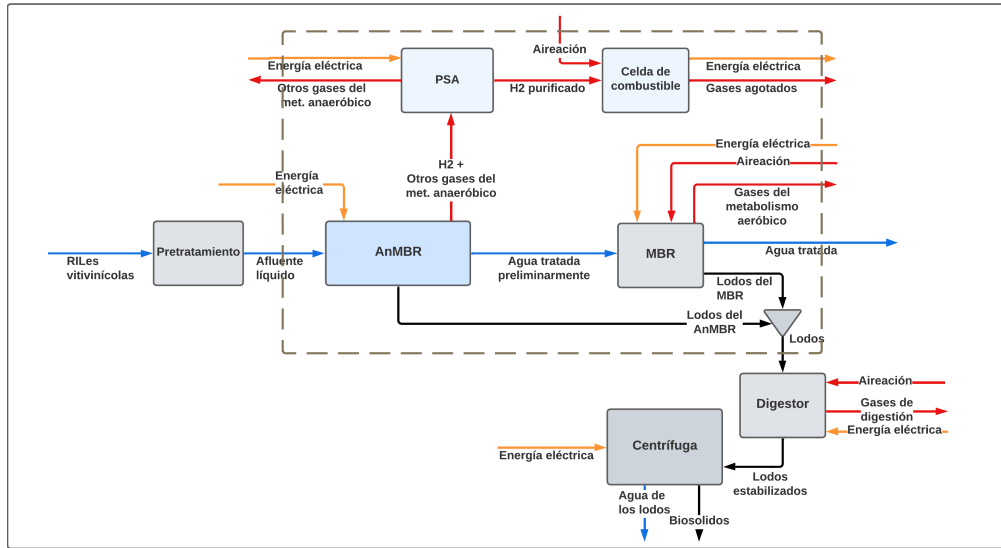


Figura 5.4: Diagrama de bloque para el proceso AnMBR + MBR + Producción energética (escenario #3).

Con los cuatro escenarios planteados, compilado expuesto en la tabla 5.2, en donde las calidades y flujos de agua, a la entrada y salida de los sistemas en cuestión serán equivalentes (igual producto), se analizarán los casos en términos de operación, estableciéndose como unidad funcional el volumen de agua tratado [m^3]. Lo anterior se debe a que siempre se obtendrá el mismo caudal de efluente, entonces la normalización de resultados podría no ser necesaria al momento de comparar.

En el Anexo A es posible encontrar la hoja de cálculos que se utilizó para las estimaciones de las siguientes secciones.

Tabla 5.2: Resumen y siglas de los escenarios propuestos para la evaluación de impacto ambiental.

Compilado de los escenarios propuestos		
Escenario	Siglas	Descripción
# 0	LA	Reactor de Lodos Activados + Sedimentador
# 1	MBR	<i>Membrane Bioreactor</i>
# 2	AnMBR + MBR	<i>Anaerobic + Aerobic Membrane Bioreactor</i>
# 3	AnMBR + MBR + H_2	<i>Anaerobic + Aerobic Membrane Bioreactor + Línea de aprovechamiento de H_2</i>

5.1. Conclusiones parciales

En primer lugar, se esclarecen las regulaciones entonor a las calidades de agua tratada y derechos. Para cada viña, se define un punto de liberación, y dependiendo de cuál sea este, son las concentraciones con las que debe cumplir. Respecto de los derechos de aguas, estos dependerán del punto de liberación, por lo que se debe tener en consideración de dónde se obtiene y se vierte, de manera de no afectar la oferta *downstream*.

Las tecnologías de reactores de membrana presentan economías de escala, tanto para el CAPEX, como para el OPEX, las que presentan una estabilización desde caudales aproximadamente de 5.000 [m^3/d].

En general, las viñas localizadas en la comuna de Molina producen caudales menores a 1.000 [m^3/d]. Pero, se consideró plausible la existencia de una viña con esa capacidad, dada la tasa productiva de la comuna y una eventual canalización de efluentes. Es por esto que los escenarios se establecieron para afluentes de 1.000 [m^3/d].

Hoy en día, la seguridad energética es el foco principal de la industria, además de los esfuerzos para disminuir los impactos ambientes de los procesos. Es por esto que se plantean los reactores de membrana, MBR y AnMBR, como opciones que podrían ser ventajosas, pero que aún no son ampliamente utilizadas. En particular, el AnMBR se establece para estudiar la conveniencia producir H_2 como gas metabólico y utilizarlo *in-situ* en forma de energía eléctrica; esto dado que se estima que el afluente vitivinícola tendría un potencial de 68,3 [$g_{H_2}/m^3_{afluente} /d$]. Mientras que el MBR se postula como una alternativa que podría demandar menor energía optimizando el proceso de descomposición.

En el caso del AnMBBR existe bibliografía que respalda la capacidad de producción de H_2 bajo ciertas condiciones operacionales. Sin embargo, se requiere mayor experimentación para esclarecer su potencial.

Capítulo 6

LCA Operacional

Para el análisis de ciclo de vida (ACV; LCA), se consideraron las etapas de construcción y operación en estado estacionario de las plantas de tratamiento, en donde los límites de cada uno de los escenarios de estudios, corresponden a las líneas punteadas de los diagramas anteriormente expuestos (figs. 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4).

En esta sección, se exponen los principales supuestos y resultados del **LCA operacional**.

Para la realización del LCA operacional se deben cuantificar los impactos ambientales descritos por la metodología ReCiPe [32], sin embargo, para esta sección se priorizó la estimación de gases de efecto invernadero (GEI), dado el contexto de los tratamientos de agua. Para aquello, se consideraron las emisiones directas e indirectas, relacionadas con el funcionamiento de la planta en estado estacionario.

En el caso de las emisiones directas, estas tienen relación con la liberación de GEI durante la operación y en la superficie del equipo que tiene contacto con la atmósfera. Por otro lado, las emisiones indirectas se tienen dado el consumo energético operacional de la planta.

Para cuantificar las emisiones es necesario realizar los balances de masa de cada uno de los escenarios. En el caso de las emisiones directas, el balance dará cuenta del escape de gases. Por otro lado, para la estimación de las emisiones indirectas se requiere contar con métodos que permitan sensibilizar el consumo energético de cada equipo y escenario, según la calidad y volumen de los flujos de entrada y de salida.

Considerando la disponibilidad de información, no fue posible obtener el nivel de detalle/información necesario para las estimaciones, por lo que, a continuación se enlistan los puntos que se tuvieron en cuenta como suposiciones para el desarrollo de la estrategia utilizada.

- El reactor en el que se disminuye la Demanda Química de Oxígeno (DQO, COD por sus siglas en inglés) es siempre el equipo que consume sustancialmente mayor energía con respecto al resto de la línea de tratamiento. Esta afirmación se sustenta principalmente por el intensivo uso de aereadores, sistemas de agitación y bombeo en algunas tecnología. La información fue validada por Concha y Toro [45], y también por bibliografía.

- Dado que el reactor corresponde a la operación unitaria en donde las reacciones de disminución de la DQO ocurren en mayor medida, las emisiones directas también serán efectuadas predominantemente en el reactor.
- Hablar de DQO invisibiliza ciertas características físicas y bioquímicas que podrían presentar los lodos, tales como, diferentes velocidades de sedimentación, mayor o menor capacidad de aglutinamiento o hidratación, diferencia en las poblaciones microbianas, entre otras. Teniendo en cuenta el origen de los RILes, podría generarse un modelo en torno a la variación de calidad de los lodos dependiendo de las operaciones unitarias por las que haya residido, sin embargo, esto queda fuera del alcance de este trabajo.
- La calidad del agua tratada y lodos de descarte está reglamentado en Chile, por lo que sin importar la tecnología utilizada, siempre se debe cumplir con estándares mínimos [26] [46].
- Si bien cada escenario de estudio puede tener una dinámica interna particular, la calidad y cantidad del agua tratada será fijada de manera de que la comparación sea justa. Para lograrlo, es probable que los tiempos de residencia, y por ende, dimensionamiento de los equipos difiera en cada caso. Lo importante a destacar es que, el reactor de lodos activados es el que menor capacidad de disminución de la DQO tiene, pero aún así es capaz de cumplir la normativa, por lo tanto, siempre es posible construir un reactor de membrana, que cumpla con las mismas calidades.
- Respecto de los lodos, también se fija la cantidad y calidad de ellos, exceptuando la concentración del Nitrógeno total de Kjeldahl (TKN). Esto se debe a que la presencia de oxígeno promueve reacciones asociadas al nitrógeno, que en el reactor anaeróbico no se tienen, por lo que las concentraciones variarán. Mientras que en los reactores aeróbicos se asume un lodo sin TKN, en el reactor anaeróbico se tiene que el 24% del TKN que ingrese se libera en el lodo. Si bien la diferencia es relevante dado el potencial de eutroficación del material, entre otros impactos, esto no debiese suponer variaciones significativas en la operación de los equipos *downstream*. En términos de su relevancia ambiental en la disposición final debería ser incorporado, pero no se cuenta con la información necesaria para este análisis.
- Los consumos energéticos de las tecnologías que se proponen, fueron reportados con base a la remoción de DQO y consideran la línea de lodos, por lo tanto las estimaciones son justas, aún cuando los tamaños pueden variar.
- Como se dijo anteriormente, es posible que el funcionamiento del digestor y centrífuga varíe dada las modificaciones en las entradas, si bien la DQO y flujos serán los mismos, no necesariamente los tipos y concentraciones de moléculas, pero aún así, su variación no será significativa considerando que no son equipos energéticamente intensos en comparación al tratamiento secundario.
- El mismo argumento anterior es aplicado a la hora de estimar las emisiones directas, por lo que solo se considerarán los GEI liberados en cada uno de los reactores (tratamiento secundario) [47] [48].

Entonces, la estrategia utilizada consistió en evaluar las emisiones directas e indirectas de cada uno de los reactores propuestos como tratamiento secundario.

La estrategia se dividirá en: **Balances de masa**, **Emisiones directas**, **Consumo energético** y **Emisiones indirectas**, dentro de las cuales se abordarán cada uno de los escenarios propuestos, para finalmente obtener los **Resultados del LCA operacional por escenario**.

6.1. Balances de masa

Para plantear los balances de masa en cada uno de los escenarios, es necesario conocer las reacciones y sus respectivas conversiones. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el concepto de DQO engloba un conjunto de moléculas, cuya representación estequiométrica se dificulta por la escasez de estudios bioquímicos detallados.

Por otro lado, considerando el argumento del reactor de lodos activados, como aquella tecnología que presenta menor capacidad de remoción de DQO, pero que aún así es posible que cumpla con la normativa [42] [45]. Entonces, fijando el flujo de entrada, siempre puedo obtener la misma salida en cada uno de los escenarios, sin importar el reactor que este usando, si y solo si, la tecnología de peor rendimiento puede hacerlo.

Otro elemento a considerar, es que al implementar los reactores de membrana no se requiere de la etapa de sedimentación. Esto podría generar confusión al realizar la homologación de flujos, sobretodo al comparar el escenario #0 con el #2, no obstante, se debe recordar que la función de los sedimentadores es de separación, por lo tanto, si bien cada una de las entradas y salidas podrían no ser idénticas por separado, si lo serán al sumar todas las corrientes de entrada al reactor para aguas y sólidos, análogo para las salidas. Esto también se expresa al asumir que no existen reacciones dentro del sedimentador [20] [47], por lo tanto, tampoco existen emisiones.

Luego, la caracterización de flujos está dada por la tabla 6.1, la cual es válida para todos los escenarios. Pero, en los casos donde se incorpora el AnMBR, entonces, existe una caracterización de salida intermedia, la cual se describe en la tabla 6.2 y fue estimada mediante la utilización del software Simba# con la simulación realizada en el trabajo de M. Escudero [41].

Tabla 6.1: Caracterización de los flujos globales de entrada y salida.

Caracterización de flujos		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo líquido entrada	m^3/d	1.000
Flujo líquido salida	m^3/d	971
COD entrada	g/m^3	8.240
TKN entrada	g/m^3	245
COD salida	g/m^3	70,00
TKN salida	g/m^3	50

Tabla 6.2: Caracterización de los flujos de salida del reactor AnMBR. Válido para los escenarios #2 y #3 [41].

Caracterización de flujos		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo líquido salida	m^3/d	971
COD salida AnMBR	g/m^3	6.326
TKN salida AnMBR	g/m^3	192

Una aclaración pertinente es que en el caso de los escenarios #2 y #3, el afluente al MBR es de 971 [m^3/d] y tienen las características del efluente de salida del AnMBR.

En este punto se deben aclarar dos aspectos de normativas. Respecto de la calidad de lodos (*sludge*), esta se enfoca principalmente en la humedad contenida [46], lo que será controlado en el digester y centrífuga, por lo que queda fuera de los alcances del estudio. Por el lado del agua, el decreto [26] especifica ciertas concentraciones permitidas, en este caso las relevantes son Demanda biológica de oxígeno (DBO_5 ; BOD_5) y Nitrógeno total de Kjeldahl (TKN).

La DBO_5 corresponde a los requerimiento de oxígeno disueltos de microorganismos aeróbicos, a lo largo del cultivo durante 5 días a 20[°C]. Mientras que para el caso de la TKN, sus mediciones están asociadas a compuestos orgánicos nitrogenados, además del amoniacó.

Por razones evidentes, la DBO_5 no se puede medir en línea, por lo que para el control diario se realizan estimaciones para aproximarla a la DQO, la cual estima a demanda de oxígeno para oxidar completamente los compuestos orgánicos. Esta mediciones solo sirve para control interno, sin embargo, se deben realizar los procedimientos *off line* de la DBO_5 para corroborar el cumplimiento de la normativa.

En el caso de Concha y Toro - Lontué, la liberación de las aguas es al estero llamado Estero Seco, y su método de aproximación es el siguiente:

$$\beta \cdot DQO = DBO_5; \beta \in [0, 1] \quad (6.1)$$

En particular, para el afluente se tiene que $\beta = 0,7$, mientras que para el efluente $\beta = 0,11 - 0,2$.

Entonces, si la normativa para liberación a cuerpos de agua fluviales (por ej., esteros) es máximos de $DBO_5 = 35 [mgO_2/L]$, la equivalencia sería aproximadamente, $DQO = 175-318 [mg/L]$.

Aún considerando lo anterior, en la entrevista a Concha y Toro, expusieron que están liberando las aguas con una DQO (COD) que ronda la 70 [mg/L]. Es por esta razón que se estableció ese valor como referencia en la tabla 6.1.

Para describir completamente el sistema, se debería plantear el balance a los gases

generados por el metabolismo de los microorganismos presentes en los flujos. Considerando que se fijaron las entradas y salidas de cada uno de los reactores, entonces siempre es posible despejar los flujos gaseosos, asumiendo la prevalencia de ciertas reacciones dada la presencia o ausencia de oxígeno.

Es importante considerar que el dióxido de carbono generado en los tratamientos de aguas afecta al balance de masa, en particular en la disminución de COD. Por otro lado, para la estimación de otros tipos de gases, tales como el óxido de nitrógeno, su cálculo se establece como una proporción de la disminución del Nitrógeno total de Kjeldahl (TKN), según lo establecido por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) [20].

A continuación se presentan los balances de masa para los componentes gaseosos según el tipo de proceso utilizado.

6.1.1. Procesos anaeróbicos

El reactor AnMBR, como lo dice su nombre, presenta reacciones anaeróbicas. Esta tecnología se encuentra en los escenarios #2 y #3, ambos con idénticos regímenes de producción. La caracterización de su flujo gaseoso se encuentra en la tabla 6.3 y fue obtenido mediante la simulación antes mencionada [41].

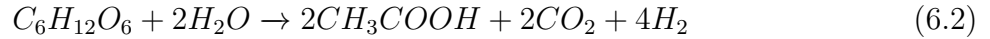
Tabla 6.3: Caracterización de los gases emitidos por el reactor AnMBR [41].

Caracterización del flujo gaseoso - AnMBR		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo gaseoso	m^3/d	1.372,00
Fracción molar H_2	%	55,80
Conc. H_2 en F. Gaseoso	mol/m^3	24,89
Conc. CO_2 en F. Gaseoso	mol/m^3	18,76
Conc. CH_4 en F. Gaseoso	mol/m^3	3,41E-04
F. molar H_2	mol/d	34.149,08
F. másico H_2	kg/año	17.825,82

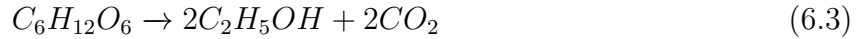
Si bien el modelo implementado en la simulación es ampliamente utilizado en diferentes publicaciones, la bibliografía asociada a su desarrollo no se considera del todo clara al momento de argumentar las cinéticas, además de exponer reacciones que no cumplen los balances de masas, y que por ende, no tienen sentido bioquímico.

Por lo anterior, se intenta argumentar los resultados estimados en Simba# con las reacciones 6.2 y 6.3, las que podrían llevarse a cabo dadas las características de los flujos y la ausencia de oxígeno, aún cuando podrían no ser las únicas. Además, se asumió como representante de la clase de azúcares digeribles a la glucosa por su simplicidad y alta concentración en la uva.

Fermentación oscura



Fermentación alcohólica



La principal razón para escoger estas reacciones, fue para el caso de la fermentación oscura, que la mayoría de las referencias consultadas la hacen responsable de la producción de H_2 en las condiciones antes descritas. Mientras, para el caso de la fermentación alcohólica, se requería un argumento respecto de que el CO_2 producido (tabla 6.3) no estuviese en las razones estequiométricas con respecto al H_2 que plantea la fermentación oscura, sino que, de hecho, existiera más CO_2 del esperado.

Por otro lado, se tiene que la fermentación alcohólica se lleva a cabo por levaduras, las que se podría presumir que existen dadas las características del efluente, por lo que la reacción hace sentido. Sin embargo, frente a la posible inhibición de una reacción por sobre otra, es que se requieren análisis microbiológicos del caso de estudio.

En bibliografía no se encontró otra forma de justificar los balances estimados, más aún, otras reacciones reportadas para estos contextos exponían el consumo del H_2 para la producción de metano (CH_4), el cual se expone como despreciable en la tabla 6.3.

Lo anterior, expone la necesidad de la validación de los supuestos empleados y control microbiológico de los efluentes, no obstante, esto sería parte de futuras investigaciones.

En el Anexo B.1 se expone con mayor detalle la validación de los resultados de la simulación.

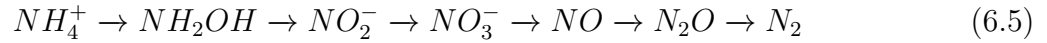
6.1.2. Procesos aeróbicos

Procesos aeróbicos son llevados a cabo tanto en el reactor de Lodos activados, como en el MBR. En ambos casos, se asume que el oxígeno suministrado es suficiente como para no generar bolsones anaeróbicos, y por ende, metano.

Las principales reacciones que pueden llevarse a cabo en estas condiciones son la metabolización aeróbica (reacción 6.4) y los procesos asociados a la nitrificación y desnitrificación mediadas por bacterias [49] (reacción 6.5).

Metabolización aeróbica





Recordando el concepto de COD, esta no se ve alterada por las vías de nitrificación y desnitrificación, dado que no están asociadas a compuestos orgánicos, pero sí afecta a las mediciones de TKN, además de producir que la corriente de gas presente óxido de nitrógeno (N_2O).

Considerando lo anterior, entonces solo la reacción 6.4 modifica la COD. Dado que no se tienen métodos para la estimación de CO_2 de manera paralela, la estrategia para la realización del balance de masa consiste en despejar la generación de dióxido de carbono (CO_2), puesto que es una variable libre.

Para la realización de la estrategia anterior, se debe tener en cuenta que la tecnología MBR se encuentra aplicada en el escenario #1 como único tratamiento secundario, pero en los escenarios #2 y #3 está acoplada al reactor AnMBR, entonces la variación de COD a considerar difiere, al igual que el caudal de entrada. Por lo anterior, se deben realizar las estimaciones para cada caso.

Para mayor detalle respecto de los balances de masa, dirigirse al Anexo B.2.

6.1.3. Resultados relevantes

Un resultado a destacar del balance de masa, corresponde a la estimación de generación de CO_2 , puesto que no se encontró bibliografía para su cuantificación mediante la implementación de factores dado que se define como biogénico.

Para su estimación, se tuvo que implementar al factor α definido por criterio, de manera de establecer la fracción másica de COD alimentada y no liberada en el agua tratada, que se dirige a los lodos (α), y la que reacciona para generar CO_2 ($1-\alpha$).

En un primer acercamiento, se definió $\alpha = 0,2$ para todos los escenarios, obteniéndose los valores se encuentran en la tabla 6.4 (recordando que, #0 = LA; #1 = MBR; #2 = AnMBR + MBR; #3 = AnMBR + MBR + H_2). Sin embargo, esto genera que los lodos producidos no sean de igual calidad en términos de COD.

Tabla 6.4: Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. $\alpha = 0,2$

Producción de CO_2 biogénico		
Escenario	Emisiones CO_2 [kg CO_2 /d]	Emisiones CO_2 [ton CO_2 /año]
#0 y #1	8.986,42	2.345,46
#2 y #3	7.812,45	2.039,05

Dada la diferencia en la calidad de los lodos, y la imposibilidad de sensibilizar los equipos (modificar sus parámetros de diseño en función de variaciones en la entrada, en pos de obtener la salida requerida) *downstream* del tratamiento secundario, es que se estableció un segundo acercamiento cuyo objetivo es la obtención de lodos con igual carga de COD.

Para lograr lo anterior, se definió el valor de α dependiendo de si el tratamiento aeróbico es el único tratamiento biológico (esc. #0 = LA y #1 = MBR), entonces $\alpha = 0,34$; y si no (esc. #2 = AnMBR + MBR y #3 = AnMBR + MBR + H_2), $\alpha = 0,2$. La diferencia de valores se podría justificar dadas las diferentes condiciones de operación. Para más detalle dirigirse al Anexo B.2.

Tabla 6.5: Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. $\alpha_{esc. \#0 \text{ y } \#1} = 0,34$ y $\alpha_{esc. \#2 \text{ y } \#3} = 0,2$

Producción de CO_2 biogénico		
Escenario	Emisiones CO_2 [kg CO_2 /d]	Emisiones CO_2 [ton CO_2 /año]
#0 y #1	7.414,8	1.935,26
#2 y #3	7.812,45	2.039,05

6.2. Emisiones directas

Para la selección de gases que deben ser cuantificados, se siguieron las directrices del IPCC [20]. Entonces, respecto al CO_2 (dióxido de carbono) producido en plantas de tratamiento de aguas, el IPCC expone que este no debe ser considerado, dado que es de origen biogénico. En el caso de los reactores aeróbicos, solo se debe considerar la emisión de N_2O (óxido nitroso), asumiendo que no existen bolsones anaeróbicos. Por otro lado, para el caso del AnMBR se debe considerar la emisión de CH_4 (metano).

Luego, se buscó por bibliografía cuáles serían los factores de emisión (FE) asociados a cada uno de los gases antes mencionados; exceptuando al metano del AnMBR, puesto que su producción fue caracterizada en la tabla 6.3.

Para la selección de los FE de N_2O , se utilizó el que sobreestimase la producción de este GEI. Lo anterior, se obtuvo al considerar el valor reportado por el IPCC (tabla 6.6). Otras referencias fueron consideradas [47] [48], pero los FE que se pueden concluir de ellas, eran significativamente menores.

Tabla 6.6: Factores de emisión de N_2O para diferentes tratamientos de aguas. [Elaboración propia con datos de [20]].

Tabla 6.8A (nueva)			
Valores de FE por defecto para aguas residuales domésticas e industriales			
Tipo de tratamiento y sistema de descarga	Comentarios	FE (kg N_2O -N /kg N)	Rango
Sistema de tratamiento de aguas residuales, FE_{planta}			
Planta de tratamiento centralizada y aeróbica	N_2O es variable y puede ser significativo	0.016	0.00016 - 0.045
Reactor anaeróbico	N_2O no es significativo	0	0 - 0.001
Laguna anaeróbica	N_2O no es significativo	0	0 - 0.001
Humedal artificial	Véase el Suplemento del 2013 de las Directrices de 2006 del IPCC para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero: Humedales		
Fosa séptica	N_2O no es significativo	0	0 - 0.001
Fosa séptica + campo de dispersión terrestre	N_2O es emitido por el suelo del sistema de dispersión	0.0045	0 - 0.005
Letrina	N_2O no es significativo	0	0 - 0.001

Para que las emisiones sean comparables, se debe tener en consideración el potencial de calentamiento del N_2O y CH_4 con respecto al CO_2 . Esto se expone en la tabla 6.7.

Tabla 6.7: Potencial de calentamiento de gases de efecto invernadero con respecto al CO_2

Potencial de calentamiento	
CH_4/CO_{2eq}	21
N_2O/CO_{2eq}	298

Con las consideraciones anteriores, se tiene los resultados reportados en la tabla 6.8. En el Anexo C.1 se expone la memoria de cálculo de esta sección.

Tabla 6.8: Estimación de las emisiones directas de GEI para cada uno de los tratamientos secundarios propuestos y su homólogo en términos de CO_{2eq} .

Emisiones directas de GEI			
Tratamiento Secundario	GEI	Unidad	Valor
Lodos activados	N_2O	$kgN_2O/año$	820,38
	CO_{2eq}	$tonCO_{2eq}/año$	244,47
MBR	N_2O	$kgN_2O/año$	820,38
	CO_{2eq}	$tonCO_{2eq}/año$	244,47
AnMBR + MBR	CO_{2eq}	$tonCO_{2eq}/año$	212,69

Como es posible notar en la tabla 6.8, el acoplamiento de los reactores AnMBR + MBR es el que menor emisión directa de GEI produce, generando un ahorro aproximado del 13 % de CO_{2eq} con respecto al uso exclusivo de reactores aeróbicos.

6.3. Consumo energético

Distintas metodologías se siguieron para la estimación de los consumos energéticos.

Durante la entrevista con el representante de Concha y Toro [45], se reportó el consumo energético de la planta para los meses de Marzo y Agosto, y se sugirió el uso de estos datos como representantes de los períodos de cosecha y no cosecha, por lo que el consumo anual se puede estimar como el promedio ponderado. Sin embargo, no toda la energía demandada por la planta es adjudicable al reactor, por lo que se utilizó como factor de consumo, la razón entre la potencia aparente del sistema versus la del reactor. Los datos entregados y sus posteriores aproximaciones se encuentra en la tabla 6.9.

Por otro lado, de las fiscalizaciones encontradas para el año 2022 [50], se reporta que el caudal promedio liberado fue de $340[m^3/d]$, por lo tanto, para escalar el consumo al escenario propuesto ($1000[m^3/d]$) se utilizó la regla de los seis décimos. La tabla 6.9 expone el resumen de lo anterior y en el Anexo C.2 se reporta la metodología de cálculo con más detalle.

Tabla 6.9: Caracterización consumo energético planta Concha y Toro - Lontué y estimaciones para escenario #0

Reactor lodos activados C&T				
Parámetro	Unidad	Valor	Comentario	Referencia
Consumo E. Marzo	kWh	190.000	Representante período de cosecha.	[45]
Consumo E. Agosto	kWh	156.000	Representante período de no cosecha.	[45]
Consumo E. anual	MWh	1.974	Promedio ponderado.	Estimación (Anexo C.2)
Pot. aparente prom.	kVA	380	Considerando toda la línea de trat. de aguas.	[45]
Pot. aparente reactor	kVA	350	Considerando aireadores y sopladores como principales demandantes.	[45]
Factor de consumo	-	0,92	Factor para distribuir el consumo energético de la planta de tratamiento.	Estimación (Anexo C.2)
Consumo reactor C&T	MWh/año	1.818,2	Considerando el factor de consumo.	Estimación (Anexo C.2)
Efl. de tratamiento C&T	m^3/d	340	Reportado en fiscalizaciones.	[50]
Consumo esperado esc. #0 (LA)	MWh/año	3.473,32	Ajuste de consumo mediante regla 6/10 para el caudal.	Estimación (Anexo C.2)

En función de lo anterior, se consideró que el consumo del reactor de Lodo activados (escenario #0) es de 3.473,32 [MWh/año]. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, existe incertidumbre respecto de la cantidad de días que operaría esta planta al año de manera que el consumo sea el estimado; a priori se estableció un régimen de 261 días/año, pero de igual modo se realizaron las estimaciones para el caso más exigente, el cual sería un régimen de 365 días/año, este se puede encontrar en el Anexo D.

Por otro lado, para las líneas de tratamiento que consideran la implementación del MBR, el consumo energético fue encontrado por literatura y está normalizado por la DQO removida, por lo que se tiene la sensibilidad necesaria para diferenciar los casos en donde opera como único tratamiento secundario, de los casos en donde corresponde al segundo tratamiento biológico, antecedido por un AnMBR.

Respecto de los requerimientos energéticos del AnMBR, se encontraron dos referencias, en la que una de ellas está normalizada por volumen tratado (caso (1)), mientras que la otra lo

está por la DQO removida (caso (2)). Entonces, se estimó el consumo energético con ambos antecedentes, para luego utilizar el de mayor valor.

En la tabla 6.10 se exhiben los consumos energéticos reportados por bibliografía. Mientras, en la tabla 6.11 se exponen los resultados de las estimaciones realizadas. Mayor detalle de los cálculos realizados se puede encontrar en el Anexo C.2.

Tabla 6.10: Consumos energéticos de los reactores de membranas, recopilados por bibliografía.

Recopilación consumos energéticos - Reactores de membrana				
Parámetro	Unidad	Promedio	Rango	Comentarios / Referencias
AnMBR - Uso no especificado				[51]
Demanda E. AnMBR	kWh/m ³	1,27	0,03 . 2,5	Caso (1). Otras referencias llegan hasta 16 [kWh/m ³] [52]
AnMBR - Aguas de desecho urbano				[53]
Mezclado reactor	kWh/kgCOD _{rem}	0,09	0,056 - 0,124	
Limpieza membrana	kWh/kgCOD _{rem}	0,08	0,048 - 0,12	
Demanda E. AnMBR Sumado	kWh/kgCOD _{rem}	0,17	0,104 - 0,244	Caso (2)
MBR - Aguas de desecho urbano				[53]
MBR	kWh/kgCOD _{rem}	1,01	0,99	

Tal como se muestra en la tabla 6.10, las referencias encontradas para la demanda energética de los reactores AnMBR presenta rangos variables en magnitud entre cada investigación. Por lo anterior, se utilizó el promedio del rango de consumo más empleado por bibliografía, considerando un referencia como *outlier*.

Tabla 6.11: Estimaciones respecto de los consumos energéticos anuales para cada una de las tecnologías de tratamiento secundario.

Consumo energético - Reactores	
Descripción	Consumo energético anual [MWh]
Lodos activados	3.473,32
MBR	2.143,03
AnMBR (caso 1)	330,17
AnMBR (caso 2)	86,92
MBR 2do	1.640,98
AnMBR (caso 1) + MBR 2do	1.971,15
AnMBR (caso 2) + MBR 2do	1.727,90

Como se puede apreciar en la tabla 6.11, las estimaciones para el AnMBR resultaron ser mayores al considerar el dato normalizado por el volumen tratado (caso (2)), por lo que se usará ese valor.

Luego, para el escenario con aprovechamiento de energía, se tiene que tener en consideración el uso de un sistema de *upgrading*, debido a la necesidad de cumplir con estándares de calidad para la utilización de la celda de combustible (*fuel cell*).

Para lo anterior, se escogió el equipo de PSA, el cual es energéticamente demandante y sensible a las características de la entrada. Dado a este cuidado, es que se buscó bibliografía que presentara flujos de entradas con concentraciones y caudal similar a lo reportado en la tabla 6.3. Sin embargo, ninguno de los casos recopilados se asimila al caso de estudio planteado (tabla 6.12).

El criterio para escoger el consumo representativo fue seleccionar el de mayor valor reportado.

Se debe mencionar que por bibliografía se tiene el siguiente orden en facilidad de adsorción: $CO_2 > CH_4 > CO \gg H_2$ [54]. Además de tener en cuenta que, por mucho que el consumo esté normalizado por unidad de tratamiento, la escala del equipo importa en términos de rendimiento, por lo tanto, los consumos del repertorio deben ser escalados al flujo de operación, lo que se realizó con la regla de los seis décimos. Los resultados obtenidos se reportan en la tabla 6.12.

Tabla 6.12: Consumos energéticos del PSA, a diferentes condiciones de operación, recopilados por bibliografía.

Recopilación consumos energéticos - PSA			
Entrada / Comentario	Salida	Energía reportada / Referencias	Energía transformada [kWh/kg H_2]
4 % (v/v) H_2 ; el resto Gas Natural	Calidad apta para una fuel cell (99.97 % (v/v) H_2)	0,8–1,5 [kWh/ m^3H_2] [55]	8,9 - 16,7
5-30 % (mol/mol) H_2 ; el resto Metano. Escala laboratorio.	Calidad apta para una fuel cell (99.97 % (v/v) H_2)	3,94 - 12,63 [kWh/ m^3H_2] [56]	3,94 - 12,63
50 % (v/v) H_2 ; el resto Metano	90 % (v/v) H_2	0,0027 [Watt/Lmix] [57]	8,19

En la tabla 6.13 se exponen tanto la tasa de consumo energético escogida, como la estimación anual correspondiente para el PSA.

Tabla 6.13: Caracterización de la operación del equipo de PSA

Operación del PSA		
Parámetro	Unidad	Valor
Ref. consumo energético	kWh/kg	16,7
Flujo másico de H_2	kg/año	17.825,82
Consumo energético anual	MWh	297,69

Finalmente, para estimar la producción energética se debe definir la eficiencia de la celda de combustible (*fuel cell*), la cual presenta un máximo del 76 % [58]. Entonces, en vista de que no se reportan pérdidas de H_2 durante el proceso de purificación, se obtienen los resultados expuestos en la tabla 6.14. Para mayor detalle, dirigirse al Anexo C.2.

Tabla 6.14: Estimaciones respecto de la producción energética por concepto de la conversión del H_2 producido.

Caracterización producción energética			
Parámetro	Unidad	Valor	Referencia
Flujo másico H_2	kg/año	17.825,82	-
Factor de combustión H_2	kWh/kg	33,33	[7]
E. combustión H_2	MWh por año	594,13	-
Máx. eficiencia <i>fuel cell</i>	-	0,76	[58]
Máx. producción E. eléctrica	MWh por año	451,54	-

Luego, el balance de producción energética se resume en la tabla 6.15, en donde los valores positivos hacen referencia al consumo y los negativos a la producción.

Tabla 6.15: Estimaciones del balance de energía asociado a la purificación y conversión del H_2 (PSA + *fuel cell*).

Balance de la producción energética	
Parámetro	Energía eléctrica anual [MWh]
Máx. E. eléctrica producida por <i>fuel cell</i>	-451,14
Consumo energético PSA	297,69
Total neto energía producida	-153,44

Como es posible apreciar en la tabla 6.15, si se adquiere una celda de combustible (*fuel cell*) capaz de presentar una eficiencia del 76 %, entonces, con la energía convertida desde el H_2 , se podría suplir completamente la energía requerida por el equipo de *upgrading*. Sin embargo, se debe tener en cuenta que de ser este el caso, el 66 % de la energía producida se estaría invirtiendo en los procesos previos a la generación, pero indispensables para que pueda operar la celda de combustible. Esto da cuenta de la necesidad de generar tecnología de purificación de gases con menor demanda energética o desarrollar métodos de conversión H_2 - energía más eficientes.

Siguiendo la lógica anterior, el 34 % de energía producida disponible (153,44 [MWh/año], descontando consumo PSA), corresponderían aproximadamente solo al 8 % de la energía requerida para la operación de los reactores AnMBR + MBR (escenario # 3).

En la tabla 6.16 se exponen las fracciones de ahorro energético con respecto al escenario con el reactor de Lodos Activados. En primer lugar, es posible notar que solo por cambio de tecnología se aprecian ahorros energéticos; posteriormente, al implementar el uso de H_2 *in situ* se aprecia la máxima disminución. Si bien estos resultados no son concluyentes, dado que se requieren tener otras consideraciones, entre ellas el costo de inversión, establece primeras aproximaciones a oportunidades de mejora.

Tabla 6.16: Fracciones de energía ahorrada con respecto al escenario # 0, en donde se utiliza la tecnología de Lodos Activados.

Fracción ahorro de energía c/r reactor Lodos Activados		
Escenario	Siglas	Frac. ahorro
# 1	MBR	0,383
# 2	AnMBR + MBR	0,432
# 3	AnMBR + MBR + H_2	0,477

Por otro lado, se hace la mención de que si la eficiencia de la celda de combustible (*fuel cell*) fuese del 50.4 %, entonces la energía convertida a partir de H_2 sería de igual magnitud

que la utilizada para el proceso de *upgrading* (PSA), por lo tanto, el escenario # 3 dejaría de tener sentido.

6.4. Emisiones indirectas

Para transformar el consumo energético en emisiones indirectas, es necesario conocer el factor de emisión de la matriz energética. En promedio durante el año 2022, el factor reportado para el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), fue de: $300,6[kgCO_{2eq}/MWh]$ [59].

En la tabla 6.17 se expone el resumen de los consumos energéticos y emisiones indirectas asociadas. Un mayor desglose de esta sección se presenta en el Anexo C.3.

Tabla 6.17: Consumo energético y emisiones indirectas de GEI en cada uno de los escenarios de estudios.

Emisiones indirectas de GEI			
Escenario	Siglas	Consumo energético anual [MWh]	Emisiones GEI [$tonCO_{2eq}/año$]
#0	LA	3.473,32	1.044,08
#1	MBR	2.143,03	644,20
#2	AnMBR + MBR	1.971,15	592,53
#3	AnMBR + MBR + H_2	1.817,29	546,28

Dada la linealidad de la estimación de las emisiones indirectas de GEI con respecto al consumo energético, se tiene que la fracción de energía ahorrada en cada uno de los escenarios con respecto al escenario # 0 es equivalente a la fracción de emisiones indirectas de GEI no emitidas. De manera que, la tabla 6.16 cobra una doble significación.

6.5. Resultados del LCA Operacional por escenario

Teniendo en cuenta las emisiones de GEI, directas e indirectas, de cada uno de los escenarios, se obtienen los resultados expuestos en la tabla 6.18.

Tabla 6.18: Resultados LCA operacional - Cuantificación de emisiones del tipo GEI.

Emisiones totales de GEI		
Escenario	Descripción	Emisiones GEI [$tonCO_{2eq}/año$]
#0	Lodos activados	1.288,55
#1	MBR	888,67
#2	AnMBR + MBR	805,22
#3	AnMBR + MBR + PSA + <i>Fuel cell</i>	758,97

En términos generales, las emisiones totales de GEI por concepto de operación para cada uno de los escenarios son menores que las estimadas para el escenario # 0 (reactor de Lodos Activados), la referencia en términos de fracciones se presenta en la tabla 6.19.

Tabla 6.19: Fracciones de emisiones totales de GEI ahorrada con respecto al escenario # 0, en donde se utiliza la tecnología de Lodos Activados.

Fracción ahorro de emisiones GEI totales c/r reactor Lodos Activados		
Escenario	Siglas	Frac. ahorro
# 1	MBR	0,31
# 2	AnMBR + MBR	0,375
# 3	AnMBR + MBR + H_2	0,411

Se puede destacar la consistencia en tendencia a la baja de las emisiones GEI del tipo operacionales, tanto directas como indirectas. Es decir, siempre se tiene que el escenario #0 es el que genera mayores emisiones, luego, los escenarios #1, #2, y finalmente el escenario #3 es el que en emisiones directas e indirectas genera el menor impacto. Sin embargo, se debe tener en cuenta la incertidumbre asociada a las estimaciones para cada tecnología, y la sensibilidad del resultado a la matriz energética considera en el estudio.

Por otro lado, se tiene que para el análisis de casos se siguió la guía del IPCC, en la cual se establece que no se debiese cuantificar las emisiones directas de CO_2 , puesto que se consideran de origen biogénico. Sin embargo, hoy en día esa aseveración está siendo cuestionada en diversas publicaciones y debates científicos [60], principalmente debido al origen de los productos empleados y que terminan dentro de los afluentes a tratar.

Por lo anterior, es que se realizaron esfuerzos para la estimación de CO_2 mediante los balances de masa (ver Anexo B). Sin embargo, fue necesario definir la fracción másica de COD que fue alimentada pero no liberada en el agua tratada, y que por lo tanto se encontrará en forma de lodo/*sludge* (α), mientras que la fracción restante seguirá las rutas metabólicas para la generación de CO_2 .

Al implementar el factor α , se establecieron dos análisis.

El primer acercamiento al problema, plantea que α es igual en todos los escenarios y presenta un valor de 0,2. Los resultados preliminares son los valores expuesto en la tabla 6.4, mientras que el impacto global se expone en la tabla 6.20, estimandose la fracción ahorro de emisiones con respecto al escenario #0.

Tabla 6.20: Resultados LCA operacional - Cuantificación de emisiones del tipo GEI incluyen del CO_2 biogénico, la fracción de ahorro con respecto al escenario #0. Valor de $\alpha = 0,2$ para todos los escenarios.

Emisiones totales de GEI considerando CO_2 biogénico			
Escenario	Siglas	Emisiones GEI [ton CO_{2eq} /año]	Frac. ahorro
#0	LA	3.634,01	-
#1	MBR	3.234,12	0,110
#2	AnMBR + MBR	2.844,27	0,217
#3	AnMBR + MBR + H_2	2.798,02	0,230

Al momento de leer los resultados de la tabla 6.20, se debe tener en consideración que la calidad de los lodos sería diferente entre los escenarios #0 y #1, versus los escenarios #2 y #3, puesto que los lodos del AnMBR presentan altos valores de COD.

Para eliminar la diferencia anterior, es que se plantea un segundo planteamiento, el que consistió en establecer un valor de α diferenciado según el escenario. Entonces, para los escenarios #0 y #1, α vale 0,34, puesto que solo existe una etapa para el tratamiento biológico; mientras que para los escenarios #2 y #3, α vale 0,2, debido a que el afluente fue anteriormente filtrado en el AnMBR, por lo tanto, es más fácil de agitar con los sopladores, provocando que la tasa de descomposición sea mayor por la homogeneidad del medio.

Los resultados del segundo acercamiento se encuentran parcialmente en la tabla 6.5, mientras que los resultados globales se exponen en la tabla 6.21.

Tabla 6.21: Resultados LCA operacional - Cuantificación de emisiones del tipo GEI incluyen del CO_2 biogénico, la fracción de ahorro con respecto al escenario #0. Valor de α diferenciado según el escenario (0,34 o 0,2).

Emisiones totales de GEI considerando CO_2 biogénico			
Escenario	Siglas	Emisiones GEI [ton CO_{2eq} /año]	Frac. ahorro
#0	LA	3.223,81	-
#1	MBR	2.823,93	0,124
#2	AnMBR + MBR	2.844,27	0,118
#3	AnMBR + MBR + H_2	2.798,02	0,132

Al considerar las emisiones directas de CO_2 es posible apreciar que las fracciones de ahorro disminuyen con respecto a lo estimado en primera instancia. Es decir, los escenarios alternativos se acercan cada vez más al comportamiento del escenario #0, provocando que la decisión respecto de la conveniencia del cambio en la tecnología/escenario, se vuelva más sensible a otros aspectos, como por ejemplo, a la inversión requerida en cada caso.

Respecto de la jerarquía de conveniencia según el LCA operacional, se tiene que siempre se mantiene que el escenario #3 presenta más ahorros de emisiones, y así sucesivamente, hasta el escenario #0. Excepto al implementar el factor α con valor diferenciado, en donde si bien el escenario #3 sigue presentando más ahorros, luego le sigue el esc. #1, posteriormente, esc. #2 y #0.

Lo anterior, se debe a que si bien existen ventajas energéticas al emplear un sistema de remoción de COD en dos etapas (anaeróbica - aeróbica), las rutas metabólicas presentan diferentes tasas de producción de CO_2 , contrarrestando la ventaja energética al imponer igual calidad en COD de agua tratada y lodos. Esto explica por qué solo en la tabla 6.21 existen modificaciones en la jerarquía, mientras que en la tabla 6.20 la jerarquía se mantiene, aun cuando los lodos resultantes de los escenarios #2 y #3 presentan mayor masa de COD que los producidos en los escenarios #0 y #1.

Los resultados del LCA operacional no permiten una toma de decisiones, por lo que se plantea la necesidad de la realización de estudios a mayor profundidad para disminuir la incertidumbre de las estimaciones, como también, la implementación de análisis multicriterios.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que para establecer el régimen anual de la planta, se debe fijar la cantidad de días al año que opera. No obstante, se utilizan datos anuales/mensuales de Concha y Toro que fueron obtenidos en la entrevista o por fiscalizaciones, pero sin conocer la cantidad de días por los que operó la planta. Para salvar esta complicación y privilegiar el uso de la información directa frente a búsquedas bibliográficas, es que se utilizó como criterio asumir 261 días de operación, esto dado que en el trabajo de M. Escudero [41] se reporta ese dato para la planta Concha y Toro - Chimbarongo. De todas maneras, en el Anexo D se reporta un análisis de sensibilidad al respecto.

6.6. Conclusiones parciales

En primer lugar, quedó en evidencia que los resultados son altamente sensibles a la calidad de los datos utilizados y las consideraciones empleadas.

En el caso de los reactores de membrana y PSA, existe brecha de información que genera incertidumbre en los resultados obtenidos. Por esto, este trabajo se establece como un primer acercamiento, y se requieren estudios a mayor profundidad y detalle para concluir la conveniencia de algún escenario en particular.

Respecto de las consideraciones, las principales tienen relación con la inclusión del CO_2 biogénico en el inventario y el establecimiento del factor α para su cuantificación.

Otro punto a considerar es el error asociado en el escalamiento para los consumos energéticos, capacidad de agitación y conversión. Si bien en caso de ser necesario se empleó la regla de los 6/10, ampliamente utilizada en ingeniería, la variable de diseño seleccionada puede ser discutible, al igual que la aproximación por escalamiento. Un caso particular, es cuando se aproxima el consumo energético pero para diferentes calidades de efluentes, los que podrían

generar variaciones en las bombas, agitadores, y otros. Esto aporta a la incertidumbre de los resultados, y dada la bibliografía disponible no se pudo contrarrestar.

Grosso modo, siempre se obtiene que el escenario #3 resulta ser el más beneficioso por presentar la menor cantidad de emisiones GEI operacionales. Sin embargo, la diferencia relativa con el siguiente buen candidato puede variar significativamente dependiendo de la metodología empleada.

Por otro lado, se entiende que solo la cuantificación de GEI operacional no es justa para establecer ventajas medioambientales, por lo que requiere incluir otros impactos ambientales por operación, además de otras fases del proyecto, tales como construcción, puesta en marcha y desmantelamiento.

Capítulo 7

LCA de la Construcción

Siguiendo con el objetivo de estimar los impactos ambientales de los escenarios de tratamiento en función de un análisis de ciclo de vida, es que en esta sección se profundiza respecto de los principales supuestos y resultados del **LCA de la Construcción**.

7.1. Inventario de construcción

En términos generales, la implementación de todos los escenarios propuestos implicaría la construcción de los siguientes equipos:

- Reactor de Lodos Activados
- Sedimentador
- MBR
- AnMBR
- PSA
- Celda de combustible (*Fuel Cell*)

Teniendo en cuenta la disponibilidad de información y los alcances de este trabajo, es que los inventarios fueron escalados en base a los flujos de entrada, con respecto a los datos reportados, mediante la regla de los 6/10. Además, cabe mencionar, que tanto la calidad, como la cantidad de referencias encontradas para cada uno de los equipos mencionados, varió significativamente.

A continuación, se procede a detallar los principales supuestos y resultados obtenidos.

7.1.1. Reactor de Lodos Activados y Sedimentador

Para los cálculos referentes a la construcción del reactor de lodos activados y sedimentador se encontraron variadas fuentes de información, dado que este tipo de tecnología es la mayormente utilizada por su simpleza.

Foley et al. [18] expone una metodología de estimación de insumos normalizada por el volumen de hormigón, por lo que este último debe estar estimado con una mayor precisión.

Los factores que allí se exponen, corresponden a un análisis realizado en otro estudio [17], utilizando como base de información plantas construidas en Suiza.

Por otro lado, se tienen los datos reportados por Morera et al. [19], los que corresponden a inventarios reales de 4 plantas de tratamiento de aguas construidas en la región de Cataluña. Morera et al. [19], a partir de esta recopilación de información, aplica metodologías de estimación de insumos de manera de comparar las diferencias en términos de masa e impacto ambiental que se pueden producir dependiendo del detalle y calidad de la información, además de la utilización de factores.

En base a lo anterior, se optó por considerar los datos reportados por Morera et al. [19], dada la cercanía tecnológica de Chile con España y la calidad de los datos expuestos. Sin embargo, se debe tener presente que las plantas reportadas presentaban caudales de operación de entre 1.500 a 21.000 $[m^3/d]$. Por lo tanto se utilizó la regla de los 6/10, de manera de poder escalar la información de la planta más pequeña reportada (Navàs 1.500 $[m^3/d]$) hasta el caudal del escenario planteado (1.000 $[m^3/d]$), lo que resultó en un factor de 0,784.

En la tabla 7.1 se puede apreciar el ajuste en términos del inventario de materiales.

Tabla 7.1: Estimación de materiales - Inventario del Reactor de Lodos Activados.

Tratamiento secundario			
Material	Unidad	Navàs	Regla 6/10
Diesel para excavación	MJ	377.812,1	296.224,6
Exceso de suelo depositado	ton	2.520,0	1.975,8
Transporte de exceso de suelo hacia un vertedero de residuos inertes	tkm	100.800,0	79.032,5
Hormigón	kg	1.371.221,3	1.075.109,7
Acero para reforzamiento	kg	39.441,6	30.924,3
Alambre usado en el acero para reforzamiento	kg	563,5	441,8
Acero de baja aleación utilizado en encofrados	kg	353,1	276,9
Acero inoxidable	kg	347,1	272,2
PVC utilizado en encofrados	kg	15,2	11,9
Madera utilizada en encofrados	kg	93,0	72,9
Mortero de cemento	kg	1.438,5	1.127,9
Hormigón prefabricado	kg	7.226,2	5.665,7
Arena	kg	496.825,0	389.537,0
Dietilenglicol utilizado en encofrados	kg	20,5	16,1
Diesel utilizado en generadores de electricidad	MJ	17,9	14,0
Transporte de material	tkm	56.467,5	44.273,5

La selección de factores ReCiPe, desde la base de datos de EcoInvent, se encuentra detallada en el Anexo E.1.

7.1.2. MBR y AnMBR

Este tipo de reactores corresponde a la tecnología con menor información disponible en términos de inventario de construcción.

La referencia seleccionada para las estimaciones, corresponde a un LCA realizado por Cashman et al. [61], para diferentes caudales, aproximadamente entre los 190 a 37.000 [m^3/d]; por lo que las interpolaciones (1.000 [m^3/d]) fueron realizadas mediante un ajuste polinomial.

Los resultados de las estimaciones para cada uno de los reactores se presentan en la tabla 7.2.

Tabla 7.2: Estimación de materiales - Inventario del MBR y AnMBR.

Inventario de construcción: MBR y AnMBR			
Material	Unidad	MBR	AnMBR
Excavación	m^3	801,1	750,6
Diesel para excavación	kg	104,94	98,33
Hormigón	m^3	246,3	195,5
Membrana PVDF	kg/10 años	2232,1	6376,4
Electricidad	MWh/años	15,9257	36,86

Todos los ítems del inventario expuesto en la tabla 7.2, fueron estimados mediante la interpolación con ajustes polinomiales, a excepción del Diesel para excavación, el cual según Cashman et al. [61], puede ser estimado considerando que una excavadora hidráulica consume 0,131 kg de diesel por cada metro cúbico de tierra removido.

La selección de factores ReCiPe, desde la base de datos de EcoInvent, se encuentra detallada en el Anexo E.2.

7.1.3. PSA

Si bien este equipo se comercializa y existen referencias que lo exponen como una alternativa de *upgrading* para H_2 , no se encontró la ficha técnica de alguno que fuese especializado en hidrógeno.

Es por esto, que se recurrió a la selección por catálogo [62] de un equipo promedio, el cual presenta un gran rango de flujos de tratamiento y es especializado para la purificación de N_2 ; estas características permiten una aproximación a lo que sería el equipo adecuado, dado que, sin estudiar a profundidad la dinámica de producción y consumo, se espera que esta se encuentre dentro del rango reportado, y dado que el equipo seleccionado es apto para nitrógeno gaseoso, el cual es un gas más grande y difícil de separar, es que las dimensiones tendrían que estar sobreestimadas para el caso del hidrógeno.

Para la cuantificación en el inventario, se aproximó el peso del equipo a acero, mientras que se estableció como criterio de diseño, que el 80 % del volumen estaría ocupado por el relleno (*carbon molecular sieve*; CMS) [63].

Del catálogo antes mencionado, se obtuvo el peso y las dimensiones del PSA, mientras que la masa del relleno fue calculada considerando el criterio de diseño y la densidad *bulk* hallada. En la tabla 7.3, se resume lo anterior.

Tabla 7.3: Estimaciones de materiales - Inventario del equipo PSA.

Equipo PSA			
Parámetro	Unidad	Valor	Comentario / Referencia
Masa PSA	kg	3.000	[62]
Volumen PSA	m^3	4,8	Estimación.
Frac. vol. relleno	-	0,8	Criterio de diseño.
Volumen relleno	m^3	3,8	Estimación.
Densidad bulk	kg/m^3	690	[64]
Masa relleno	kg	2.652,25	Estimación.

Además, se agregó al sistema un tanque de acero, de modo de permitir holguras en la dinámica del H_2 . En términos del inventario, su cuantificación fue obtenida por catálogo [65], considerando un tanque pequeño, de capacidad 20[L] y peso 7[kg], de manera que si se requieren más unidades, pudiese usarse esta como unidad básica de almacenamiento.

La selección de factores ReCiPe, desde la base de datos de EcoInvent, se encuentra detallada en el Anexo E.3.

7.1.4. Celda de combustible - *Fuel cell*

La principal referencia utilizada para estimar la construcción de este equipo, corresponde a la memoria de Ljubana Koscina [66], en donde se desarrolla el inventario de materiales para cada una de las secciones componentes de la celda de combustible (cátodo, ánodo, electrolito, marco, interconector y celda). Los valores reportados están normalizados por la unidad funcional de aquel estudio (“1[MW] de potencia ininterrumpida durante 24 [h] en un horizonte temporal de 25 años ” - caso reportado, CR).

Como fue expuesto en la Sección 6, considerando una producción anual de hidrógeno de 17.825,82[kg/año], operación durante 261 días al año y la implementación de una celda de combustible con una eficiencia del 76 % (tabla 6.14), entonces es posible estimar la potencia generada, la cual ronda los 0,072[MW] (caso de estudio, CE).

Luego, dado el criterio de escalamiento seleccionado (regla de los 6/10), se pueden estimar los requerimientos máxicos en base a la tasa de producción energética, obteniéndose un factor de escalamiento de aprox. 0,206. En la tabla 7.4 se observa el inventario que se contabilizaría por la fabricación de la celda de combustible.

La selección de factores ReCiPe, desde la base de datos de EcoInvent, se encuentra detallada en el Anexo E.4.

Tabla 7.4: Estimaciones de materiales - Inventario de la celda de combustible (*Fuel Cell*). CR: Caso Reportado [66], CE: Caso de Estudio.

Inventario de construcción: <i>Fuel Cell</i>				
Componente	Entrada	Unidad	CR	CE
Cátodo	LSM (La _{1-x} Sr _x Cr _{0.5} Mn _{0.5} O ₃)	kg	573,85	118,38
Cátodo	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	kg	133,18	27,47
Cátodo	Butiral de polivinilo (aglutinante)	kg	43,50	8,97
Cátodo	Acetato de n-butilo 99,5 % (disolvente)	kg	130,80	26,98
Cátodo	2-butoxietanol (disolvente)	kg	16,38	3,38
Cátodo	Carbón negro	kg	28,31	5,84
Cátodo	Methocel A4M (aglutinante)	kg	28,90	5,96
Ánodo	Óxido de níquel	kg	659,66	136,08
Ánodo	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	kg	133,18	27,47
Ánodo	Butiral de polivinilo (aglutinante)	kg	43,50	8,97
Ánodo	Acetato de n-butilo 99,5 % (disolvente)	kg	130,80	26,98
Ánodo	2-butoxietanol (disolvente)	kg	16,39	3,38
Ánodo	Carbón negro	kg	28,31	5,84
Ánodo	Methocel A4M (binder)	kg	28,90	5,96
Electrolito	Circonia estabilizada con itria (YSZ)	kg	133,18	27,47
Electrolito	Butiral de polivinilo (aglutinante)	kg	43,50	8,97
Electrolito	Acetato de n-butilo 99,5 % (disolvente)	kg	130,80	26,98
Electrolito	2-butoxietanol (disolvente)	kg	16,38	3,38
Electrolito	Carbón negro	kg	28,31	5,84
Electrolito	Methocel A4M (binder)	kg	28,90	5,96
Marco	Acero Inoxidable	kg	2.580,25	532,28
Marco	Óxido de aluminio	kg	20,56	4,24
Interconector	Acero Inoxidable	kg	2.580,25	532,28
Interconector	Mn _{1.5} Co _{1.5} O ₄	kg	65,25	13,46
Celda	Acero	kg	3.968,69	818,70

7.1.5. Vida útil

Los inventarios de materia y energía anteriormente expuestos corresponden a los requeridos para la construcción de cada uno de los equipos listados al comienzo de este capítulo. Sin embargo, se debe tener en cuenta la vida útil de cada uno de ellos y sus componentes, de manera de estimar la cantidad de reemplazos que se deben realizar a lo largo de los 20 años de operación establecidos para cada uno de los escenarios de tratamiento.

En la tabla 7.5 se expone la cantidad de reemplazos necesarios por tecnología, entonces, 1 recambio corresponde a decir que existe la primera aplicación y luego un reemplazo.

Los equipos/componentes que no se encuentran en la tabla 7.5, es debido a que presentan una vida útil mayor a 20 años.

Tabla 7.5: Vida útil y cantidad de reemplazos requeridos por equipos.

Vida útil y reemplazos			
Tecnología	Vida útil	Cant. reemplazos	Ref.
Membranas (MBR y AnMBR)	10 años	1	[61]
Relleno carbón poroso (PSA)	12 años	1	[62]
<i>Fuel cell</i>	40.000 hrs. 6,4 años	3	[66]

7.2. Resultados del LCA Construcción por escenario

7.2.1. Resultados *Endpoint*

A continuación se exponen los resultados del LCA de la construcción, aplicando la metodología ReCiPe [32], para cada uno de los escenarios.

En el Anexo F, se encuentra una mayor descripción del procedimiento de cálculo, además de resultados con mayor nivel de detalle.

Se debe aclarar que para esta sección, el escenario #3 consideró un tanque de almacenamiento de H_2 , el que no se describió en el LCA operacional. Lo anterior, dado que la existencia de este no contribuye en el impacto provocado por la operación, pues se asumió dentro del consumo energético del PSA los requerimientos de energía para el almacenamiento.

En la tabla 7.6 se pueden apreciar la suma de los puntajes de las categorías *endpoint* obtenidos para cada uno de los escenarios, además de su fracción relativa con respecto al escenario #0.

Tabla 7.6: Estimaciones de los puntajes *endpoint* (E) de la metodología ReCiPe para la construcción de los diferentes escenarios propuestos, además de su referencia con respecto al escenario #0 (reactor de Lodos Activados + Sedimentador).

ReCiPe Endpoint (E) - Resultados de construcción			
Escenario	Siglas	Puntaje Endpoint	Fracción con respecto al esc. #0
#0	LA	$1,14 \cdot 10^5$	1
#1	MBR	$6,88 \cdot 10^4$	0,61
#2	AnMBR + MBR	$1,15 \cdot 10^5$	1,90
#3	AnMBR + MBR + H_2	$2,42 \cdot 10^5$	2,13

Como es posible apreciar en la tabla 7.6, el único escenario que presenta un menor puntaje en términos de indicador *endpoint*, corresponde al escenario #1 con la tecnología MBR. Si bien la diferencia es sustancial con respecto al escenario #0, pues se obtiene un 39% menos de impactos ambientales, se debe tener en cuenta la incertidumbre que acompaña las estimaciones.

En primer lugar, se debe considerar que todos los factores utilizados para la estimación de los indicadores *endpoint* fueron del tipo global, a excepción de la energía eléctrica estimada para el MBR, el cual presenta un factor nacional.

En el caso del MBR, el inventario de materiales considerado es más acotado y menos detallado que el reportado para el reactor de Lodos Activados y sedimentador. Además, para los reactores de membranas, al ser una tecnología más moderna y menos común, es posible que la información de materiales recopilada presente ciertos sesgos respecto del lugar de aplicación y la cuatificación de los insumos.

Por otro lado, si se analizan los puntajes *endpoint* por categoría (Anexo F, tablas F.1 y F.2), se ve que el MBR siempre tiene menor puntaje total por área de protección (calidad de los ecosistemas, salud humana y recursos naturales).

Entonces, estos resultados darían indicios de un potencial beneficio al utilizar un MBR frente a otras tecnologías, pero se requiere un estudio a mayor profundidad para concluir.

Respecto de los resultados para los escenarios #2 y #3, estos se diferencian por 23 puntos porcentuales, los que estarían dados por la fabricación de los equipos requeridos para el aprovechamiento del H_2 como energía eléctrica *in-situ*. Para valorar la diferencia en impacto ambiental por construcción, se tendría que tener en cuenta, los impactos evitados dada la utilización del H_2 .

Análogo al análisis anterior, es el que se tendría que realizar al comparar los escenarios #2 y #3 con respecto al escenario #0.

Cabe destacar que los escenarios #2 y #3, además de presentar un mayor puntaje global

en la suma de las categorías *endpoint* con respecto al escenario #0, también lo hacen en cada una de las secciones (calidad de los ecosistemas, salud humana y recursos naturales). Ver Anexo F para mayor detalle de resultados (tablas F.1 y F.2)

7.2.2. Resultados categorías *Midpoint*

Los resultados de las categorías *midpoint* para cada uno de los escenarios se encuentran en el Anexo F, tabla F.3.

En esta sección, se prefirió presentar la tabla 7.7 que se encuentra a continuación, dado que reporta la incidencia relativa de cada categoría *midpoint* con respecto al escenario #0, haciendo más fácil el análisis. Las casillas coloreadas en rojo muestran que el valor supera la unidad (mayor impacto que el esc. #0).

Es necesario destacar que en la tabla 7.7, la fila transformación de suelo natural* se encuentra en valor absoluto, dado que el escenario #0 presenta impacto negativo, principalmente porque el factor considerado para el ítem de exceso de suelo depositado es negativo. En tanto, para los otros escenarios no se tuvo en inventario ese ítem en particular, además de que todos los factores utilizados son positivos.

Tabla 7.7: Fracciones de los impactos ReCiPe - Midpoint (E) con respecto al escenario #0 (reactor de Lodos Activados + Sedimentador)

ReCiPe Midpoint (E) - Frac. con respecto al esc. #0			
Escenario	#1	#2	#3
Midpoint	MBR	AnMBR + MBR	AnMBR + MBR + H_2
Ocupación de suelo agrícola	6,48	21,40	21,85
Cambio climático	1,06	3,14	3,31
Agotamiento de fósiles	1,29	4,13	4,48
Ecotoxicidad del agua dulce	0,25	0,82	1,11
Eutrofización del agua dulce	1,87	6,17	6,68
Toxicidad humana	0,38	1,24	1,44
Radiación ionizante	1,13	3,72	4,10
Ecotoxicidad marina	0,34	1,11	1,45
Eutrofización marina	1,08	3,36	3,53
Agotamiento de metales	0,10	0,30	1,48
Transformación de suelo natural*	1,58	4,83	5,37
Agotamiento del ozono	1,10	3,49	3,89
Formación de material particulado	2,99	9,75	10,51
Formación de oxidantes fotoquímicos	0,92	2,85	3,07
Acidificación terrestre	1,52	4,88	6,24
Ecotoxicidad terrestre	0,67	1,92	2,30
Ocupación de suelo urbano	0,21	0,56	0,62
Agotamiento del agua	1,20	3,64	4,13

A continuación se procede con el análisis de los resultados expuestos en la tabla 7.7, con respecto al escenario #0, el cual considera el reactos de Lodos Activados + Sedimentador.

La transformación de suelo natural fue contabilizada con valor absoluto al momento de jerarquizar los impactos.

En primer lugar, las categorías *midpoint* más altas en comparación al escenario #0 (valores mayores a 1), corresponden a la ocupación de suelo agrícola y la formación de material particulado para los tres escenarios.

En el caso de la ocupación de suelo agrícola, se debe principalmente a los altos requerimientos energéticos por construcción del MBR y AnMBR, los que están asociados a la fabricación de las membranas. La gran diferencia entre el escenario #1 y #2, se debe a que el AnMBR requiere una mayor masa de membranas en el tiempo de operación, por lo que a su vez, emplea mayor energía por este concepto. En el caso del escenario #3, el aumento no es significativo con respecto al escenario #2, es decir, implementar la recuperación y uso del H_2 no tiene mayor incidencia en este impacto.

El mismo argumento anterior se tiene para el caso de la formación de material particulado.

En segundo lugar, se procede a seleccionar las categorías *midpoint* más bajas en comparación al escenario #0 (valores menores a 1), estas son el agotamiento de metales y la ocupación de suelo urbano.

Se tiene que para el agotamiento de metales, el escenario #0 presenta valores elevados al considerar el ítem de acero para reforzamiento, el cual debiese ser contabilizado en todos los escenarios, pero que por falta de información para los reactores MBR y AnMBR, es que no se pudo incorporar al análisis. En el caso de los escenarios #1 y #2, el principal ítem que presenta este tipo de impacto es la membrana, pero su incidencia es menor en comparación al escenario #0. En el caso del escenario #3, el acero inoxidable requerido para la estructura de la celda de combustible genera que el impacto sea mayor al escenario #0.

En el caso de la ocupación de suelo urbano, todos los escenarios presentan valores menores que el escenario #0, el cual debe su magnitud al ítem exceso de suelo depositado, y que no fue contabilizado en los otros casos por falta de información. En el caso del MBR, es el hormigón el material que más aporta en este impacto, mientras que, para el AnMBR se tiene que corresponde a la energía eléctrica.

Finalmente, las categorías *midpoint* que presentan valores similares al escenario #0 (valores cercanos a 1) varían en cada unos de los casos. Para este análisis, solo se consideraron las que se acercan por la derecha al 1.

Para el MBR, se tiene el indicador del cambio climático y la eutrofización marina como impactos que son similares al escenario #0, pero por ítems diferentes. Mientras que para el MBR la energía presenta la mayor incidencia en estas categorías *midpoint*, en el escenario #0 se debe principalmente al uso del hormigón.

En el escenario #2, los impactos más cercanos al escenario #0 corresponden a la ecotoxicidad marina y la toxicidad humana. Para el caso de los reactores de membrana se tiene como principal ítem la energía, mientras que para el escenario #0 se debe al exceso de suelo depositado.

En el caso del escenario #3 y el impacto de toxicidad humana se tiene el mismo argumento anterior. Respecto de la ecotoxicidad del agua dulce, la cual se ve afectada por el exceso de suelo depositado en el escenario #0; en el escenario #3 se deben principalmente a la energía para la fabricación de las membranas, principalmente para el AnMBR.

7.3. Conclusiones parciales

Queda en evidencia la brecha de información entre las tecnologías de tratamiento, obteniéndose inventarios con diferentes niveles de detalle, lo que tiene incidencia al momento de la cuantificación de impacto ambiental, tanto por el desglose del inventario, como por la estimación de cantidades para cada material.

El empleo de las reglas de escalamiento y la selección de la variable de diseño, por ejemplo caudal de entrada, constituye un criterio que podría ser cuestionable, pero dada la escasez de información no se pueden establecer otras aproximaciones.

Para el caso de los reactores de membrana es donde se encontró mayor carencia de reportes detallados respecto de inventarios de construcción. Mientras, el reactor de lodos activados, al ser ampliamente utilizado presenta mayor reporte de información y estandarización de esta.

Se sabe que los LCA son específicos para cada localización, no solo por la consideración de los transportes, sino que por la estimación de los factores de emisión por la aplicación de ciertas tecnologías y materiales, en donde las eficiencias y proporciones podrían presentar variaciones. Sin embargo, dada la base de datos disponible, solo se pudieron emplear factores globales para cada uno de los insumos, exceptuando los relativos a la energía eléctrica la cual fue específica para Chile.

En relación a los resultados obtenidos en esta sección, en primer lugar se tienen los resultados de las categorías *endpoint*, en donde se manifestaría una ventaja comparativa del MBR frente a todos los demás escenarios. No obstante, es discutible la valorización que existe para cada uno de los impactos ambientales, considerando la dificultad de equiparlos dada la variedad de unidades de cuantificación.

Por otro lado, analizando las estimaciones de las categorías *midpoint*, se obtiene que más de la mitad de estas presentan un mayor impacto que el que se obtiene al aplicar el escenario #0.

Respecto de los ahorros en impactos, pasan de estar presentes en 7 categorías para el escenario #1, a estar solo en 1 para el escenario #3. Sin embargo, se debe tener en consideración que el esc. #1 presenta un inventario muy reducido, por lo que incluso carece de insumos que tienen gran incidencia en los LCA de tratamiento de aguas según bibliografía,

tales como el acero para reforzamiento, el exceso de suelo depositado, entre otros. Para los escenarios con reactores de membrana no se encontraron métodos para la estimación de estos requerimientos. Mientras el esc. #3 es un caso más complejo, el que emplea varias operaciones unitarias, siendo una de ellas la conversión de H_2 a electricidad mediante el uso de una celda de combustible. Este último equipo presenta un gran nivel de desglose dado que fue cuantificado en otro trabajo de memoria, por lo que era esperable que también presentase grandes impactos.

En términos generales, los escenarios propuestos suelen tener mayores impactos dado el intensivo uso de energía durante la fabricación de las membranas de PVDF.

Finalmente, se puede concluir la necesidad de generar inventarios con menor incertidumbre y similar nivel de detalle para la realización de comparaciones justas, por lo que este trabajo pasa a ser solo un primer acercamiento a la evaluación ambiental.

Por otro lado, se requiere un análisis completo, considerando otras fases del ciclo de vida de las plantas propuestas, de manera de concluir los beneficios ambientales.

Capítulo 8

LCA Global

En esta sección, se expone el consolidado de los resultados del **LCA Global**, recordando que el LCA operacional consistió únicamente en la estimación de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que el LCA de la construcción estimó los 18 indicadores de impacto ambiental (*midpoint*) de la metodología ReCiPe [32], además de los valores de los indicadores *endpoint*.

De la sección 6.18 se obtiene que con los escenarios propuestos es posible ahorrar entre un 38 a un 48 % de energía eléctrica, empleando reactores de membrana además de procesos de producción energética capturando el H_2 emitido en los procesos anaeróbicos. Respecto de las emisiones totales, el beneficio oscila entre un 31 a un 41 % en CO_{2eq} .

El análisis anterior es válido siempre y cuando no se contabilicen las emisiones de CO_2 de los procesos aeróbicos, dado que el IPCC recomienda no incluirlo en los inventarios por ser considerado biogénico. Sin embargo, la fracción de ahorro con respecto al escenario #0 varía significativamente, siendo entre un 11 % a un 23 %.

De todos modos, el solo estimar las emisiones de GEI no es suficiente para evaluar a cabalidad el impacto ambiental de un proceso.

En el caso del LCA Construcción (sección 7), se consideraron todos los indicadores del tipo E de la metodología ReCiPe, quedando en evidencia que los ítems que resultaron tener los mayores impactos en el escenario #0, no pudieron ser incluidos en los otros escenarios por falta de información. Ejemplo de esto son: *Excess soil deposited* y *Reinforcing steel*, ítems que debiesen ser listados en todos los escenarios, pero de los cuales son se encontró bibliografía para argumentar su cuantificación en el escenario #0. Otra gran diferencia descriptiva, es la cantidad de materiales listados en cada escenario, y las consideraciones de transporte.

Lo anterior da cuenta de una gran brecha de información entre las diferentes tecnologías de tratamiento, generando mayor incertidumbre en los resultados. Es por esto que los valores expuestos en este trabajo son solo referenciales de la información disponible, pero se requieren estudios a mayor profundidad para la toma de decisiones, como también el análisis de otros criterios, tales como disponibilidad de tecnología, costos, etc.

Un análisis que se puede realizar para entrelazar los resultados del LCA operacional con

el de construcción, corresponde a establecer la dinámica de amortización/reembolso de las emisiones GEI, considerando las estimaciones totales de operación y el indicador *midpoint: Climate change*.

Se debe recordar que, en la sección 6 se expusieron tres diferentes resultados de emisiones operacionales GEI, dependiendo de las consideraciones empleadas. En el primer caso no se incluyó el dióxido de carbono dado que se define como biogénico, en el segundo caso se definió el factor α (fracción másica de COD de entrada menos la del agua tratada, que se dirige a los lodos (α) y $(1-\alpha)$ la fracción que reacciona y genera CO_2) con igual valor en todos los escenarios ($\alpha = 0,2$). Mientras que en el tercer caso, se estableció un valor de α diferenciado dependiendo del caso, en los escenarios #0 y #1 se tiene $\alpha = 0,34$, y en los escenarios #2 y #3 se establece $\alpha = 0,2$.

En la tabla 8.1 se encuentra el resumen de los resultados operacionales y el indicador *midpoint: Climate change* de construcción. Se debe tener en cuenta que en todo momento los ahorros considerados son con respecto al escenario #0.

Tabla 8.1: Resumen de los resultados de las emisiones GEI operacionales y de construcción para cada caso.

Resultados de emisiones GEI operacionales y de construcción				
Descripción	Escenarios			
[ton CO_{2eq} /año]	#0 - LA	#1 - MBR	#2 MBR + AnMBR	#3 MBR + AnMBR + H_2
Midpoint Climate change Construcción	313,21	331,57	983,81	1.037
Exceso de emisiones GEI por construcción c/r esc. #0 (LA)	-	18,36	670,60	723,79
Emisiones Op. GEI	1.288,55	888,67	805,22	758,97
Emisiones Op. GEI + CO2 biogénico ($\alpha=0,2$)	3.634,01	3.234,12	2.844,27	2.798,02
Emisiones Op. GEI + CO2 biogénico ($\alpha=0,34$ ó $0,2$)	3.223,81	2.823,93	2.844,27	2.798,02

Para analizar los resultados bajo las tres diferentes consideraciones, se exponen las tablas 8.2, 8.3 y 8.4, donde uno de los principales resultados en cada una de ellas es el período de amortización del exceso de emisiones por construcción y el ahorro total de emisiones durante la vida útil de cada una de las plantas.

De la tabla 8.2 se logra apreciar que la jerarquía de los escenarios en torno a la conveniencia por emisiones, se mantiene con respecto a los resultados operacionales. Si bien el escenario #3 es que el que mayor emisiones GEI por construcción genera, los ahorros operacionales provocan que el período de amortización sea menor a dos años, y que aún frente al desfase en el ahorro, sea el de menor emisiones al considerar la vida útil de 20 años.

Tabla 8.2: Análisis de los resultados de emisión total de GEI por operación y construcción. Consideración: no se contabiliza el CO_2 biogénico

Análisis de operación y construcción a largo plazo				
Descripción \ Escenarios	#0 - LA	#1 - MBR	#2 MBR + AnMBR	#3 MBR + AnMBR + H_2
Emisiones GEI Op. [ton CO_{2eq} /año]	1.288,55	888,67	805,22	758,97
Ahorro emisiones Op. c/r esc. #0 (LA) [ton CO_{2eq} /año]	-	399,88	483,33	529,58
Fracción de ahorro emisiones Op. c/r esc. #0 (LA) [-]	-	0,310	0,375	0,411
Exceso de emisiones GEI por construcción c/r esc. #0 [ton CO_{2eq} /año]	-	18,36	670,6	723,79
Período de amortización de exceso por construcción [año]	-	0,05	1,39	1,37
Emisiones ahorradas durante vida útil (20 años) [ton CO_{2eq} /año]	-	7.979,33	8.996,03	9.867,80

Respecto de la tabla 8.3, se obtiene el mismo análisis anterior para la jerarquización. Sin embargo, se debe recordar que en el caso de aplicar igual α en todos los escenarios, se obtienen diferentes calidades de lodos en términos de COD, lo que estaría fuera de los límites de este estudio, pero se debe considerar al momento de analizar los resultados.

Algo destacable en este caso, corresponde a que si bien las fracciones de ahorro de emisiones operacionales disminuyeron con respecto al caso en donde el CO_2 biogénico no es considerado, se tiene que la diferencia porcentual entre los escenario #1 y #2 aumentó. Es decir, si bien el ahorro con respecto al escenario #0 es del 11 % para esc. #1 y del 21,7 % para el esc. #2, se tiene que existen 10,7 puntos porcentuales de diferencia. Estos constituyen prácticamente

el doble con respecto al escenario #1.

Al hacer el mismo análisis en base a la tabla 8.2, la diferencia entre los escenarios #1 y #2 es de 6,5 puntos porcentuales, lo que es equivalente a un aumento en el ahorro de un 21 % con respecto al escenario #1.

Tabla 8.3: Análisis de los resultados de emisión total de GEI por operación y construcción. Consideración: se contabiliza el CO_2 biogénico y se define $\alpha = 0,2$ para todos los escenarios.

Análisis de operación y construcción a largo plazo				
Descripción \ Escenarios	#0 - LA	#1 - MBR	#2 MBR + AnMBR	#3 MBR + AnMBR + H_2
Emisiones GEI Op. [ton CO_{2eq} /año]	3.634,01	3.234,12	2.844,27	2.798,02
Ahorro emisiones Op. c/r esc. #0 (LA) [ton CO_{2eq} /año]	-	399,88	789,74	835,98
Fracción de ahorro emisiones Op. c/r esc. #0 [-]	-	0,110	0,217	0,230
Exceso de emisiones GEI por construcción c/r esc. #0 [ton CO_{2eq} /año]	-	18,36	670,6	723,79
Período de amortización de exceso por construcción [año]	-	0,05	0,85	0,87
Emisiones ahorradas durante vida útil (20 años) [ton CO_{2eq} /año]	-	7.979,33	15.124,14	15.995,90

Finalmente, al analizar los resultados expuestos en la tabla 8.4, considerando el CO_2 biogénico y un valor de α diferenciado según el escenario, de manera de obtener igual calidad de lodos en términos de COD, se obtiene que la jerarquización de conveniencia es diferente con respecto a los análisis anteriores.

En este último análisis, a largo plazo se obtiene que el escenario #1 es el más conveniente, y luego le sigue el escenario #3, con 2,3% menor ahorro durante la vida útil (con respecto al esc. #1).

Tabla 8.4: Análisis de los resultados de emisión total de GEI por operación y construcción. Consideración: se contabiliza el CO_2 biogénico y se define $\alpha = 0,34$ o $\alpha = 0,2$, dependiendo del escenario.

Análisis de operación y construcción a largo plazo				
Descripción \ Escenarios	#0 - LA	#1 - MBR	#2 MBR + AnMBR	#3 MBR + AnMBR + H_2
Emisiones GEI Op. [ton CO_{2eq} /año]	3.223,81	2.823,93	2.844,27	2.798,02
Ahorro emisiones Op. c/r esc. #0 (LA) [ton CO_{2eq} /año]	-	399,88	379,54	425,79
Fracción de ahorro emisiones Op. c/r esc. #0 [-]	-	0,124	0,118	0,132
Exceso de emisiones GEI por construcción c/r esc. #0 [ton CO_{2eq} /año]	-	18,36	670,6	723,79
Período de amortización de exceso por construcción [año]	-	0,05	1,77	1,70
Emisiones ahorradas durante vida útil (20 años) [ton CO_{2eq} /año]	-	7.979,33	6.920,28	7.792,04

8.1. Conclusiones parciales

Tal como fue posible notar en los resultados, las consideraciones empleadas pueden afectar incluso la apreciación relativa de los escenarios, generando que la alternativa ganadora no siempre sea la misma.

Por otro lado, se tiene que el esquema de amortización de las emisiones de gases de efecto invernadero debiese realizarse para cada uno de los impactos ambientales, de manera de evaluar el desempeño global de los escenarios.

El solo estudiar el comportamiento de los GEI constituye una visión sesgada de los impactos ambientales. Además, dependiendo del lugar de implementación de la planta de tratamiento, podría ser que existan problemáticas más urgentes y sensibles que las relacionadas con la atmósfera, por lo que la eventual conclusión sería para cada caso y requeriría de la valorización particular de los diferentes tipos de impacto.

Considerando los límites del estudio y la información disponible, al analizar solamente el comportamiento de los GEI operacionales y de construcción, se obtiene que los escenarios propuestos siempre generan ahorros de emisiones con respecto al escenario #0 bajo los supuestos empleados, por lo que cualquiera de ellos podría ser sugerido para la implementación. Además, considerando que los escenarios #2 y #3 son capaces de producir H_2 , entonces este subproducto podría definirse como verde.

La jerarquización de los escenarios dependerá de los supuestos empleados, por lo que se requiere la verificación de ellos.

Existen otro tipo de evaluaciones que son pertinentes a la hora de decidir frente a un portafolio de proyectos, no solo considerando el impacto ambiental o un análisis económico, sino que teniendo en cuenta la sintonía con el futuro de la tecnología empleada, además de la capacidad de que el sistema resista perturbaciones, etc. Para la valorización de estas características, se sugiere emplear la metodología de análisis multicriterio.

Capítulo 9

Aplicación metodología ICoS

Entendiendo que los impactos estimados mediante la metodología del LCA no son los únicos a ser considerados en la evaluación multidimensional de escenarios tecnológicos, es que en esta sección se expone el desarrollo y resultados obtenidos de la aplicación de la metodología ICoS.

El Concepto Integrativo de Desarrollo Sostenible, ICoS por sus siglas en inglés, corresponde a una metodología para la construcción de marcos de evaluación de sistemas desde la sostenibilidad, integrando las miradas medioambientales, sociales y económicas. Dada su transversalidad, es que se propone su uso en este trabajo para ampliar la discusión.

9.1. Propuesta de los indicadores

Tal como se expuso en la sección 4.1.2, en primer lugar se debe elaborar un marco de evaluación de sostenibilidad para los escenarios propuestos, con retroalimentación de personas involucradas, tanto comunidades, como académicos, empresarios, operarios, etc. Para lograrlo, se comienza estableciendo criterios atingentes para cada uno de los tres objetivos de sostenibilidad que plantea ICoS, de manera de posteriormente desarrollar indicadores que permitan el reflejo de los avances y deudas que presentan los casos de estudio en ámbitos medio ambientales, económicos y sociales.

Dado los límites del estudio, el desarrollo de los criterios e indicadores se obtuvo principalmente de la bibliografía consultada. Es por esto que no se exponen grandes diferencias conceptuales entre ellos. Sin embargo, si se realizara con la metodología a mayor profundidad, las discusiones permitirían identificar claramente los criterios en cuestión.

Considerando principalmente el trabajo de Fuss et al. [24] y Rodriguez et al. [25], se seleccionaron algunos de sus indicadores propuestos, los cuales fueron empleados directamente o adaptados a este trabajo. El consolidado de indicadores se presenta en las tablas 9.1, 9.2 y 9.3.

Se debe tener presente que si bien un indicador puede ser aplicable de igual manera en contextos diferentes, la relevancia e interpretación de este podría cambiar, dado que los

actores involucrados y/o el sistema presentan propósitos diferentes.

Como es posible observar, cada tabla hace mención a uno de los objetivos de sostenibilidad planteados por ICoS, mientras que en negrita sobre cada indicador se encuentra la regla de ICoS a la que tributa. Solo los indicadores presentes en celdas de color blanco serán cuantificados; el resto (celdas color gris) solo fue reportado.

Para mayor detalle respecto de la metodología diríjase a la sección 4.1.2.

Tabla 9.1: Propuesta de indicadores para el objetivo 1 de ICoS: Asegurar la existencia humana.

Objetivo: Asegurar la existencia humana.	
Indicador	Unidad
Regla: Asegurar la satisfacción de las necesidades básicas.	
Suministro de H_2 como fuente de energía	MWh/a
Nutrientes recuperados en biosólidos	ton N/a

En el primer objetivo, la regla respecto asegurar la satisfacción de las necesidades básicas se interpretó como la capacidad de producción de combustibles (H_2) y fertilizantes orgánicos de cada uno de los escenarios, lo que permite sostener un nivel de calidad de vida.

Tabla 9.2: Propuesta de indicadores para el objetivo 2 de ICoS: Mantener el potencial productivo de la sociedad.

Objetivo: Mantener el potencial productivo de la sociedad.	
Indicador	Unidad
Regla: Usar los recursos y las fuentes de energía renovables de manera sostenible.	
Tasa de producción del reactor	$g H_2/m^3/d$
Regla: Usar los recursos y las fuentes de energía no-renovables de manera sostenible.	
Demanda neta de combustibles fósiles	$t Petroleo_{eq}$
Demanda de energía eléctrica de la red	MWh/a
Regla: Usar el medio ambiente sin dañar su capacidad de sumidero.	
Potencial de calentamiento global	ton CO_{2eq}
Potencial de eutrofización	kg P_{eq}
Potencial de acidificación	kg SO_2
Desechos sólidos generados por cada tecnología	ton desechos/a
Regla: Desarrollar bienes, habilidades y conocimiento de manera sostenible.	
Contribución al conocimiento de la población respecto a los retos del agua y la energía	Declaración cuantificada
Costos de construcción, operación y mantenimiento	$\$/m^3$

En el segundo objetivo y sus reglas asociadas, se hace mención al uso sostenible, proponiendo que se cuantifiquen como abonos o retiros a la matriz correspondiente.

Por otro lado, la regla de respecto de desarrollar bienes, habilidades y conocimiento de manera sostenible, da cuenta del deber de la sociedad a generar una herencia tanto a nivel de recursos e infraestructura técnica, como de habilidades y conocimientos [35]. Por lo anterior, los indicadores propuestos hacen mención a la distribución de la información a la población y la factibilidad económica, desde la mirada de los recursos empleados en cada uno de los escenarios.

Tabla 9.3: Propuesta de indicadores para el objetivo 3 de ICoS: Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad.

Objetivo: Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad.	
Indicador	Unidad
Regla: Conservación de los recursos sociales (tolerancia, solidaridad, etc.).	
Fomento de la responsabilidad social	Declaración cuantificada
Creación de puestos laborales	# nuevos puestos laborales

En cuanto al último objetivo, dada su mirada más social es que los indicadores se convierten principalmente en valorizaciones subjetivas de un grupo encuestado, en donde la declaración cuantificada corresponde a la asignación de un puntaje dentro de la escala del 0 al 5 (análogo a lo expuesto en el trabajo de Casas, L. et al. [67]) para permitir la comparación entre los escenarios.

La preservación de las opciones de desarrollo y acción de la sociedad, considera los recursos sociales en relación al bienes común, es por esto que se establecen indicadores respecto de la promoción de la responsabilidad y la creación de empleos.

9.2. Cuantificación de los indicadores

Para la cuantificación de los indicadores, se emplearon principalmente resultados de las secciones anteriores, tales como consumo energético, producción de H_2 e indicadores *midpoint* del LCA.

En el caso de los indicadores de apreciación (declaración cuantificada) y estimación de nuevos puestos de trabajo, se realizaron consultas a un grupo de expertos.

En la tabla 9.4 se encuentra la asociación entre el número de escenario y la tecnología propuesta, mientras que en las tablas 9.5, 9.6 y 9.7 se encuentran los resultados para cada uno de los indicadores ICoS cuantificados por objetivo.

Tabla 9.4: Resumen y siglas de los escenarios propuestos para la evaluación de impacto ambiental.

Compilado de los escenarios propuestos		
Escenario	Siglas	Descripción
# 0	LA	Reactor de Lodos Activados + Sedimentador
# 1	MBR	<i>Membrane Bioreactor</i>
# 2	AnMBR + MBR	<i>Anaerobic + Aerobic Membrane Bioreactor</i>
# 3	AnMBR + MBR + H_2	<i>Anaerobic + Aerobic Membrane Bioreactor + Línea de aprovechamiento de H_2</i>

El indicador de la tabla 9.5 fue calculado en la sección 6.18, estimando la tasa de producción de H_2 y considerando el rendimiento energético promedio de una celda de combustible.

Entonces, para el primer objetivo de ICoS se obtiene que la jerarquía es clara, dado que solo el último escenario genera un combustible que se puede emplear *in-situ*.

Tabla 9.5: Cuantificación de los indicadores relativos al objetivo 1 de ICoS, Asegurar la existencia humana.

Asegurar la existencia humana.		Escenario			
Indicador	Unidad	#0	#1	#2	#3
Regla: Asegurar la satisfacción de las necesidades básicas.					
Suministro de H_2 como fuente de energía	MWh/a	-	-	-	153,85

Respecto de la cuantificación de indicadores para el segundo objetivo (tabla 9.6) se tiene que son todas estimaciones previas o resultados del LCA consolidado (secciones 6 y 7) (sin incluir el CO_2 considerado biogénico), a excepción del último punto a evaluar.

Para la valorización de la contribución al conocimiento de las personas respecto de los desafíos agua - energía, se encuestó a un grupo de expertos para que en una escala del 0 al 5 puntuaran cada escenario.

Dentro de las principales discusiones del indicador se tiene que, si bien es una pregunta válida, su importancia es menor dado que no es el propósito del proyecto. Sumado a esto, se debe considerar cuán oportuna es la pregunta considerando que, a diferencia del estudio propuesto por M. Rodríguez et al [25], en donde la tecnología MBR sería empleada en un jardín botánico en donde existen visitantes siempre nuevos y con interés en aprender, en el caso de una planta de tratamiento los operarios son siempre los mismos y su interés es

meramente laboral.

Lo anterior, expone que el grupo objetivo y la transferencia de información será diferente en cada caso. Además, dado que la motivación del proyecto no es apoyar el conocimiento, el contexto social cambia. Entonces, ningún escenario podría presentar puntajes sobre 3. Luego, para discriminar cada caso, se reflexionó respecto de qué tan evidente es el nexo agua - energía. Se consideró que, a medida que se complejiza el sistema, la interrelación se hace más clara por los consumos de energía en todos los escenarios, además de la producción de esta mediante celdas de combustible en el último caso.

Observando la tabla 9.6, es difícil establecer cuál es el mejor escenario, puesto que se carece de comparaciones justas frente a las diferentes unidades de impacto propuestas. Por ejemplo, si bien el escenario #3 demanda menor energía y emite menor CO_{2eq} , es el que mayor potencial de eutrofización y acidificación presenta. Algo parecido es lo que ocurre al analizar los otros escenarios.

Para el establecimiento de la jerarquía de los indicadores, se deben realizar encuestas a un panel de expertos multidisciplinarios involucrados en el contexto estudiado. Dado que esto no fue abarcado en este trabajo, entonces se plantea la relevancia de la huella de carbono frente a otros indicadores ambientales, puesto que presenta valores de mayor magnitud, empleando unidades de toneladas mientras que los potenciales de eutrofización y acidificación se encuentran en kilogramos.

Uno de los resultados colaterales de ICoS es establecer puntos a mejorar de cada escenario. En este caso, es posible plantear la necesidad de disminuir principalmente los impactos ambientales por construcción de las tecnologías alternativas.

Tabla 9.6: Cuantificación de los indicadores relativos al objetivo 2 de ICoS, Mantener el potencial productivo de la sociedad.

Mantener el potencial productivo de la sociedad.		Escenario			
Indicador	Unidad	#0	#1	#2	#3
Regla: Usar los recursos y las fuentes de energía renovables de manera sostenible.					
Tasa de producción del reactor	$g H_2 / m^3 / d$	-	-	68,3	68,3
Regla: Usar los recursos y las fuentes de energía no-renovables de manera sostenible.					
Demanda de energía eléctrica de la red	MWh/a	3.473,32	2.143,03	1.971,15	1.817,29
Regla: Usar el medio ambiente sin dañar su capacidad de sumidero.					
Potencial de calentamiento global	ton CO_{2eq}	2,61E+04	1,81E+04	1,71E+04	1,62E+04
Potencial de eutrofización	kg P_{eq}	60,69	113,74	374,32	405,54
Potencial de acidificación	kg SO_2	1.409,65	2.146,37	6.882,20	8.799,93
Regla: Desarrollar bienes, habilidades y conocimiento de manera sostenible.					
Contribución al conocimiento de la población respecto a los retos del agua y la energía	Declaración cuantificada	0	1	2	3

En relación al tercer objetivo de ICoS (tabla 9.7), para la cuantificación del primer indicador se realizó la encuesta anteriormente mencionada, además de consultar criterio experto para la estimación del segundo punto a evaluar.

La promoción de la responsabilidad social se interpretó desde el punto de vista empresarial dado el contexto del proyecto y, si bien se consideró pertinente de incluir, no se prevén desarrollos de esa índole debido al cambio de tecnología.

Por otro lado, la creación de puestos laborales fue estimada por turno y asumiendo como ya contratados a los empleados necesarios para operar el escenario #0 (LA), a esto se debe que presenta como valor referencial cero en la tabla 9.7. Respecto de los escenarios #1 (MBR) y #2 (AnMBR + MBR), dado que corresponden a un cambio del tratamiento secundario,

pero siguen operando en continuo, es que no se adicionaron nuevo puesto de trabajo, mientras que para el escenario #3 (AnMBR + MBR + H_2), debido a que en la línea del H_2 se operan con gases en modalidad batch, se estimó la necesidad de agregar a una persona por turno.

Dado los resultados obtenidos es posible plantearse si es que verdaderamente existe un aporte significativo por parte de alguno de los escenarios planteados hacia el tercer objetivo de ICoS. Al menos, bajo la evaluación realizada, podría decirse que el hecho de que el escenario #3 (AnMBR + MBR + H_2) requiera de una persona más por turno no establece una diferencia relevante para la regla.

Queda en manifiesto que el tercer objetivo de ICoS, Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad, presenta un débil desarrollo en los escenarios propuestos, desde el punto de vista de los indicadores seleccionados. Aún cuando se puede establecer como ganador al escenario #3 con la línea de aprovechamiento de H_2 .

Tabla 9.7: Cuantificación de los indicadores relativos al objetivo 3 de ICoS, Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad.

Preservar las opciones de desarrollo y acción de la sociedad		Escenario			
Indicador	Unidad	#0	#1	#2	#3
Regla: Conservación de los recursos sociales (tolerancia, solidaridad, etc.).					
Fomento de la responsabilidad social	Declaración cuantificada	Sin diferencia apreciable			
Creación de puestos laborales	# nuevos puestos por turno	0	0	0	1

9.3. Conclusiones parciales

En primer lugar, se debe recordar que el foco de la metodología ICoS es presentar las diversas aristas de la sostenibilidad aplicada a un caso, de manera de exponer todos los puntos a evaluar sistematizadamente.

El análisis que se propone por bibliografía es por cada objetivo, por lo que no se espera tener un único resultado, sino que expresar las fortalezas y debilidades de los escenarios propuestos.

Se debe tener en consideración que varios de los indicadores provienen de las estimaciones realizadas para los LCA, y tal como se expuso anteriormente, presentan incertidumbre asociada a la cantidad y calidad de la información encontrada en literatura.

Dentro de las principales conclusiones obtenidas en este capítulo, se presenta el distinguir a la metodología ICoS como una herramienta para la integración y desarrollo de análisis multicriterios. Sin embargo, presenta debilidades en términos del tiempo requerido para su implementación, necesidad de contactar y hacer encuestas a actores relevantes, ser caso-específico y por sobretodo, la falta de guías para la propuesta de indicadores.

Del primer objetivo de la metodología, se puede concluir una jerarquía clara, en donde se obtiene que el mejor escenario corresponde al #3, dado que genera combustible con la calidad requerida para el uso de la celda de combustible. Mientras que, el escenario #2 produce H_2 , pero en una mezcla que debiese ser tratada.

En base al segundo objetivo, la jerarquía no es clara dada la variedad de unidades empleadas para caracterizar los indicadores, además de diferentes tendencias en cada uno de ellos. Solo se puede concluir que dado un escenario, siempre existirán puntos a mejorar respecto del resto.

En cuanto al tercer objetivo, se obtiene que solo el escenario #3 presenta beneficios, mientras que el resto mantiene el status quo. Sin embargo, es cuestionable el impacto de este beneficio hacia el cumplimiento de la regla. Se considera que en futuros trabajos este objetivo podría estar construido de manera más sólida, además de incluir la opinión de un espacio muestral mayor.

El empleo de ICoS en este trabajo fue acotado, por lo que se requiere la generación de más indicadores, y por ende dimensiones, para comprender cabalmente los diversos impactos que cada uno de los escenarios propuestos puede generar. Para lograrlo, se necesita de la colaboración de otras partes interesadas, de manera de discutir los diversos puntos de vista y estimar indicadores cualitativos en grupos muestrales estadísticamente representativos, además de generar la valorización de cada uno de los puntos a evaluar para establecer la relevancia relativa de estos.

Por otro lado, se requieren modelos más complejos de las líneas de tratamiento, de manera de predecir con mayor exactitud la calidad fisicoquímica de los lodos y su potencial como potenciador de suelos, además de otras propiedades que permitirían un mejor diseño de las tecnología y por ende mejores estimaciones de impacto en términos del LCA.

Finalmente, no se debe olvidar la relevancia de la factibilidad económica, la cual está asociada a los costos de inversión, operación y mantenimiento, pero también a las tasas de retorno y VAN (valor actual neto) del proyecto. Si bien en este trabajo no se abordó este indicador, al igual que en todo proyecto de ingeniería se debe tener en consideración, y dado lo moderno de algunos equipos, o poco industrializados, como las celdas de combustible, es que se requeriría de estudio más profundos para su tasación.

Capítulo 10

Propuestas de mejora

Si bien este trabajo se plantea como una primera aproximación al problema, además de ejemplo de cálculo para otros estudios relacionados; se logra obtener una visión general al contexto, como también exponer ciertos puntos a mejorar en términos de la tecnología e implementación en baso a los resultados obtenidos.

Dado lo anterior, se recalca la necesidad de estudios de mayor precisión para la toma de decisiones y propuestas competitivas.

Las propuestas son en torno a los potenciales usos del H_2 , y las mejoras en las tecnologías.

10.1. Potenciales usos del H_2

10.1.1. Simbiosis industrial

La tasa esperada de producción de H_2 dado un caudal de 1.000 [m^3/d], es de 68,3 [kg/d]; lo cual es una cantidad importante considerando que presenta un poder calorífico superior al del gas natural.

Sin embargo, plantas vitivinícolas no presentan requerimientos de energía térmica, o al menos no tan masivos como el potencial del H_2 generado, según lo declarado en la entrevista a Concha y Toro. Por lo tanto, la co-generación, al igual que el empleo como combustible de llama no resulta adecuado.

Otra opción, es el uso de camiones a base del H_2 como gas de explosión [68], sin emplear celdas de combustible. Esto permitiría el disminuir la huella de carbono de la flota que actualmente utiliza diesel o petróleo, y que no presentan otras alternativas. No obstante, este tipo de tecnología aún no se ampliamente comercializada, por lo que su adquisición es compleja y trae retos/riesgos asociados.

Si es que se estudia el caso de simbiosis industrial, el H_2 producido en plantas de tratamiento, puede ser empleado en otros contextos en donde sea viable y presente ventajas comparativas con respecto a la tecnología actual

Varias propuestas pueden surgir en base a lo anterior, y su factibilidad será para cada caso, dado que uno de los principales desafíos es el transporte y almacenamiento.

Ejemplos de uso, puede ser en *blending* [69] al gas natural/licuado para uso doméstico e industrial, el cual puede disminuir la huella de carbono, además del uso como combustible en grúa horquillas [70], generando menores tiempo de carga y por ende mayor utilización de la flota.

10.1.2. Desarrollo de la industria química nacional

Si bien lo más común al momento de hablar de H_2 es pensar en su producción mediante electrolizadores y empleo en celdas de combustible, se deja de lado que existen industrias que pueden producirlo o requerirlo como reactante.

La producción puede ser mediante el tratamiento de aguas ricas en carga orgánica como es el caso analizado en este trabajo, mientras que los requerimientos vienen de la industria química, para la producción de amoníaco vía Haber-Bosch, para la síntesis de explosivos utilizados en la minería o fertilizantes de la agroindustria, también para la síntesis de combustibles como el metano y otros, vía Fischer-Tropsch, o solventes/anticongelantes como el metanol.

Todos los productos mencionados se generan a partir de reacciones que requieren la adición de H_2 , el cual está siendo suplido principalmente por las reacciones de reformado de vapor [71].

Si bien, por el momento la demanda se ha suplido, se espera un aumento en el uso de fertilizantes y otros de los productos químicos mencionados. Además, procesos como Haber-Bosch son altamente demandantes de energía, y están generando contaminación al ser realizados en países subdesarrollados, con matrices energéticas en base a combustibles fósiles.

Por lo anterior, sustituir el origen del H_2 por uno más verde contribuiría parcialmente a reducir el impacto ambiental de los productos generados a partir de él.

En el caso de Chile, se requiere del desarrollo de la industria química nacional, la que permitiría abrir nuevos horizontes y generar empleos, como también disminuir el impacto por transporte de todos los productos mencionados. Hoy en día, existe un reducido número de plantas químicas que usan H_2 , las cuales son en su mayoría pequeñas, y en la que destaca la planta de amoníaco en Mejillones, la cual se especializa en la producción de explosivos.

10.2. Mejoras en las tecnologías

Si bien las celdas de combustible generan impactos ambientales, al igual que todas las tecnologías, esta sección se centrará en los tratamientos secundarios.

En primer lugar, se plantea la necesidad de datos experimentales para la validación de la producción de H_2 en un AnMBR, con afluentes vitivinícolas.

Por otro lado, según el modelo empleado, se obtiene que la optimización de la producción de H_2 es contraria a la capacidad de reducción de la COD, provocando que se requiera un segundo reactor para el cumplimiento de la norma.

Sin embargo, dados los requerimientos actuales de la planta, y el ahorro energético solo por el cambio de tecnología, ya sea a MBR o AnMBR + MBR, se propone el estudio de otros casos, privilegiando la reducción de COD, pero aún fijando una tasa de generación de H_2 base. Esto se debe principalmente a que puede que este sistema no sea óptimo para la producción de H_2 , por ejemplo al compararlo con los rendimientos de un electrolizador. Sin embargo, si se considera que es un subproducto y no el objetivo principal de producción, entonces los resultados, tanto del LCA como del ICoS, podrían variar a favor de esta tecnología.

Es decir, no se debe buscar generar el máximo H_2 posible, sino que se debe encontrar el equilibrio entre generarlo y a la vez disminuir los impactos ambientales del tratamiento de agua, modificando las variables de diseño de los reactores, por ejemplo, los tiempos de residencia y, por ende, el volumen y materiales requeridos.

Respecto de la construcción de los reactores de membrana, las principales deudas ambientales se deben al alto consumo de energía para la fabricación de las membranas [61] y la demanda de materiales escasos y/o especiales en comparación a otras tecnologías. Esto puede presentar mejoras, en primer lugar empleando energías renovables y certificando el proceso, disminuyendo el efecto sobre el LCA global. Además se plantea el potencial de optimizar el proceso productivo de membranas en términos energéticos, lo cual puede tener relación con aislaciones, empleo de nuevas tecnologías, nuevo diseño de la planta, etc.

Capítulo 11

Comparación de sistemas y reflexiones

En este capítulo se aborda la elaboración de indicadores desde una mirada sistémica, además del desarrollo de reflexiones generales.

11.1. Indicadores sistémicos

Si bien anteriormente se expusieron los resultados del LCA global (sec. 8) y metodología ICoS (sec. 9), en esta sección se plantean nuevos indicadores que permitirían obtener otra mirada en términos de eficiencia, reuniendo dos índices de evaluación a la vez.

La lógica que se sigue para la construcción de este tipo de indicadores corresponde a la razón entre aspectos positivos y negativos para cada una de las propuestas, por lo que indicadores de menor valor serían menos ventajosos que indicadores de mayor valor. Bajo esta estructura, los indicadores que se pueden postular serán tantos como se estime conveniente.

En función de lo anterior, se propone que el beneficio, el aspecto positivo de cada indicador, sea caracterizado a partir del precio de mercado de los productos generados en cada escenario. Por otra parte, para describir las debilidades (aspectos negativos) del sistema se plantea el considerar la masa de hormigón requerido para la construcción de cada planta, dado que es una manera de expresar los requerimientos materiales de los escenarios.

Entonces, la ecuación 11.1 describe al indicador propuesto ($I_{eficiencia}$).

$$I_{eficiencia} = \frac{\text{Precio mercado}}{\text{Masa hormigón}} \quad (11.1)$$

Para establecer el beneficio económico, se realizó la ponderación del precio reportado para cada producto y el flujo de producción de este. Lo anterior se resume en la tabla 11.1.

En la estimación, el agua generada por el tratamiento se consideró como apta para el riego. El H_2 se estimó como producto final, en pos de incluir otros mercados en los potenciales beneficios, que no sean el uso *in-situ* como combustible.

Tabla 11.1: Recopilación tasa de producción y precios de mercado de los productos

Reporte de producción y precio de mercado			
Producto	Precio Mercado	Tasa de producción	Referencia
Agua de riego	5,9 [UF/L/s]	8,04 [L/s]	[72]
H_2 gaseoso	2,5 [USD\$/ kg H_2]	17.826 [kg/año]	[73]

Para la estimación se consideró el valor de la Unidad de Fomento (UF) en \$36.858 [74] y el dolar en \$914,71 [75] según lo reportado por el Banco Central para el 10 de Enero de 2024.

Respecto de la masa de hormigón utilizada, esta fue reportada en los inventarios de la sección 7, y cuyo resumen se encuentra en la tabla 11.2.

Tabla 11.2: Requerimientos de hormigón para la construcción de cada planta.

Inventario construcción	
Escenario	Masa de hormigón [ton]
#0 - LA	1.075,11
#1 - MBR	586,19
#2 - AnMBR + MBR	1051,48
#3 - AnMBR + MBR + H_2	1051,48

En la tabla 11.3 se pueden apreciar los valores del indicador sistémico ($I_{eficiencia}$), mostrando que todos los escenarios propuestos, sobre todo los sistemas que producen H_2 , presentan ventajas por sobre el caso #0 (LA).

Tabla 11.3: Estimaciones del indicador sistémico propuesto en base a la masa de hormigón empleada en la construcción.

Indicador sistémico - Masa de hormigón	
Escenario	$I_{eficiencia}$ [\$/ton hormigón]
#0 - LA	32.509,8
#1 - MBR	59.624,6
#2 - AnMBR + MBR	808.594,7
#3 - AnMBR + MBR + H_2	808.594,7

Análogo a lo anterior, se pueden construir indicadores que presenten como debilidades (denominador de la ecuación) alguna categoría de impacto ambiental.

A continuación se expone un ejemplo de lo anterior, en base a las emisiones GEI operacionales anuales sumadas a la anualización de las producidas por construcción.

Entonces, la ecuación 11.2 describe al indicador propuesto ($I_{eficiencia}$).

$$I_{eficiencia} = \frac{\text{Precio mercado}}{\text{Emisiones GEI anualizadas}} \quad (11.2)$$

En la tabla 11.4 se expone el recuento de las emisiones GEI anualizadas que se emplearán como factor característico de las debilidades del sistema.

Tabla 11.4: Emisiones GEI operacionales y de construcción anualizadas en los 20 años de vida útil de las plantas de tratamiento.

Emisiones GEI anualizadas	
Escenario	Emisiones GEI [ton CO_{2eq} /a]
#0 - LA	1.304,21
#1 - MBR	905,25
#2 - AnMBR + MBR	854,41
#3 - AnMBR + MBR + H_2	810,82

Los resultados del indicador económico - ambiental propuesto se encuentran en la tabla 11.5, en donde se puede ver claramente la jerarquía de los escenarios.

A diferencia del indicador económico - másico anterior, ahora es posible la diferenciación entre los escenarios #2 y #3. No obstante, el índice estimado para estos difiere aproximadamente en un 6%, lo que no resulta en una ventaja significativa, al ser un valor bajo y sensible a los supuestos empleados.

Tabla 11.5: Estimaciones del indicador sistémico propuesto en base a las emisiones GEI operacionales y de construcción.

Indicador sistémico - Emisiones GEI	
Escenario	$I_{eficiencia}$ [\$/ton CO_{2eq}]
#0 - LA	1.339,9
#1 - MBR	1.930,5
#2 - AnMBR + MBR	49.755,0
#3 - AnMBR + MBR + H_2	52.429,8

Para la correcta interpretación de la tabla 11.5, se debe recordar que el escenario #2 produce H_2 pero en una mezcla al 55% molar. Mientras que el escenario #3 considera el aprovechamiento del H_2 *in-situ* mediante una celda de combustible, por lo que las emisiones

operacionales son menores al haber un autoabastecimiento de energía verde.

11.2. Reflexiones generales

Este trabajo consistió en el estudio de impacto ambiental de cuatro escenarios tecnológicos que se diferenciaron en el tipo de tratamiento secundario empleado (#0 - LA; #1 MBR; #2 AnMBR + MBR; #3 AnMBR + MBR + H_2). Además, el último escenario incluye una línea de aprovechamiento de H_2 mediante el uso de una celda de combustible para producción de energía eléctrica empleada *in-situ*.

Dentro de los principales hallazgos de este trabajo se encuentra la declaración de Concha y Toro que expresa una primera preocupación respecto del origen de la energía empleada, tanto eléctrica como de combustibles en el transporte, para luego establecer como futuros inconvenientes la oferta hídrica a la cual se enfrentarán.

Respecto de la factibilidad técnico-económica de los casos propuestos, se tiene que los reactores de membrana son viables de ser incorporados en estos contextos. Sin embargo, presentan economías de escala para el CAPEX y OPEX, las cuales se estabilizan alrededor de los 5.000 [m^3/d]. Por lo anterior, el generar *clusters* de tratamiento para RILes de calidades similares sería beneficioso económicamente. No obstante, no se prosiguió en el análisis de esta perspectiva, principalmente por falta de información respecto de las industrias adyacentes al caso planteado y el escaso conocimiento sobre los derechos de aguas asociados.

En término de los impactos relacionados con la operación de los escenarios, solo se estimaron las emisiones de GEI directas e indirectas, dado que es lo que usualmente se puede encontrar en la literatura de tratamiento de aguas.

Si bien los primeros cálculos operacionales reflejan un ahorro de emisiones en todos los escenarios propuestos, llegando a alcanzar ventajas hasta de un 41,1% con respecto a la tecnología de lodos activados, se debe tener en consideración tanto la incertidumbre asociada a los datos empleados para la cuantificación, como también la incidencia de los supuestos establecidos.

Respecto de lo anterior, una de las principales discusiones que se puede establecer es con respecto a incluir o no las emisiones de CO_2 consideradas biogénicas. Esto aún se encuentra en debate internacional, y al incluirlo en el análisis se tiene que los ahorros de emisiones no superan el 13,3% con respecto al escenario base.

Otras de las dificultades presentadas se debe a la nula capacidad de sensibilizar la operación de la línea de lodos a su variedad de calidades, generando que los límites del sistema se hayan reducido solo al tratamiento secundario, aún cuando existen diferencias en los productos.

Entonces, queda de manifiesto la sensibilidad de los resultados a los supuestos e información recopilada. Por lo tanto, para establecer un escenario óptimo se requieren análisis de mayor profundidad. No obstante, en el caso del estudio operacional, bajo las diversas ramas de decisión empleadas, siempre es posible plantear que el escenario que utiliza el H_2 *in-situ*

presenta ventajas en términos atmosféricos.

Posteriormente, al incorporar al análisis los impactos asociados a la construcción de cada una de las plantas, se expone una brecha de información en términos de los inventarios de insumos que es posible establecer en cada caso. Si bien se requiere desarrollar inventarios más similares en términos de detalle, siendo los más débiles los asociados a los reactores de membrana, aún así no se exponen ventajas en términos de los indicadores *midpoint* considerados, puesto que presentan valores superiores al escenario basal, o al momento de presentar ahorros estos se deben a no haber considerado insumos que sí se contabilizaron para el reactor de lodos activados, como por ejemplo el acero para reforzamiento.

La reflexión en términos del LCA global solo pudo llevarse a cabo en términos de GEI dado los datos recopilados.

De lo anterior, se obtuvo que todos los escenarios propuestos generan ahorros de emisiones GEI, considerando la construcción de las plantas y operación durante 20 años. El establecimiento de la jerarquía y la ventaja relativa dependerán del conjunto de supuestos empleados.

En la selección de un portafolio de proyectos, los impactos ambientales no son los únicos a considerar, al igual que al realizar una evaluación de sostenibilidad. Es por esto que se propuso el empleo de la metodología ICoS.

Aún cuando los indicadores cuantificados corresponden principalmente a las estimaciones obtenidas anteriormente, y no se estudió la jerarquización de estos, el solo proponer indicadores permite ampliar la mira hacia el contexto, entendiendo que el ámbito social y económico son relevantes.

En términos generales, la aplicación de ICoS deja en evidencia los bajos niveles de desarrollo en términos sociales que presenta este tipo de proyectos. No obstante, el escenario #3 con la línea de aprovechamiento de H_2 sobresale sutilmente con respecto al resto, principalmente por lo ilustrativo del nexo agua - energía y el requerir la presencia de un operario extra por turno.

Luego del análisis de los resultados, se obtuvo que dentro de las propuestas se encuentra el replanteamiento de los escenarios asociados al AnMBR, en donde el objetivo no sea la máxima producción de H_2 , sino que sea posible balancear la productividad con la capacidad de reducción de la carga orgánica del afluente.

Respecto de los reactores de membrana, el principal punto de falla en términos ambientales se debe al excesivo consumo de energía para la producción de las membranas, por lo que se plantea la certificación de energías verdes para su fabricación, además de la optimización de sus procesos productivos y su transporte.

En términos sistémicos, se expone el reflexionar respecto de los usos del H_2 , estableciendo una eventual simbiosis industrial en la zona, lo que permita emplearlo en sistemas más eficientes que la tecnología de celda de combustible, además de colaborar entre diversos

entes económicos.

En miras al futuro, se propone el desarrollo de la industria química nacional, que utilice este H_2 como un reactante con sello verde y vele por la producción ambientalmente sostenible de otros compuestos demandados, tales como amoníaco, y metanol.

Como es posible notar, todas las propuestas establecen la necesidad de expandir los horizontes del estudio, con el objetivo de establecer otras dinámicas de generación y consumo, puesto que si bien los resultados anteriores exponen ventajas en términos de emisiones GEI, respecto de los otros impactos no se presenta una forma de integrarlos a modo de generar una decisión transversal.

Por lo anterior es que se estimó conveniente el empleo de indicadores de eficiencia sistémica, de manera de comparar la razón entre los beneficios y contras de cada escenario. Los indicadores estudiados corresponden al valor mercado de los productos versus masa de hormigón para la construcción, y, valor de mercado versus emisiones GEI totales.

Los resultados de lo anterior, exponen que escenarios productores de H_2 presentan indicadores más altos en un orden de magnitud con respecto al resto. Además, el escenario #2 - MBR siempre refleja mejores rendimientos que el escenario basal (#0 - LA).

Luego de los análisis realizados se tiene que, los escenarios propuestos presentan ventajas comparativas con respecto al status quo (esc. #0 - LA). Sin embargo, la jerarquía y posición relativa dependerá del conjunto de supuestos y metodologías empleadas.

Capítulo 12

Conclusiones

Se predice que tanto los recursos hídricos, como energéticos se verán sometidos a estrés, dado el crecimiento demográfico y la tendencia a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para intentar frenar el avance del cambio climático, lo que no necesariamente va de la mano con la reducción de la huella hídrica.

Son variadas las industrias que utilizan grandes caudales de aguas, además de altos consumos de energía. En particular, los tratamientos de aguas aplicados a nivel mundial son responsable del 1,6 % de las emisiones GEI y del consumo del 3 % de la energía global.

Lo anterior expone un nicho de mejora, si se considera que las tecnologías empleadas no presentan detallados modelos predictivos, ni de diseño, además de presentar ineficiencias según lo expuesto por variados expertos.

Entonces, y entendiendo el nexo agua - energía, es que se planteó el estudio de un análisis de impacto ambiental para diferentes tecnologías de tratamiento de aguas. En particular, se establece como caso de estudio una planta vitivinícola, puesto que la bibliografía respalda el potencial de producción de H_2 que tendrían el tratamiento de sus RILes dado su alta carga orgánica.

Se propusieron cuatro escenarios de tratamiento, todos evaluados para las mismas calidades de agua de entrada y salida, además de un caudal de 1.000 [m^3/d]. En el primer caso, se tiene el uso de un reactor de lodos activados, la tecnología más ampliamente utilizada, además de la existente en la viña Concha y Toro - Lontué, de la cual se obtuvieron datos de operación mediante la realización de una entrevista. El siguiente escenario consistió en sustituir el reactor anterior por un MBR, puesto que se planteaba el potencial de disminuir el consumo energético de la planta. Los últimos dos escenarios establecen un tren de tratamiento que comienza con un AnMBR capaz de generar H_2 , para luego continuar con un MBR el que permitiría cumplir con la normativa en términos de la carga orgánica; la principal diferencia en estos escenarios es que si bien en ambos se produce H_2 , solo en el último se considera un sistema de purificación y empleo *in-situ* para la generación de energía eléctrica mediante una celda de combustible.

La tasa de producción de H_2 bajo el régimen del AnMBR se estimó en 68,3 [$g H_2/ m^3/d$],

por lo que se debe tener en consideración que este sería un subproducto del proceso, cuyo principal objetivo sigue siendo el tratamiento de RILes.

La estimación del impacto ambiental de cada escenario se estimó mediante un Análisis de Ciclo de Vida, constituido por las etapas de construcción y operación en estado estacionario. Se incluyó también la metodología ICoS para la consideración de otros indicadores que permitieran hablar de la sostenibilidad de cada proyecto en términos más amplios, integrando aspectos económicos y sociales.

Para establecer un análisis global del LCA de construcción y operativo, se requeriría haber empleado los mismos *midpoint* en cada etapa. Sin embargo, puesto que esto no fue posible, solo se planteó la evaluación global en términos de GEI.

En el consolidado se obtuvo como conclusión principal que cualquiera de los escenarios propuestos generaría ahorros en términos de emisiones GEI. La jerarquización de las alternativas y su diferencia relativa depende de los supuestos empleados y de la decisión de incluir o no en el inventario las emisiones de CO_2 consideradas biogénicas.

No se debe olvidar que el análisis arrastra los errores asociados a las estimaciones y las brechas de información, por lo cual no es una conclusión definitiva, sino que la obtenida en esta primera aproximación al caso planteado.

Respecto de las categorías *midpoint* que solo fueron consideradas en el LCA construcción, en términos generales se tiene que los escenarios propuestos generaban mayores impactos ambientales. Sin embargo, se debe tener en cuenta la capacidad del AnMBR de producir H_2 como subproducto, por lo que en las categorías en donde se superaron los impactos ambientales referenciales (escenario #0 - LA), siempre es posible establecer que el exceso debe ser asimilado por este subproducto, y en base a esta nueva repartición de impactos compararlo con otros procesos que generen H_2 , como lo es el empleo de un electrolizador y todo lo que ello conlleva.

No obstante, dado que los LCA para la producción de H_2 se centran mayoritariamente en la huella de carbono (emisiones GEI), y los sistemas propuestos que producen H_2 ya presentan ahorros de emisiones, entonces no fue necesario realizar el fraccionamiento de la responsabilidad ambiental, pero se propone esta asignación para otras categorías.

Por otro lado, a pesar de la somera implementación de ICoS se puede concluir que, en términos sociales, todos los escenarios presentan bajos niveles de desarrollo, pero el escenario #3 sobresale positiva, aunque insignificamente con la línea de aprovechamiento de H_2 al requerir más operarios.

Dentro de las propuestas de mejoras, todas apuntan al estudio de nuevos escenarios que podrían presentar beneficios según la información recopilada. Sin embargo, esto no desmerece el hecho de que, desde el punto de vista de los indicadores sistémicos, los escenarios #2 y #3 obtienen puntajes más de 10 y 20 veces mayores que el resto en términos de precio de mercado de los productos versus la masa de hormigón empleada en la construcción y emisiones GEI, respectivamente.

Bibliografía

- [1] Power systems in transition - Challenges and opportunities ahead for electricity security. International Energy Agency, 2021.
- [2] Action Plan on Global Water Security. The White House, 2021.
- [3] P. D'Odorico, K. F. Davis, L. Rosa, J. A. Carr, D. Chiarelli, J. Dell'Angelo, J. Gephart, G. K. MacDonald, D. A. Seekell, S. Suweis, M. C. Rulli, The global food-energy-water nexus, *Reviews of Geophysics*, vol. 56, 2018 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1029/2017RG000591](https://doi.org/10.1029/2017RG000591). [Consulta: 21 de Julio, 2023].
- [4] D. Perrone, G. M. Hornberger, Water, food, and energy security: scrambling for resources or solutions?, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, vol. 1, 2014 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1002/wat2.1004](https://doi.org/10.1002/wat2.1004). [Consulta: 03 de Julio, 2023].
- [5] M. Pescod, Wastewater treatment and use in agriculture - 3. Wastewater treatment. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [6] F. Bianco, M. Race, V. Forino, S. Pacheco-Ruiz, E. R. Rene, Bioreactors for wastewater to energy conversion: From pilot to full scale experiences. Elsevier, 2021 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1016/B978-0-12-821879-2.00004-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821879-2.00004-1). [Consulta: 06 de Julio, 2023].
- [7] P. K. Sarangi, S. Nanda, Biohydrogen Production Through Dark Fermentation, *Chemical Engineering and Technology*, vol. 43, 2020 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1002/ceat.201900452](https://doi.org/10.1002/ceat.201900452). [Consulta: 06 de Julio, 2023].
- [8] Alianza Hidrógeno Verde, H_2 - Manual del Hidrógeno Verde, [En Línea]. Disponible en: www.ah2vbiobio.cl/recursos. [Consulta: 19 de Julio, 2023].
- [9] X. Zhou, F. Yang, F. Yang, D. Feng, T. Pan, H. Liao, Analyzing greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment plants using pollutants parameter normalizing methoda case study of Beijing, *Journal of Cleaner Production*, vol. 376, 2022 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134093](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134093). [Consulta: 07 de Agosto, 2023].
- [10] Ministerio del Medio Ambiente - SNICHile, Contexto internacional, [En Línea]. Disponible en: <https://snichile.mma.gob.cl/contexto-internacional/>. [Consulta: 24 de Julio, 2023].
- [11] L. A. Ioannou, G. L. Puma, D. Fatta-Kassinos, Treatment of winery wastewater by physicochemical, biological and advanced processes: A review, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 286, 2015 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1016/j.jhazmat.2014.12.043](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.043). [Consulta: 04 de Julio, 2023].
- [12] R. Rajagopal, N. M. Saady, M. Torrijos, J. V. Thanikal, Y. T. Hung, Sustainable agro-food industrial wastewater treatment using high rate anaerobic process, *Water*

- (Switzerland), vol. 5, 2013 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.3390/w5010292](https://doi.org/10.3390/w5010292). [Consulta: 07 de Julio, 2023].
- [13] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, Environmental management. Life Cycle Assessment — Principles and framework. ISO 14040, 2006.
- [14] C. Rösch, K. R. Bräutigam, J. Kopfmüller, V. Stelzer, P. Lichtner, Indicator system for the sustainability assessment of the German energy system and its transition, *Energy, Sustainability and Society*, vol. 7, 2017 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1186/s13705-016-0103-y](https://doi.org/10.1186/s13705-016-0103-y). [Consulta: 17 de Julio, 2023].
- [15] S. Elmoutez, A. Abushaban, M. C. Necibi, M. Sillanpää, J. Liu, D. Dhiba, A. Chehbouni, M. Taky, Design and operational aspects of anaerobic membrane bioreactor for efficient wastewater treatment and biogas production, *Environmental Challenges*, 2022 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100671](https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100671). [Consulta: 29 de Junio, 2023].
- [16] Y. He, Y. Li, X. Li, Y. Liu, Y. Wang, H. Guo, J. Hou, T. Zhu, Y. Liu, Net-zero greenhouse gas emission from wastewater treatment: Mechanisms, opportunities and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 184, 2023 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1016/j.rser.2023.113547](https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113547). [Consulta: 19 de Julio, 2023].
- [17] Life cycle inventory of wastewater treatment. In: *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services –Ecoinvent Report No.13.*, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dubendorf. Capítulo 4, 2003.
- [18] J. Foley, D. de Haas, K. Hartley, P. Lant, Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems, *Water Research*, vol. 44, no. 5, 2010 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.11.031](https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.11.031). [Consulta: 14 de Agosto, 2023].
- [19] S. Morera, M. V. Santana, J. Comas, M. Rigola, L. Corominas, Evaluation of different practices to estimate construction inventories for life cycle assessment of small to medium wastewater treatment plants, *Journal of Cleaner Production*, vol. 245, 2020 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118768](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118768). [Consulta: 08 de Agosto, 2023].
- [20] 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- [21] Direct GHG emissions from a pilot scale MBR-process treating municipal wastewater, *Advances in Climate Change Research*, vol. 13, no. 1, 2022 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.09.006](https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.09.006). [Consulta: 25 de Julio, 2023].
- [22] Promotion of full-scale constructed wetlands in the wine sector: Comparison of greenhouse gas emissions with activated sludge systems, *Science of The Total Environment*, vol. 770, 2021 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145326](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145326). [Consulta: 27 de Julio, 2023].
- [23] L. Corominas, D. M. Byrne, J. S. Guest, A. Hospido, P. Roux, A. Shaw, M. D. Short, The application of life cycle assessment (lca) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review, *Water Research*, vol. 184, 2020 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116058](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116058). [Consulta: 10 de Agosto, 2023].
- [24] M. Fuss, R. T. Vasconcelos Barros, W.-R. Poganietz, Designing a framework for

- municipal solid waste management towards sustainability in emerging economy countries - An application to a case study in Belo Horizonte (Brazil), *Journal of Cleaner Production*, vol. 178, 2018 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.051](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.051). [Consulta: 27 de Septiembre, 2023].
- [25] M. Rodríguez-Castillo, V. Bolívar-Paypay, W. R. Poganietz, A. L. Prieto, Indicators for the sustainability assessment of MBR technologies for wastewater reuse in Chile: The good, the bad, and the ugly, *MethodsX*, vol. 10, 2023 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102111](https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102111). [Consulta: 28 de Junio, 2023].
- [26] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Decreto 90 - Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, 2001 [En Línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>. [Consulta: 10 de Julio, 2023].
- [27] S. H. Latessa, L. Hanley, W. Tao, Characteristics and practical treatment technologies of winery wastewater: A review for wastewater management at small wineries, *Journal of Environmental Management*, vol. 342, 2023 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1016/j.jenvman.2023.118343](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118343). [Consulta: 12 de Julio, 2023].
- [28] Ministerio de energía, Estrategia Nacional de Hidrógeno - Fuente energética para un planeta cero emisiones, 2020.
- [29] Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), Criterio de evaluación en el SEIA - Introducción a proyectos de hidrógeno verde, 2022.
- [30] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Informe de producción de vinos 2022, 2023 [En Línea]. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/rubros/vinos-y-alcoholes>. [Consulta 24 de Julio, 2023].
- [31] Boletín del vino, Enero 2022. 2022 [En Línea]. Disponible en: <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-del-vino-enero-2022>. [Consulta: 24 de Julio, 2023].
- [32] National Institute for Public Health and the Environment - Netherland, ReCiPe 2016 v1.1. A harmonized Life Cycle Impact Assessment method at midpoint and endpoint level, 2017 [En Línea]. Disponible en: https://pre-sustainability.com/legacy/download/Report_ReCiPe_2017.pdf. [Consulta: 08 de Junio, 2023].
- [33] A. López, Evaluación de impacto ambiental de nuevas tecnologías de tratamiento de aguas., Tesis de Master universitario en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos. Alcalá de Henares. Universidad de Alcalá y Universidad Rey Juan Carlos, 2022.
- [34] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischer, T. Nemecek, G. Rebitzer, M. Spielmann, The ecoinvent database: Overview and methodological framework, *international journal of life cycle assessment* 10, 2005 [En Línea]. Disponible en: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>. [Consulta: 27 de Septiembre, 2023].
- [35] A. Seebacher, M. Albiez, O. Parodi, A. Quint, S. Zimmer-Merkle, I. Walter, Cómo es posible alcanzar la sostenibilidad, 2023 [En Línea]. Disponible en: https://www.quartierzukunft.de/wp-content/uploads/2023/01/QZ_Leporello_SPA_1teAuflage_2023_Web.pdf. [Consulta: 27 de Junio, 2023].
- [36] F. Steiner, H. Lehn, A. Weiss, Sustainability assessment of urban water infrastructure systems with special focus on the urban water-energy nexus, 2018 [En Línea]. Disponible

- en: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133725736>. [Consulta: 13 de Junio, 2023].
- [37] Innovations for sustainable biomass utilisation in the Upper Rhine Region, rep. tec., Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), 2017. [Consulta: 08 de Junio, 2023].
- [38] K. Mosse, A. Patti, R. Smernik, E. Christen, T. Cavagnaro, Physicochemical and microbiological effects of long- and short-term winery wastewater application to soils, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 201-202, 2012 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.071](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.071). [Consulta: 07 de Agosto, 2023].
- [39] Z. Y. Zhang, B. Jin, Z. H. Bai, X. Y. Wang, Production of fungal biomass protein using microfungi from winery wastewater treatment, *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 9, 2008 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.047](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.047). [Consulta: 15 de Julio, 2023].
- [40] Z. Rončević, J. Grahovac, S. Dodić, D. Vučurović, J. Dodić, Utilisation of winery wastewater for xanthan production in stirred tank bioreactor: Bioprocess modelling and optimisation, *Food and Bioproducts Processing*, vol. 117, 2019 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.06.019](https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.06.019). [Consulta: 15 de Julio, 2023].
- [41] M. Escudero, Evaluation of an Anaerobic MBR as pretreatment for CBMem system for the production and recovery of hydrogen from winery wastewater, *Memoria de Ingeniería Civil*. Santiago. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2022.
- [42] M. Oliveira, A. Saraiva, M. Lambri, J. Rochard, R. Frago, E. Romanini, P. Hipólito, C. Ettore, E. Duarte, Chapter 11 - Water management toward regenerative wineries, en *Improving Sustainable Viticulture and Winemaking Practices* (J. M. Costa, S. Catarino, J. M. Escalona, P. Comuzzo, eds.), Academic Press, 2022 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85150-3.00021-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85150-3.00021-9). [Consulta: 29 de Junio, 2023].
- [43] R. Jalab, A. M. Awad, M. S. Nasser, J. Minier-Matar, S. Adham, S. J. Judd, An empirical determination of the whole-life cost of fo-based open-loop wastewater reclamation technologies, *Water Research*, vol. 163, 2019 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114879](https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114879). [Consulta: 12 de Julio, 2023].
- [44] S. Judd, Membrane technology costs and me, *Water Research*, vol. 122, 2017 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.027](https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.027). [Consulta: 12 de Julio, 2023].
- [45] Representante de Concha y Toro S.A., Planta de tratamiento de agua, Bodega Concha y Toro - Lontué, Entrevistado por J. Carrasco, Julio - 2023.
- [46] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Decreto 4 - Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas, 2009 [En Línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1007456>. [Consulta: 21 de Julio, 2023].
- [47] L. Flores, M. Garfí, R. Pena, J. García, Promotion of full-scale constructed wetlands in the wine sector: Comparison of greenhouse gas emissions with activated sludge systems, *Science of The Total Environment*, vol. 770, 2021 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145326](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145326). [Consulta: 21 de Julio, 2023].
- [48] C. Baresel, Y. Jingjing, B. Niclas, T. Kåre, K. Linda, W. Klara, Direct GHG emissions from a pilot scale MBR-process treating municipal wastewater, *Advances in Climate*

- Change Research, vol. 13, 2022 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.09.006](https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.09.006). [Consulta: 21 de Julio, 2023].
- [49] M.J. Kampschreur, H. Temmink, R. Kleerebezem, MS. Jetten , MC. van Loosdrecht ., Nitrous oxide emission during wastewater treatment., Water Res., 2009 [En Línea]. Disponible en: [10.1016/j.watres.2009.03.001](https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.001). [Consulta: 27 de Junio, 2023].
- [50] Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental, Expediente: DFZ-2023-1049-VII-NE, 2023 [En Línea]. Disponible en: <https://snifa.sma.gob.cl/Fiscalizacion/Ficha/1060312>. [Consulta: 04 de Julio, 2023].
- [51] M. Ashok, M. Kumar, 15 - Anaerobic membrane reactors for biohydrogen production, en Current Developments in Biotechnology and Bioengineering (H. H. Ngo, W. Guo, H. Y. Ng, G. Mannina, A. Pandey, eds.), Elsevier, 2020 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819852-0.00015-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819852-0.00015-4). [Consulta: 27 de Junio, 2023].
- [52] I. Martin, M. Pidou, A. Soares, S. Judd, B. Jefferson, Modelling the energy demands of aerobic and anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment, Environmental Technology, vol. 32, 2011 [En Línea]. Disponible en: [doi:10.1080/09593330.2011.565806](https://doi.org/10.1080/09593330.2011.565806). [Consulta: 05 de Julio, 2023].
- [53] A. Jiménez-Benítez, A. Ruiz-Martínez, J. Ferrer, J. Ribes, F. Rogalla, A. Robles, Life cycle costing of AnMBR technology for urban wastewater treatment: A case study based on a demo-scale AnMBR system, Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 11, no. 3, 2023 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110267](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110267). [Consulta: 21 de Julio, 2023].
- [54] K. Baamran, Q. Al-Naddaf, S. Lawson, A. Ali Rownaghi, F. Rezaei, Kinetic process assessment of H_2 purification over highly porous carbon sorbents under multicomponent feed conditions, Separation and Purification Technology, vol. 306, 2023 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122695](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122695). [Consulta: 25 de Julio, 2023].
- [55] W. Liemberger, M. Groß, M. Miltner, M. Harasek, Experimental analysis of membrane and pressure swing adsorption (PSA) for the hydrogen separation from natural gas, Journal of Cleaner Production, vol. 167, 2017 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.012](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.012). [Consulta: 26 de Julio, 2023].
- [56] L. Dehdari, I. Burgers, P. Xiao, K. G. Li, R. Singh, P. A. Webley, Purification of hydrogen from natural gas/hydrogen pipeline mixtures, Separation and Purification Technology, vol. 282, 2022 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120094](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120094). [Consulta: 26 de Julio, 2023].
- [57] Q. Huang, A. Malekian, M. Eić, Optimization of PSA process for producing enriched hydrogen from plasma reactor gas, Separation and Purification Technology, vol. 62, 2008 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.12.017](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.12.017). [Consulta: 26 de Julio, 2023].
- [58] Y. Haseli, Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, 2018 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.076](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.076). [Consulta: 10 de Julio, 2023].
- [59] Energía Abierta, Factores de emisión - SEN, 2023 [En Línea]. Disponible en: [http:](http://)

- [//energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/](https://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/). [Consulta: 07 de Septiembre, 2023].
- [60] Y. Law, G. E. Jacobsen, A. M. Smith, Z. Yuan, P. Lant, Fossil organic carbon in wastewater and its fate in treatment plants, *Water Research*, vol. 47, 2013 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.002](https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.06.002). [Consulta: 27 de Septiembre, 2023].
- [61] S. Cashman, J. Mosley, C. Ma, J. Garland, J. Cashdollar, D. Bless, Life cycle assessment and cost analysis of water and wastewater treatment options for sustainability: Influence of scale on membrane bioreactor systems, 2016.
- [62] Hangzhou Nuzhuo Technology Group Co., Ltd. , NUZHUO machine nitrogen generator automatic small nitrogen plant for fertliser PSA N2 generator, [En Línea]. Disponible en: <https://www.hznuzhuo.com/nuzhuo-machine-nitrogen-generator-automatic-small-nitrogen-plant-for-fertliser-psa-n2-generator-product/>. [Consulta: 26 de Septiembre, 2023].
- [63] GSA Co., Ltd. - Global Standard Air/Gas, N2 PSA System, [En Línea]. Disponible en: <https://www.gsadryer.com/gas-generation-technique/gas-equipment/n2-psa-system/>. [Consulta: 27 de Septiembre, 2023].
- [64] Fuxing Technology - Carbon Molecular Sieve Manufacturer, Producto - CMS 300, [En Línea]. Disponible en: <https://www.fxcms-tech.com/product/cms-300/>. [Consulta: 27 de Septiembre, 2023].
- [65] Sinopowe, Tanque de almacenamiento con válvula para el contenedor de hidrógeno, [En Línea]. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_hfsinopower/product_Hydrogen-Canister-9L-12L-20L-35MPa-Storage-Tank-with-Valve-for-Drones_ysriegsyyg.html. [Consulta: 26 de Septiembre, 2023].
- [66] L. N. Koscina, Hidrógeno verde y baterías de litio como alternativa de almacenamiento energético en plantas fotovoltaicas: Evaluación mediante análisis de ciclo de vida, Memoria de Ingeniería Civil Química. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2022.
- [67] L. Casas, A. Orjuela, W-R. Poganietz, Sustainability assessment of the valorization scheme of used cooking oils (UCOs): the case study of Bogotá, Colombia, *Biomass Conversion and Biorefiner*, 2023 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1007/s13399-023-03800-1](https://doi.org/10.1007/s13399-023-03800-1). [Consulta: 23 de Septiembre, 2023].
- [68] L. Das, 7 - Hydrogen-fueled internal combustion engines, en *Compendium of Hydrogen Energy* (F. Barbir, A. Basile, T. N. Veziroğlu, eds.), Woodhead Publishing Series in Energy, Oxford: Woodhead Publishing, 2016 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-363-8.00007-4](https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-363-8.00007-4). [Consulta: 10 de Julio, 2023].
- [69] S. Bellocchi, M. De Falco, M. Facchino, M. Manno, Hydrogen blending in Italian natural gas grid: Scenario analysis and LCA, *Journal of Cleaner Production*, 2023 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137809](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137809). [Consulta: 27 de Julio, 2023].
- [70] N. Metzger y X. Li, Technical and economic analysis of fuel cells for forklift applications, *ACS Omega*, 2022 [En Línea]. Disponible en: [doi:doi:10.1021/acsomega.1c07344](https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07344). [Consulta: 25 de Julio, 2023].

- [71] F. Cameli, A. Kourou, V. Rosa, E. Delikonstantis, V. Galvita, K. M. Van Geem, G. D. Stefanidis, Conceptual process design and technoeconomic analysis of an ammonia plant: Green h₂ and cryogenic air separation coupled with haber-bosch process, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024 [En Línea]. Disponible en: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.020](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.020). [Consulta: 03 de Agosto, 2023].
- [72] Pontificia Universidad Católica de Chile - Departament de Economía, Informe Final - Análisis del mercado del agua de riego en Chile: una revisión crítica a través del caso de la Región de Valparaíso. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias - Gobierno de Chile, 2010 [En Línea]. Disponible en: https://www.odepa.gob.cl/odepaweb/servicios-informacion/publica/Analisis_agua_riego_Valparaiso.pdf. [Consulta: 10 de Enero, 2024].
- [73] Escuela de Ingeniería - Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile tiene el costo de producción del hidrógeno verde más barato en el mundo, 2021 [En Línea]. Disponible en:
- [74] Indicadores diarios - unidad de fomento, Banco Central de Chile [En Línea]. Disponible en: <https://si3.bcentral.cl/indicadoressiete/secure/Serie.aspx?gcode=UF¶m=RA BmAFYAWQB3AGYAaQBuAEkALQAzADUAbgBNAGgAaAAkADUAVwBQAC4AbQBYADAARwBOAGUAYwBjACMAQQBaAHAARgBhAGcAUABTAGUAYwBsAEMAMQA0AE0AawBLAF8AdQBDACQASABzAG0AXwA2AHQAawBvAFcAZwBKAEwAegBzAF8AabgBMAHIAYgBDAC4ARQA3AFUAVwB4AFIAWQBhAEEAOABkAHkAZwAxAEEARAA=>. [Consulta: 10 de Enero, 2024].
- [75] Indicadores diarios - dolar norteamericano, Banco Central de Chile [En Línea]. Disponible en: https://si3.bcentral.cl/indicadoressiete/secure/Serie.aspx?gcode=PRE_TCO¶m=RABmAFYAWQB3AGYAaQBuAEkALQAzADUAbgBNAGgAaAAkADUAVwBQAC4AbQBYADAARwBOAGUAYwBjACMAQQBaAHAARgBhAGcAUABTAGUAdwA1ADQAMQA0AE0AawBLAF8AdQBDACQASABzAG0AXwA2AHQAawBvAFcAZwBKAEwAegBzAF8AabgBMAHIAYgBDAC4ARQA3AFUAVwB4AFIAWQBhAEEAOABkAHkAZwAxAEEARAA=. [Consulta: 10 de Enero, 2024].
- [76] CDP - Disclosure insight action, Cdp technical note: Conversion of fuel data to mwh, 2023 [En Línea]. Disponible en: https://cdn.cdp.net/cdp-production/cms/guidance_docs/pdfs/000/000/477/original/CDP-Conversion-of-fuel-data-to-MWh.pdf. [Consulta: 07 de Septiembre, 2023].

Anexo A

Material complementario

En estos capítulos de la sección de Anexos se encuentran con mayor detalle la memoria de cálculo, selección de factores de emisión y resultados obtenidos.

Además, en el siguiente [link](#), es posible encontrar la hoja de cálculos empleada para las estimaciones realizadas.

Anexo B

Balances de masa

B.1. Procesos anaeróbicos

El balance de masa para caso del AnMBR tiene el sentido de corroborar las estimaciones del software Simba#. En la fig. B.1 se puede apreciar la simulación realizada por M. Escudero [41] y los valores característicos de cada flujo, los que se resumen en la tabla B.1 para los flujos sólidos y líquidos, mientras que en la tabla B.2 para los gases. Se debe tener en consideración que ciertos decimales pueden variar entre las tablas y la fig. B.1, dada la resolución numérica del programa y la cantidad de iteraciones realizadas (la fig. no fue reportada en la misma ocasión en que se extrajeron los valores).

Tabla B.1: Caracterización de los flujos sólidos y líquidos del reactor AnMBR.

Caracterización de flujos para el AnMBR			
Nombre	Flujo [m ³ /d]	COD [mg/L]	TKN [mg/L]
Afluente líquido	1.000	8.240	245
Efluente líquido	971	6.326	192,3
Lodo	28,5	54.930	2.058

Tabla B.2: Caracterización de los gases emitidos por el reactor AnMBR.

Caracterización del flujo gaseoso - AnMBR		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo gaseoso	m^3/d	1.372
Fracción molar H_2	%	55,80
Conc. H_2 en F. Gaseoso	mol/m^3	24,89
Conc. CO_2 en F. Gaseoso	mol/m^3	18,76
Conc. CH_4 en F. Gaseoso	mol/m^3	3,41E-04
F. molar H_2	mol/d	34.149,08
F. másico H_2	kg/año	17.825,82

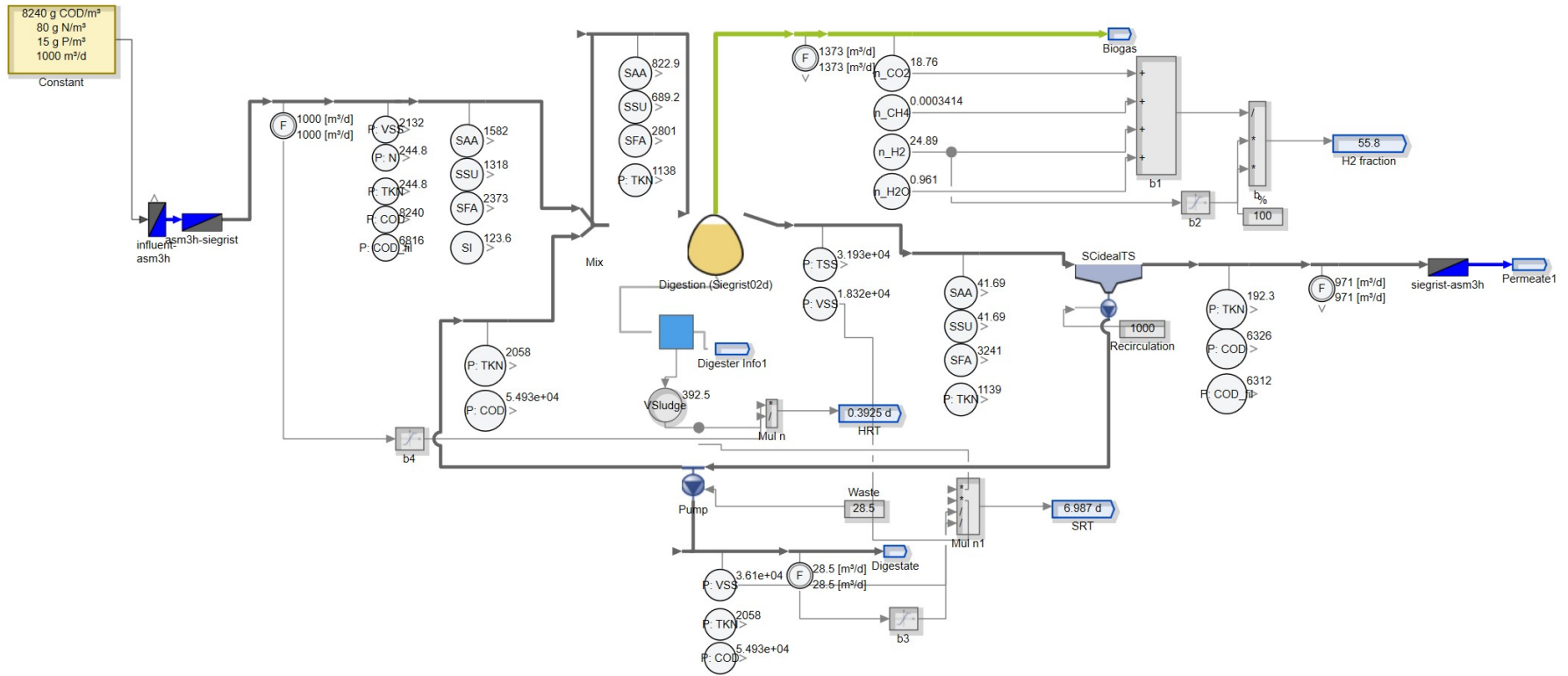
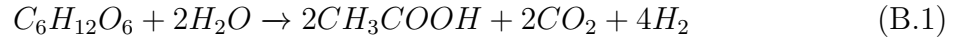


Figura B.1: Simulación en Simba# del diagrama de flujo para el reactor AnMBR (escenario #2 y #3). Programa realizado en el trabajo de M. Escudero [41].

En primer lugar, se tiene que la principal reacción descrita por bibliografía para este tipo de reactores en donde el objetivo es la producción de H_2 , corresponde a la fermentación oscura, reacción B.1.

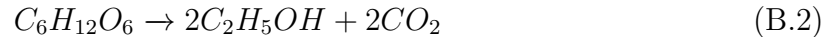
Fermentación oscura



Como es posible notar, se tiene que la estequiometría del CO_2 al H_2 , es el tipo 1:2, sin embargo, en la tabla B.2 se aprecia una relación del tipo 18,76 : 24,89. Esto solo puede ser posible si es que existe otra reacción que tenga como producto el CO_2 e H_2 en otra relación estequiométrica, o donde se produzca CO_2 y no H_2 .

Dada la consideración anterior, es que se plantea la reacción B.2, de manera de justificar el exceso de CO_2 , pero teniendo en cuenta la condición anóxica del proceso.

Fermentación alcohólica



Si bien en la tabla B.2 también se expone la presencia de CH_4 , este se considera despreciable por lo que no se incluirá en el balance. Mientras que para el caso del vapor de agua que se aprecia en la fig. B.1, este puede deberse a una reacción o por evaporación, por lo que tampoco se le hará seguimiento, además de ser despreciable.

Considerando todo lo anterior, se procede a plantear los balances de masa, utilizando como nomenclatura de flujo la siguiente:

- F_0 Flujo volumétrico del gas emitido.
- F_1 Flujo volumétrico del afluente líquido (flujo de entrada al sistema).
- F_2 Flujo volumétrico del efluente líquido (agua tratada).
- F_3 Flujo volumétrico del lodo (sólidos hacia el digestor).

BM global: TKN

$$F_1 \cdot C_1^{TKN} = F_2 \cdot C_2^{TKN} + F_3 \cdot C_3^{TKN} \quad (B.3)$$

No se le consideran reacciones asociadas, dado que no se emiten gases nitrogenados, ni se reportan procesos de nitrificación o desnitrificación. Aún así, dado que el TKN incluye a los compuestos orgánicos nitrogenados y al amoníaco, el balance debería ser correcto.

Reemplazando por lo valores correspondiente,

$$1.000 \frac{m^3}{d} \cdot 245 \frac{g}{m^3} \neq 971 \frac{m^3}{d} \cdot 192,3 \frac{g}{m^3} + 28,5 \frac{m^3}{d} \cdot 2.058 \frac{g}{m^3} \quad (B.4)$$

$$245.000 \frac{g}{d} \neq 186.723, 3 \frac{g}{d} + 58.653 \frac{g}{d} \quad (B.5)$$

$$245.000 \frac{g}{d} \neq 245.376, 3 \frac{g}{d} \quad (B.6)$$

Como es posible apreciar, el balance al TKN no es consistente, pero se explica por acumulación del error numérico y es del orden del 0,2%, por lo que se considera insignificante.

BM global: COD

$$F_1 \cdot C_1^{COD} = F_2 \cdot C_2^{COD} + F_3 \cdot C_3^{COD} + r_{rxn}^{COD} \quad (B.7)$$

Para el caso del balance a la COD, se plantea el término r_{rxn} puesto que en la línea de gases existe emisión de CO_2 , compuesto producido por la oxidación de la COD. La estrategia en este caso es despejar r_{rxn} , de manera de posteriormente realizar el balance incluyendo la línea de gases.

Reemplazando por lo valores correspondiente,

$$1.000 \frac{m^3}{d} \cdot 8.240 \frac{g}{m^3} = 971 \frac{m^3}{d} \cdot 6.326 \frac{g}{m^3} + 28,5 \frac{m^3}{d} \cdot 54.930 \frac{g}{m^3} + r_{rxn}^{COD} \frac{g}{d} \quad (B.8)$$

Despejando r_{rxn} ,

$$r_{rxn}^{COD} = 8.240.000 \frac{g}{d} - (6.142.546 \frac{g}{d} + 1.565.505 \frac{g}{d}) \quad (B.9)$$

$$r_{rxn}^{COD} = 531.949 \frac{g}{d} \quad (B.10)$$

Entonces, para que el balance a la COD sea correcto, se debe justificar la emisión de gases equivalentes a su reducción.

Reacciones y su estequiometría

Se partirá analizando la fermentación oscura.

En primer lugar, se tiene que es la única reacción planteada que explica la producción de H_2 , por lo que toda su producción debe estar justificada con la estequiometría planteada en la reacción B.1.

Si la razón $CO_2 : H_2$ es 1:2. Entonces, los moles de CO_2 generados por la fermentación

oscura serían equivalente a:

$$\dot{n}_{ferm. oscura}^{CO_2} = \frac{1}{2} \cdot \dot{n}_{ferm. oscura}^{H_2} \frac{mol}{d} \quad (B.11)$$

$$\dot{n}_{ferm. oscura}^{CO_2} = \frac{1}{2} \cdot 24,89 \frac{mol}{m^3} \cdot 1.372 \frac{m^3}{d} \quad (B.12)$$

$$\dot{n}_{ferm. oscura}^{CO_2} = 17.074,54 \frac{mol}{d} \quad (B.13)$$

Luego, es posible despejar la cantidad de moles de CO_2 generados por la fermentación alcohólica.

$$\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{CO_2} = F_0 \cdot C_0^{CO_2} - \dot{n}_{ferm. oscura}^{CO_2} \quad (B.14)$$

Reemplazado,

$$\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{CO_2} = 1.372 \frac{m^3}{d} \cdot 18,76 \frac{mol}{m^3} - 17.074,54 \frac{mol}{d} \quad (B.15)$$

$$\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{CO_2} = 8.664,18 \frac{mol}{d} \quad (B.16)$$

Ahora, se debe corroborar si es que la producción de CO_2 en las cantidades y reacciones antes expuestas están en concordancia con la disminución de COD (r_{rxn}).

Para el caso de la fermentación oscura, se tiene que por cada 1 mol de glucosa ($C_6H_{12}O_6$), generan 2 moles de ácido acético (CH_3COOH) y 2 moles de dióxido de carbono (CO_2).

Entonces, si $\dot{n}_{ferm. oscura}^{CO_2} = 17.074,54 \text{ mol/d}$, se tiene lo siguiente.

$$\dot{n}_{ferm. oscura}^{C_6H_{12}O_6} = \frac{-1}{2} \cdot \dot{n}_{ferm. oscura}^{CO_2} \frac{mol}{d} \quad (B.17)$$

$$\dot{n}_{ferm. oscura}^{C_6H_{12}O_6} = \frac{-1}{2} \cdot 17.074,54 \frac{mol}{d} \quad (B.18)$$

$$\dot{n}_{ferm. oscura}^{C_6H_{12}O_6} = -8.537,27 \frac{mol}{d} \quad (B.19)$$

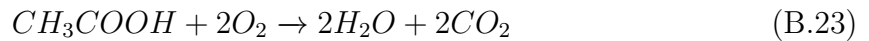
El consumo de glucosa por fermentación oscura es de $-8.537,27 \text{ mol/d}$. Pero a su vez, se está produciendo ácido acético en razón 1:1 con el dióxido de carbono.

$$\dot{n}_{ferm. oscura}^{CH_3COOH} = \dot{n}_{ferm. oscura}^{CO_2} \frac{mol}{d} \quad (B.20)$$

$$\dot{n}_{ferm. oscura}^{CH_3COOH} = 17.074,54 \frac{mol}{d} \quad (B.21)$$

La transformación de la glucosa a ácido acético tiene asociada una variación en la COD.

En primer lugar, recordando la definición de la COD, se tiene que corresponde a los gramos de O_2 por gramo de sustancia, requeridos para oxidarla completamente. Para la estimación de la COD de cada molécula, se debe plantear la reacción de oxidación (reacciones B.22 y B.23).



Para la glucosa, la COD estaría dada por,

$$COD^{glucosa} = \frac{mol_{O_2} \cdot PM_{O_2}}{mol_{glucosa} \cdot PM_{glucosa}} \quad (B.24)$$

$$COD^{glucosa} = \frac{632}{1 \cdot 180} \frac{g_{O_2}}{g_{glucosa}} \quad (B.25)$$

$$COD^{glucosa} = 1,067 \frac{g_{O_2}}{g_{glucosa}} \quad (B.26)$$

Análogo para el ácido acético.

$$COD^{ác. acético} = \frac{mol_{O_2} \cdot PM_{O_2}}{mol_{ác. acético} \cdot PM_{ác. acético}} \quad (B.27)$$

$$COD^{ác. acético} = \frac{232}{1 \cdot 60} \frac{g_{O_2}}{g_{ác. acético}} \quad (B.28)$$

$$COD^{ác. acético} = 1,067 \frac{g_{O_2}}{g_{ác. acético}} \quad (B.29)$$

Con el procedimiento anterior, se obtiene que la COD de la glucosa y el ácido acético es de igual valor. No obstante, se debe tener en cuenta la estequiometría de las reacciones planteadas para verificar si existe una reducción en la demanda de oxígeno.

Para estimar la variación de COD, se propone el cálculo de requerimiento de oxígeno para la glucosa que reaccionó y el ácido acético que se produjo.

$$COD_{ferm. oscura}^{glucosa} = 1,067 \frac{g_{O_2}}{g_{glucosa}} \cdot 180 \frac{g_{glucosa}}{mol_{glucosa}} \cdot 8.537,27 \frac{mol}{d} \quad (B.30)$$

$$COD_{ferm. oscura}^{glucosa} = 1.639.668,08 \frac{gO_2}{d} \quad (B.31)$$

Análogo para el ácido acético.

$$COD_{ferm. oscura}^{ác. acético} = 1,067 \frac{gO_2}{g_{ác. acético}} \cdot 60 \frac{g_{ác. acético}}{mol_{ác. acético}} \cdot 17.074,54 \frac{mol}{d} \quad (B.32)$$

$$COD_{ferm. oscura}^{ác. acético} = 1.093.112,05 \frac{gO_2}{d} \quad (B.33)$$

Como es posible notar, efectivamente existe una reducción de COD al llevarse a cabo la reacción de fermentación oscura ($\Delta_{ferm. oscura}^{COD}$).

$$\Delta_{ferm. oscura}^{COD} = 1.093.112,05 \frac{gO_2}{d} - 1.639.668,08 \frac{gO_2}{d} \quad (B.34)$$

$$\Delta_{ferm. oscura}^{COD} = -546.556,03 \frac{gO_2}{d} \quad (B.35)$$

El mismo procedimiento se debe llevar a cabo para la fermentación alcohólica. En primer lugar, se plantea que la estequiometría expone que por cada 1 mol de glucosa, se producen 2 moles de etanol y 2 moles de dióxido de carbono.

Entonces, recordando que anteriormente se calcularon los moles de CO_2 producidos en la fermentación alcohólica ($\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{CO_2} = 8.664,18 \text{ mol/d}$), se pueden plantear las siguientes relaciones.

$$\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{C_6H_{12}O_6} = \frac{-1}{2} \cdot \dot{n}_{ferm. alcohólica}^{CO_2} \frac{mol}{d} \quad (B.36)$$

$$\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{C_6H_{12}O_6} = \frac{-1}{2} \cdot 8.664,18 \frac{mol}{d} \quad (B.37)$$

$$\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{C_6H_{12}O_6} = -4.332,09 \frac{mol}{d} \quad (B.38)$$

El consumo de glucosa por fermentación alcohólica es de $-4.332,09 \text{ mol/d}$. Pero a su vez, se está produciendo etanol (C_2H_5OH) en razón 1:1 con el dióxido de carbono.

$$\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{C_2H_5OH} = \dot{n}_{ferm. alcohólica}^{CO_2} \frac{mol}{d} \quad (B.39)$$

$$\dot{n}_{ferm. alcohólica}^{C_2H_5OH} = 8.664,18 \frac{mol}{d} \quad (B.40)$$

La transformación de la glucosa a etanol tiene asociada una variación en la COD. Para

estimar la COD del etanol se plantea la reacción B.41.



Para el etanol, la COD estaría dada por,

$$COD^{etanol} = \frac{mol_{O_2} \cdot PM_{O_2}}{mol_{etanol} \cdot PM_{etanol}} \quad (B.42)$$

$$COD^{etanol} = \frac{332}{1 \cdot 46} \frac{g_{O_2}}{g_{etanol}} \quad (B.43)$$

$$COD^{etanol} = 2,09 \frac{g_{O_2}}{g_{etanol}} \quad (B.44)$$

Para estimar la variación de COD, se propone el cálculo de requerimiento de oxígeno para la glucosa que reaccionó y el etanol que se produjo.

$$COD_{ferm. alcoholica}^{glucosa} = 1,067 \frac{g_{O_2}}{g_{glucosa}} \cdot 180 \frac{g_{glucosa}}{mol_{glucosa}} \cdot 4.332,09 \frac{mol}{d} \quad (B.45)$$

$$COD_{ferm. alcoholica}^{glucosa} = 832.021,21 \frac{g_{O_2}}{d} \quad (B.46)$$

Análogo para el etanol.

$$COD_{ferm. alcoholica}^{etanol} = 2,09 \frac{g_{O_2}}{g_{etanol}} \cdot 46 \frac{g_{etanol}}{mol_{etanol}} \cdot 8.664,18 \frac{mol}{d} \quad (B.47)$$

$$COD_{ferm. alcoholica}^{etanol} = 832.974,27 \frac{g_{O_2}}{d} \quad (B.48)$$

Como es posible notar, existe una aumento de COD al llevarse a cabo la reacción de fermentación alcohólica ($\Delta_{ferm. alcoholica}^{COD}$). Sin embargo, el alza es poco significativa al ser del orden del 0,1 %.

$$\Delta_{ferm. alcoholica}^{COD} = 832.974,27 \frac{g_{O_2}}{d} - 832.021,21 \frac{g_{O_2}}{d} \quad (B.49)$$

$$\Delta_{ferm. alcoholica}^{COD} = 953,06 \frac{g_{O_2}}{d} \quad (B.50)$$

Finalmente, al considerar las variaciones de COD producidas por ambas reacciones, se tiene que existe una reducción neta ($\Delta_{F.O. + F.A}^{COD}$).

$$\Delta_{F.O. + F.A}^{COD} = \Delta_{ferm. oscura}^{COD} \frac{g_{O_2}}{d} + \Delta_{ferm. alcoholica}^{COD} \frac{g_{O_2}}{d} \quad (B.51)$$

$$\Delta_{F.O. + F.A}^{COD} = -546.556,03 \frac{g_{O_2}}{d} + 953,06 \frac{g_{O_2}}{d} \quad (B.52)$$

$$\Delta_{F.O. + F.A}^{COD} = -545.602,97 \frac{gO_2}{d} \quad (B.53)$$

Del balance global al COD, se determinó un $r_{rxn} = 531.949$ g/d, lo que significaba que debía justificar esta variación con la emisión de gases. Sin embargo, al considerar las reacciones de fermentación oscura y alcohólica, se estima una variación de $\Delta_{F.O. + F.A}^{COD} = 545.602,97$ g/d.

Se debe notar, que la diferencia numérica entre r_{rxn}^{COD} y $\Delta_{F.O. + F.A}^{COD}$ es del orden del 3%, por lo que puede ser justificado por acumulación de errores numéricos. Otra explicación plausible, es la existencia de otra reacción que esté probocando un leve aumento en la COD, tal como el efecto de la fermentación alcohólica.

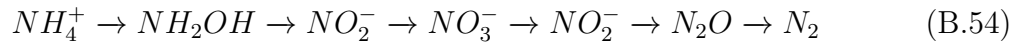
Por lo anterior, se validan lo resultados obtenidos de la simulación en Simba# de M. Escudero [41].

B.2. Procesos aeróbicos

Los reactores aeróbicos considerados corresponden al reactor de lodos activados y el MBR.

En términos de balances de masa, tanto el N_2O , como el CO_2 son gases relevantes. Las dinámicas de reacción más prominentes encontradas por bibliografía son los procesos de nitrificación/desnitrificación y metabolización aeróbica (reacciones B.54 y B.55).

Nitrificación / Desnitrificación



Metabolización aeróbica



Se debe tener en cuenta al momento de reemplazar los valores correspondientes, que en términos de balances de masa los escenarios #0 y #1 no presentan diferencias si es que se hace la homologación de los flujos de salida del sedimentador con los flujos de salida del MBR. Además, se debe recordar que el MBR presenta diferentes concentraciones de entradas dependiendo del escenario analizado, mientras que para los escenarios #0 y #1 la entrada corresponde COD_{in} y TKN_{in} (tabla B.3), para los escenarios #2 y #3 la entrada corresponde $COD_{out AnMBR}$ y $TKN_{out AnMBR}$ (tabla B.4).

Tabla B.3: Caracterización de los flujos globales de entrada y salida.

Caracterización de flujos		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo líquido entrada	m^3/d	1.000
Flujo líquido salida	m^3/d	971
COD entrada	g/m^3	8.240
TKN entrada	g/m^3	245
COD salida	g/m^3	70,00
TKN salida	g/m^3	50

Tabla B.4: Caracterización de los flujos de salida del reactor AnMBR. Válido para los escenarios #2 y #3 [41].

Caracterización de flujos		
Parámetro	Unidad	Valor
Flujo líquido salida	m^3/d	971
COD salida AnMBR	g/m^3	6.326
TKN salida AnMBR	g/m^3	192

Se utilizará la misma nomenclatura de flujos que en la sección anterior.

- F_0 Flujo volumétrico del gas emitido.
- F_1 Flujo volumétrico del afluente líquido (flujo de entrada al sistema).
- F_2 Flujo volumétrico del efluente líquido (agua tratada - salida del sedimentador o del MBR).
- F_3 Flujo volumétrico del lodo (sólidos hacia el digestor).

BM global: TKN

Dado que existe una salida de gases nitrogenados, entonces debe existir el término de consumo (r_{rxn}^{TKN}).

$$F_1 \cdot C_1^{TKN} = F_2 \cdot C_2^{TKN} + F_3 \cdot C_3^{TKN} + r_{rxn}^{TKN} \quad (B.56)$$

Los flujos y calidades de aguas de F_1 y F_2 fueron fijadas. Respecto del término de consumo, se tiene factores para la estimación de óxido de nitrógeno (N_2O) reportados por el IPCC ($FE_{N_2O} = 0,016 \text{ kg } N_2O/\text{kg N}$), pero es necesario conocer la cantidad de nitrógeno que reaccionó. A la vez, se tiene que el flujo volumétrico del lodo también fue fijado por criterio de diseño (F_3), sin embargo, la calidad en términos de TKN no

podría ser la misma en todos los escenarios, si se considera que los procesos anaeróbicos no liberan gases nitrogenados, mientras que los procesos aeróbicos si lo hacen, además del requerimiento de que el agua tratada cumpla la normativa respecto del TKN.

Lo anterior, implica que la calidad del lodo producido en los escenarios #0 y #1, es diferentes que para los escenarios #2 y #3, entonces para el primer par, el lodo es más pobre en TKN, que para el segundo par, en donde los lodos del proceso anaeróbicos son mezclados con los del aeróbico.

Lo anterior podría alterar la diversidad microbiana, generando variaciones en el funcionamiento del digester y/o centrífuga, sin embargo, frente a la imposibilidad de sensibilizar la operación *downstream*, es que se asumió que los cambios en términos de calidad no afectarían a los procesos fuera del límite de batería del estudio, o en caso de hacerlo, las modificaciones no serán significativas en emisiones, dado que el tratamiento secundario es el de mayor relevancia.

Reemplazando para el proceso aeróbico del escenario #0 y #1 (caso A),

$$r_{rxn\ Caso\ A}^{TKN} = 1.000 \frac{m^3}{d} \cdot 245 \frac{g}{m^3} - 971 \frac{m^3}{d} \cdot 50 \frac{g}{m^3} \quad (B.57)$$

$$r_{rxn\ Caso\ A}^{TKN} = 245.000 \frac{g}{d} - 48.550 \frac{g}{d} \quad (B.58)$$

$$r_{rxn\ Caso\ A}^{TKN} = 196.450 \frac{g}{d} \quad (B.59)$$

Reemplazando para el proceso aeróbico del escenario #2 y #3 (caso B),

$$r_{rxn\ Caso\ B}^{TKN} = 971 \frac{m^3}{d} \cdot 192 \frac{g}{m^3} - 971 \frac{m^3}{d} \cdot 50 \frac{g}{m^3} \quad (B.60)$$

$$r_{rxn\ Caso\ B}^{TKN} = 186.432 \frac{g}{d} - 48.550 \frac{g}{d} \quad (B.61)$$

$$r_{rxn\ Caso\ B}^{TKN} = 137.882 \frac{g}{d} \quad (B.62)$$

Conociendo r_{rxn}^{TKN} para cada caso, entonces es posible estimar las emisiones de N_2O , utilizando la ecuación B.63.

$$Emisión^{N_2O} = F_0 \cdot C_0^{N_2O} = FE_{IPCC}^{N_2O} \cdot r_{rxn}^{TKN} \quad (B.63)$$

Reemplazando para el caso A.

$$Emisión_{Caso\ A}^{N_2O} = 0,016 \frac{kgN_2O}{kgN} \cdot 196,45 \frac{kgTKN}{d} \quad (B.64)$$

$$Emisión_{Caso A}^{N_2O} = 3,14 \frac{kgN_2O}{d} \quad (B.65)$$

Entonces, cada escenario del caso A emite 3,14 kgN_2O/d .

Análogo para el caso B.

$$Emisión_{Caso B}^{N_2O} = 0,016 \frac{kgN_2O}{kgN} \cdot 137,882 \frac{kgTKN}{d} \quad (B.66)$$

$$Emisión_{Caso B}^{N_2O} = 2,21 \frac{kgN_2O}{d} \quad (B.67)$$

Entonces, cada reactor aeróbico de los escenarios del caso B emite 2,21 kgN_2O/d .

BM global: COD

$$F_1 \cdot C_1^{COD} = F_2 \cdot C_2^{COD} + F_3 \cdot C_3^{COD} + r_{rxn}^{COD} \quad (B.68)$$

$$F_1 \cdot C_1^{COD} - F_2 \cdot C_2^{COD} = F_3 \cdot C_3^{COD} + r_{rxn}^{COD} \quad (B.69)$$

Para el caso del balance a la COD, se plantea el término r_{rxn} puesto que en la línea de gases existe emisión de CO_2 , compuesto producido por la oxidación de la COD. Esto queda en evidencia dada la reacción B.55.

Dado que no se cuenta con datos respecto de la calidad de los lodos en procesos aeróbicos, pero se fijó el flujo volumétrico F_3 . Entonces, es necesario establecer un criterio de diseño para relacionar la COD del lodo con la emisión de CO_2 (factor α).

El criterio establecido fue el expuesto en las ecuaciones a continuación. Este se justifica debido a la alta capacidad digestiva de los sistemas aeróbicos.

$$F_3 \cdot C_3^{COD} = \alpha \cdot x \quad (B.70)$$

$$r_{rxn}^{COD} = (1 - \alpha) \cdot x \quad (B.71)$$

$$F_3 \cdot C_3^{COD} = 0,2 \cdot x \quad (B.72)$$

$$r_{rxn}^{COD} = 0,8 \cdot x \quad (B.73)$$

Entonces, la ecuación queda como,

$$x = F_1 \cdot C_1^{COD} - F_2 \cdot C_2^{COD} \quad (B.74)$$

La estrategia en este caso es despejar x, para posteriormente conocer r_{rxn} .

Reemplazando para el caso A.

$$x_{Caso A} = 1.000 \frac{m^3}{d} \cdot 8.240 \frac{g}{m^3} - 971 \frac{m^3}{d} \cdot 70 \frac{g}{m^3} \quad (B.75)$$

$$x_{Caso A} = 8.240.000 \frac{g}{d} - 67.970 \frac{g}{d} \quad (B.76)$$

$$x_{Caso A} = 8.172.030 \frac{g}{d} \quad (B.77)$$

Ahora, dado que se conoce x, se tiene que

$$F_{3, Caso A} \cdot C_{3, Caso A}^{COD} = 0,2 \cdot 8.172.030 \frac{g}{d} \quad (B.78)$$

$$r_{rxn, Caso A}^{COD} = 0,8 \cdot 8.172.030 \frac{g}{d} \quad (B.79)$$

$$F_{3, Caso A} \cdot C_{3, Caso A}^{COD} = 1.634.406 \frac{g}{d} \quad (B.80)$$

$$r_{rxn, Caso A}^{COD} = 6.537.624 \frac{g}{d} \quad (B.81)$$

Puesto que se obtuvo el valor de $r_{rxn, Caso A}^{COD}$ y se estableció cual es la principal reacción que se lleva a cabo (reacción B.55), es posible estimar la cantidad de CO_2 emitido.

El mismo procedimiento anterior se realiza para el caso B.

$$x_{Caso B} = 971 \frac{m^3}{d} \cdot 6.326 \frac{g}{m^3} - 971 \frac{m^3}{d} \cdot 70 \frac{g}{m^3} \quad (B.82)$$

$$x_{Caso B} = 6.142.546 \frac{g}{d} - 67.970 \frac{g}{d} \quad (B.83)$$

$$x_{Caso B} = 6.074.576 \frac{g}{d} \quad (B.84)$$

Ahora, dado que se conoce x, se tiene que

$$F_{3, Caso B} \cdot C_{3, Caso B}^{COD} = 0,2 \cdot 6.074.576 \frac{g}{d} \quad (B.85)$$

$$r_{rxn, Caso B}^{COD} = 0,8 \cdot 6.074.576 \frac{g}{d} \quad (B.86)$$

$$F_{3, Caso B} \cdot C_{3, Caso B}^{COD} = 1.214.915,2 \frac{g}{d} \quad (B.87)$$

$$r_{rxn, Caso B}^{COD} = 4.859.660,8 \frac{g}{d} \quad (B.88)$$

Se procede a estimar la cantidad de CO_2 emitido.

Reacciones y su estequiometría

En primer lugar, se tiene que la metabolización aeróbica (reacción B.55) no genera productos con oxidación intermedia, por lo tanto, la reducción de COD se debe a la descomposición total de la glucosa, esto queda expuesto en la ecuación B.89, en donde se prefirió reportar la unidades para una mejor comprensión.

$$\dot{n}_{met. aerób.}^{glucosa} = \frac{-r_{rxn}^{COD} \frac{gO_2}{d}}{COD^{glucosa} \frac{gO_2}{g_{glucosa}} \cdot PM_{glucosa} \frac{g_{glucosa}}{mol_{glucosa}}} \quad (B.89)$$

Por otro lado, se tiene que la razón $CO_2 : C_6H_{12}O_6$ es 6 : 1. Entonces, los moles de CO_2 generados por la metabolización aeróbica serían equivalente a:

$$\dot{n}_{met. aerób.}^{CO_2} = -6 \cdot \dot{n}_{met. aerób.}^{glucosa} \quad (B.90)$$

Al sustituir la descomposición de glucosa en la ecuación anterior, se obtendría la tasa de producción de CO_2 en mol/d. Recordar que el valor de $COD^{glucosa}$ fue demostrado en la sección anterior.

$$\dot{n}_{met. aerób.}^{CO_2} = 6 \cdot \frac{r_{rxn}^{COD} \frac{gO_2}{d}}{COD^{glucosa} \frac{gO_2}{g_{glucosa}} \cdot PM_{glucosa} \frac{g_{glucosa}}{mol_{glucosa}}} \quad (B.91)$$

Reemplazando para los escenarios del caso A.

$$\dot{n}_{met. aerób.}^{CO_2} \text{ Caso A} = 6 \cdot \frac{6.537.624 \frac{gO_2}{d}}{1,067 \frac{gO_2}{g_{glucosa}} \cdot 180 \frac{g_{glucosa}}{mol_{glucosa}}} \quad (B.92)$$

$$\dot{n}_{met. aerób.}^{CO_2} \text{ Caso A} = 204.236,93 \frac{mol_{CO_2}}{d} \quad (B.93)$$

Entonces, cada reactor aeróbico presente en los escenarios del caso A, emiten diariamente 204.236,93 [mol/d] de CO_2 , lo que es equivalente a 8.986,42 [kg CO_2 /d].

Análogo para el caso B.

$$\dot{n}_{met. aerób.}^{CO_2} \text{ Caso B} = 6 \cdot \frac{4.859.660,8 \frac{gO_2}{d}}{1,067 \frac{gO_2}{g_{glucosa}} \cdot 180 \frac{g_{glucosa}}{mol_{glucosa}}} \quad (B.94)$$

$$\dot{n}_{met. aerób.}^{CO_2} \text{ Caso B} = 151.816,96 \frac{mol_{CO_2}}{d} \quad (B.95)$$

Entonces, cada reactor aeróbico presente en los escenarios del caso B, emiten diariamente 151.816,96 [mol/d] de CO_2 , lo que es equivalente a 6.679,95 [kg CO_2 /d].

B.3. Comentarios

Luego de planteados los balances de masa, con sus respectivos supuesto, se obtuvo la caracterización de las emisiones gaseosas relevantes, además de la verificación para el caso de la simulación del AnMBR.

Una discusión que es posible plantear, corresponde a la no contabilización del CO_2 en los inventarios, según las directrices del IPCC [20].

En modo resumen se presenta la tabla B.5, con los valores obtenidos en este Anexo.

Tabla B.5: Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. Valor de $\alpha_{Caso A} = \alpha_{Caso B} = 0,2$

Producción de CO_2 biogénico		
Escenario	Emisiones CO_2 [kg CO_2 /d]	Emisiones CO_2 [ton CO_2 /año]
#0 y #1	8.986,42	2.345,46
#2 y #3	7.812,45	2.039,05

Sin embargo, para la estimación CO_2 biogénico se utilizó un factor definido por criterio, de manera de establecer la fracción másica de COD que fue alimentada y no liberada en el agua tratada, que se dirige a los lodos (α), y la que reacciona para generar CO_2 ($1-\alpha$).

En la tabla B.5 se observan los resultados al aplicar el mismo factor para los escenarios de los Casos A y B, 20% de la COD se dirige a los lodos ($\alpha = 0,2$) y 80% de la COD reacciona. Al establecer este criterio, se obtiene que la calidad de los lodos no es la misma en términos de COD, dado que el lodo del AnMBR es rico en COD.

Mientras el Caso A presenta lodos tales que,

$$F_{3, Caso A} \cdot C_{3, Caso A}^{COD} = 1.634.406 \frac{g}{d} \quad (B.96)$$

Los lodos del Caso B estarían dados por

$$F_{3, AnMBR} \cdot C_{3, AnMBR}^{COD} + F_{3, Caso B} \cdot C_{3, Caso B}^{COD} = 28,5 \frac{m^3}{d} \cdot 54.930 \frac{g}{m^3} + 1.214.915 \frac{g}{d} \quad (B.97)$$

$$F_{3, AnMBR} \cdot C_{3, AnMBR}^{COD} + F_{3, Caso B} \cdot C_{3, Caso B}^{COD} = 2.780.420 \frac{g}{d} \quad (B.98)$$

Considerando esta diferencia, la línea de lodos debiese estar incluida dentro de los límites del sistema. No obstante, la información es limitada y no es posible realizar la sensibilidad a los equipos *downstream*.

Por otro lado, la diferencia en las calidades de lodos solo se deben a las estimaciones de CO_2 biogénico. Es decir, las estimaciones del LCA operacional (sección 6) no se verían afectadas.

Entonces, se debe discutir si es correcto matener las estimaciones considerando que los lodos presentan diferentes calidades, o si es preferible establecer diferentes criterios de distribución de la COD (reacciona versus lodo), dependiendo del caso.

Si se estable $\alpha_{Caso A} = 0,34$ y $\alpha_{Caso B} = 0,2$, la diferencia de los lodos en términos de COD sería menor al 1% másico. Mientras que la producción de CO_2 sería la que es expone en la tabla B.6.

Tabla B.6: Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. Valor de $\alpha_{Caso A} = 0,34$ y $\alpha_{Caso B} = 0,2$

Producción de CO_2 biogénico		
Escenario	Emisiones CO_2 [kg CO_2 /d]	Emisiones CO_2 [ton CO_2 /año]
#0 y #1	7.414,8	1.935,26
#2 y #3	7.812,45	2.039,05

El valor diferenciado para α podría explicarse considerando que en los escenarios del Caso B el proceso aeróbico se encuentra como segundo tratamiento biológico, en una mezcla más líquida (menor presencia de sólidos) que la inicial puesto que ya pasó por la membrana del AnMBR, entonces, la mezcla es más reactiva debido a la dispersión de moléculas y células y más probable la descomposición, por eso se estableció un α menor que cuando es reactor aeróbico es el único tratamiento biológico.

Anexo C

LCA operacional - Memoria de cálculo

C.1. Emisiones Directas

Al estimar de las emisiones directas, generadas por cada uno de los reactores anualmente, se debe tener en cuenta las unidad del factor de emisión reportado, de manera de saber cuál es el compuesto, cuya concentración se debe conocer a la entrada y salida de la operación.

En el caso del reactor de lodos activados, el IPCC indica que el GEI a cuantificar corresponde al N_2O , y que su emisión está asociada a la presencia de nitrógeno (TKN).

El FE utilizado fue: 0,016 [kg N_2O /kgN].

Entonces, utilizando la ecuación C.1 para las emisiones anuales.

$$Emision_{N_2O} = (Masa_{in}^{TKN} - Masa_{out}^{TKN}) \cdot FE_{N_2O} \quad (C.1)$$

Estructurando el balance de masa se tiene que :

$$(Masa_{in}^{TKN} - Masa_{out}^{TKN}) = (Caudal_{in} \cdot C_{in}^{TKN} - Caudal_{out} \cdot C_{out}^{TKN}) \cdot t_{anual} \quad (C.2)$$

Para el caso del reactor de lodos activados, el caudal de entrada corresponde a 1.000 [m³/d] y el de salida a 971 [m³/d], mientras que las concentraciones fijada fueron de $C_{in}^{TKN} = 245$ [g/m³] y $C_{out}^{TKN} = 50$ [g/m³]. Por último, se consideró que la planta opera durante 261 días al año (t_{anual}).

Reemplazando, se obtiene que,

$$Emision_{N_2O} = (1000m^3/d \cdot 0.245kg/m^3 - 9710.050kg/m^3) \cdot 261d/año \cdot 0,016kgN_2O/kgN \quad (C.3)$$

$$Emision_{N_2O} = 820,38[kgN_2O/año] \quad (C.4)$$

Entonces las emisiones directas anuales del reactor de lodos activados son de: 820,38 [kg N_2O /año].

Para que las emisiones sean comparables entre cada uno de los casos, es que se utiliza el potencial de calentamiento (PC) de los GEI. El valor reportado para el N_2O con respecto al CO_2 es de 298 [$kgCO_{2eq}/kgN_2O$], por lo tanto se puede realizar la siguiente equivalencia:

$$Emission_{CO_2} = PC_{N_2O} \cdot Emission_{N_2O} \quad (C.5)$$

Reemplazando,

$$Emission_{CO_2} = 298kgCO_{2eq}/kgN_2O \cdot 820,38kgN_2O/año \quad (C.6)$$

$$Emission_{CO_2} = 244,47[tonCO_{2eq}/año] \quad (C.7)$$

Finalmente, se obtiene que por concepto de emisiones directas, el reactor de lodos activados emite anualmente 244,47 [$tonCO_{2eq}/año$].

El proceso es análogo para los otros casos, pero se debe tener la precaución con las unidades de los FE y el uso de la concentración de entrada/salida que le corresponda al escenario, recordando que al utilizar un AnMBR existe una salida intermedia.

C.2. Consumo Energético

Para la estimación de consumo energético del reactor de lodos activados, se trabajó principalmente con la información expuesta en la entrevista con Concha y Toro [].

En primer lugar, se realizó un promedio ponderado para la cuantificación anual, lo que se traduce en la ec. C.8.

$$Consumo_{anual} = Periodo_{cosecha} \cdot Consumo_{cosecha} + Periodo_{no-cosecha} \cdot Consumo_{no-cosecha} \quad (C.8)$$

Considerando una cosecha de tres meses (Febrero, Marzo y Abril), y que los representes de consumo energéticos serán los realizados en los meses de Marzo y Agosto, se tiene que,

$$Consumo_{anual} = 3 \cdot 190.000[kWh] + 9 \cdot 156.000[kWh] \quad (C.9)$$

$$Consumo_{anual} = 1.974[MWh] \quad (C.10)$$

Por lo que es posible aproximar el consumo anual a 1.974[MWh].

Sin embargo, se debe tener en cuenta, que si bien el reactor corresponde al equipo con mayor demanda energética, no es el único que consume energía para su funcionamiento. Para realizar una distribución acorde al contexto, se plantea el factor de consumo como la razón entre las potencias aparentes del sistema y el reactor. Esto se expresa en la ec.C.11.

$$Factor_{consumo} = \frac{Potencia\ Aparente_{reactor}}{Potencia\ Aparente_{sistema}} \quad (C.11)$$

Al reemplazar los datos entregados en la entrevista, se obtiene,

$$Factor_{consumo} = \frac{350kVA}{380kVA} \quad (C.12)$$

$$Factor_{consumo} = 0,921[-] \quad (C.13)$$

El resultado anterior se interpreta como, el 92.1% del consumo energético de la planta corresponde al efectuado por la operación del reactor de lodos activados.

Entonces, si la planta en su totalidad consume anualmente 1.974[MWh], el reactor es responsable de la demanda de 1.818,2[MWh].

Posteriormente, para realizar el ajuste de consumo por caudal mediante la regla de los seis décimos, se plantea la ec. C.14. Considerando el subfijo caso para referirse al tratamiento de 1000[m³/d], mientras que el subfijo reportado para hablar de un caudal (Q) de 340[m³/d].

$$Consumo_{caso} = Consumo_{reportado} \cdot \left[\frac{Q_{caso}}{Q_{reportado}} \right]^{0.6} \quad (C.14)$$

Reemplazando los valores correspondientes,

$$Consumo_{caso} = 1.818,2MWh \cdot \left(\frac{1.000m^3/d}{340m^3/d} \right)^{0.6} \quad (C.15)$$

$$Consumo_{caso} = 3.473,32MWh \quad (C.16)$$

Luego, es consumo anual esperado para el escenario #0 es de 3.473,32 [MWh].

En el caso de las estimaciones de las otras tecnologías, se utilizaron herramientas análogas a las expuestas en este Anexo. Por ejemplo, para el caso de los reactores de membranas, el consumo está asociado al volumen de agua tratado, o bien, a la masa de DQO (COD) removida, por lo que se debe tener cuidado con las unidades. Mientras que en el caso del PSA, la demanda se asocia a la masa de H₂ tratado.

Respecto de la operación de la *fuel cell*, la eficiencia reportada expone la fracción de energía que es capaz de generar, tomando como referencia la energía que se produciría al combustionar el H₂. Por lo que se obtiene las ecs. C.17 y C.18.

$$E_{\text{Combustión } H_2} = Masa_{H_2} \cdot \text{Factor de combustión} \quad (C.17)$$

$$E_{\text{fuel cell}} = \eta_{\text{fuel cell}} \cdot E_{\text{Combustión } H_2} \quad (C.18)$$

Reemplazando con los datos reportados en la sección 6, se obtiene que,

$$E_{\text{Combustión } H_2} = 17.825,82kg/año \cdot 33.3kWh/kg = 593,6MWh/año \quad (C.19)$$

$$E_{\text{fuel cell}} = 0,76[-] \cdot 593,6MWh/año = 451,14MWh/año \quad (C.20)$$

Entonces, la máxima producción energética que se puede obtener al operar con un *fuel cell*, con el régimen de producción de H₂ descrito, es de 451,14 [MWh/año]. Cabe mencionar, que en la sección 6 el valor anterior presenta signo negativo para diferenciar de los datos de consumo, expuestos con signos positivos.

C.3. Emisiones Indirectas

Las emisiones indirectas tienen relación con el consumo de energía y la matriz energética del país donde se realiza la demanda.

Considerando que el estudio se realizó con información de vitivinícolas chilenas, es que se utilizó el FE correspondiente a Chile, en particular, el reportado para el año 2022. La lógica se siguen este tipo de cuantificación es análoga al de las emisiones directas (ec. C.21).

Se realizará un ejemplo de cálculo para el caso del MBR (escenario #1).

$$Emission_{CO_2eq} = Consumo_{energético} \cdot FE_{matriz\ energética} \quad (C.21)$$

Reemplazando,

$$Emission_{CO_2eq} = 2.143,03MWh/año \cdot 300,6kgCO_{2eq}/MWh = 644,2tonCO_{2eq}/año \quad (C.22)$$

Por lo tanto, se concluye que las emisiones indirectas anuales por operación del MBR (escenario #1), corresponden aproximadamente a 897,29[tonCO_{2eq}/año].

Anexo D

LCA operacional - Sensibilidad días de operación

Como fue mencionado, existe incertidumbre respecto de la cantidad de días de operación al año considerados al momento de estimar el consumo energético anual del reactor de Lodos Activados.

Para la realización de las estimaciones expuesta en este trabajo, se tomó el supuesto de que se opera la planta durante 261 días. Este criterio se basó en lo reportado para la planta Concha y Toro - Chimbarongo, por M. Escudero es su trabajo de memoria.

Dado que el consumo energético calculado para el reactor de Lodos Activados está dado para una cantidad desconocida de días, al modificar esta base de cálculo, son los escenarios # 1, # 2 y # 3, los que percibirían la modificación en las estimaciones de demanda energética y por lo tanto de emisiones indirectas de GEI. No obstante, respecto de las estimaciones de emisiones directas, todos los escenarios serían sensibles, dado que el volumen total de agua tratada al año cambiaría.

Se considera que el peor caso de estudio sería aquel en donde la base de cálculo fuese de 365 días/año, puesto que considerando el consumo del reactor de Lodos Activados fijo, implicaría que requiere menor energía por volumen de agua tratado con respecto al caso en donde la base de cálculo es de 261 días/año.

Por lo anterior, se procede a calcular las emisiones operacionales consideran 365 días/año.

D.1. Estimación CO_2 biogénico

Dado que el balance de masa (Anexo B) se encuentra normalizado por día, es directo obtener la sensibilidad para el CO_2 biogénico y las diferentes consideraciones del factor α , los resultados se encuentran en las tablas D.1 y D.2.

Tabla D.1: Sensibilidad - Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. Valor de $\alpha = 0, 2$ para todos los escenarios.

Producción de CO_2 biogénico		
Escenario	Emisiones CO_2 [kg CO_2 /d]	Emisiones CO_2 [ton CO_2 /año]
#0 y #1	8.986,42	3280,04
#2 y #3	7.812,45	2.851,55

Tabla D.2: Sensibilidad - Estimaciones respecto de la producción de CO_2 biogénico por escenario. Valor de $\alpha_{Caso A} = 0,34$ y $\alpha_{Caso B} = 0,2$.

Producción de CO_2 biogénico		
Escenario	Emisiones CO_2 [kg CO_2 /d]	Emisiones CO_2 [ton CO_2 /año]
#0 y #1	7.414,80	2.706,40
#2 y #3	7.812,45	2.851,55

D.2. Emisiones directas

En la tabla D.3 se exponen las nuevas estimaciones de emisiones directas, en donde es posible apreciar la linealidad con respecto al tiempo de operación. Es por esta misma razón, que se mantiene el hecho de que la aplicación secuencial AnMBR + MB genera un ahorro del orden del 13% con respecto a las emisiones directas del reactor de Lodos Activados.

Tabla D.3: Sensibilidad - Estimación de las emisiones directas de GEI para cada uno de los tratamientos secundarios propuestos.

Emisiones directas de GEI			
Tratamiento Secundario	GEI	Unidad	Valor
Lodos activados	N_2O	kg N_2O /año	1.147,27
	CO_{2eq}	ton CO_{2eq} /año	341,89
MBR	N_2O	kg N_2O /año	1.147,27
	CO_{2eq}	ton CO_{2eq} /año	341,89
AnMBR + MBR	CO_{2eq}	ton CO_{2eq} /año	297,45

D.3. Consumo energético

Tal como se explicó anteriormente, en la tabla D.4 se expone como las estimaciones respecto de los consumos energéticos de todos los escenarios, excepto esc. # 0, se ven afectador por el cambio de días considerados.

Tabla D.4: Sensibilidad - Estimaciones respecto de los consumos energéticos anuales para cada una de las tecnologías de tratamiento secundario.

Consumo energético - Reactores	
Descripción	Consumo energético anual [MWh]
Lodos activados	3.473,32
MBR	2.996,96
AnMBR (1)	461,73
AnMBR (2)	121,56
MBR 2do	2.294,86
AnMBR(1) + MBR 2do	2.756,58
AnMBR(2) + MBR 2do	2.416,42

Si bien la cantidad de H_2 producido sería mayor al considerar 365 días, tanto la energía requerida para la purificación de este, como la energía producida por la conversión mediante la *fuel cell* aumentarán en la misma proporción. Para mayor detalle, véase la tabla D.5.

Tabla D.5: Sensibilidad - Estimaciones del balance de energía asociado a la purificación y conversión del H_2 (PSA + *fuel cell*).

Balance de la producción energética	
Parámetro	Energía eléctrica anual [MWh]
Máx. E. eléctrica producida por <i>fuel cell</i>	-631,47
Consumo energético PSA	416,31
Total neto energía producida	-215,16

En síntesis, se tiene la tabla D.6, la cual expone que el ahorro energético se vería drásticamente afectado, puesto que todos los consumos aumentan en la proporción de aumento de días (365/261), exceptuando al reactor de Lodos Activados (referencia del ahorro). Aún así, la tecnología del escenario #0 seguiría siendo la más demandante.

Tabla D.6: Sensibilidad - Fracciones de energía ahorrada con respecto al escenario # 0, en donde se utiliza la tecnología de Lodos Activados.

Fracción ahorro de energía c/r reactor Lodos Activados		
Escenario	Descripción	Frac. ahorro
# 1	MBR	0,137
# 2	AnMBR + MBR	0,206
# 3	AnMBR + MBR + PSA + <i>fuel cell</i>	0,268

D.4. Emisiones indirectas

Análogo al caso de la energía, las estimaciones se exponen en la tabla D.7.

Tabla D.7: Sensibilidad - Estimaciones de las emisiones indirectas de GEI en cada uno de los escenarios de estudios.

Emisiones indirectas de GEI		
Escenario	Descripción	Emisiones GEI [tonCO _{2eq} /año]
#0	Lodos activados	1.044,08
#1	MBR	900,89
#2	AnMBR + MBR	828,63
#3	AnMBR + MBR +PSA + Fuel cell	763,95

D.5. Resultados LCA operacional

Finalmente, se puede concluir observando la tabla D.8 con respecto a la tabla 6.18, que mientras antes el ahorro de emisiones totales de GEI era del orden del 30 - 40 %, al modificar la cantidad de días al año, el ahorro pasa a ser del orden del 10 - 20 % (ver tabla D.9).

Tabla D.8: Sensibilidad - Resultados LCA operacional - Cuantificación de emisiones del tipo GEI.

Emisiones totales de GEI		
Escenario	Descripción	Emisiones GEI [tonCO _{2eq} /año]
#0	Lodos activados	1.385,97
#1	MBR	1.242,77
#2	AnMBR + MBR	1.126,07
#3	AnMBR + MBR +PSA + Fuel cell	1.061,40

Tabla D.9: Sensibilidad - Fracciones de emisiones totales de GEI ahorrada con respecto al escenario # 0, en donde se utiliza la tecnología de Lodos Activados.

Fracción ahorro de emisiones GEI totales c/r reactor Lodos Activados		
Escenario	Tecnología	Frac. ahorro
# 1	MBR	0,103
# 2	AnMBR + MBR	0,188
# 3	AnMBR + MBR +PSA + Fuel cell	0,234

En el caso de considerar el CO_2 biogénico, las fracciones de ahorro se reducen. Al utilizar $\alpha = 0,2$ para todos los escenarios, se obtienen ahorros de emisiones totales de GEI del orden del 3 - 16% con respecto al escenario #0. Mientras que si se emplea un valor de α diferenciado por escenario, el ahorro es del 3 - 5%.

Anexo E

EcoInvent

E.1. Reactor de Lodos Activados y Sedimentador

La selección de materiales según la disponibilidad de datos en EcoInvent fue la expuesta en la tabla E.1 . La mayor parte de las elecciones se hicieron en base a lo reportado por Morera et al [19] para este tipo de plantas.

Tabla E.1: Selección de materiales en la base de datos de EcoInvent - Inventario del Reactor de Lodos Activados y Sedimentador.

Selección de materiales: Reactor de Lodos Activados + Sedimentador	
Materiales	Selección EcoInvent
Diesel for excavation	Diesel, burned in building machine {GLO} market for Alloc Def
Excess soil deposited	Inert waste {RoW} treatment of, sanitary landfill Alloc Def
Transport of excess soil to a inert waste landfill	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO} market for Alloc Def
Concrete	Concrete, normal {RoW} market for Alloc Def
Reinforcing steel	Reinforcing steel {GLO} market for Alloc Def
Wire used in reinforcing steel	Wire drawing, steel {GLO} market for Alloc Def
Low alloyed steel used in formworksf	Steel, low-alloyed {GLO} market for Alloc Def
Stainless steel	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for Alloc Def
PVC used in formworks	Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for (+) Polyvinylchloride, emulsion polymerised {GLO} market for
Wood used in formworks	Glued laminated timber, for outdoor use {GLO} market for Alloc Def
Cement mortar	Cement mortar {RoW} market for cement mortar Alloc Def
Precast concrete	Concrete block {GLO} market for Alloc Def
Sand	Sand {GLO} market for Alloc Def
Diethylhylene glycol used in formworks	Diethylene glycol {GLO} market for Alloc Def
Diesel used in electricity generators	Diesel, burned in diesel-electric generating set {GLO} market for Alloc Def
Material transport	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO} market for Alloc Def

Algunas conversiones y consideraciones se deben tener en cuenta al utilizar la selección antes expuesta.

El factor respecto *Concrete* se encuentra reportado por unidad de volumen, sin embargo, las estimaciones de inventario fueron con relación a la masa. Para esto, se utilizó el valor de densidad de: $2380[\text{kg}/\text{m}^3]$ [19].

Análogo al caso anterior, la densidad utilizada para *Glued laminated timber* fue de $540[\text{kg}/\text{m}^3]$ [19].

En el caso del *PVC used in formworks*, se consideró apropiado por bibliografía, el considerarlo como una mezcla del tipo, 90 % *bulk polymerised* y 10 % *emulsion polymerised* [19].

E.2. MBR y AnMBR

Algunas consideraciones fueron necesarias para establecer la equivalencia/similitud del inventario con los procesos presentes en EcoInvent, esto se expone en la tabla E.2.

Tabla E.2: Selección de materiales en la base de datos de EcoInvent - Inventario del MBR y AnMBR.

Selección de materiales: MBR y AnMBR	
Materiales	Selección EcoInvent
Earthworks	Excavation, hydraulic digger//{GLO} market for excavation, hydraulic digger
Diesel for excavation	Diesel, burned in building machine//{GLO} diesel, burned in building machine
Concrete	Concrete, normal//{GLO} market for concrete, normal
Membrane PVDF	Polyvinylfluoride//{GLO} market for polyvinylfluoride
Electricity	Electricity, high voltage //{CL} market for electricity,high voltage

En primer lugar, se tiene que el consumo de *Diesel for excation* fue estimado en [kg], mientras que los factores de emisión se encuentran normalizados por [MJ]. Para esto se hizo uso del valor calorífico neto del diesel, 43 [MJ/kg] [76].

Por otro lado, debido a que el polímero PVDF (fluoruro de polivinilideno; por sus siglas en inglés) no se encuentra en la base de datos de EcoInvent, Cashman et al. [61] sugieren aproximar su impacto ambiental por los factores del PVF (fluoruro de polivinilo; por sus siglas en inglés).

En el caso del consumo de electricidad, dado que el valor estimado en el inventario es mayor en magnitud que lo revisado por bibliografía; se concluyó que esto se debía principalmente por considerar la energía requerida para la fabricación de la membrana. Entonces, esto justificaría que se escoja los factores de emisión del tendido eléctrico, y no los asociados a un generador de electricidad en base a diesel.

E.3. PSA

El principal supuesto para la estimación del inventario del PSA fue el considerar únicamente el acero requerido para la construcción de las torres de adsorción y el relleno correspondiente. Además, se contabilizó la adquisición de un tarde que acero para almacenamientos intermedios de H_2 .

La selección de materiales según la disponibilidad de datos en EcoInvent fue la expuesta en la tabla E.3.

Tabla E.3: Selección de materiales en la base de datos de EcoInvent - Inventario del PSA y tanque de almacenamiento de H_2 .

Selección de materiales: PSA y tanque de almacenamiento	
Materiales	Selección EcoInvent
Acero	Sheet rolling, steel// {GLO} market for
Carbón poroso	Carbon black// {GLO} market for

E.4. Fuel Cell

Dado el listado de materiales presentes en la base de datos de EcoInvent utilizada, es que ciertos insumos debieron ser aproximados a alguno de los reportados. Esto se resumen en la tabla E.4.

Tabla E.4: Selección de materiales en la base de datos EcoInvent - Inventario *Fuel cell*.

Selección de materiales: <i>Fuel cell</i>	
Materiales	Selección EcoInvent
LSM ($\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_3$)	Lanthanum oxide// {GLO} market for lanthanum oxide
Circonia estabilizada con itria (YSZ)	Zirconium oxide// {GLO} market for zirconium oxide
Butiral de polivinilo (aglutinante)	Polyvinylchloride, bulk polymerised// {GLO} market for polyvinylchloride, bulk polymerised
Acetato de n-butilo 99,5 % (disolvente)	Butyl acetate// {GLO} market for butyl acetate
2-butoxietanol (disolvente)	Ethanol, without water, in 99.7 % solution state, from ethylene // {GLO} market for
Carbón negro	Carbon black//{GLO} market for carbon black
Methocel A4M (aglutinante)	Diethyl ether, without water, in 99.95 % solution state// {GLO} market for
Óxido de níquel	Nickel, 99.5 %// {GLO} market for nickel, 99.5 %
Acero Inoxidable	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for Alloc Def
Óxido de aluminio	Aluminium oxide//{GLO} market for aluminium oxide
$\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_4$	Magnesium sulfate//{GLO} market for magnesium sulfate
Acero	Sheet rolling, steel//{GLO} market for sheet rolling, steel

Como es posible notar, existen materiales que no coinciden totalmente con la selección en EcoInvent. Esto se debe a su inexistencia en la base de datos, por lo que se optó por aquel producto de fabricación similar, análogo a lo realizado en el trabajo de L. Koscina [66].

Anexo F

LCA construcción - Memoria de cálculo resultados parciales

F.1. Memoria de cálculo

F.2. Resultados

En esta sección se encuentran los resultados del LCA Construcción para cada uno de los escenarios planteados.

- Escenario #0: Reactor de lodos activados + sedimentador.
- Escenario #1: MBR.
- Escenario #2: AnMBR + MBR.
- Escenario #3: AnMBR + MBR + PSA + Tanque de almacenamiento de H_2 + *Fuel cell*.

F.2.1. *Endpoint*

Si bien el puntaje asociado a los *endpoint* engloba a todas las subcategorías (*midpoint*), la base de datos utilizada (EcoInvent), también presenta la distribución de puntajes dentro de cada una de ellas. Esto se logra apreciar en la tabla F.1.

Un análisis con la tabla F.1 sería necesario para reconocer la relevancia en el *endpoint*, dada la magnitud del puntaje en cada *midpoint*.

Paralelamente, se plantea la tabla F.2, la que expone la relevancia relativa de cada uno de los puntajes asignados en base a los obtenidos en el escenario #0 (las casillas coloreadas en rojo significa que el valor supera la unidad). Es posible observar la misma tendencia con respecto al escenario #0 para cada uno de los *midpoint*, es decir, la tecnología MBR siempre obtiene un puntaje menor al reactor de lodos activados + sedimentador, para cada uno de los *midpoint*, mientras que los escenarios #2 y #3, siempre presentan puntajes mayores en comparación.

Tabla F.1: Estimación de los impactos ReCiPe - Endpoint (E)

ReCiPe Endpoint (E) - Resultados de construcción					
ReCiPe Endpoint (E)		Esc. # 0	Esc. # 1	Esc. # 2	Esc. # 3
Ecosystem quality	Freshwater eutrophication	3,98,E+00	7,47,E+00	2,46,E+01	2,66,E+01
	Terrestrial acidification	2,91,E+01	4,44,E+01	1,42,E+02	1,82,E+02
	Freshwater ecotoxicity	1,15,E+01	2,43,E+00	7,95,E+00	1,12,E+01
	Climate change, ecosystems	8,52,E+03	9,02,E+03	2,68,E+04	2,82,E+04
	Marine ecotoxicity	2,37,E+03	7,84,E+02	2,57,E+03	3,37,E+03
	Natural land transformation	8,84,E+03	4,09,E+03	1,00,E+04	1,09,E+04
	Terrestrial ecotoxicity	8,28,E+01	5,53,E+01	1,60,E+02	1,91,E+02
	Urban land occupation	3,65,E+02	7,53,E+01	2,04,E+02	2,26,E+02
	Agricultural land occupation	1,57,E+02	9,90,E+02	3,27,E+03	3,34,E+03
	Total	2,04,E+04	1,51,E+04	4,32,E+04	4,65,E+04
Human health	Particulate matter formation	1,71,E+03	5,11,E+03	1,67,E+04	1,80,E+04
	Human toxicity	6,90,E+04	2,60,E+04	8,55,E+04	9,93,E+04
	Ozone depletion	6,72,E-01	7,12,E-01	2,26,E+00	2,53,E+00
	Ionising radiation	2,82,E+00	3,19,E+00	1,05,E+01	1,15,E+01
	Climate change, human health	1,07,E+04	1,14,E+04	3,37,E+04	3,55,E+04
	Photochemical oxidant formation	6,50,E+01	2,39,E+02	8,04,E+02	8,42,E+02
	Total	8,15,E+04	4,27,E+04	1,37,E+05	1,54,E+05
Resources	Fossil depletion	8,33,E+03	1,07,E+04	3,44,E+04	3,73,E+04
	Metal depletion	3,32,E+03	3,20,E+02	1,00,E+03	4,79,E+03
	Total	1,16,E+04	1,10,E+04	3,54,E+04	4,21,E+04
Endpoint	Total	1,14,E+05	6,88,E+04	2,15,E+05	2,42,E+05

Tabla F.2: Fracciones de los impactos ReCiPe - Endpoint (E) con respecto al escenario #0 (reactor de Lodos Activados + Sedimentador)

ReCiPe Endpoint (E) - Frac. con respecto al esc. #0				
ReCiPe Endpoint (E)		Esc. # 1	Esc. # 2	Esc. # 3
Ecosystem quality	Freshwater eutrophication	1,87	6,17	6,68
	Terrestrial acidification	1,52	4,88	6,24
	Freshwater ecotoxicity	0,21	0,69	0,97
	Climate change, ecosystems	1,06	3,14	3,31
	Marine ecotoxicity	0,33	1,09	1,43
	Natural land transformation	0,46	1,14	1,24
	Terrestrial ecotoxicity	0,67	1,93	2,31
	Urban land occupation	0,21	0,56	0,62
	Agricultural land occupation	6,32	20,88	21,34
	Total	0,74	2,12	2,28
Human health	Particulate matter formation	2,99	9,75	10,51
	Human toxicity	0,38	1,24	1,44
	Ozone depletion	1,06	3,35	3,77
	Ionising radiation	1,13	3,72	4,10
	Climate change, human health	1,06	3,14	3,31
	Photochemical oxidant formation	3,68	12,37	12,96
	Total	0,52	1,68	1,89
Resources	Fossil depletion	1,29	4,13	4,48
	Metal depletion	0,10	0,30	1,44
	Total	0,95	3,04	3,61
Endpoint	Total	0,61	1,90	2,13

F.2.2. *Midpoint*

En la tabla F.3 se aprecian los resultados y unidades de cada uno de los (18) *midpoint* considerados en la metodología ReCiPe.

Tabla F.3: Estimación de los impactos ReCiPe - Midpoint (E).

ReCiPe Midpoint (E) - Resultados de construcción					
Midpoint	Unidad	Esc. # 0	Esc. # 1	Esc. # 2	Esc. # 3
Agricultural land occupation	m2a	6,4,E+03	4,1,E+04	1,4,E+05	1,4,E+05
Climate change	kg CO2-Eq	3,1,E+05	3,3,E+05	9,8,E+05	1,0,E+06
Fossil depletion	kg oil-Eq	6,9,E+04	8,9,E+04	2,9,E+05	3,1,E+05
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DC	1,1,E+04	2,8,E+03	9,0,E+03	1,2,E+04
Freshwater eutrophication	kg P-Eq	6,1,E+01	1,1,E+02	3,7,E+02	4,1,E+02
Human toxicity	kg 1,4-DC	1,0,E+07	3,8,E+06	1,3,E+07	1,5,E+07
Ionising radiation	kg U235-Eq	1,8,E+04	2,0,E+04	6,6,E+04	7,2,E+04
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DC	9,7,E+06	3,3,E+06	1,1,E+07	1,4,E+07
Marine eutrophication	kg N-Eq	5,3,E+02	5,7,E+02	1,8,E+03	1,9,E+03
Metal depletion	kg Fe-Eq	7,2,E+04	6,9,E+03	2,2,E+04	1,1,E+05
Natural land transformation	m2	-3,6,E+01	5,7,E+01	1,7,E+02	1,9,E+02
Ozone depletion	kg CFC-11	2,6,E-02	2,9,E-02	9,1,E-02	1,0,E-01
Particulate matter formation	kg PM10-Eq	6,7,E+02	2,0,E+03	6,6,E+03	7,1,E+03
Photochemical oxidant formation	kg NMVOC	1,5,E+03	1,4,E+03	4,2,E+03	4,6,E+03
Terrestrial acidification	kg SO2-Eq	1,4,E+03	2,1,E+03	6,9,E+03	8,8,E+03
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DC	3,8,E+02	2,5,E+02	7,3,E+02	8,8,E+02
Urban land occupation	m2a	1,2,E+04	2,5,E+03	6,8,E+03	7,5,E+03
Water depletion	m3	5,9,E+02	7,1,E+02	2,1,E+03	2,4,E+03