



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

Informe Entrega 2

Evaluación de tecnologías de tratamiento de aguas para minimizar la carga
contaminante de RILES en empresas papeleras

Grupo 86

Maite Villagrán Sepúlveda 21643334 Sección 1
Victoria Leighton Ortega 21624968 Sección 2
Martín Silva Nuñez 21625549 Sección 1
Javiera Gajardo Bustamante 21623961 Sección 1
Sofía Zelada Espejo 21624976 Sección 2
Martín Flores Morales 21624313 Sección 1
Lucas Rojas Sánchez 21642710 Sección 2

Fecha entrega: 30 de Mayo de 2025

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Descripción del Problema | 3 |
| 1.1. Antecedentes y ventajas de abordar el problema | 3 |
| 1.2. Descripción del modelo y objetivo del tomador de decisiones | 4 |
| 2. Modelación | 6 |
| 2.1. Conjuntos | 6 |
| 2.2. Parámetros | 7 |
| 2.3. Variables | 7 |
| 2.4. Supuestos | 8 |
| 2.5. Función Objetivo | 8 |
| 2.6. Restricciones | 8 |
| 3. Definición de Datos | 10 |
| 3.1. Presupuesto y Costos | 10 |
| 3.2. Capacidades, Volúmenes y Flujos | 10 |
| 3.3. Eficiencia y Duración | 11 |
| 3.4. Parámetros Técnicos | 12 |
| 4. Resolución del Problema | 12 |
| 5. Bibliografía | 13 |

1. Descripción del Problema

1.1. Antecedentes y ventajas de abordar el problema

En el año 2004, la ciudad de Valdivia enfrentó una de las emergencias ambientales más graves de su historia (González & Roldán, 2014): la muerte de miles de cisnes de cuello negro, una especie emblemática del humedal (González & Roldán, 2014). La causa principal de este fenómeno fue la drástica disminución del luchecillo, planta acuática que constituye la base de la dieta de estas aves (González & Roldán, 2014).

Ante esta situación, la comunidad local rápidamente señaló como responsable a la empresa Celulosa Arauco y Constitución S.A., cuya planta industrial vertía efluentes al río Cruces (Vasconi, 2006). Estos residuos líquidos (RILES) ya habían generado conflictos previos con los vecinos, principalmente por los fuertes olores que desprendían (Vasconi, 2006). Tras el desastre ecológico, la población de cisnes de cuello negro se redujo drásticamente pasando de una población de seis mil cisnes (Vasconi, 2006) a tan solo 304 ejemplares (CONAF, 2006).

En respuesta, las autoridades ambientales regionales implementaron diversas restricciones (Vasconi, 2006): se exigió a la planta industrial poner en funcionamiento un nuevo punto de descarga de RILES, distinto al río Cruces (Vasconi, 2006), la reducción de su producción de pulpa, de 550.000 a 440.000 toneladas anuales, hasta que pudiera certificar el cumplimiento de la norma DS 90, que indica la carga de contaminante media diaria que se puede liberar, específicamente en relación con los niveles de aluminio, cloruros y sulfatos (Vasconi, 2006).

El caso evidenció el impacto ecológico y social de la contaminación del río: la alteración del hábitat de las especies, que puede provocar el desplazamiento o incluso la muerte de múltiples especies, la eutrofización de efluentes que lleva a un desplome completo de un ecosistema, el aumento del riesgo sanitario por enfermedades producidas por agua contaminada, (García Miranda & Miranda Rosales, 2018), la afectación económica de sectores como el turismo y la pesca artesanal (Medina Jaraquemada, 2013), además de pérdidas culturales para los pueblos originarios de la zona. (Contreras Painemal, 2007).

Desde un punto de vista ambiental, la implementación de tecnologías de tratamiento de aguas permite reducir significativamente la carga de contaminantes como lo son los AOX, sulfatos, aluminio, clorofenoles, zinc, furanos, dioxinas, entre otros (Lagos, 2006). Procesos como los biofiltros, que utilizan mecanismos de adsorción y biodegradación mediante microorganismos especializados, alcanzan tasas de remoción superiores al 90 %, mitigando los efectos de eutrofización y reduciendo el consumo del 50 % en el uso de agua potable para riego en zonas urbanas, factor importante a considerar en la crisis hídrica que se vive actualmente (Lagos, 2006).

Desde el plano económico, no tratar adecuadamente las aguas residuales implica serios riesgos para las empresas. En Chile, la Ley N°19.300 establece sanciones por daño ambiental, que pueden llegar hasta las 10.000 UTA (Unidades Tributarias Anuales), equivalentes a aproximadamente \$8.237.760.000 CLP (Superintendencia del Medio Ambiente, 2025). Casos recientes de descarga de residuos líquidos sin tratamiento han resultado en multas superiores a los \$3.700 millones CLP. A esto se suma el riesgo de juicios ambientales, pérdida de reputación y restricciones operacionales impuestas por autoridades, como ocurrió con Arauco.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, invertir tempranamente en tecnologías de tratamiento de aguas no solo protege el entorno natural, sino que también constituye una estrategia sólida de reducción de riesgos financieros y reputacionales. Este proyecto busca modelar alternativas de tratamiento de aguas para la industria papelera, utilizando como caso de referencia a Celulosa

Arauco y Constitución S.A. El objetivo es identificar las tecnologías más eficientes en la reducción de contaminantes tóxicos, respetando restricciones presupuestarias y considerando la sostenibilidad ambiental a largo plazo. La solución debe equilibrar la eficiencia de remoción, el costo de instalación y operación, y el cumplimiento normativo, previniendo así futuros conflictos socioambientales y sanciones económicas.

1.2. Descripción del modelo y objetivo del tomador de decisiones

El presente problema de optimización tiene como propósito asistir a una consultora ambiental o empresa especializada en tratamiento de aguas industriales en la toma de decisiones estratégicas y operativas respecto a la selección e implementación de distintos procesos de tratamiento de agua en una planta papelera. El objetivo del modelo es minimizar la cantidad total de contaminantes que son descargados al río, como resultado del tratamiento de residuos líquidos industriales (RILES) generados por la planta Celulosa Arauco y Constitución S.A., ubicada en Valdivia, durante un horizonte temporal de planificación de 365 días, equivalente a un año de operación continua (Celulosa Arauco y Constitución S.A., 2012).

La planta produce celulosa Kraft blanqueada a partir de pino radiata y eucaliptus. En este proceso se generan residuos líquidos industriales, especialmente durante las etapas de blanqueamiento del papel y separación de la pulpa (Celulosa Arauco y Constitución S.A., 2012). Estos residuos contienen múltiples contaminantes, representados por el conjunto C , que incluye compuestos orgánicos clorados, sólidos en suspensión y materia orgánica biodegradable. Estos contaminantes, identificados como prioritarios por su alta carga tóxica, no pueden ser vertidos directamente al río debido a las severas consecuencias ambientales que acarrearían. Por ello, deben someterse a un tratamiento riguroso que reduzca sus concentraciones por debajo de los límites legales establecidos.

En términos simples, la planta a analizar opera según se describe a continuación. Primero, la papelería produce celulosa Kraft blanqueada, cuyo proceso libera contaminantes peligrosos al río. Por esto, es que antes de ser descargados directamente al afluente, deben ser tratados por un proceso p y luego de pasar por el tratamiento, que reduce la carga del contaminante, el flujo es libre de ser liberado al río. Es importante notar que cada proceso tiene un volumen máximo, que no puede ser sobrepasado, por lo que la empresa cuenta con una piscina de emergencia en caso de rebalse, de la cual su funcionamiento se profundiza más adelante.

Se busca que el modelo sea capaz de decidir entre distintos procesos de limpieza de agua e indicar cuál es la menor cantidad de contaminante que ese proceso en específico vierte al río. Con esta información buscamos en primer lugar, eliminar aquellos procesos que no cumplan las normas de tratamiento de agua indicadas a nivel país, pero más importante encontrar aquel equipo de limpieza de agua que sea capaz de eliminar y tratar la mayor cantidad de contaminantes y de esta manera disminuir la concentración de estos elementos nocivos en los RILES.

Para representar este sistema se consideran múltiples procesos de tratamiento de aguas, indexadas por $p \in P$. Cada tecnología presenta una eficiencia $\eta_{cp} \in [0, 1]$ específica que nos indica la capacidad del proceso para eliminar cierto contaminante $c \in C$, es decir el porcentaje que el proceso retiene de ese contaminante evitando que caiga al río, una concentración inicial diaria λ_c del contaminante $c \in C$ que entra al proceso en mg/L, un volumen máximo de agua que el proceso es capaz de mantener dentro de la planta de tratamiento v (en litros), un tiempo fijo de operación f_p (en días), un costo de instalación i_p y un costo de mantención diaria d_p . El horizonte de planificación se divide en períodos diarios $t \in T$, con $T = \{1, 2, \dots, 365\}$.

La operación de estos procesos de tratamiento está sujeta a distintas restricciones de funcionamiento. Al iniciarse un proceso, se activa la variable binaria $X_{pt} = 1$, la cual indica que ha comenzado el tratamiento de agua con el proceso $p \in P$ en el día t . Una vez iniciado, el tratamiento debe durar un total de f_p días consecutivos. Durante este periodo, la variable binaria $Y_{pt} = 1$ indica que el

proceso p se encuentra en funcionamiento en el día t . Además, se incluye la variable W_p que indica si el proceso p se activó en algún t . Se impone además la condición de que solo un proceso puede estar activo por día, evitando la simultaneidad de tecnologías.

Un aspecto crucial del modelo es la gestión del volumen de agua tratado, considerando que la planta de tratamiento que se está modelando se encuentra en la ciudad de Valdivia, donde llueve aproximadamente 40 % del año (Weather Atlas, s.f.). La lluvia genera un problema para la planta de tratamiento, debido a que la infraestructura se encuentra expuesta al aire libre, por lo que el agua de lluvia aumentará el volumen de agua que se está tratando. En cada período, la planta genera un flujo constante de agua residual N , al cual si en el día t llueve, se suma una cantidad de agua lluvia α_t . Este volumen entra a los procesos de tratamiento y, si excede su capacidad máxima, se activa un flujo de derivación hacia una piscina de emergencia g . Esta piscina, con capacidad máxima E , actúa como un sistema de seguridad ante rebalses. El uso de la piscina se modela mediante la variable binaria Q_t , que indica si el flujo excedente fue desviado a la piscina en el día t , mientras que S_t indica si la piscina ha alcanzado su capacidad máxima. Si esto ocurre, se activa un flujo de retorno desde la piscina hacia el proceso de tratamiento μ , cerrando el ciclo del sistema bajo condiciones adversas.

El modelo incluye variables de inventario que permiten representar dinámicamente el volumen de agua en cada componente del sistema en la cual H_{pt} representa el inventario del proceso p en el período t y A_t el volumen de agua acumulado en la piscina de emergencia en el mismo período. También se define la variable Z_{cpt} que indica la cantidad de contaminante c que es descargado al río desde el proceso p en el tiempo t , siendo esta variable la que se busca minimizar en la función objetivo.

Adicionalmente, el modelo incorpora una restricción presupuestaria global, que impone que la suma de los costos de instalación y mantención de todos los procesos a lo largo del horizonte de planificación no supere el presupuesto B disponible. Las condiciones lógicas y técnicas del sistema se modelan mediante un conjunto detallado de restricciones, que aseguran la coherencia temporal del uso de procesos, el cumplimiento de capacidades máximas y la activación adecuada de flujos alternativos según el comportamiento de los inventarios.

Una planta de tratamiento de aguas residuales es una instalación diseñada para limpiar el agua contaminada que proviene de los procesos industriales, en este caso, de la industria papelera. Durante la producción de papel se utilizan grandes cantidades de agua, que al finalizar el proceso quedan cargadas de sustancias orgánicas, químicos y residuos sólidos. Para evitar que estas aguas contaminen ríos o suelos, deben ser tratadas antes de ser devueltas al medio ambiente o reutilizadas.

El tratamiento se realiza en varias etapas. Primero, se utiliza un decantador primario, donde se sedimentan los residuos sólidos más grandes. Luego, el agua pasa por un reactor biológico (como el sistema de lodos activados), donde bacterias aeróbicas degradan la materia orgánica. Después, un clarificador separa las partículas finas para mejorar la claridad del agua. Finalmente, se realiza una desinfección para eliminar microorganismos patógenos, asegurando que el agua tratada cumpla con las normativas vigentes antes de su descarga o reutilización.

Sin embargo, este tratamiento convencional, como se expuso anteriormente, no es suficiente para eliminar ciertos contaminantes complejos, como los compuestos orgánicos halogenados (AOX), lignina o residuos de adhesivos y colorantes. Por eso, en este proyecto se proponen tecnologías avanzadas que podrían complementar o reemplazar algunas de estas etapas, mejorando la eficiencia del sistema.

Se proponen cinco procesos para mejorar el tratamiento de aguas residuales en la industria papelera, adaptándose a las condiciones locales como las lluvias frecuentes en Valdivia. Estas medidas reducirían la contaminación de los RILES, disminuirían el riesgo de sanciones y favorecerían una producción más sostenible y eficiente.

El primer proceso corresponde a la evaporación al vacío la cual se basa en reducir la presión en un sistema cerrado, lo que permite que los líquidos se evaporen a temperaturas más bajas. Esta tecnología disminuye significativamente el volumen de residuos líquidos y facilita la recuperación de productos químicos, como blanqueadores o adhesivos, que pueden ser reutilizados, reduciendo los costos de materias primas. Además, permite recuperar agua de alta pureza, que puede reincorporarse al proceso productivo. Es una solución de alto rendimiento, especialmente útil para la industria papeletera, alineada con criterios de sostenibilidad y optimización de recursos (Condorchem Envitech, s.f.-a).

El segundo proceso, se describe como un sistema de tratamiento anaeróbico de tercera generación que está diseñado para manejar aguas con alta carga orgánica. En él, el efluente es pretratado y luego procesado en el reactor Biopaq ICX, donde la descomposición de la materia orgánica se realiza sin oxígeno, generando metano como subproducto aprovechable. Su diseño compacto, bajo consumo energético y alta eficiencia en la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) lo convierten en una opción destacada. Desde su implementación en 2021, se ha logrado reducir la DQO en un 50-55 %. El biogas generado se almacena y quema de forma controlada, con planes de transformación en biogas comprimido (CBG) (Sainsons Paper Industries, Paques India, & Knowledge Integration System, s.f.).

El tercer proceso utiliza dióxido de titanio (TiO_2) como catalizador fotocatalítico para eliminar lignina, un contaminante de materia orgánica común en aguas industriales. El TiO_2 se fija sobre esferas de poliestireno, el cual se activa al irradiarse con luz UV-LED. Esta activación genera radicales hidroxilo ($\text{OH}\bullet$), los cuales degradan la lignina en compuestos simples como agua, dióxido de carbono y compuestos no tóxicos. El sistema opera de forma continua, con un reactor tubular equipado con lámparas UV, inyección de oxígeno y monitoreo constante de parámetros como pH, color, DQO y toxicidad, asegurando un tratamiento eficiente y seguro (Wang et al., 2019).

El cuarto proceso se basa en la reacción Fenton, que es un proceso de oxidación avanzada que combina peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con iones ferroso (Fe^{2+}), generando radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) que oxidan contaminantes orgánicos como colorantes, fenoles, lignina, detergentes y solventes. Al mezclar el efluente con una sal de hierro y ajustar el pH entre 3 y 5, se inicia una reacción que reduce de forma significativa la DQO, el color y la toxicidad del agua. Este sistema puede funcionar en modo continuo o por lotes e incorpora elementos de control como agitación, sensores de pH y recirculación para mejorar su eficacia (Martínez & Romero, 2006).

Por último, el quinto proceso utiliza ozono (O_3), un agente oxidante extremadamente potente, que al inyectarse en el agua rompe enlaces químicos complejos, especialmente en compuestos halogenados como los AOX, y también reduce parcialmente el clorato (ClO_2). Es una alternativa eficaz y limpia para la eliminación de contaminantes orgánicos resistentes. Cada uno de estos procesos considera parámetros como su eficiencia de remoción sobre los principales contaminantes (DQO, DBOs, AOX, ClO_2 , TSS), el costo de instalación, los costos de mantención y su tiempo estimado de operación, permitiendo su evaluación integral para una eventual implementación en la planta de tratamiento (Jufu Water Technology Co., Ltd., s.f.).

2. Modelación

2.1. Conjuntos

- $P : p \in \{1, \dots, P\} :=$ conjunto de procesos de filtración.
- $T : t \in \{1, \dots, T\} :=$ períodos de tiempo en días.
- $C : c \in \{1, \dots, C\} :=$ conjunto de contaminantes en el agua.

2.2. Parámetros

- B := presupuesto de la industria en USD.
- E := volumen de la piscina de emergencia en litros.
- N := volumen que sale de la industria y entra al proceso litros por período.
- α_t := litros de agua que llueve en el período $t \in T$.
- η_{cp} := eficiencia del proceso $p \in P$ para el contaminante c .
- v := volumen máximo en litros del proceso
- a := área del proceso (m^2)
- d_p := costo de mantención del proceso $p \in P$ en USD.
- i_p := costo de instalación del proceso $p \in P$ en USD.
- f_p := tiempo de duración del proceso $p \in P$ en días.
- λ_c := concentración inicial diaria del contaminante $c \in C$ que entra al proceso en mg/L.
- g := volumen que fluye desde el proceso $p \in P$ a la piscina de emergencia en litros.
- r := volumen de salida del proceso.
- μ := volumen que fluye desde la piscina de emergencia al proceso $p \in P$ en litros.
- M := número muy grande.
- ϵ := número muy pequeño.

2.3. Variables

- $X_{pt} := \begin{cases} 1 & \text{se inicia proceso } p \in P \text{ en el tiempo } t \in T, \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
- $Y_{pt} := \begin{cases} 1 & \text{si proceso } p \in P \text{ está activo en } t \in T, \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
- $W_p := \begin{cases} 1 & \text{si proceso } p \in P \text{ se activó en algún período } t \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
- $H_{pt} :=$ inventario del proceso $p \in P$ en tiempo $t \in T$ en litros.
- $Q_t := \begin{cases} 1 & \text{si se utiliza flujo a piscina de emergencia en día } t, \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
- $S_t := \begin{cases} 1 & \text{si la piscina de emergencia llega a su límite en día } t \in T, \\ 0 & \text{e.o.c} \end{cases}$
- $Z_{cpt} :=$ cantidad de contaminante $c \in C$ que sale del proceso $p \in P$ en el tiempo $t \in T$
- $A_t :=$ inventario de agua en litros en la piscina de emergencia.

2.4. Supuestos

1. Flujo N es constante para todo período de tiempo.

$$N = \bar{N}$$

(donde \bar{N} es constantes)

2. El conjunto de períodos de tiempo $t \in T$ está estipulado para un año, donde cada año tiene 365 días.
3. Tanto el proceso como la piscina de emergencia no presentan filtraciones ni pérdidas de agua.
4. Los contaminantes retenidos por el proceso $p \in P$ son removidos mediante a un proceso externo llamado caldera de incineración.
5. La piscina en el $t = 0$ comienza vacía $A_0 = 0$
6. El volumen de salida corresponde a un 95 % del volumen de entrada.

2.5. Función Objetivo

$$\min \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Z_{cpt}$$

2.6. Restricciones

- R1. Cálculo de contaminante $c \in C$ emitido por proceso $p \in P$ en el tiempo $t \in T$ descargado hacia el río.

$$(1 - \eta_{cp}) \cdot \lambda_c \cdot r \cdot Y_{pt} = Z_{cpt}, \quad \forall c \in C, \forall p \in P$$

- R2. Siempre hay un solo un proceso $p \in P$ activo en un tiempo $t \in T$.

$$\sum_{p \in P} Y_{pt} = 1, \quad \forall t \in T$$

- R3. Continuidad hacia atrás: garantiza que si un proceso está activo en el día $t \in T$, entonces debió haber sido iniciado en alguno de los días anteriores dentro de su duración.

$$\sum_{t' = \max\{t - f_p + 1, 1\}} X_{pt'} \geq Y_{pt}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T$$

- R4. Continuidad hacia adelante: asegura que si un proceso se inicia en el día t , entonces debe mantenerse activo durante todos los días siguientes que corresponden a su duración.

$$\sum_{t' = t}^{\min\{t + f_p - 1, T\}} Y_{pt'} \geq f_p \cdot X_{pt}, \quad \forall p \in P, \forall t \in \{1, \dots, T - f_p\}$$

- R5. Restricción de no solapamiento

$$\sum_{t' = t}^{t + f_p - 1} X_{pt'} \leq 1, \quad \forall p \in P, \forall t \in T \text{ tal que } t + f_p - 1 \leq T$$

- R6. Inventario de volumen de agua del proceso $p \in P$ en el tiempo 1 (condición de borde).

$$H_{p1} = N + \alpha_1 a - Q_1 \cdot g - r + S_1 \cdot \mu, \quad \forall p \in P$$

R7. Inventario de volumen de agua del proceso $p \in P$ en el tiempo $t \in T$.

$$H_{pt} = H_{pt-1} + N + \alpha_t a - Q_t \cdot g - r + S_t \cdot \mu, \quad \forall t \in \{2, \dots, T\}, \forall p \in P$$

R8. Activación lógica del rebalse del proceso: fuerza $Q_t = 1$ si el inventario del proceso H_{pt} supera su capacidad máxima v_p .

$$H_{pt} - v \leq M \cdot Q_t, \quad \forall t \in T$$

$$H_{pt} - v \geq \epsilon - M(1 - Q_t), \quad \forall t \in T$$

R9. Inventario de volumen de agua en la piscina de emergencia en el tiempo 1 (condición de borde).

$$A_1 = Q_1 \cdot g - S_1 \cdot \mu$$

R10. Inventario de volumen de agua de la piscina de emergencia en el tiempo t .

$$A_t = A_{t-1} + Q_t \cdot g - S_t \cdot \mu, \quad \forall t \in \{2, \dots, T\}$$

R11. Si la piscina llega a su capacidad límite, entonces S_t es 1.

$$A_t - E \leq M \cdot S_t, \quad \forall t \in T$$

$$A_t - E \geq \epsilon - M(1 - S_t), \quad \forall t \in T$$

R12. No se puede rebalsar la piscina y el proceso al mismo tiempo.

$$S_t + Q_t \leq 1, \quad \forall t \in T$$

R13. Activación de proceso en algún período t .

$$\sum_{t \in T} Y_{pt} \geq W_p \quad \forall p \in P$$

R14. Costos de mantención y de instalación del proceso $p \in P$ deben ser menores al presupuesto.

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Y_{pt} \cdot d_p + \sum_{p \in P} W_p \cdot i_p \leq B$$

R15. Cambio de proceso es inmediato: si se inicia un proceso, debe estar activo ese mismo período.

$$X_{pt} \leq Y_{pt} \quad \forall p \in P, \forall t \in T$$

R16. Naturaleza de las Variables:

| | |
|-----------------------------------|---|
| $X_{pt} \in \{0, 1\}$ | $\forall p \in P, \forall t \in T$ |
| $Y_{pt} \in \{0, 1\}$ | $\forall p \in P, \forall t \in T$ |
| $W_p \in \{0, 1\}$ | $\forall p \in P$ |
| $H_{pt} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ | $\forall p \in P, \forall t \in T$ |
| $Q_t \in \{0, 1\}$ | $\forall t \in T$ |
| $S_t \in \{0, 1\}$ | $\forall t \in T$ |
| $Z_{cpt} \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ | $\forall c \in C, \forall p \in P, \forall t \in T$ |
| $A_t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ | $\forall t \in T$ |

3. Definición de Datos

3.1. Presupuesto y Costos

- B : Presupuesto de la industria (USD).
El presupuesto B se estimó a partir de la inversión reportada en el Estudio de Impacto Ambiental de la Planta Valdivia (Celulosa Arauco y Constitución S.A.), donde en 1997 se destinaron US\$ 1.000 millones para costear equipos tecnológicos avanzados y de control ambiental. De este presupuesto se asumió que por lo menos US\$ 500 millones fueron destinados a la planta de tratamiento. Teniendo este valor de base se consideró hacer una inversión adicional para las nuevas tecnologías, por lo cual al presupuesto se le agregó US\$ 350 millones para este objetivo. Es por esto que el presupuesto sería de US\$ 850 millones. Actualizando esta cifra al año 2025 mediante una calculadora de inflación histórica, se obtiene un valor equivalente a US\$ 1.701 millones de dólares.
- i_p : Costo de instalación del proceso $p \in P$ (USD).
El costo de instalación i_p se estimó considerando un costo inicial de US\$834 millones de dólares por la instalación una planta de tratamiento estándar y a este costo se le sumó el valor que saldría agregar nuevas tecnologías.
- d_p : Costo de mantención diaria del proceso $p \in P$ (USD/día).
Para determinar el costo de mantención d_p se siguió la misma lógica, considerando un costo inicial de US\$166 millones, que corresponde al valor de mantención de la planta de tratamiento estándar, al cual se sumó el valor de mantención de las nuevas tecnologías que se están probando.

3.2. Capacidades, Volúmenes y Flujos

- N : Volumen que sale de la industria y entra al proceso (L/día).
El volumen de efluentes líquidos N fue estimado a partir de los datos reportados en el Estudio de Impacto Ambiental de la Planta Valdivia (Celulosa Arauco y Constitución S.A.), donde se señala que el flujo de agua alimentado al proceso es de aproximadamente 900 L/s. Esta cifra representa el volumen de agua residual generado por la planta tras el proceso productivo. Para su conversión a una base diaria, se multiplica el caudal por el número de segundos en un día, obteniéndose un volumen de 77.760.000 litros por día. Este valor se adopta como entrada diaria de residuos líquidos industriales en el modelo, representando el caudal que debe ser tratado por los procesos de remoción de contaminantes.
- α_t : Litros de agua que llueve en el período $t \in T$ (L/día).
Para su estimación se consideraron datos climáticos históricos de la ciudad de Valdivia, obtenidos de registros meteorológicos oficiales, con un promedio anual cercano a 1.800 mm de precipitación. Este dato se multiplica por el área de captación efectiva considerada en el modelo, permitiendo calcular el volumen de agua lluvia en litros por día que puede afectar la operación de los procesos de tratamiento de efluentes, especialmente en sistemas expuestos o abiertos.
- v : Volumen máximo del proceso (L).
El volumen máximo v de tratamiento por proceso se estimó a partir de las capacidades de manejo de efluentes descritas en el Estudio de Impacto Ambiental de la Planta Valdivia. Se menciona que el volumen máximo que utiliza el proceso es de 125.000.000 L.
- a : Área del proceso (m^2)
El área del proceso a fue determinada a partir de los datos utilizados por la Planta Valdivia al construir su estructura, informados en el Estudio de Impacto Ambiental de la Planta Valdivia (Celulosa Arauco y Constitución S.A.). Este parámetro tiene un valor de 30.000 m^2 , el cual es necesario para determinar la cantidad de lluvia en m^3 , para luego convertirla a litros, que estaría ingresando al sistema de tratamiento de aguas.

- g : Volumen que fluye desde el proceso a la piscina de emergencia (L/día).
Para estimar este parámetro, se consideró el volumen de entrada al proceso y la cantidad de lluvia captada para realizar un balance de cuánto volumen estaría fluyendo desde el proceso a la piscina de emergencia. Al realizar esto, se obtuvo un volumen de 777.600 L/día.
- r : Volumen de salida del proceso (L/día).
En base al supuesto de que parte del volumen de entrada se queda acumulado en el proceso, por lo que no sale todo lo que entra, se estimó que el volumen de salida corresponde a un 95 % del volumen de entrada, es decir, 73.872.000 L.
- μ : Volumen que fluye desde la piscina de emergencia al proceso $p \in P$ (L/día). Para estimar este parámetro, se consideró el volumen de entrada al proceso y la cantidad de lluvia captada para realizar un balance de cuánto volumen estaría fluyendo desde la piscina de emergencia al proceso. Al realizar esto, se obtuvo un volumen de 7.776.000 L/día.
- E : Volumen de la piscina de emergencia (L).
Mediante los datos reportados en el Estudio de Impacto Ambiental de la Planta Valdivia (Celulosa Arauco y Constitución S.A.), se obtuvo que el valor del volumen de la piscina de emergencia, corresponde a 450.000.000 L.

3.3. Eficiencia y Duración

- η_{cp} : Eficiencia del proceso $p \in P$ para el contaminante c (adimensional).
Se definió una escala para determinar si el valor de eficiencia obtenido es significativo para el modelo, o que en el caso contrario, no tenga un impacto. La escala tiene un rango de 0 a 1. Se definió un primer intervalo, desde el 0 hasta el 0,3, el cual indica que la eficiencia del proceso p para el contaminante c es muy baja, por lo que logra eliminar una pequeña parte de este, lo cual no es significativo para el objetivo del modelo. Luego, un siguiente intervalo abierto en 0,3 y cerrado en 0,6 que indica que la eficiencia de ese proceso logra remover parcialmente el contaminante del agua, y finalmente un intervalo abierto en 0,6 y cerrado en 1, el cual significa que el proceso p es capaz de eliminar significativamente el contaminante c del efluente.

| Proceso | DQO | DBO5 | AOX | ClO3 | TSS |
|------------------------------|------|------|------|------|------|
| Planta Valdivia | 0,60 | 0,95 | 0,55 | 0,97 | 0,90 |
| Evaporador al vacío | 0,88 | 0,98 | 0,55 | 0,97 | 0,98 |
| Biopaq ICX | 0,96 | 0,99 | 0,55 | 0,97 | 0,97 |
| TiO2/PS UV-LED | 0,74 | 0,81 | 0,55 | 0,97 | 0,94 |
| FENTON | 0,88 | 0,84 | 0,80 | 0,75 | 0,95 |
| Oxidación Avanzada con Ozono | 0,60 | 0,95 | 0,85 | 0,60 | 0,90 |

Cuadro 1: Eficiencia de remoción de contaminantes por proceso de tratamiento

- λ_c : Concentración inicial diaria del contaminante $c \in C$ que entra al proceso (mg/L).
Los datos asociados al parámetro λ_c fueron determinados a partir del informe publicado por la planta Valdivia. Se tenía la concentración de un contaminante de salida anual en mg/L y la eficiencia original del proceso. Con esto, realizamos una regla de 3 para determinar cuál era la concentración inicial anual para cada contaminante. Finalmente, se dividió este valor por 365 para obtener la concentración inicial diaria del contaminante en mg/L.
- f_p : Tiempo de duración del proceso $p \in P$ (días).
El parámetro f_p fue estimado a partir de lo sugerido por el fabricante, como en el caso del proceso de evaporador al vacío, o realizando una aproximación a una escala industrial, en este caso operando a un caudal de 900 L/s, debido a que los datos de tiempo estaban calculados para una escala de laboratorio para los demás procesos.

3.4. Parámetros Técnicos

- M : Número muy grande (adimensional).
Se definió el parámetro M como un número muy grande que cumpla el rol de un “Big M” para las restricciones 8 y 11 para establecer una cota superior muy alta cuando las variables Q_t y S_t valgan 1 respectivamente, la cual no será alcanzada por el modelo. Esto permite modelar los efectos que tendría si el proceso y la piscina de emergencia llegan a su volumen máximo.
- ϵ : Número muy pequeño (adimensional).
Se definió el parámetro ϵ como un número muy pequeño el cual es útil para las restricciones 8 y 11. Este valor permite evitar el rebalse del proceso y la piscina de emergencia.

4. Resolución del Problema

Para resolver el modelo, se utilizó la interfaz Python-Gurobi, con la cual se escribió el modelo y se le entregó el set de datos descritos anteriormente, que se encuentran en los archivos Excel.

| Compuesto | mg/L salida diarios (sin proceso) | mg/L salientes FENTON |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| DQO | 2,2821 | 0,1141 |
| DBO ₅ | 0,1369 | 0,0822 |
| AOX | 0,1835 | 0,1103 |
| ClO ₃ | 0,0465 | 0,0052 |
| TSS | 0,0465 | 0,1555 |

Cuadro 2: Concentración de contaminantes (mg/L).

Al analizar los resultados, entregados por Gurobi al correr el código, se observa que el Proceso 4 presenta un desempeño superior en términos de eficiencia global en la remoción de contaminantes.

Tal como se muestra en el Cuadro 2, esta tecnología alcanza eficiencias significativamente altas en la eliminación de DQO y AOX, contaminantes clave por su asociación directa con la toxicidad orgánica y los procesos de eutrofización. Esta capacidad lo posiciona como una alternativa altamente sustentable, superando incluso a opciones tecnológicamente avanzadas como Biopaq y el Evaporador, especialmente al considerar la eficiencia promedio ponderada por impacto ambiental.

La comparación entre las concentraciones de contaminantes antes y después del tratamiento refuerza esta evaluación positiva. En el caso de la DQO, se evidencia una reducción cercana al 95 %, lo que da cuenta de una remoción muy eficaz de materia orgánica biodegradable. El clorato, contaminante vinculado a la toxicidad inorgánica, disminuye en más de un 88 %, y los AOX, conocidos por su alta toxicidad y persistencia, se reducen en más de un 39 %. Si bien la DBO₅ también disminuye, su reducción es menos marcada, aunque suficiente para mantenerse bajo umbrales considerados seguros. La única anomalía dentro de los resultados corresponde al incremento observado en los Sólidos Suspendidos Totales (TSS), fenómeno que podría explicarse por la formación de subproductos insolubles propios del mecanismo de oxidación del proceso Fenton. Esta particularidad, sin embargo, no opaca el sólido rendimiento general del proceso.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante la implementación del modelo de optimización en Gurobi ratifican la elección del Proceso 4 como la mejor alternativa, se obtuvo que el valor óptimo de la función objetivo alcanzado es de 12588076900,8 mg/L de contaminante, lo que destaca por su eficiencia ambiental, sino también por su viabilidad operativa y económica dentro de las restricciones del sistema. Además, se presenta un GAP de 0, por lo que el proceso 4 es definitivamente el mejor. Esto confirma su idoneidad como solución integral frente a los desafíos de tratamiento de aguas en la industria papelera.

5. Bibliografía

- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (n.d.). *Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>
- Celulosa Arauco y Constitución S.A. (2012). *Resumen ejecutivo: Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Modernización y Ampliación Planta Arauco (MAPA)*. Servicio de Evaluación Ambiental. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122014/EIA_891034_Resumen_ejecutivo.pdf
- Contreras, R. (2007). *El conflicto ambiental en el Santuario del Río Cruces y la planta de celulosa Valdivia*. Mapuche.info. <https://mapuche.info/archivo/mapuint/contreras070701.pdf>
- García Miranda, F. G., & Miranda Rosales, V. (2018). Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. En J. Gasca Zamora (Coord.), *Impacto socio-ambiental, territorios sostenibles y desarrollo regional desde el turismo* (Vol. 2). Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C. <https://ru.iiiec.unam.mx/4269/>
- González, K., & Roldán, S. (2014, noviembre 1). *A diez años de la muerte de los cisnes*. La Tercera. <https://www.latercera.com/noticia/a-diez-anos-de-la-muerte-de-los-cisnes/>
- Habit, E., Górski, K., Alò, D., Ascencio, E., Astorga, A., Colin, N., Contador, T., de los Ríos, P., Delgado, V., Dorador, C., Fierro, P., García, K., Parra, Ó., Quezada-Romegialli, C., Ried, B., Rivera, P., Soto-Azat, C., Valdovinos, C., Vera-Escalona, I., & Woelfl, S. (2019). Biodiversidad de ecosistemas de agua dulce. En P. A. Marquet, J. A. Lagos, J. A. Fernández, & C. A. Moreno (Eds.), *Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones* (pp. 1–50). Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación. https://minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/d1/b4/d1b48af9-dcb8-4437-9c02-cd3c5b534a02/biodiversidad_de_ecosistemas_de_agua_dulce.pdf
- Lagos, P. (2006). *Impacto ambiental de la planta de celulosa Valdivia en el Santuario de la Naturaleza Carlos Anwandter* [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]. Universidad de Concepción, Programa de Investigación GIBA. <https://eula.udec.cl/giba/wp-content/uploads/2017/09/tesis-pablo-lagos-2006.pdf>
- Lara Figueroa, H. N., & García Salazar, E. M. (2019). Prevalencia de enfermedades asociadas al uso de agua contaminada en el Valle del Mezquital. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 7(21), 91–108. <https://doi.org/10.22201/enes1.20078064e.2019.21.69636>
- Medina Jaraquemada, F. J. (2013). *Análisis econométrico del turismo receptivo en Chile* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114165/Tesis%20-%20Francisco%20Medina%20Jaraquemada.pdf?sequence=4>
- Payment, P. (2003). Health effects of water consumption and water quality. *Handbook of Water and Wastewater Microbiology*, 209–219. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7150002/>
- SEA. (2012). *Resumen ejecutivo del Estudio de Impacto Ambiental: Planta de Celulosa Valdivia*. Servicio de Evaluación Ambiental. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122014/EIA_891034_Resumen_ejecutivo.pdf

- SEA. (2012). *Descripción del proyecto: Planta de Celulosa Valdivia*. Servicio de Evaluación Ambiental. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122014/EIA_891034_Descripcion_del_proyecto.pdf
- Vasconi, P. (2006). *CELCO: El caso de la planta Valdivia (APP N° 35)*. Fundación Terram. <https://biblioteca.cehum.org/bitstream/CEHUM2018/1386/1/Vasconi.%20APP%20N%2035>
- Weather Atlas. (s.f.). *Anual y mensual del tiempo - Valdivia, Chile*. Weather Atlas. <https://www.weather-atlas.com/es/chile/valdivia-clima>
- Diario Financiero. (s.f.). *SMA abre proceso de sanción contra Celulosa Arauco por incumplimientos*. Diario Financiero. <https://www.df.cl/empresas/actualidad/sma-abre-proceso-de-sancion-contra-celulosa-arauco-por-incumplimientos>
- Tercer Tribunal Ambiental. (2023, 14 de agosto). *Tribunal Ambiental de Valdivia acogió parcialmente reclamación de CELCO contra millonaria multa de la SMA*. Tercer Tribunal Ambiental. <https://3ta.cl/noticias/tribunal-ambiental-de-valdivia-acogio-parcialmente-reclamacion-de-celco-contra-millonaria-mult>
- Economía y Negocios. (2006, 16 de marzo). *Celco pagó \$614 millones a operadores turísticos para evitar juicio por daño ambiental*. Economía y Negocios. <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=28011>
- Bioplastic. (s.f.). *Plantas de tratamiento*. Bioplastic. <https://www.bioplastic.cl/categoria/plantas-de-tratamiento>
- New Calgon. (s.f.). *Industria del papel*. New Calgon. <https://www.newcalgon.com/industrias/papel/>
- Condorchem Envitech. (s.f.). *Tratamiento de aguas residuales en la industria papelera*. Condorchem Envitech. <https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-aguas-residuales-en-la-industria-papelera/>
- Condorchem Envitech. (s.f.). *Evaporadores ENVIDEST MVR FC*. Condorchem Envitech. <https://condorchem.com/es/evaporadores/envidest-mvr-fc/>
- Paques. (s.f.). *Tratamiento de aguas residuales en la industria papelera*. Paques. <https://www.paquesglobal.com/es-es/sectores/tratamiento-de-aguas-residuales-en-la-industria-papelera>
- Sainsons Paper Industries, Paques India, & Knowledge Integration System. (s.f.). *Sainsons Paper – Biopaq ICX and CBG*. <https://cdn.opptylab.com/hg/assets/sainsons-paper-biopaq-icx-and-cbg.pdf>
- Martínez, F. J., & Romero, R. (2006). *Aplicación del proceso Fenton a la decoloración de efluentes de la industria gráfica*. Ingeniería Química, (472), 132–137. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3688151>
- EnviroModeling. (s.f.). *Multas por incumplimientos ambientales en Chile*. EnviroModeling. <https://enviromodeling.cl/multas-por-incumplimientos-ambientales-en-chile/>
- Wang, Y., Wang, Y., Zhang, Y., & Wang, Y. (2019). *A novel method for wastewater treatment using advanced oxidation processes*. Journal of Environmental Management, 231, 1–10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582018310243>
- Jufu Water Technology Co., Ltd. (s.f.). *Jufu Water Technology Co., Ltd.*. Jufu Water Technology Co., Ltd. <https://jufuwater.com/>