



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

# “Evaluación técnico-económica de la cadena de suministro del ácido sulfúrico en Codelco 2024-2032”

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

FELIPE MAXIMILIANO DE LA BARRA GARCIA

PROFESOR GUÍA:  
RENE ESQUIVEL CABRERA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

OMAR CERDA INOSTROZA  
RODOLFO URRUTIA URIBE

SANTIAGO DE CHILE  
2023

## RESUMEN EJECUTIVO

Codelco es una empresa estatal autónoma con una larga trayectoria de 50 años en la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos. La compañía se dedica principalmente a producir y comercializar cátodos de cobre grado A, y es actualmente la principal productora en el mundo, con una producción anual de 1.7 millones de toneladas métricas de cobre fino, lo que representa el 31% de la producción a nivel nacional y el 8% a nivel mundial.

La división Casa Matriz es el área de la compañía donde se llevará a cabo el trabajo, específicamente en la Vicepresidencia de Comercialización, que cuenta con tres áreas: operaciones comerciales, ventas y operaciones logísticas.

Durante los últimos años, el mercado del ácido sulfúrico en Chile ha destacado por su condición deficitaria, principalmente debido al gran consumo proveniente de la producción hidrometalúrgica de cobre. Esto ha llevado a que el país dependa fuertemente de las importaciones de este insumo.

Para abordar este problema, se realizó un proceso de levantamiento de la cadena, se obtuvo una comprensión profunda de su funcionamiento y sus desafíos. Para validar las propuestas de mejora, se realizó una simulación completa que, al ser contrastada con datos reales, evidenció una sólida coincidencia entre los resultados teóricos y las situaciones observadas en la práctica.

En este contexto, se evaluó el desempeño de la cadena en distintos escenarios y periodos, con un enfoque específico en las zonas de Mejillones, Zona Centro y Zona Sur. Los resultados subrayan la importancia crítica de considerar la expansión de la capacidad en puntos clave, especialmente en el Puerto de Mejillones, donde se identificó la necesidad de incrementar la capacidad en 22,000 toneladas métricas (TM) para garantizar un flujo óptimo de materiales en los años 2024-2025 y 2026-2032.

La evaluación concluye que la expansión de la capacidad en el Puerto de Mejillones es esencial, con un costo anual de arrendamiento de 1.3 millones de dólares, una inversión justificada frente a los costos operativos resultantes de la interrupción de la producción. Se destaca la eficacia del modelo de simulación en la toma de decisiones estratégicas informadas y su aplicabilidad en diversas industrias con cadenas de suministro similares.

## **Dedicatoria**

A la memoria imborrable de mi padre, aunque ya no esté físicamente presente, he sentido su apoyo y guía incondicional en cada paso de mi vida.

A mi madre, agradecimiento por su presencia en cada decisión que he tomado y por sus sabios consejos que han iluminado mi camino.

A mis hermanos y "hermanos", a quienes les debo la singularidad de este trayecto, su apoyo ha transformado este camino en algo verdaderamente significativo.

A mi tía, compañera, por su inquebrantable apoyo.

Y a todos aquellos que estuvieron conmigo a lo largo de esta travesía.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. En primer lugar, a mis padres, cuyo apoyo incondicional y aliento constante han sido la base de mi perseverancia en todos los ámbitos.

A mis abuelos, quienes siempre han sido fuentes de sabiduría y motivación, aportando experiencias valiosas que enriquecieron mi camino académico. A mis hermanos, por su constante respaldo y compañía, formando parte esencial de este viaje.

Agradezco profundamente a mis amigos, en especial a aquellos que me acompañaron en estos últimos instantes, su amistad ha sido un pilar fundamental, tanto en los buenos como en los difíciles momentos.

A los profesores que me acompañaron en este recorrido, agradezco su guía, enseñanzas y dedicación.

Además, quiero expresar mi gratitud a aquellos que colaboraron conmigo en mi experiencia laboral en Codelco.

En resumen, cada persona mencionada que de una o otra forma me acompañaron en el proceso y culminación de esta etapa.

# Tabla de contenido

<b>I ANTECEDENTES GENERALES.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Características de la empresa.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Estructura organizacional.....	2
1.1.2 Misión y objetivos.....	3
1.1.3 Productos o servicios.....	4
1.1.4 Clientes de la organización.....	7
1.1.5 Dimensiones de actividades realizadas por la organización.....	7
1.1.6 Diferenciación y ventaja competitiva.....	8
<b>1.2 Mercado y/o Marco Institucional.....</b>	<b>9</b>
1.2.1 Actores relevantes en la organización.....	9
1.2.2 Regulaciones relevantes.....	9
1.2.3 Tendencias en el mercado y sus efectos sobre la organización.....	10
1.2.4 Desempeño Organizacional.....	11
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>13</b>
2.1 Información del área de trabajo.....	13
2.2 Identificación del problema.....	14
2.3 OBJETIVOS.....	16
2.4 MARCO CONCEPTUAL.....	17
2.5 METODOLOGÍA.....	18
2.6 ALCANCES.....	19
<b>3. Análisis de mercado.....</b>	<b>21</b>
3.1 Mercado Chileno del ácido sulfúrico al año 2031.....	21
3.2 Demanda 2024-2032 Codelco.....	27
3.3 Producción 2024-2032 Codelco.....	28
<b>4. Modelamiento.....</b>	<b>30</b>
4.1 Construcción del modelo conceptual.....	30
4.1.1 Almacenamiento.....	30
4.1.2 Modos de transporte.....	31
4.1.3 Análisis de flujo.....	34
4.2 Análisis exploratorio de datos.....	38
4.3 Especificación del modelo.....	40
4.4 Implementación del modelo.....	41
4.5 Validación y verificación.....	42
4.6 Escenarios.....	44
<b>5. Resultados.....</b>	<b>45</b>
<b>6. Costo de implementación.....</b>	<b>56</b>
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>57</b>
<b>8. Recomendaciones futuras.....</b>	<b>58</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>59</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>61</b>
Anexo A. Divisiones de Codelco.....	61
Anexo B. Diagrama de producción de sulfuros.....	61
Anexo D. Cierre de programación ácido 2022.....	62
Anexo E. Simulación.....	62
Anexo F. Levantamiento infraestructura.....	63
Anexo G. Producción diaria de ácido por división.....	64

## Índice de tablas

<b>Tabla 1: Excedentes y aportes al fisco por año.....</b>	<b>11</b>
<b>Tabla 2: Cantidad de viajes necesarios de trenes y camiones.....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 3: Nivel de confianza Cap Puertos Mejillones 2024-2025 en TM.....</b>	<b>45</b>
<b>Tabla 4: Nivel de confianza Cap Puertos Mejillones 2026-2032 en <sup>TM</sup>.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 5: Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 6: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabla 7: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 8: Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabla 9: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM.....</b>	<b>50</b>
<b>Tabla 10: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 11: Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 12: Nivel de confianza Cap Mejillones 2024-2025 enTM.....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 13: Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabla 14: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM.....</b>	<b>54</b>

## índice de figuras

Figura 1: Organigrama Codelco.....	3
Figura 2: Cátodos de cobre.....	4
Figura 3: Concentrado de cobre.....	4
Figura 4: Ánodos de cobre.....	5
Figura 5: Trióxido de molibdeno.....	5
Figura 6: Ácido sulfúrico.....	6
Figura 8: Mercado del cobre.....	7
Figura 9: Producción de cobre por año y divisiones.....	8
Figura 10: Producción de cobre por país 2021.....	10
Figura 11: Balance ácido sulfúrico al 2031.....	21
Figura 12: Balance ácido sulfúrico región de Tarapacá y Arica-Parinacota al 2031.....	22
Figura 13: Balance ácido sulfúrico región de Antofagasta al 2031.....	23
Figura 14: Balance ácido sulfúrico región de Atacama al 2031.....	24
Figura 15: Balance ácido sulfúrico región centro-sur al 2031.....	25
Figura 16: Consumo proyectado ácido sulfúrico Codelco al 2032.....	27
Figura 17: Producción proyectada ácido sulfúrico Codelco al 2031.....	28
Figura 18: Alpaca.....	31
Figura 19: CONCON trader.....	32
Figura 20: Guanaco.....	32
Figura 21: Camion para transporte de ácido sulfúrico.....	33
Figura 22: Tren de carga ácido sulfúrico.....	33
Figura 23: Logística Ácido sulfúrico.....	37
Figura 24: validación acumulado real 2022 vs acumulado simulacion 2022.....	43
Figura 25: Distribución máximos en puertos de mejillones.....	46
Figura 26: Distribución máximos en puertos de mejillones.....	46
Figura 27: Distribución máximos Zona Centro.....	47
Figura 28: Distribución máximos en Zona Sur.....	48
Figura 29: Distribución máximos puertos mejillones.....	49
Figura 30: Distribución máximos Zona Centro.....	49
Figura 31: Distribución máximos Zona sur.....	50
Figura 32: Distribución máximos puertos en mejillones.....	51
Figura 33: Distribución máximos Zona Centro.....	52
Figura 34: Distribución máximos puertos en Mejillones.....	53
Figura 35: Distribución máximos Zona Centro.....	53
Figura 36: Distribución máximos Zona Sur.....	54
Figura 37: Resultados exportación San antonio.....	55

## **I ANTECEDENTES GENERALES**

### **1.1 Características de la empresa**

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, conocida como Codelco, es una empresa estatal autónoma dedicada a la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, produciendo y comercializando principalmente cátodos de cobre grado A [1]. Fue creada el 28 de febrero de 1976 con la finalidad de agrupar las sociedades existentes en una sola empresa, minera, industrial y comercial, con personalidad jurídica y patrimonio propio, de duración indefinida, que se relaciona con el Gobierno a través del Ministerio de Minería y se rige por las normas del Decreto Ley 1.350 de 1976, las de sus estatutos y por las disposiciones del derecho común en cuanto fueran compatibles con lo dispuesto en estas normas.

En 2022, la producción de Codelco alcanzó un total de 1.445.662 toneladas métricas de cobre fino (tmf), lo que representa una caída de 10,7% respecto al año anterior que tuvo una producción total de 1.727.862 tmf [2]. Esta cifra incluye la participación en Minera El Abra y en Anglo American Sur S.A, además de lo producido por los propios yacimientos. Esta producción equivale al 8% de la producción de cobre de mina a nivel mundial y al 30% a nivel nacional.

Codelco opera ocho centros de trabajo ubicados entre la región de Antofagasta y la región del Libertador General Bernardo O'Higgins coordinados desde la Casa Matriz, ubicada en Santiago de Chile [3]. Entre sus divisiones se encuentran:

- División Radomiro Tomic, ubicada en Calama, Región de Antofagasta.
- División Chuquicamata, ubicada en Calama, Región de Antofagasta.
- División Gabriela Mistral, ubicada en Sierra Gorda, Región de Antofagasta.
- División Ministro Hales, ubicada en Calama, Región de Antofagasta.

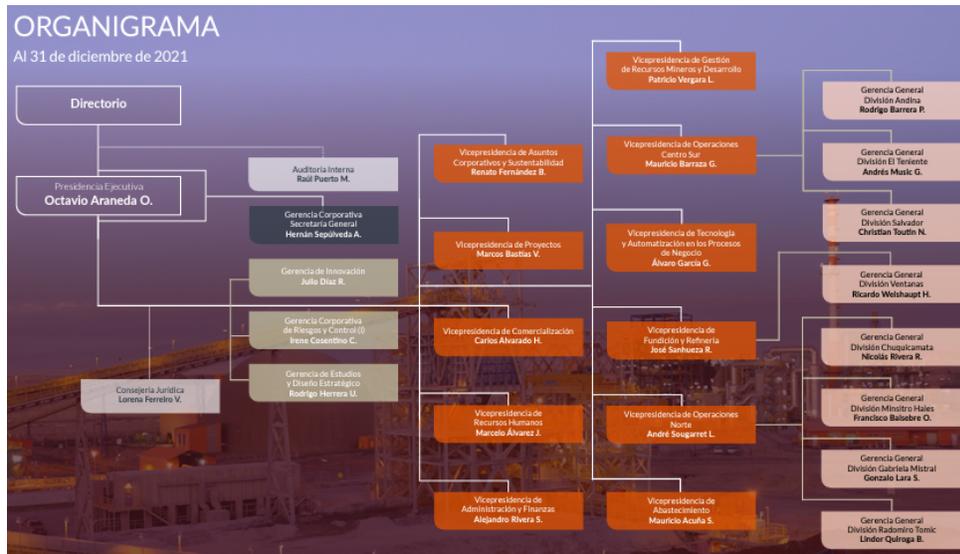
- División Salvador, ubicada en Diego de Almagro, Región de Atacama.
- División Andina, ubicada en Los Andes, Región de Valparaíso.
- División El Teniente, ubicada en Machalí, Región del Libertador Bernardo O'Higgins.
- División Ventanas, ubicada en Puchuncaví, Región de Valparaíso.

### **1.1.1 Estructura organizacional**

Según lo establecido en el artículo 10 del Decreto Ley N° 1350 y en los artículos 25 y 26 de los Estatutos de la Corporación, la dirección superior y administración de la empresa son responsabilidad del Directorio y del presidente ejecutivo. El Directorio tiene la función de liderar y supervisar la empresa, mientras que el presidente ejecutivo, nombrado por el Directorio, es encargado de ejecutar los acuerdos del directorio y supervisar todas las actividades productivas, administrativas y financieras de la empresa, teniendo las facultades que el Directorio le haya delegado. Las actividades de la empresa son gestionadas a través de vicepresidencias y divisiones productivas, con un grupo de ejecutivos de Staff que reportan directamente al presidente ejecutivo, siguiendo los criterios de organización interna que han sido establecidos por él en las resoluciones correspondientes.[4]

En cuanto al personal, Codelco cuenta con 214 ejecutivos, 4068 profesionales y 10809 de carácter operativo, lo que se traduce en un total de 15.896 trabajadores de personal propio en todos los centros de trabajo a nivel nacional.[5]

Relevante a la Vicepresidencia de comercialización, el vicepresidente, Carlos Alvarado, es quién dirige todas las operaciones del área. Bajo él se encuentra el gerente de comercialización de cobre refinado, gerente de comercialización de subproductos y el gerente de servicios comerciales, a continuación el organigrama:



**Figura 1: Organigrama Codelco.**

### 1.1.2 Misión y objetivos

La misión de Codelco es desplegar, de manera responsable y con excelencia, toda su capacidad de negocios mineros y relacionados en Chile y en el mundo, con el propósito de maximizar en el largo plazo su valor económico y su aporte al Estado. Enfatizando una organización de alto desempeño, la participación, la innovación creativa y el conocimiento de las personas en permanente desarrollo [1].

Además, la empresa tiene como objetivo ser líder en el mercado del cobre, tanto en términos de producción como de rentabilidad, y contribuir al desarrollo económico y social de Chile y del mundo, en un marco de sustentabilidad y respeto por el medio ambiente.

Codelco también ha desarrollado la iniciativa C +, que busca mejorar continuamente las prácticas de la empresa y posicionarla como una empresa relevante a nivel nacional e internacional.

### 1.1.3 Productos o servicios

Codelco a nivel nacional tiene productos que se clasifican en las siguientes 3 categorías:

Productos refinados:

- Cátodos

Es el producto procesado desde la extracción del mineral, hasta la electro refinación electrolítica, la cual permite obtener cátodos de cobre de 99,99% de pureza.



**Figura 2: Cátodos de cobre**

Productos no refinados:

- Concentrados

Los concentrados de cobre son el primer producto disponible para la comercialización en la producción de cobre, está compuesto aproximadamente en partes iguales por cobre, fierro y azufre. Este material constituye la materia prima de todas las fundiciones de cobre, para producir cobre en forma de blister o ánodos y que luego son refinados.



**Figura 3: Concentrado de cobre**

- Blister y ánodos

El cobre blister y anódico es un material con una pureza aproximada del 99,5 por ciento, el que es utilizado para la producción de cobre de alta calidad como el cobre refinado a fuego (RAF) y los cátodos de cobre.



**Figura 4: Ánodos de cobre**

Subproductos:

- Molibdeno

El molibdeno es un subproducto que se obtiene del concentrado de cobre mediante el concentrado de molibdeno (bisulfuro de molibdeno  $\text{MoS}_2$ , este material es sometido al proceso de tostación para eliminar el azufre que posee y finalmente el producto que comercializa Codelco es el trióxido de molibdeno.



**Figura 5: Trióxido de molibdeno**

- Ácido sulfúrico

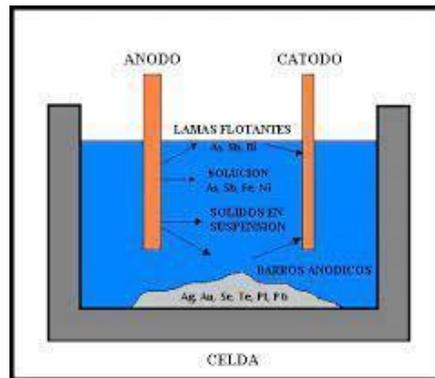
Este subproducto es producido a partir de los gases con contenido de azufre que emanan de los hornos de fusión de concentrados de cobre son captados y conducidos a plantas de limpieza y tratamiento, que permiten obtener la producción de ácido sulfúrico.



**Figura 6: Ácido sulfúrico**

- **Barros anódicos**

Los barros anódicos son el producto generado por la fabricación de cátodos de cobre con 99.99 por ciento de pureza en el proceso de electrorefinación, este “barro” contiene metales preciosos como plata, oro, platino y paladio.



**Figura 7: Proceso de electrorefinación y barro anódico en el fondo**

### 1.1.4 Clientes de la organización

Codelco cuenta con diversos clientes a nivel mundial, los que se clasifican según los mercados continentales. En el mercado asiático, los principales clientes de Codelco son China, Corea del Sur y Japón. En América, los principales clientes se encuentran en Estados Unidos, Brasil y Chile. En Europa, Codelco tiene como principales clientes a Alemania, España e Italia, mientras que en el mercado africano sus principales clientes son Sudáfrica y Egipto. Finalmente, en Oceanía, Codelco tiene como principales clientes a Australia y Nueva Zelanda [6].

Estos clientes se orientan en su mayor cantidad a fabricantes de semielaborados que utilizan el cobre refinado. específicamente en el año 2021 el 46.1% de las ventas fue al continente asiático, 21.7% a Sudamérica, 17.4% a Norteamérica y 14.8% a Europa.[6]

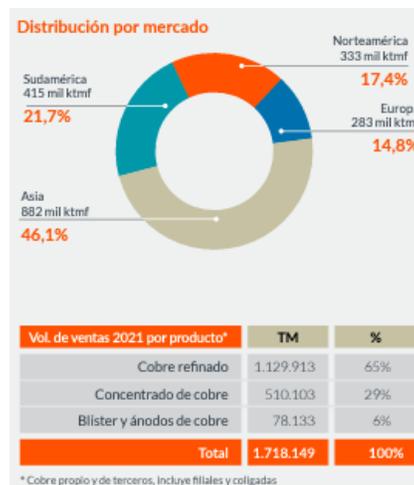


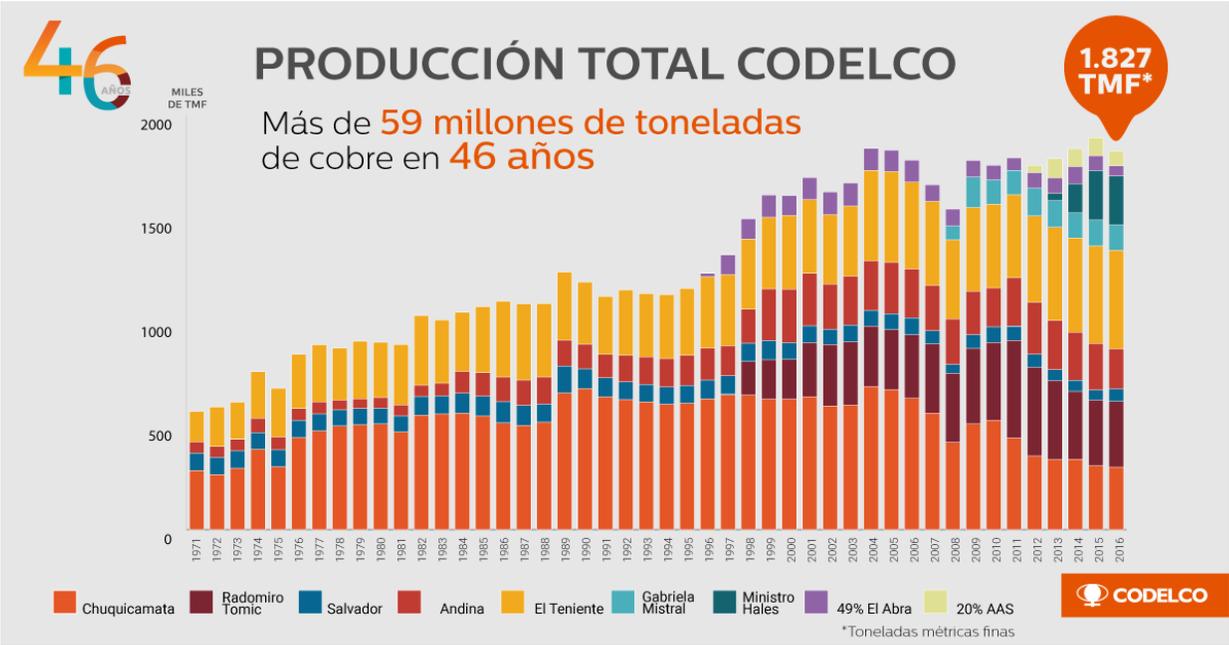
Figura 8: Mercado del cobre.

Fuente: memoria 2021 Codelco

### 1.1.5 Dimensiones de actividades realizadas por la organización

En la figura 9 es posible observar como la producción ha ido al alza hasta el año 2016 donde se obtuvo una producción de 1.8 millones de toneladas de cobre, y en los últimos años se ha mantenido en esa cifra, en el año 2020 llegó a la cifra de 1.6 millones de toneladas de cobre, para llegar a 1.7 TMF al año 2021. Además, en el año 2021 Codelco generó excedentes por US\$ 7.394 millones, cifra 256% superior al ejercicio anterior (explicado por el alza de 50% del precio del metal rojo respecto al año anterior, Según datos de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), el precio promedio

del cobre en el 2021 alcanzó a US\$ 4,2263 la libra, el mayor promedio anual desde que se llevan registros (1935)) y la segunda más alta de los últimos 10 años, según datos de las memorias anuales de Codelco [6][7][8][9][10].



**Figura 9: Producción de cobre por año y divisiones.**

**1.1.6 Diferenciación y ventaja competitiva**

Codelco es de las empresas con más prestigio a nivel mundial en el rubro de la minería especialmente metalurgia del cobre, gracias a su experiencia, liderazgo, presencia en los mercados internacionales, cuenta con yacimientos importantes a nivel mundial, tecnología a la vanguardia y estabilidad y condiciones favorables para la ejecución de proyectos y negocios mineros.

## **1.2 Mercado y/o Marco Institucional**

### **1.2.1 Actores relevantes en la organización**

En primer lugar, cabe mencionar que la empresa es fiscalizada por la Comisión para el Mercado Financiero, la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) e, indirectamente, por la Contraloría General de la República, a través de Cochilco, además de la Cámara de Diputados.

También se tiene como actores relevantes a cada empresa contratista que opera en los centros de trabajo de Codelco con un total aproximado de 40.000 trabajadores, además de los proveedores, quienes ayudan a cumplir con el éxito en las operaciones en cada uno de los centros de trabajo a nivel nacional.

### **1.2.2 Regulaciones relevantes**

Primero su constitución que se rige bajo el Decreto Ley N° 1.350 de 1976, publicado en Diario Oficial el 28 de febrero de 1976 (última modificación 10-oct-2014 Ley 20.720) Crea la Corporación Nacional de Cobre.

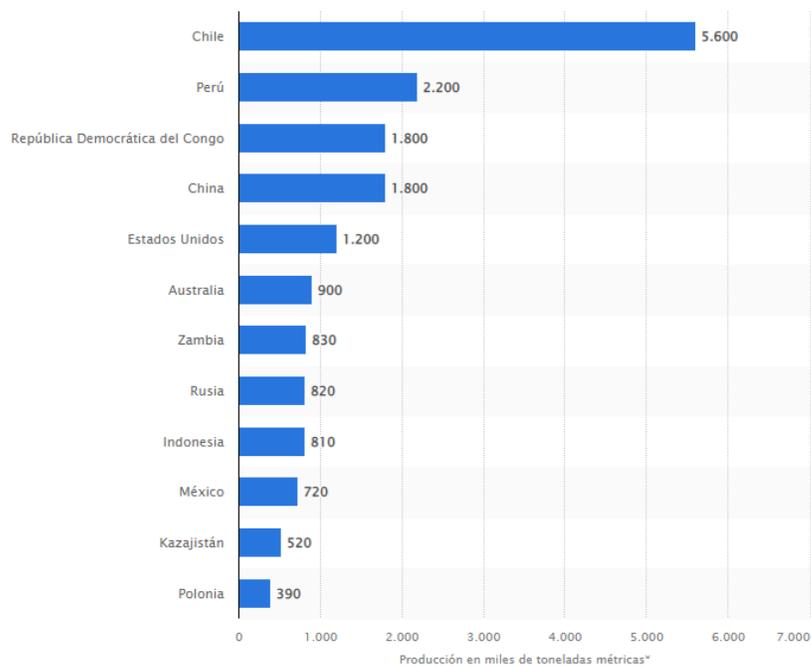
Relevante a las normas sobre responsabilidad y funciones:

- Ley N° 19.137 publicada en Diario Oficial el 12 de mayo de 1992, actualizada por Ley N° 20.392 Sobre explotación de pertenencias mineras de Codelco
- Decreto 3, publicado en Diario Oficial el 4 de julio de 2012 (versión única). Modifica y fija texto refundido de los Estatutos de la Corporación Nacional del Cobre de Chile- Codelco
- Decreto N° 146, publicado en Diario Oficial el 25 de octubre de 1991 (versión única) Estatutos de la Corporación Nacional del Cobre
- Decreto Ley 1.167, publicado en Diario Oficial el 27 de febrero de 1976 (versión única) Consolida la nacionalización de la Gran Minería del Cobre.

De acuerdo con la Ley N° 20.285, sobre Acceso a la Información Pública deben hacer pública y de manera permanente y actualizada antecedentes del marco normativo, dotaciones por área, remuneraciones, estados financieros y otros que son periódicamente sometidos a la fiscalización del Consejo para la Transparencia, según lo que declaran en el marco normativo [11].

### 1.2.3 Tendencias en el mercado y sus efectos sobre la organización

Durante el año 2021, Chile se consolidó como el principal productor mundial de cobre, con una producción total de 5,6 millones de toneladas métricas. En segundo lugar se ubicó Perú, con una producción de 2,2 millones de toneladas. Es importante destacar que la producción global de cobre ha experimentado un aumento significativo en los últimos años, alcanzando alrededor de 20 millones de toneladas anuales desde 2016. Esto representa un incremento de alrededor del 25% en comparación con los niveles registrados en 2006 [12].



**Figura 10: Producción de cobre por país 2021.**

Según el informe realizado por Cochilco[13] para el año 2022 se proyecta una oferta de cobre refinado de 24,7 millones toneladas, esto es un 2,2% más que el año anterior, mientras que la demanda llegaría a 24,6 millones de toneladas, lo que representa un alza de 1,2% más que en 2021, generando un superávit de mercado de 120 mil toneladas de cobre.

En tanto para el año 2023 la oferta de cobre aumentaría 3,2% respecto de 2022, mientras que la demanda lo haría en 2,1%, generando un superávit de 409 mil toneladas de cobre en el mercado.

Cochilco ajustó a la baja la proyección promedio de precio del cobre para 2022 desde US\$4,4 la libra informada en la estimación anterior a US\$4 la libra. Mientras que para 2023 mantuvo la proyección de US\$3,95 la libra del metal. La baja del valor del metal se debe principalmente al aumento de la oferta desde República Democrática del Congo y disminución de la demanda por parte de China.

#### 1.2.4 Desempeño Organizacional

En cuanto al desempeño organizacional es importante ver los resultados que tiene Codelco en los excedentes y aportes al fisco, los datos de la tabla fueron recopilados de los informes financieros y memorias anuales de Codelco.

Año	Excedentes (Millones de USD)	Aportes al fisco(Millones de USD)
2021	5032	2376
2020	2078	1274
2019	1269	1149
2018	2078	1125
2017	2885	2085
2016	1009	896
2015	1872	1517
2014	2278	1982
2013	4161	2980

**Tabla 1: Excedentes y aportes al fisco por año**

**Fuente: creación propia**

Los excedentes se refieren a los ingresos que la compañía ha generado después de deducir sus gastos y deudas, mientras que los aportes al fisco representan los impuestos y otras contribuciones que Codelco ha pagado al Estado.

En general, se puede observar que los excedentes de Codelco han sido variables a lo largo de los años, aunque en promedio han sido positivos. En particular, durante los últimos dos años (2020 y 2021), la empresa ha tenido excedentes significativamente mayores que en años anteriores, lo que sugiere un buen desempeño económico en un contexto de alta demanda y precios del cobre.

Asimismo, los aportes al fisco también han fluctuado en función de las ganancias de la empresa y de la política fiscal del gobierno. En algunos años, como en 2013 y 2017, Codelco ha realizado aportes importantes al fisco, mientras que en otros años, como en 2016 y 2019, los montos han sido menores.

Es importante destacar que la producción de cobre ha sido un factor clave en la generación de excedentes y aportes al fisco por parte de Codelco. A pesar de los desafíos en este ámbito, tales como la disminución de la ley del mineral y problemas operacionales en algunas minas, la compañía ha logrado mantener una producción estable en torno a los 1,7 millones de toneladas métricas anuales.

En resumen, los datos de la tabla evidencian que Codelco ha experimentado un desempeño variable en términos de excedentes y aportes al fisco durante la última década. A pesar de estas fluctuaciones, la empresa ha logrado mantener, en términos generales, una posición financiera estable y ha realizado contribuciones significativas al desarrollo del país. En el año 2022, Codelco reportó excedentes de \$2.746 millones de dólares. Sin embargo, en el primer semestre de 2023, la tendencia a la baja continuó, reflejándose en un aporte al Fisco de \$770 millones de dólares, lo que representó una reducción del 54% con respecto al año anterior.

## **2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN**

### **2.1 Información del área de trabajo**

El área de trabajo es la división Casa Matriz, específicamente en la Vicepresidencia de Comercialización, en el área de operaciones comerciales. Esta área corresponde a una de las 3 áreas que existen hoy en día en la Vicepresidencia de Comercialización de Cobre Refinado. Por un lado, el área de comercialización de cobre refinado, comercialización de subproductos y servicios comerciales. a continuación el organigrama:

En el área de servicios comerciales, se encuentra el área de operaciones logísticas, donde se realiza el trabajo de memoria, se encargan de realizar las labores de conexión con cada una de las divisiones de Codelco para saber sobre la producción que se alcanzará en cada mes, además se encarga de la administración de contratos creando los documentos con todos los datos pertinentes para el cliente, para Codelco y para la aduana de Chile. Además, las áreas deben estar en completa coordinación con el tráfico portuario en los distintos puntos de exportación con los que cuenta Codelco, además de estar en contacto con las navieras que prestan los servicios a los distintos puntos de exportación.

“La misión del área es maximizar en el corto, mediano y largo plazo el valor de la producción y el retorno de las ventas de Codelco, a través del diseño de una eficiente estrategia de comercialización y la utilización de la fuerza de ventas, tanto corporativa como en sus subsidiarias y agencias en el extranjero, que apoyen nuestra misión. Desarrollar y defender los mercados de Codelco, propendiendo a expandir la demanda y a mejorar el valor de nuestros productos, de manera de aumentar en eficiencia los resultados de su comercialización, de acuerdo con las políticas fijadas por el directorio de la Corporación y las facultades conferidas por el presidente.” [14]

## 2.2 Identificación del problema

Codelco es una empresa minera que opera 8 centros de trabajo a nivel nacional, los cuales cuentan con distintos tipos de minerales y formas de procesarlos según su naturaleza. Entre ellos, se encuentran las divisiones de Chuquicamata, Ministro Hales, Salvador y El Teniente, que utilizan la pirometalurgia, específicamente el proceso de fusión, para obtener cobre. Sin embargo, este proceso genera emisiones de gases a la atmósfera, incluido el anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>), el cual debe ser capturado y transformado en ácido sulfúrico. En Chile, existen regulaciones que exigen a las empresas mineras recuperar al menos el 90% del contenido de azufre del mineral después de la fundición, con el objetivo de reducir la cantidad de dióxido de azufre liberado al ambiente y prevenir la contaminación.

Para cumplir con estas regulaciones, las empresas mineras, incluida Codelco, utilizan procesos de recuperación de azufre para convertirlo en ácido sulfúrico. Este ácido se utiliza en el proceso de lixiviación, donde se riegan las pilas de minerales oxidados. En el caso de Codelco, las divisiones que hacen un uso significativo del ácido sulfúrico son Gabriela Mistral y Radomiro Tomic.

Como se mencionó anteriormente, el ácido sulfúrico es una sustancia peligrosa que requiere ser almacenada en estanques especiales hasta su uso. Sin embargo, este almacenamiento conlleva un alto costo si no hay un flujo constante de utilización del mismo. Además, su almacenamiento en los estanques tiene un límite, lo que puede resultar en paradas operativas de las fundiciones si se alcanza dicho límite.

Por otro lado, si no hay disponibilidad de ácido en las divisiones que explotan óxidos de cobre, el proceso de lixiviación debe detenerse. De manera similar, si los estanques están llenos en las divisiones que explotan sulfuros y necesitan fundir este mineral, también deben detener sus procesos. En ambos casos, la consecuencia es la pérdida significativa de producción del metal rojo, así como el costo adicional de no utilizar la maquinaria y el personal operativo necesario, las que tienen un costo de oportunidad aproximado de 5 millones de dólares por día.

Además, otro factor que puede afectar significativamente la continuidad operativa de las divisiones de Codelco es el cierre de puertos debido a diversos factores. Estos cierres impiden el transporte regular y oportuno del ácido sulfúrico, lo que genera un estrés adicional en la cadena logística de Codelco.

Además, los retrasos en la cadena logística debido a los cierres de puertos pueden generar dificultades en la programación de llegada de los barcos y afectar la planificación de las operaciones mineras. Esto implica una mayor complejidad en la gestión de la cadena de suministro de ácido sulfúrico, ya que se deben realizar ajustes y coordinaciones adicionales para asegurar el flujo constante del ácido y evitar la acumulación excesiva en los estanques.

Actualmente, el mayor flujo de ácido se realiza desde la zona sur (división El Teniente) hacia la zona norte. El ácido sulfúrico producido en El Teniente se transporta en camiones hasta una estación de transferencia en Los Lirios, cerca de Rancagua, donde se transfiere desde los estanques de los camiones a los del ferrocarril. Un convoy ferroviario doble, compuesto por dos locomotoras y 28 vagones, se encarga de transportar el ácido hasta la estación de Barrancas, en el puerto de San Antonio, desde donde se envía por barco hacia el norte del país. Sin embargo, los factores ambientales pueden afectar la programación de llegada de los barcos, lo que a su vez afecta la cadena logística y puede llevar a que los estanques alcancen su límite de capacidad.

Esta situación genera desafíos y gastos adicionales para garantizar la continuidad operativa de las diferentes divisiones y centros de operaciones de Codelco. Estos gastos incluyen pagos por almacenaje adicional, compra de ácido a otras mineras y pagos a otras navieras para priorizar el desembarco del ácido.

En resumen, tanto el almacenamiento inadecuado del ácido sulfúrico como la falta de disponibilidad del mismo pueden ocasionar interrupciones en los procesos productivos, provocando pérdidas considerables en la producción del metal rojo y generando costos adicionales debido a la inutilización de la maquinaria y el personal. Por lo que el problema identificado radica en asegurar la continuidad operativa de las diferentes divisiones de Codelco debido al aumento de excedentes de ácido esperados en los próximos años y los retrasos en la cadena logística, especialmente en los puertos, lo cual tiene un impacto económico en los costos de la empresa.

## 2.3 Objetivos

### Objetivo General:

Realizar un análisis y simulación para la actual cadena de suministro de ácido sulfúrico, con el fin de recomendar a Codelco donde se debe invertir en infraestructura adicional para disminuir los riesgos asociados, en el periodo 2024-2032.

### Objetivos Específicos:

1. Identificar los diferentes puntos de la cadena de suministro de ácido sulfúrico, desde la producción hasta el consumo final, incluyendo los medios de transporte utilizados y los centros de almacenamiento.
2. Evaluar la capacidad de producción y la demanda actual de ácido sulfúrico en cada punto de la cadena de suministro en el periodo 2024-2032.
3. Establecer posibles escenarios futuros de demanda de ácido sulfúrico y evaluar su impacto en la cadena de suministro.
4. Diseñar un modelo de simulación de la cadena de suministro, que incluya la integración de los diferentes medios de transporte, los centros de almacenamiento, los puntos de consumo e integrando las variabilidades de consumo, producción y marejadas.
5. Identificar oportunidades de mejora y optimización de la cadena de suministro, que permitan hacer frente a la disminución de la demanda y aseguren la continuidad operativa de todas las divisiones.

## 2.4 Marco conceptual

El marco conceptual de esta tesis se basa en una serie de conceptos fundamentales en la gestión de operaciones y cadena de suministro, con un enfoque específico en el levantamiento de la cadena de suministro de ácido sulfúrico en Codelco. La metodología se respalda en estos conceptos para llevar a cabo el análisis, la simulación, la validación del modelo y la evaluación económica.

### Concepto de Cadena de Suministro:

La cadena de suministro se define como una red interconectada de procesos que abarca el flujo de materiales, información y recursos financieros desde los proveedores hasta los consumidores finales. Esta definición enfatiza la importancia de la colaboración y coordinación entre los diferentes actores involucrados en la producción y distribución de bienes y servicios [16].

### Gestión de la Cadena de Suministro:

La gestión de la cadena de suministro tiene como objetivo principal optimizar la eficiencia y coordinación a lo largo de todos los procesos involucrados. La colaboración efectiva entre los distintos eslabones de la permite reducir costos, mejorar la satisfacción del cliente y alcanzar una mayor competitividad en el mercado[17][20].

### Análisis de la Cadena de Suministro:

El análisis de la cadena de suministro es esencial para identificar ineficiencias, cuellos de botella y áreas de mejora. Mediante la evaluación detallada de los componentes y procesos de la cadena, se pueden tomar decisiones informadas para optimizar el flujo de materiales y la alineación entre la oferta y la demanda[18].

### Modelos de Simulación en Cadena de Suministro:

Los modelos de simulación son herramientas poderosas para comprender y mejorar la cadena de suministro. Permiten simular diferentes escenarios y evaluar el

impacto de diversas decisiones. La Ley de Little, que relaciona los tiempos de residencia y las tasas de llegada, es esencial para identificar cuellos de botella y optimizar los flujos de materiales [19].

Validacion de Modelos de Simulacion:

La validación de modelos de simulación es un paso crítico para asegurar que el modelo representa con precisión la realidad. Se verifica la coherencia de los resultados simulados comparándolos con datos reales o expectativas razonables. La validación garantiza que el modelo sea una representación fiel del sistema y sus interacciones.

## 2.5 Metodología

La metodología propuesta para la realización de esta tesis sigue un enfoque clásico de implementación de un modelo de simulación. A continuación, se detalla cada etapa de la metodología:

- Definición del problema : En esta fase, se identifica de manera precisa el problema que será abordado mediante la simulación. Los objetivos específicos se establecen y el alcance del problema se delimita para guiar el proceso de investigación.
  
- Antecedentes Generales : En esta sección, se recopilan datos relevantes relacionados con el mercado del ácido sulfúrico a nivel nacional y las proyecciones de producción y consumo por parte de Codelco. Esto se logra a través de reuniones con analistas de Cochilco y los responsables del área de ácido en Codelco.
  
- Modelamiento:
  - ❖ Construcción del modelo conceptual: En esta etapa, se identifican los componentes principales del sistema y sus relaciones. Se utilizan técnicas de modelado, como diagramas de flujo, modelos de bloques o diagramas de transición de estados, para representar el comportamiento del sistema. Por ejemplo, al simular una cadena de suministro, se representarán los diferentes nodos de la cadena, como proveedores, fabricantes,

distribuidores y minoristas, y las relaciones de flujo de materiales o productos entre ellos.

- ❖ Especificación del modelo: En esta etapa, se detallan los elementos del modelo, como las entidades, los eventos, las variables y las relaciones entre ellos. Se definen las reglas y la lógica del sistema.
- ❖ Validación y verificación: Se verifica que el modelo se haya implementado correctamente y se valida su comportamiento comparando los resultados de la simulación con datos reales o expectativas razonables. Se asegura de que el modelo refleje fielmente el sistema real y que los resultados de la simulación sean consistentes con las expectativas establecidas. Si es posible, se comparan los resultados de la simulación con datos históricos.
- Resultados: En esta etapa, se llevan a cabo diferentes experimentos con el modelo para explorar diferentes escenarios y recopilar datos. Se varían los parámetros y las condiciones del sistema para evaluar su impacto en el rendimiento. Se analizan los resultados obtenidos para obtener información y conclusiones relevantes. Se utilizan técnicas estadísticas y visualizaciones para analizar y presentar los datos de manera efectiva.
- Costo de implementación: Se analiza el impacto financiero de las mejoras propuestas en la cadena de suministro. Esto implica realizar un análisis de costos y beneficios para determinar si las mejoras son económicamente viables.

## 2.6 Alcances

El presente proyecto se centra en el área de logística de la vicepresidencia de comercialización de la casa matriz, con el objetivo de analizar y mejorar la cadena de suministro de ácido sulfúrico de Codelco en el horizonte que abarca desde 2024 hasta el 2032.

El enfoque estratégico se orientará hacia la toma de decisiones a largo plazo, considerando opciones como la posible construcción o arriendo de tanques de almacenamiento, contratación de naves y el aumento de la flota de camiones o trenes. Estas medidas tienen como propósito minimizar o evitar los costos operativos derivados de la acumulación o falta de ácido sulfúrico en las instalaciones.

Se limitará el análisis a los puertos ya utilizados, dado que son los únicos con la infraestructura y capacidad necesarias para manipular este tipo de material. Los datos sobre la oferta y demanda de ácido sulfúrico serán extraídos de los informes de hidrometalurgia de Codelco, así como del informe elaborado por Cochilco.

Se espera obtener resultados que brinden posibles soluciones o alternativas a la cadena de suministro actual de ácido sulfúrico en Codelco. Estas soluciones serán evaluadas económicamente, de esta manera, Codelco contará con información precisa y fundamentada para la toma de decisiones respecto al suministro de ácido sulfúrico en cada una de sus divisiones, permitiendo optimizar sus procesos operativos y mitigar posibles inconvenientes.

### 3. Análisis de mercado

#### 3.1 Mercado Chileno del ácido sulfúrico al año 2031

Según el análisis realizado por Cristian Cifuentes González y Victor Garay Lucero en el informe "El Mercado Chileno del Ácido Sulfúrico" publicado por COCHILCO en diciembre de 2022.

Se destaca que a diferencia del informe del año 2021, no se espera que el mercado pase de ser deficitario a excedentario durante el período de análisis. Esto se debe principalmente a la extensión de la vida útil de las faenas hidrometalúrgicas y al aumento del consumo en operaciones actuales debido a factores técnicos, en un contexto de precios del cobre al alza. Estos factores han permitido que los recursos disponibles se conviertan en reservas económicamente extraíbles para las compañías mineras en Chile.

El estudio identifica dos puntos de inflexión en el balance del mercado de ácido sulfúrico. El primero se espera para el año 2024, donde se prevé un incremento en la producción de ácido debido a mejoras operativas en las fundiciones, mientras que el consumo crecerá ligeramente. Esto resultará en una reducción del déficit del mercado en un 13,3%.

El segundo punto de inflexión se observa en 2026, con un aumento del consumo del 5,3%, pero una disminución significativa en la producción debido al cierre de NORACID S.A. A partir de este año, se anticipa una menor necesidad de importación de ácido sulfúrico en el balance, y se proyecta que al final del período de análisis el mercado alcance un estado de excedente. Según las estimaciones, se espera un déficit de menos de mil toneladas de ácido sulfúrico hacia 2031, y se pronostica que el cambio hacia un mercado excedentario se producirá al año siguiente.

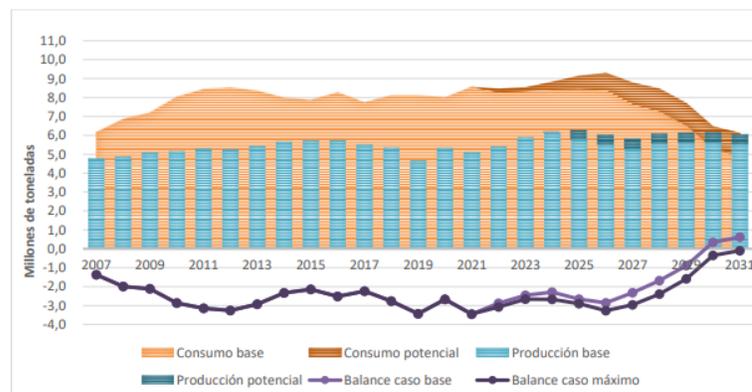
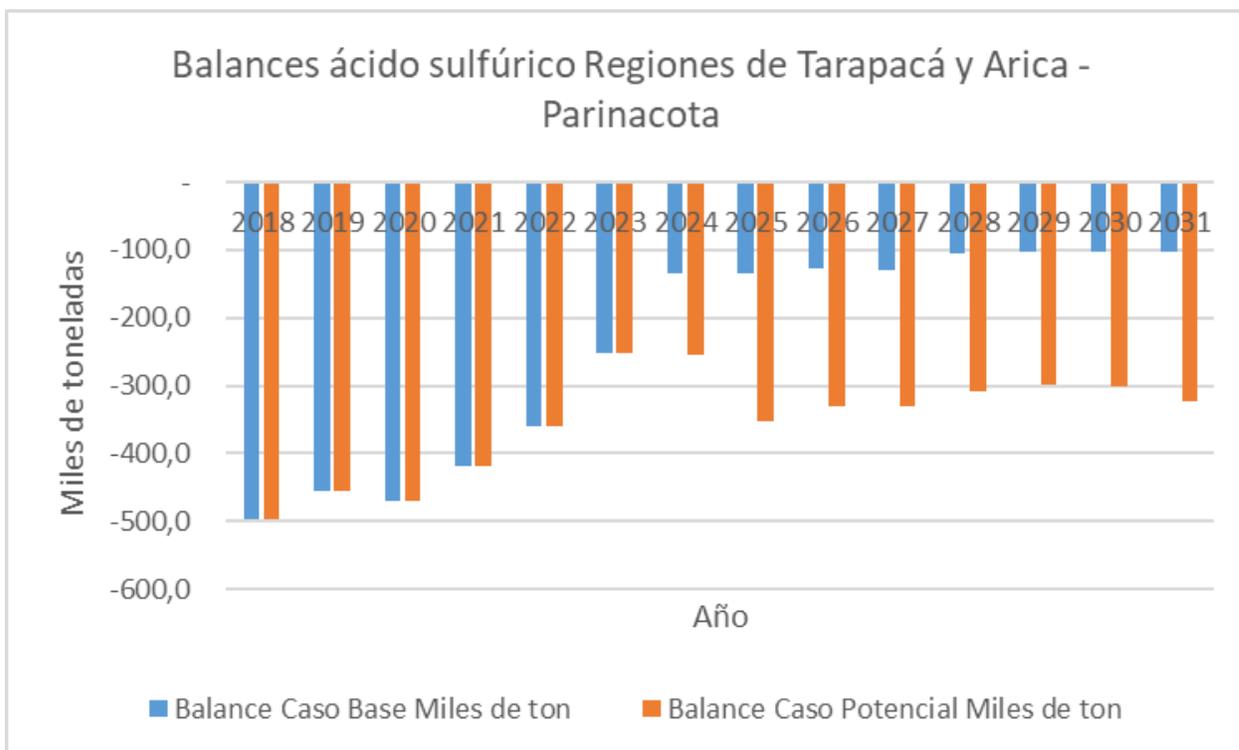


Figura 11: Balance ácido sulfúrico al 2031

Fuente: Cochilco

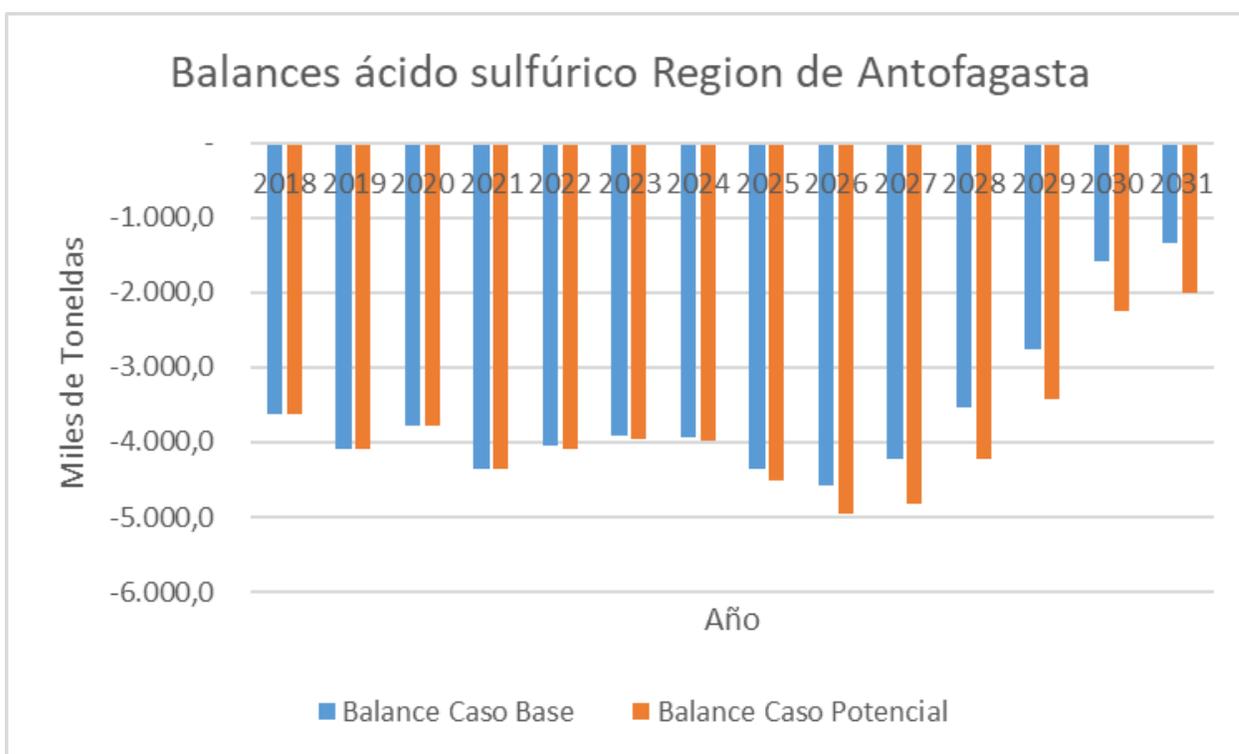
Al examinar el equilibrio por regiones y respaldándose en los datos suministrados por Cochilco, se desprende los siguiente:



**Figura 12: Balance ácido sulfúrico región de Tarapacá y Arica-Parinacota al 2031**

**Fuente: Cochilco**

En la Región de Tarapacá y Arica-Parinacota, se constata que el consumo base ha experimentado una disminución a lo largo de los años, pasando de 495 mil toneladas en 2018 a 101 mil toneladas en 2031. Este saldo negativo durante todos los años refleja la dependencia continua de la importación de productos. En un caso potencial, la producción base no cuenta con datos disponibles, pero se proyecta que la región comenzará a producir 30 mil toneladas de un producto a partir de 2023. Esta producción potencial crecerá gradualmente, alcanzará 100 mil de toneladas en 2026 y se mantendrá constante en años posteriores. A pesar de este incremento, el consumo potencial también se elevó a partir de 2024, llegando a su punto máximo de 321 mil de toneladas en 2031.

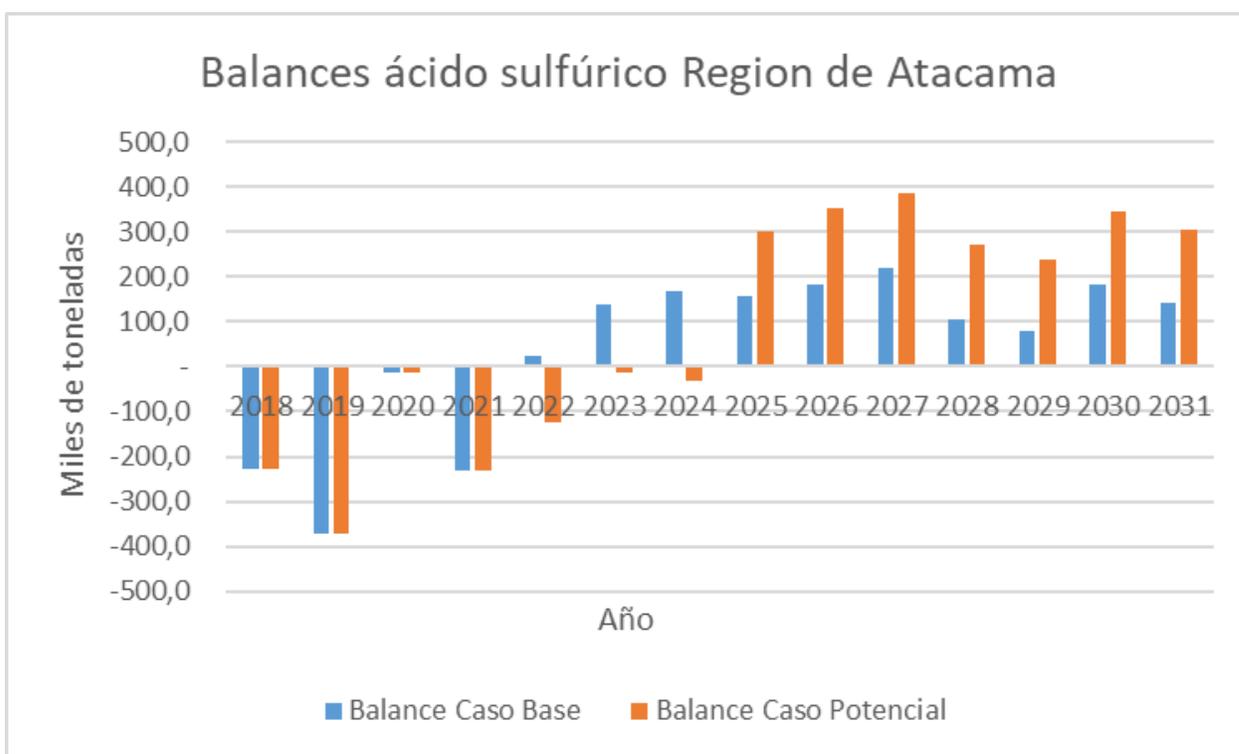


**Figura 13: Balance ácido sulfúrico región de Antofagasta al 2031**

**Fuente: Cochilco**

En la Región de Antofagasta, se constata en el caso base un incremento progresivo en la producción base a lo largo del tiempo, alcanzando su punto máximo en 3,050 ktm en 2024, seguido de una disminución gradual. En términos de consumo base, se observa una tendencia decreciente de 6,262 ktm en 2018 a 3,670 ktm en 2031. La presencia de un balance negativo en todos los años indica que la región sigue dependiendo de la importación de productos para equilibrar su demanda.

En el caso potencial, la producción base se mantiene constante en relación con el caso base. El consumo base permanece invariable en los años venideros. Sin embargo, el consumo potencial muestra un aumento progresivo a partir de 2024, alcanzando su valor máximo en 4,332 ktm en 2031. Pese a estas proyecciones, se observa un desequilibrio negativo en todos los años en el caso potencial, reforzando la noción de que la región seguirá dependiendo de las importaciones para satisfacer su demanda, incluso en el escenario potencial considerado.

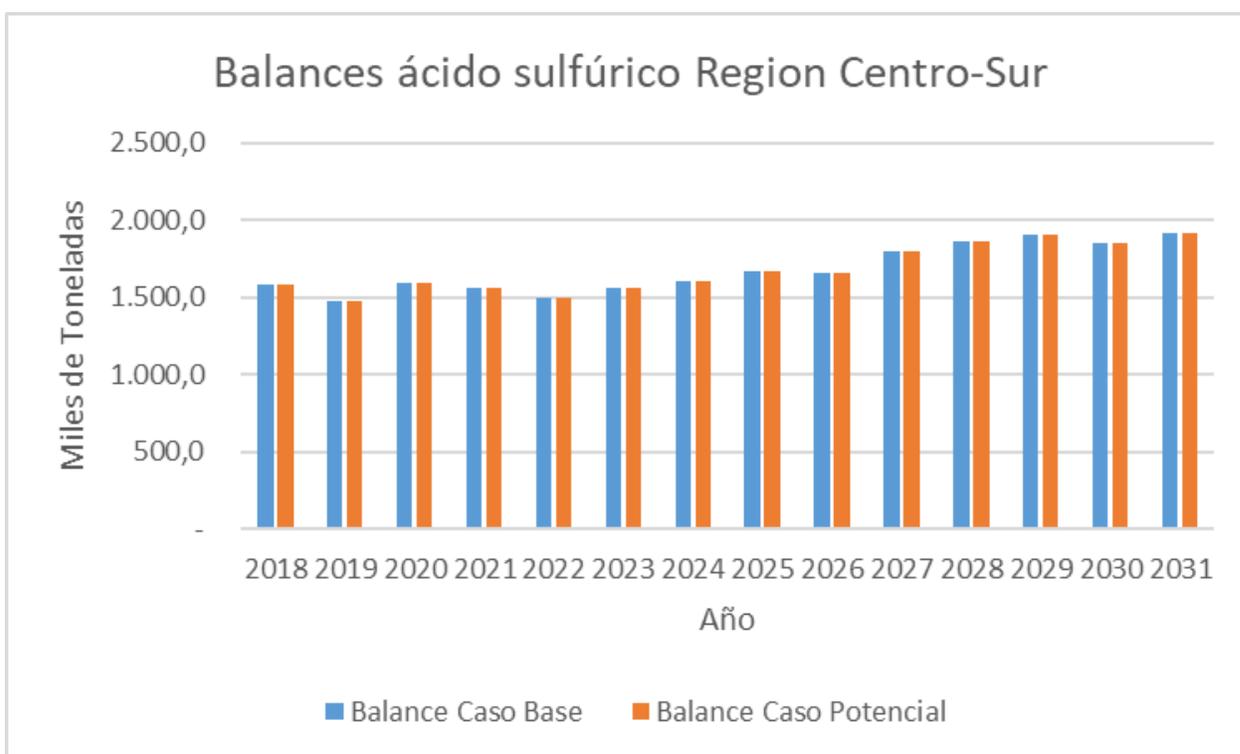


**Figura 14: Balance ácido sulfúrico región de Atacama al 2031**

**Fuente: Cochilco**

En la Región de Atacama, en el caso base, se evidencia una escasez en la producción base a lo largo de los años, caracterizada por fluctuaciones tanto en incrementos como en disminuciones. En términos generales, se observa un balance positivo, lo que sugiere que la región presenta un excedente de producción y la capacidad de exportar productos a otras regiones.

En el caso potencial, la base de producción permanece inalterada con respecto al caso base, y no se brindan datos para la producción potencial. El consumo base se mantiene constante en los años venideros. Sin embargo, el consumo potencial experimentará un aumento progresivo a partir de 2024, llegando a su punto máximo en 1,200 ktm en 2031. A pesar de este incremento en la demanda proyectada, se advierte un balance positivo en todos los años para el caso potencial. Esto subraya que incluso con el aumento en el consumo potencial, la región seguirá manteniendo un excedente de producción y la capacidad para exportar productos a otras regiones.



**Figura 15: Balance ácido sulfúrico región centro-sur al 2031**

**Fuente: Cochilco**

En la Región del Centro Sur, se observa un notable incremento en la producción base a lo largo de los años, alcanzando su punto máximo de 2.800 ktm en 2024, seguido de una disminución gradual en el caso base. Por otro lado, el consumo base experimenta una tendencia descendente, pasando de 5.100 ktm en 2018 a 3.500 ktm en 2031.

En el escenario potencial, los valores de la producción base se mantienen constantes en comparación con el caso base, y no se disponen de datos para la producción potencial. Asimismo, el consumo base se mantiene estable en los años siguientes. Sin embargo, el consumo potencial presenta un aumento progresivo a partir de 2024, alcanzando su punto máximo en 4.200 ktm en 2031.

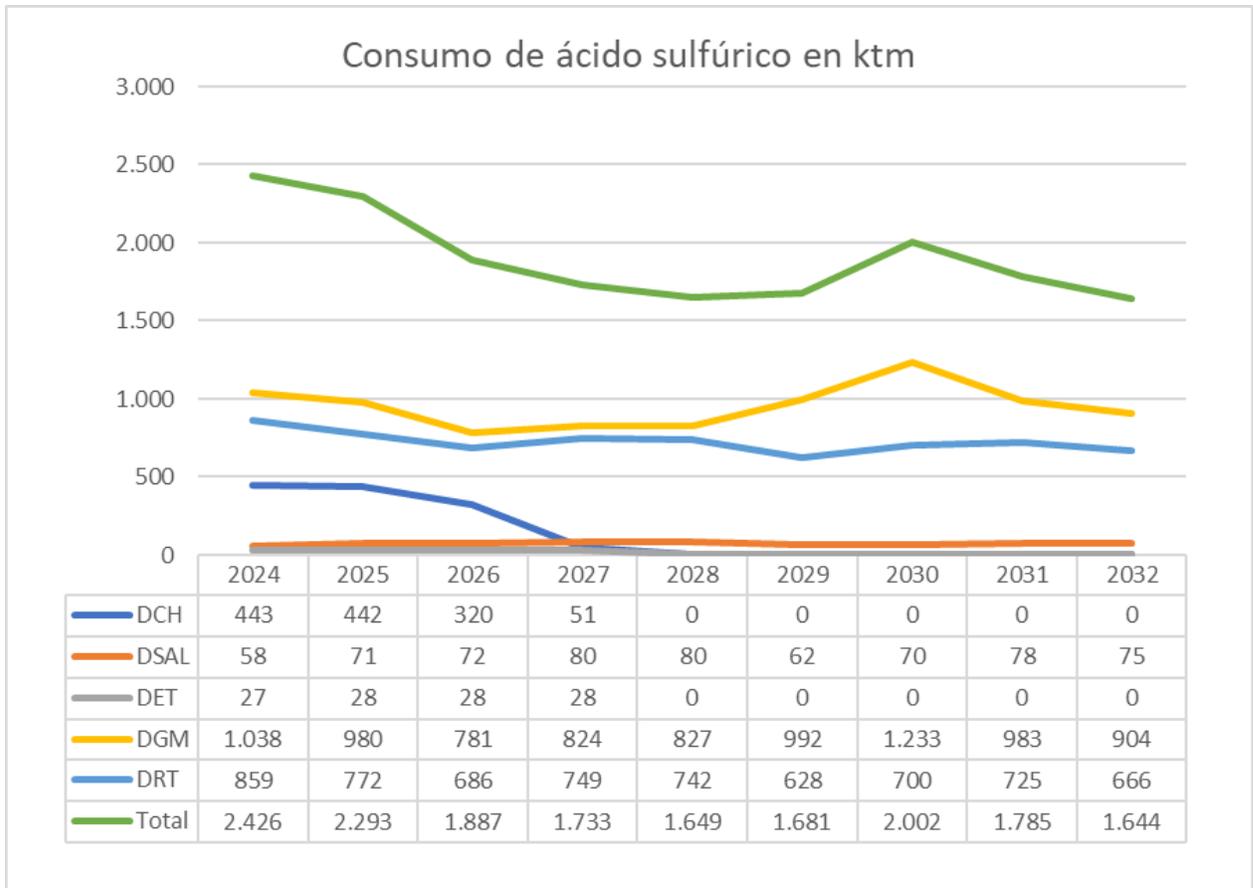
En conclusión, la Región del Centro Sur exhibe una característica excedentaria a lo largo del período analizado, siendo capaz de mantener una producción consistente y, a pesar del aumento proyectado en el consumo potencial, sigue manteniendo un excedente de producción. Este escenario refuerza la idea de que la región desempeña un papel crucial como proveedora para otras áreas, contribuyendo al equilibrio y abastecimiento de ácido sulfúrico en el conjunto nacional.

Finalmente, según los datos proporcionados anteriormente, podemos afirmar que la comercialización de ácido en el país puede continuar sin problemas hasta el año 2031. Además, es importante destacar que la Región de Antofagasta se presenta como el destino más atractivo para la distribución del ácido proveniente de otras regiones, específicamente para los excedentes de CODELCO. Esto se debe a que Antofagasta muestra el mayor consumo a nivel nacional y presenta un balance negativo a lo largo del periodo analizado. En otras palabras, la demanda de ácido en la Región de Antofagasta supera su producción local, lo que la convierte en una región receptora de importaciones para satisfacer su necesidad de este producto químico.

Además, es crucial considerar que el balance negativo a nivel nacional podría extenderse en años futuros, influenciado por factores como el precio del cobre, el cual da la posibilidad de extracciones de nuevos yacimientos mineros o la extensiones de proyectos existentes. Estas variables podrían extender la duración del período en el cual el balance negativo persiste en el escenario nacional, aumentar la magnitud de la necesidad de ácido sulfúrico y, como resultado, permitir la comercialización total de ácido sulfúrico a nivel nacional en los próximos años posteriores al análisis.

### 3.2 Demanda 2024-2032 Codelco

Los datos mostrados a continuación fueron obtenidos del balance hidro de Codelco, donde muestran la proyección del consumo de ácido sulfúrico (en kilo toneladas) para diferentes divisiones las divisiones de Chuquicamata(DCH), Salvador(DSAL), El Teniente(DET), Gabriela Mistral(DGM) y Radomiro Tomic(DRT) desde 2024 hasta 2032.



**Figura 16: Consumo proyectado ácido sulfúrico Codelco al 2032**

**Fuente: Balance hidro Codelco 2022**

En cuanto al consumo, cada división minera presenta patrones individuales a lo largo del período examinado. La División Chuquicamata exhibe una tendencia decreciente desde 450 ktm en 2023 hasta un mínimo de 0 ktm a partir de 2027, donde se presenta su término de explotación de la línea de óxidos. Por otro lado, División Salvador muestra un incremento gradual en el consumo durante los primeros años, con un punto máximo de 80 ktm en 2027, seguido de una disminución moderada hacia el final del periodo.

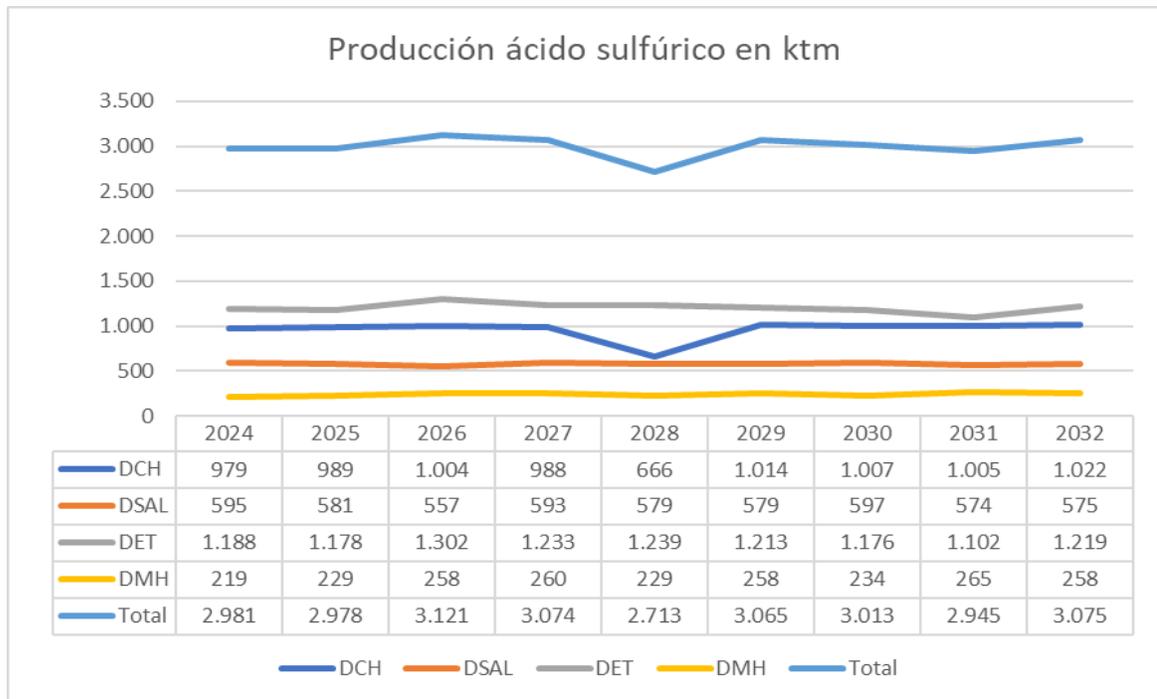
La División el Teniente mantiene un consumo estable en 27 ktm durante los años iniciales, luego disminuye a 0 ktm en 2028.

En lo que respecta a la División de Gabriela Mistral, el consumo presenta fluctuaciones significativas. Al principio, se registra un aumento desde 1.058 ktm en 2023 hasta 1.233 ktm en 2030. Sin embargo, en los años finales, el consumo disminuye a 904 ktm en 2032, relacionado al agotamiento de las reservas de óxidos.

La división de Radomiro Tomic, por su parte, experimenta una disminución constante en el consumo desde 980 ktm en 2023 hasta 666 ktm en 2032, con fluctuaciones menores a lo largo del tiempo.

### 3.3 Producción 2024-2032 Codelco

Los datos mostrados a continuación fueron obtenidos del balance hidro de Codelco, donde muestran la proyección de la producción de ácido sulfúrico (en kilo toneladas) para las diferentes divisiones como: Chuquicamata(DCH), El Salvador(DSAL), El Teniente(DET), y Ministro Hales (DMH) de 2023 a 2032.



**Figura 17: Producción proyectada ácido sulfúrico Codelco al 2031**

**Fuente: Balance hidro Codelco 2022**

En términos de producción, cada división minera presenta patrones distintivos a lo largo del período. La producción de la división de Chuquicamata se mantiene relativamente estable durante la mayor parte del tiempo, con un leve aumento en los primeros años seguido de una ligera disminución hacia el final. Los valores más altos de producción se registran en 2024 (979 ktm), 2026 (1.004 ktm) y 2035 (1.025 ktm). No obstante, se observa una notoria caída en la producción en 2028, con un mínimo de 666 ktm.

Por otro lado, la división de El Salvador muestra una fluctuación menos predecible, con altibajos a lo largo del período. La producción varía entre 557 ktm y 597 ktm, sin un patrón de crecimiento o decrecimiento definido.

En el caso de El teniente, la producción experimentará un aumento significativo en 2026 (1.302 ktm), seguida de un descenso y una recuperación gradual. No obstante, a partir de 2028, la producción de El Teniente experimentó una disminución constante, llegando a 1.102 ktm en 2032.

En la división Ministro Hales, se registra una disminución inicial en la producción desde 270 ktm en 2023 hasta 219 ktm en 2024. Luego, la producción oscila de manera constante, culminando en 265 ktm en 2031.

## **4. Modelamiento**

### **4.1 Construcción del modelo conceptual**

Este capítulo se adentra en el proceso de construcción del modelo conceptual, donde se establece la base teórica y estructural que permitirá capturar las interacciones y comportamientos esenciales del sistema en estudio. En esencia, el modelo conceptual actúa como el andamiaje sobre el cual se construirá el entorno de simulación, la creación de un modelo conceptual sólido y representativo es un paso fundamental para lograr una representación precisa y efectiva de un sistema real y su precisión y adecuación determinarán la validez y utilidad de los resultados obtenidos.

La cadena logística de CODELCO se organiza en tres regiones principales. Estas regiones, conocidas como Zona Sur, Zona Centro y Zona Norte, están conformadas por diversas divisiones mineras y terminales de transferencia que gestionan el almacenamiento, carga y descarga del material de manera estratégica.

#### **4.1.1 Almacenamiento**

En la Zona Sur, se encuentra la División El Teniente, se caracteriza por ser una división productora, una parte esencial de la cadena logística. Uno de sus componentes, Caletones, destaca por su capacidad de almacenamiento de 30.000 toneladas y su red de siete sitios de carga para camiones. Además, la Terminal de Transferencia Los Lirios contribuye a la operación eficiente con su capacidad de almacenamiento de 12.400 toneladas y sus siete sitios de descarga para camiones, complementados por ocho brazos de carga para trenes. Terquim, ubicado en San Antonio, es otro pilar fundamental, con una capacidad de almacenamiento de 40.000 toneladas y una infraestructura de descarga ferroviaria con siete brazos de descarga tren, además de su capacidad de carga de nave a una velocidad de 1.000 TM/H.

La Zona Centro se destaca por la División El Salvador, la cual tiene un comportamiento de productor de ácido sulfúrico y además de consumidor, donde Potrerillos juega un rol clave con su capacidad de almacenamiento de 10.000 toneladas y sus cuatro sitios de carga para camiones. Barquito, con una capacidad de almacenamiento de 30.000 toneladas, realiza un papel multifacético con cinco sitios de carga para camiones y tres sitios de descarga, junto con una velocidad de carga de nave de 380 TM/H.

La Zona Norte, compuesta por diversas divisiones, desempeña un papel fundamental en el flujo logístico de la región. Entre las divisiones productivas se destaca la División Ministro Hales, que cuenta con una capacidad de almacenaje de

15.000 toneladas y cuatro sitios de carga para camiones. A su vez, la División Chuquicamata, con funciones tanto de producción como de consumo, dispone de instalaciones de almacenamiento con una capacidad total de 44.800 toneladas.

Adentrándonos en las divisiones consumidoras, Gabriela Mistral se distingue con una capacidad de almacenamiento de 21.000 toneladas y ocho sitios de descarga para camiones. Además, se suma el Terminal de Transferencia de Baquedano, con una capacidad de almacenamiento de 3.000 toneladas, seis sitios de carga para camiones y 14 brazos para la descarga de trenes. Por último, la División Radomiro Tomic aporta con su capacidad de almacenamiento de 12.350 toneladas y ocho sitios de descarga para camiones.

El Puerto Mejillones Interacid, con su capacidad de almacenaje de 35.000 toneladas y tres sitios de carga para camiones, es una pieza vital en la cadena logística y El Terminal Puerto Mejillones complementa la operación con su capacidad de almacenamiento de 20.000 toneladas, tres sitios de carga para camiones y una impresionante red de 14 brazos de carga para trenes.

#### **4.1.2 Modos de transporte**

Actualmente, Codelco opera con tres naves bajo un acuerdo de arrendamiento con una entidad externa, la cual provee servicios esenciales de transporte de ácido nacional e importaciones regulares desde Perú para realizar un canje del material con empresas privadas. Estas embarcaciones desempeñan un papel vital en el flujo logístico de la compañía y aseguran un transporte eficiente y seguro de sustancias críticas. A continuación, se presenta una descripción de estas naves:

La primera nave, denominada "Alpaca" , dispone de 18 tanques principales, además de 2 adicionales, y en conjunto, ofrecen una capacidad de almacenamiento de 32,208 toneladas.



**Figura 18: Alpaca**

La segunda embarcación, denominada "CONCON trader", su capacidad de almacenamiento se manifiesta a través de sus tanques, con una capacidad total de 15,000 toneladas.



**Figura 19: CONCON trader**

La tercera nave, conocida como "Guanaco", la embarcación alberga 28 tanques, lo que contribuye a una capacidad de almacenaje de 15.000 toneladas.



**Figura 20: Guanaco**

Por otro lado los camiones deben contar con algunas características especiales como tanques de almacenamiento de acero inoxidable con una capacidad de 27 toneladas aproximadamente, válvulas de seguridad, sistemas de contención de derrames y equipo de seguridad personal para el conductor. Cabe mencionar que los camiones que transportan el material son de empresas contratistas que brindan el servicio de traslado.

En cuanto a las normas ambientales, el transporte de ácido sulfúrico está regulado por la Ley chilena no. 20.089, que establece normas para la prevención de riesgos derivados del uso, manejo, transporte, almacenamiento y disposición final de productos químicos peligrosos.



**Figura 21: Camion para transporte de ácido sulfúrico**

Actualmente codelco cuenta con la operación de líneas ferroviarias en su cadena, la de estación los lirios a el terminal de san antonio la que cuenta con 2 convoy de 1.900 toneladas, por otro lado está la línea de mejillones a terminal baquedano que cuenta con 2 convoy con capacidad de 1.400 toneladas. Ambos también operados por empresas externas.



**Figura 22: Tren de carga ácido sulfúrico**

### 4.1.3 Análisis de flujo

En esta sección, se llevará a cabo un análisis de flujo para asegurar un flujo óptimo entre los distintos puntos, evitando posibles cuellos de botella causados por el transporte y minimizando el estrés adicional en la cadena debido al llenado de los tanques de almacenamiento. Este análisis nos permitirá identificar cualquier obstáculo o ineficiencia en el flujo de los materiales y tomar medidas para optimizarlo. De esta manera se obtendrá la cantidad requerida entre cada punto, para posteriormente utilizar estos datos en la simulación.

Además, para el cálculo de cada uno de ellos se considerarán diferentes aspectos, como la capacidad de transporte disponible, los tiempos de tránsito, la sincronización de los envíos y la coordinación entre los puntos de la cadena.

Para el análisis se considerara la separación en dos zonas la zona sur, zona centro y la zona norte.

En la actualidad, la zona sur opera con 895 viajes a la semana entre Caletones y el terminal de transferencia, junto con 11 viajes de trenes entre el terminal de transferencia y la estación de San Antonio. Sin embargo, se proyecta que estos flujos generarán cuellos de botella en el futuro. Por lo tanto, se ha llevado a cabo una optimización de los viajes necesarios, tanto de trenes como de camiones, con la restricción de que los tanques de Caletones no alcancen su límite.

Tras realizar los cálculos de capacidad necesaria, se ha determinado que, para todo el periodo, será necesario incorporar un viaje adicional de tren, totalizando 12 viajes semanales. En el caso específico del año 2026, que se espera tenga la mayor producción diaria de 3568 toneladas, se requerirán 13 viajes semanales de tren y 34 viajes adicionales de camiones. A continuación, se detallan los requisitos específicos para cada año:

- Para el período en general: 12 viajes semanales de tren.
- Año 2026 (mayor producción): 13 viajes semanales de tren y 34 viajes más de camiones a la semana.

Año	Camiones	Trenes
2024	895	12
2025	895	12
2026	929	13
2027	895	12
2028	895	12
2029	895	12
2030	895	12
2031	895	11
2032	895	12

**Tabla 2: Cantidad de viajes necesarios de trenes y camiones**

**Fuente: creación propia**

Asimismo, en las zonas centro y norte, los cálculos indican que la capacidad actual de transporte también es adecuada para manejar la demanda esperada en los próximos años. Esta evaluación sugiere que el sistema de transporte está bien dimensionado para enfrentar los desafíos logísticos planteados en el análisis, sin requerir aumentos significativos en la capacidad de viajes en ninguna de las zonas consideradas.

### Calculo capacidad naves

Para el cálculo de la capacidad de la naves se obtiene aplicando la ley de Little que establece:

$$Capacidad\ mínima\ de\ nave\ [u] = Flujo\ \left[\frac{u}{t}\right] \times ciclo\ de\ nave[t]$$

En particular para las naves de Puerto san antonio a puerto mejillones se utiliza la producción diaria promedio, y para el ciclo de la nave se considera los tiempos de descarga(500t/h), carga(1.000t/h), atraque(2h), desatraque(2h) y los tiempos de viaje entre los puertos + tiempo de espera (60h), obteniendo el tiempo de ciclo de la siguiente forma:

$$Ciclo_{nave(San Antonio-Mejillones)} = \frac{3 \times \text{Capacidad mínima de nave } t}{1.000t/h} + 128 \text{ h}$$

El caso de puerto barquito y mejillones se utilizan los siguientes tiempos, tiempo de viaje entre puertos(24h), tiempo carga y descarga (400t/h), atraque(2h), desatraque(2h), obteniendo el tiempo de ciclo de la siguiente forma:

$$Ciclo_{nave Barquito-Mejillones} = \frac{2 \times \text{Capacidad mínima de nave } t}{400 \text{ t/h}} + 48 \text{ h}$$

La planificación de la cadena de transporte marítimo revela requisitos específicos para el traslado de carga desde San Antonio a Mejillones. En este sentido, se estima que una embarcación de 32.000 toneladas, con un tiempo de ciclo de 9 días y un total de 38 viajes al año, es la capacidad necesaria para llevar a cabo este trayecto de manera eficiente. De manera similar en el trayecto de Barquito a Mejillones, se determina que una nave de 15,000 toneladas, con una frecuencia de 35 viajes anuales, es suficiente para cumplir con los requisitos de transporte. Esta evaluación de las capacidades de las embarcaciones sugiere que, en relación con la demanda proyectada, las naves en consideración cuentan con una capacidad adecuada para llevar a cabo las operaciones sin constituir un cuello de botella.

Al concluir el proceso de levantamiento, se ha logrado desarrollar una perspectiva integral del sistema logístico que abarca diversos puntos críticos de producción, consumo y transferencia en las regiones sur, centro y norte. A continuación, se presenta de manera detallada el levantamiento completo de la logística de ácido sulfúrico. Además, se invita a consultar el Anexo F, donde se detalla la infraestructura por partes para una comprensión más detallada y específica del sistema en cuestión.

### LOGÍSTICA ÁCIDO SULFÚRICO

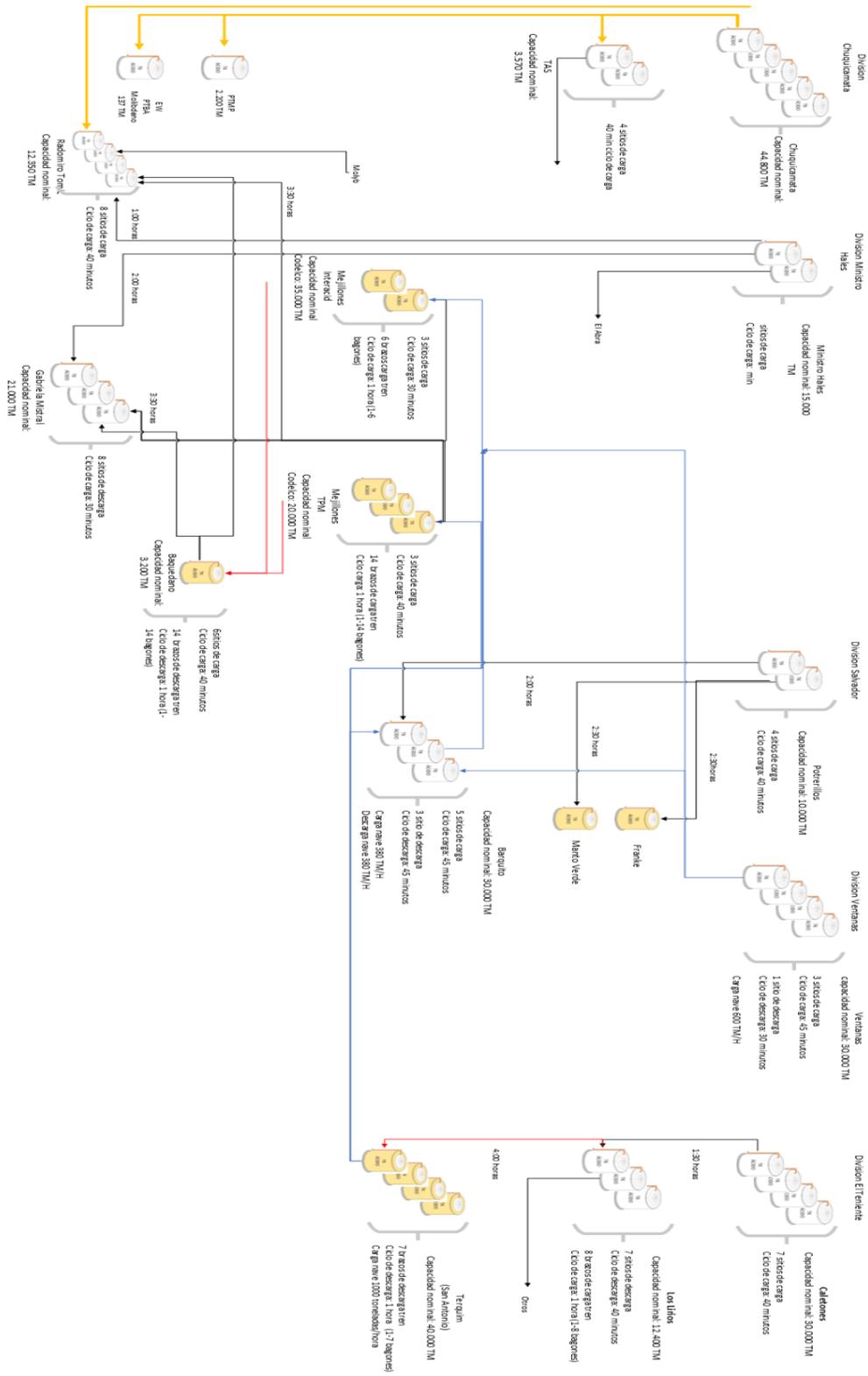


Figura 23: Logística Ácido sulfúrico

## 4.2 Análisis exploratorio de datos

El presente capítulo se centra en el análisis exploratorio de datos relacionados con la producción de ácido sulfúrico en cuatro minas durante el periodo comprendido entre enero de 2022 y diciembre de 2022.

A continuación se presentan las estadísticas descriptivas clave de la producción mensual de ácido sulfúrico en toneladas para cada mina durante el periodo de enero a diciembre de 2022:

### Media de Producción Mensual

- Salvador: 899.67 toneladas
- Ministro Hales: 1464.66 toneladas
- Chuquicamata: 1300.73 toneladas
- Teniente: 2981.37 toneladas

### Mediana de Producción Mensual

- Salvador: 893.00 toneladas
- Ministro Hales: 889.00 toneladas
- Chuquicamata: 1287.50 toneladas
- Teniente: 3281.00 toneladas

### Desviación Estándar de Producción Mensual

- Salvador: 374.21 toneladas
- Ministro Hales: 396.75 toneladas
- Chuquicamata: 898.38 toneladas
- Teniente: 617.34 toneladas

### Mínimo de Producción Mensual

- Salvador: 82.91 toneladas
- Ministro Hales: 0.00 toneladas
- Chuquicamata: 0.00 toneladas
- Teniente: 1299.00 toneladas

### Máximo de Producción Mensual

- Salvador: 1764.37 toneladas
- Ministro Hales: 2314.00 toneladas
- Chuquicamata: 3028.00 toneladas
- Teniente: 3977.00 toneladas

En cuanto a las Tendencias Temporales las que se pueden observar en el anexo G son las siguientes:

- Salvador: Se observan ciertas fluctuaciones en la producción que se relacionan con factores estacionales.
- Ministro Hales: La producción muestra una tendencia relativamente estable con fluctuaciones moderadas.
- Chuquicamata: La producción ha experimentado variaciones significativas a lo largo del año, con periodos de alta y baja producción que están relacionadas con paradas operativas y mantenciones mayores.
- Teniente: Se aprecia cierta volatilidad en algunos meses donde se realiza las mantenciones

## 4.3 Especificación del modelo

En esta sección, se describe la construcción de un modelo de simulación para la cadena de suministro de ácido sulfúrico de Codelco, el cual incorpora componentes estocásticos. El modelo se enfoca en la gestión logística de la cantidad de ácido sulfúrico transportado y almacenado en estanques, especialmente en los puertos, que son puntos críticos de recepción y distribución.

Se han identificado distintos conjuntos que definen las categorías de los días de la semana, incluyendo los domingos. Las variables consideradas abarcan la cantidad transportada por camiones, trenes y naves, así como las etapas clave de producción, consumo y venta, junto con los posibles cierres de puertos y la capacidad disponible en los estanques.

Este enfoque cuantitativo se sustenta en la introducción de parámetros críticos que limitan las capacidades de los estanques, camiones, trenes y naves, así como en el número total de viajes involucrados. Las restricciones establecidas garantizan que la cantidad transportada por cada modalidad no exceda las capacidades previamente definidas, asegurando así un funcionamiento eficiente y seguro del sistema logístico.

### **Restricciones:**

- Cantidad en estanques  $\leq$  capacidad estanques
- Cantidad transportada por camiones  $\leq$  n° de viajes \* capacidad camiones
- Cantidad transportada por trenes  $\leq$  n° de viajes \* capacidad tren
- Cantidad transportada por naves  $\leq$  capacidad nave

Los componentes esenciales del modelo se detallan a continuación, proporcionando una comprensión integral de su aplicabilidad y su potencial impacto en la optimización de la cadena de distribución. Los outputs clave de la simulación se centran en las cantidades acumuladas en los estanques, especialmente en los puertos, donde se reciben y descargan grandes volúmenes de ácido sulfúrico. Estos outputs son fundamentales para evaluar la capacidad máxima de los puertos y para anticipar y gestionar eficientemente las capacidades necesarias en los distintos puntos a futuro.

## 4.4 Implementación del modelo

En el contexto de la implementación de la simulación, se ha establecido una hoja de cálculo específica en Excel, denominada "Datos", para centralizar todos los datos esenciales requeridos. Esta hoja de datos realiza un papel fundamental como el núcleo central que respalda el proceso de simulación.

Dentro de la mencionada hoja "Datos", se han registrado de manera exhaustiva diversos elementos de relevancia crucial. En particular, se consignan en detalle los datos relacionados con la producción y el consumo diario en kilotoneladas (ktm), junto con las correspondientes desviaciones estándar para ambos parámetros.

Asimismo, se ha llevado a cabo una documentación detallada en relación a las deficiencias de almacenamiento en cada punto de la cadena. Estos representan elementos esenciales para asegurar que la simulación reproduzca de manera precisa las restricciones y las oportunidades de cada ubicación en el sistema. Paralelamente, las capacidades de los modos de transporte, que incluyen camiones, trenes y naves, también han sido incorporadas meticulosamente en la hoja "Datos".

Adicionalmente, la hoja "Datos" contiene información crítica concerniente a los cierres de puertos. Se han registrado con minuciosidad los valores promedio y máximos asociados a cada puerto. Estos datos desempeñan un papel de vital importancia en la simulación, ya que permiten modelar de manera precisa los períodos durante los cuales los puertos podrían estar cerrados. Tal aspecto, a su vez, impacta directamente el flujo del ácido sulfúrico en todo el sistema simulado.

El enfoque de la simulación reside en el seguimiento del acumulado de ácido sulfúrico en toneladas, con una atención particular en cada uno de los puntos que conforman la cadena. Para tal fin, se han establecido diversas áreas de control y gestión:

**Control de Estanques:** Se monitorizan los niveles de los estanques.

**Flujo de Camiones y Trenes:** La disponibilidad y la capacidad de los camiones, trenes y naves surgen como factores críticos en la distribución eficiente del ácido sulfúrico entre las distintas instalaciones. Un seguimiento detallado de estos recursos y su utilización en el transporte resulta imperativo.

**Decisiones de Distribución y Recepción:** Se adoptan decisiones estratégicas en relación con la distribución equilibrada del ácido sulfúrico acumulado entre las diversas estancias. Esto involucra la determinación de la cantidad que puede salir de un punto y cuánto puede ser recibido por otro, con la finalidad de mantener niveles óptimos.

**Gestión de Naves y Puertos:** La simulación considera la disponibilidad de naves y el estado de los puertos, aspectos que ejercen influencia en la entrada y salida del ácido sulfúrico de las instalaciones.

**Consumo Interno y Ventas a Terceros:** Se evalúa el consumo interno de ácido sulfúrico en las operaciones mineras, así como las ventas a terceros. Estos factores son determinantes para modelar la demanda y para establecer una planificación precisa de la producción.

**Optimización de la Cadena de Suministro:** El objetivo fundamental de la simulación radica en la optimización de la cadena de suministro para asegurar un flujo continuo y eficiente de ácido sulfúrico entre las diversas etapas. Esto involucra la identificación y la resolución de restricciones y deficiencias.

En este sentido, es relevante mencionar que la simulación considera la particularidad de cada división en el proceso. Para "Teniente" y a modo de ejemplo, se presentan variables específicas tales como la producción, los niveles de los estanques "Caletones" y "Los Lirios", la capacidad de los camiones y trenes, el flujo hacia "Terquim", las salidas de naves, los cierres de puertos y la cantidad transportada, entre otros aspectos. La implementación en "Teniente" es representativa de cómo se abordan estos elementos en cada una de las divisiones. Para más detalle observar el anexo E.

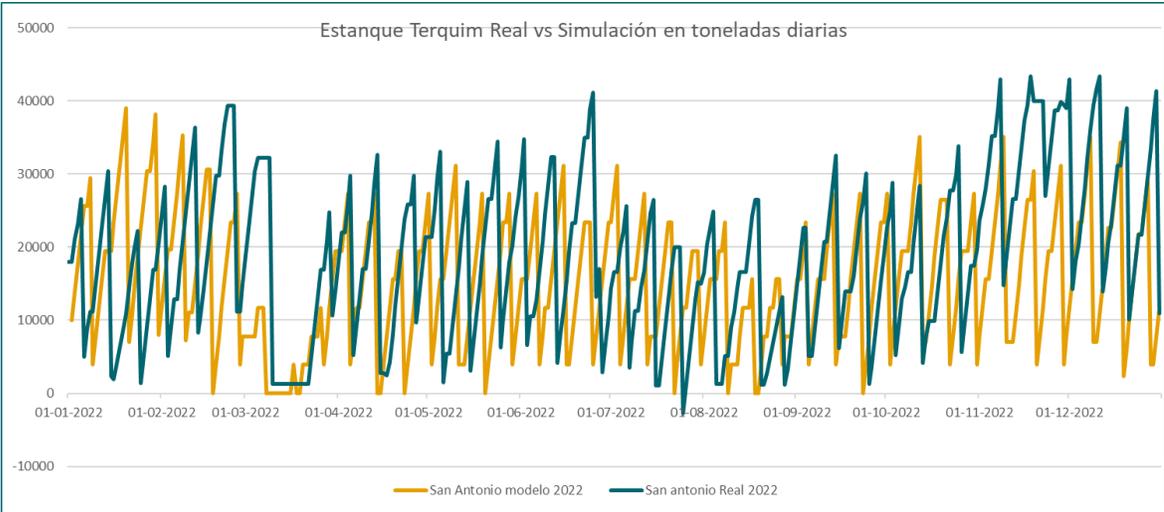
## **4.5 Validación y verificación**

En el apartado de Validación y Verificación (Sección 4.4), el proceso de validación del modelo se llevó a cabo mediante la colaboración estrecha con los equipos de venta de ácido y los responsables de las distintas áreas involucradas. Estas interacciones se manifiestan a través de reuniones donde se exploran diversas iteraciones y especificaciones del modelo, buscando una representación cada vez más precisa. En paralelo, se contrastaron los resultados obtenidos por el modelo con los datos del año 2022, específicamente y a modo de ejemplo lo que respecta a la cantidad acumulada de toneladas en los estanques de San Antonio (TERQUIM).

Vale la pena destacar que, en el año 2022, la división de Ventanas operaba con el puerto Ventanas. No obstante, en el modelo, se optó por no considerar la división de Ventanas debido a su cese de operaciones, lo que introdujo variaciones con respecto a

la realidad. Asimismo, en ciertas instancias, los datos reales exhibieron ciertas desviaciones por encima de la capacidad, originadas por pérdidas de control en la acumulación en los distintos periodos.

La validación también se respaldó en una comparación visual que contrastó el acumulado real con los resultados de la simulación. En este sentido, el coeficiente de correlación fue del 81%, lo que refleja una concordancia sustancial entre el modelo y los datos reales. Es importante mencionar que los datos empleados para este contraste se obtuvieron de la programación y están detallados en el Anexo D denominado "Cierre de Programación Ácido 2022". En este contexto, es esencial enfatizar que se tomó en consideración el período comprendido entre los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre.



**Figura 24: validación acumulado real 2022 vs acumulado simulacion 2022**

## 4.6 Escenarios

Después de validar el modelo y en colaboración con el equipo de trabajo de Codelco, se han evaluado diversos escenarios críticos, incluyendo aumentos en mareas y disminuciones en la producción de algunas plantas, así como la posibilidad de exportación a través de San Antonio debido al posible mercado excedentario de ácido sulfúrico en el país. A continuación, se detallan los resultados de los cinco escenarios evaluados:

Escenario 1: Producción y Consumo Normal, Mareas Promedio, Venta de Excedentes desde Mejillones. Este escenario representa la operación estándar sin eventos excepcionales. La venta de excedentes desde Mejillones se basa en la estrategia de aprovechar la capacidad de almacenamiento en dicho puerto para gestionar los excedentes de producción, además de ser la región de Antofagasta donde se presenta el mayor consumo de ácido y ser de carácter deficitario.

Escenario 2: Venta en Mejillones, Cierre de Puertos Máximo, Producción y Consumo Normal. Se considera la venta en Mejillones, por las razones antes mencionadas. El cierre de puertos máximos puede simular situaciones extremas de condiciones climáticas adversas que podrían afectar las operaciones portuarias y la producción normal.

Escenario 3: Venta de Excedentes en Mejillones, Cierre de Puertos Normales, Producción al 85%. Este escenario evalúa la capacidad de respuesta frente a situaciones que podrían afectar la producción, como el cierre de puertos normales. La producción al 85% simula un escenario en el que algunas productoras operan a capacidad reducida, las que son más comunes en las divisiones de Chuquicamata y Salvador.

Escenario 4: Venta de Excedentes CIF, Cierre de Puertos Normal, Distribución Promedio de Producción y Consumo. La venta de excedentes CIF implica la venta directa sin necesidad de almacenamiento adicional. El cierre de puertos normales y la distribución promedio de producción y consumo evalúan la capacidad frente a condiciones normales.

Escenario 5: Venta desde San Antonio, Llegada Aleatoria de Naves de Exportación. Este escenario se plantea considerando la venta directa desde San Antonio, el puerto de salida de ácido sulfúrico de Teniente, la mayor productora. La elección de San Antonio busca simplificar las operaciones logísticas al exportar directamente desde el puerto de producción principal minimiza la complejidad en el transporte y agiliza la cadena de suministro. La introducción de la llegada aleatoria de naves de exportación simula la variabilidad de la demanda externa.

## **5. Resultados**

El presente capítulo constituye el núcleo fundamental de esta investigación, ya que en él se expondrán y analizarán los resultados obtenidos a través de la simulación realizada.

La simulación llevada a cabo ha sido diseñada con el propósito de modelar y evaluar el comportamiento de nuestro sistema (Cadena de suministro de ácido sulfúrico de Codelco). Con este enfoque, hemos podido observar cómo diferentes variables interactúan y afectan el desempeño general, permitiéndonos así extraer conclusiones fundamentadas y valiosas para nuestro campo de estudio.

Los escenarios considerados y sus resultados se detallan a continuación (se muestran los resultados de los estanques para los puertos que son los más relevantes según los mismos resultados de la simulación, los resultados son los máximos de máximos alcanzados):

Para el **escenario 1** se considera lo siguiente:

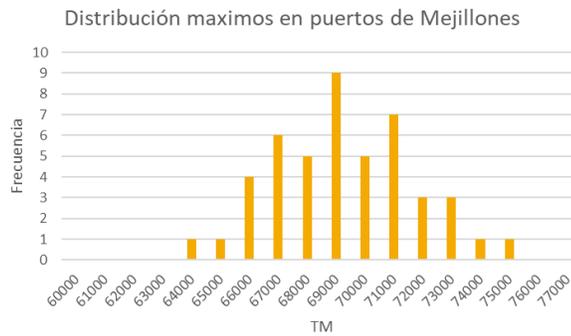
- PRODUCCION Y CONSUMO NORMAL
- MAREJADAS PROMEDIO
- VENTA EXCEDENTES DESDE MEJILLONES

En relación a los estanques en los puertos de Mejillones, se observaron los siguientes datos estadísticos: para la capacidad en toneladas métricas (TM), el promedio se estableció en 68.951 TM, con una desviación estándar de 2.632 TM y un caso máximo de 79.992 TM. Asimismo, se analizó la confianza en los niveles de capacidad en los años 2024-2025.

<b>Nivel de confianza Cap Puertos Mejillones 2024-2025 en TM</b>	
84,15%	97,75%
71.583	76.215

**Tabla 3: Nivel de confianza Cap Puertos Mejillones 2024-2025 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados. Esta representación gráfica proporciona una visión clara de la la concentración de los valores más altos logrados:



**Figura 25: Distribución máximos en puertos de mejillones**

En cuanto a la capacidad en el período 2026-2032 en Mejillones, se identificaron promedios, desviaciones estándar y casos máximos de 45.684 TM, 3.911 TM y 67.127 TM, respectivamente.

<b>Nivel de confianza Cap Puertos Mejillones 2026-2032 en TM</b>	
84,15%	97,75%
49.595	53.507

**Tabla 4: Nivel de confianza Cap Puertos Mejillones 2026-2032 en <sup>TM</sup>**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



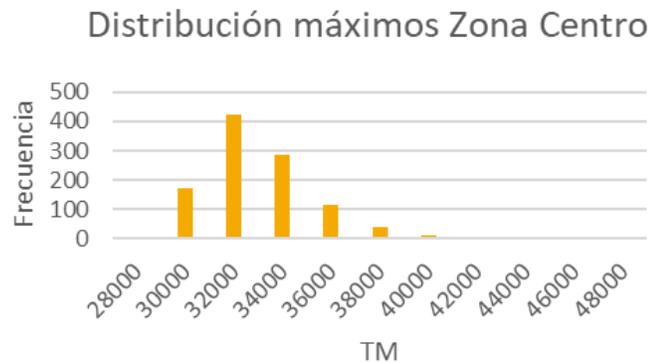
**Figura 26: Distribución máximos en puertos de mejillones**

En la Zona Centro, se evaluaron promedios, desviaciones estándar y casos máximos de 32.141 TM, 2.325 TM y 46.935 TM, respectivamente.

<b>Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM</b>	
84,15%	97,75%
34.467	36.793

**Tabla 5: Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



**Figura 27: Distribución máximos Zona Centro**

Por último, en la Zona Sur, los cálculos correspondientes arrojaron un promedio de 51.834 TM, una desviación estándar de 5.578 TM y un caso máximo de 70.623 TM.

<b>Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM</b>	
84,15%	97,75%
57.412	62.990

**Tabla 6: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



**Figura 28: Distribución máximos en Zona Sur**

En el **escenario 2**, que se enfoca:

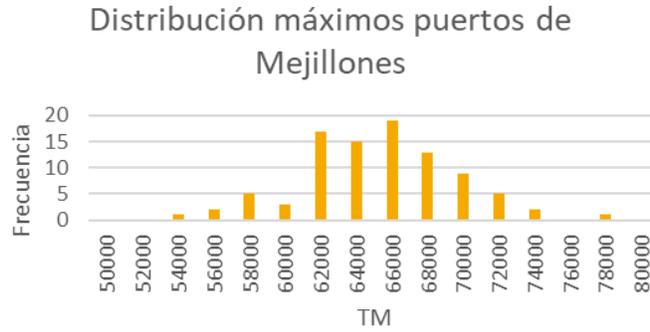
- Venta en Mejillones
- Cierre de Puertos Máximo
- Producción y Consumo Normal

En relación a los estanques en los puertos de Mejillones, se observaron los siguientes datos estadísticos: para la capacidad en toneladas métricas (TM), el promedio de 64.255 TM en capacidad, acompañado por una desviación estándar de 4.288 TM y un valor máximo de 77.985 TM. Asimismo, se analizó la confianza en los niveles de capacidad en los años 2024-2025, para los años 2026 a 2032 los resultados son similares al escenario anterior.

<b>Nivel de confianza Cap Puertos de Mejillones 2024-2025 en TM</b>	
84,15%	97,75%
68.544	72.833

**Tabla 7: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



**Figura 29: Distribución máximos puertos mejillones**

Asimismo, se ha llevado a cabo una evaluación detallada de la Zona Centro, donde los promedios y desviaciones estándar han sido establecidos en 35.194 TM y 3.981 TM, respectivamente.

<b>Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM</b>	
84,15%	97,75%
39.175	43.153

**Tabla 8: Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



**Figura 30: Distribución máximos Zona Centro**

Finalmente, se ha examinado la Zona Sur, identificando promedios, promedio 58.541 TM, desviación estándar: 9.495 TM, Máximo: 94.420 TM

Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM	
84,15%	97,75%
67.960	77.455

Tabla 9: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:

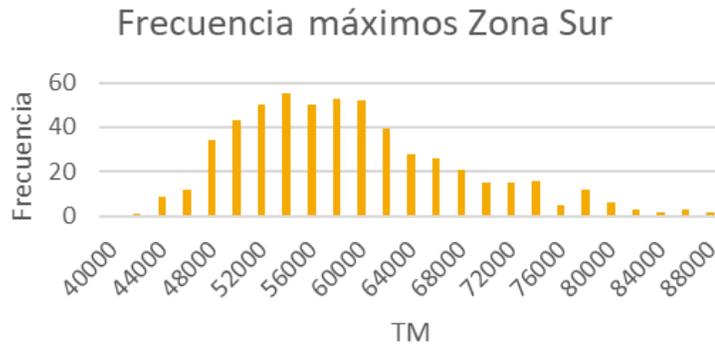


Figura 31: Distribución máximos Zona sur

Por otro lado, el **escenario 3**:

- Venta de Excedentes en Mejillones
- Cierre de Puertos Normales
- La producción de Potrerillos y Chuquicamata al 85%

En lo que respecta a los Puertos de Mejillones durante el período 2024-2025, se ha calculado un promedio de capacidad de 63.990 TM, acompañado por una desviación estándar de 3.687 TM y un valor máximo de 75.049 TM. Para los años 2026 a 2032 los resultados son similares al escenario anterior.

<b>Nivel de confianza Cap puerto Mejillones 2024-2032 en TM</b>	
84,15%	97,75%
67.677	71.365

**Tabla 10: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



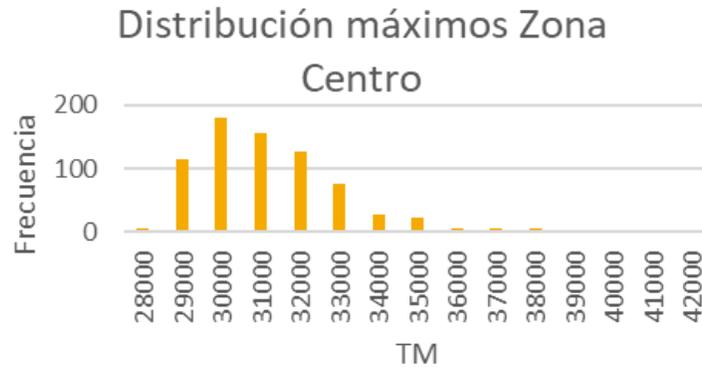
**Figura 32: Distribución máximos puertos en mejillones**

Asimismo, se ha evaluado la capacidad en la Zona Centro, determinando promedios, desviaciones estándar y máximos de 30.777 TM, 1.914 TM y 41.626 TM, respectivamente.

<b>Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM</b>	
84,15%	97,75%
32.692	34.606

**Tabla 11: Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



**Figura 33: Distribución máximos Zona Centro**

Para la zona sur los datos son análogos a los anteriores debido a que solo varía la producción de la zona centro y norte.

En el **escenario 4**:

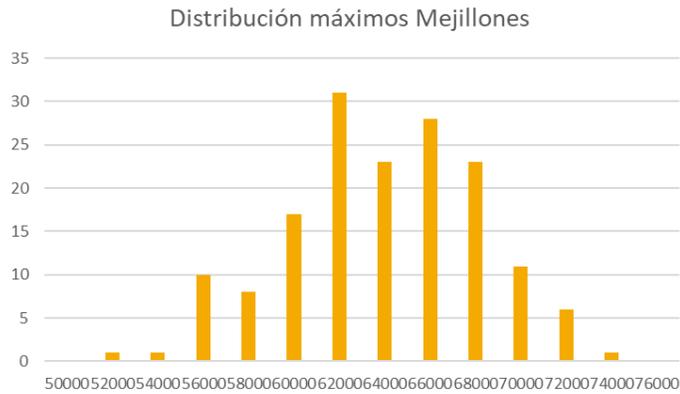
- Venta de Excedentes CIF
- Cierre de Puertos Normal
- Distribución Promedio de Producción y Consumo

Al considerar los Puertos de Mejillones en los años 2024-2025 se han obtenido resultados significativos. Concretamente, se ha calculado un promedio de capacidad de 63.020 TM, con una desviación estándar de 4.267 TM y un valor máximo de 72.969 TM. Por otro lado para los años 2026 a 2032 se obtiene un promedio de 16.112 TM y una desviación estándar de 532 <sup>TM</sup>.

<b>Nivel de confianza Cap Zona puertos mejillones 2024-2025 en TM</b>	
84,15%	97,75%
67.287	71.554

**Tabla 12: Nivel de confianza Cap Mejillones 2024-2025 enTM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



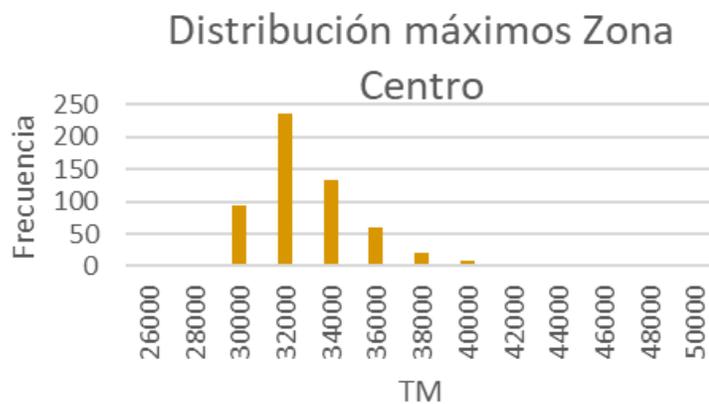
**Figura 34: Distribución máximos puertos en Mejillones**

En la Zona Centro, se han evaluado promedios, desviaciones estándar y máximos de 32.099 TM, 2.517 TM y 44.007 TM, respectivamente.

<b>Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM</b>	
84,15%	97,75%
34.616	37.133

**Tabla 13: Nivel de confianza Cap Zona Centro 2024-2032 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



**Figura 35: Distribución máximos Zona Centro**

Asimismo, se han obtenido valores relevantes para la Zona Sur, con niveles de confianza del 84,15%, 97,75% y 99. 85% que se traducen en capacidades estimadas de 58.262 TM, 64.491 TM y 70.720 TM. Estos análisis y resultados son esenciales para la toma de decisiones informadas en la planificación y ejecución de las operaciones.

<b>Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM</b>	
84,15%	97,75%
67.960	77.455

**Tabla 14: Nivel de confianza Cap Zona Sur 2024-2032 en TM**

A continuación, podemos observar la distribución de los máximos alcanzados:



**Figura 36: Distribución máximos Zona Sur**

Por último considerando una posible exportación el escenario 5 considera:

- venta desde san antonio
- llegada aleatoria de naves de exportación

Es posible observar el figura 37 que en ninguno de los casos es necesario contar con almacenaje adicional debido a que la frecuencia de salida del estanque es mayor.

Exportación	Promedio de máximos en TM	Máximo de máximos en TM	Días espera nave exportación	Cierre de puertos	Días de espera cabotaje
50%	56.491	67.482	79	Máximo	200
50%	53.057	61.398	90	Promedio	192
20%	54.624	79.304	22	Promedio	112
20%	64.782	82.859	34	Máximo	128

**Figura 37: Resultados exportación San antonio**

Tras el análisis considerando, a un nivel de confianza del 97,75%, se ratifica la relevancia de la evaluación y la posible expansión de la capacidad en puntos críticos de la cadena de suministro de ácido sulfúrico. Los hallazgos revelan que al garantizar una flota de transporte óptima para el material, los umbrales de capacidad en las áreas de la Zona Sur y la Zona Centro están por debajo de las capacidades actuales. En particular, en el caso de la capacidad de los Puertos de Mejillones, específicamente para los años 2024-2025, superan la capacidad real en aproximadamente 22,000 TM. Además, para los años 2026 a 2032, los valores se sitúan alrededor de las 50.000 TM.

En el contexto de la venta CIF, que implica la venta en el puerto de Mejillones sin almacenamiento requerido, ya que terceros realizan el embarque (escenario 4), se hace necesario contar con una capacidad adicional de 18,000 TM para los años 2024 a 2025. Para los años 2026 a 2032, únicamente se necesitan 16,000 TM adicionales de capacidad de almacenamiento.

Finalmente, en el escenario número 5, donde se planea la exportación del ácido con llegada aleatoria de barcos y venta desde San Antonio, tampoco se requiere capacidad de almacenamiento adicional en la zona sur.

## **6. Costo de implementación**

La presente sección está destinada al costo de implementación, una dimensión crítica para la factibilidad y eficacia de las propuestas delineadas en este estudio.

En el contexto de la ampliación de la capacidad en el Puerto de Mejillones, se ha identificado un costo de arrendamiento de capacidad adicional de \$1,300,000 dólares anuales, en virtud de los acuerdos contractuales vigentes con los puertos. Este costo permite la comercialización de 300,000 toneladas adicionales, lo que supera la capacidad de almacenamiento existente de 55,000 toneladas durante los años 2024 y 2025. Es importante resaltar que este costo se presenta como una alternativa favorable en comparación con los gastos operativos que se incurriría al no producir durante un día, evaluados en \$5 millones de dólares.

Por otro lado, en lo que respecta a la exportación, se han determinado los costos asociados a las demoras de las naves de exportación en dos escenarios. Para el caso de exportar el 50% de los excedentes de Teniente con el cierre de puertos máximos, se estima un costo de \$1.6 millones de dólares debido a las demoras. En el caso de optar por el cierre de puertos máximos y exportar el 20% de los excedentes, el costo asociado a las demoras de las naves asciende a \$600,000 dólares.

Estos análisis detallados y cifras concretas garantizan una visión integral de los costos financieros inherentes a la implementación de las mejoras propuestas en la cadena de distribución de ácido sulfúrico. A través de la consideración de estos aspectos económicos, se busca sentar las bases para una toma de decisiones informada y estratégica que permita la optimización efectiva de la cadena logística de Codelco.

## **7. Conclusiones**

En resumen, la evaluación de la cadena de suministro de ácido sulfúrico de Codelco ha proporcionado lo siguiente: en los puertos de mejillones es necesario contar con 22.000TM adicionales de capacidad para cualquiera de los casos lo que suponen una inversión de 1.3 millones de dólares anuales. para la capacidad de la zona centro no es necesario contar con capacidad adicional en ninguno de los casos antes mencionados y finalmente la capacidad de la zona sur en ninguno de los casos se ve sobrepasada. Por otro lado en el escenario 5, que implica la venta directa desde San Antonio con llegada aleatoria de naves de exportación, se destaca que no se requiere capacidad de almacenamiento adicional en la Zona Sur, pero se incurrirá en gastos adicionales por pago de demoras portuarias a las naves que se lleven el ácido.

En el caso de la ampliación de la capacidad en el Puerto de Mejillones, se observa que el costo de arrendamiento de capacidad adicional, a pesar de ser significativo, se presenta como una opción favorable en comparación con los costos operativos que resultan de no producir durante un día. Esto subraya la eficacia de la expansión de la capacidad como una inversión para evitar pérdidas operativas costosas.

En conjunto, estos hallazgos respaldan la necesidad de una evaluación constante y ajustes en la cadena de suministro, destacando la crítica importancia de la capacidad de los Puertos de Mejillones y la optimización de la flota de transporte para evitar cuellos de botella. El modelo de simulación demostró su utilidad en la toma de decisiones estratégicas informadas y puede aplicarse a diversas industrias con cadenas de suministro similares.

La disponibilidad de una flota de transporte adecuada y bien dimensionada se revela como un factor crítico para evitar estos cuellos de botella. El análisis detallado de la capacidad de transporte, resulta esencial para mantener un flujo constante y equilibrado a lo largo de la cadena de suministro. En casos en que sea necesario aumentar la flota, ya sea en cantidad o capacidad, el modelo de simulación ofrece una herramienta valiosa para evaluar el impacto y la eficacia de estas decisiones.

La acumulación excesiva de ácido sulfúrico en los estanques no solo implica riesgos operativos, sino también riesgos económicos debido a la inmovilización de recursos valiosos y la interrupción de la producción. La planificación y gestión efectiva de la flota de transporte no solo previene estos riesgos, sino que también permite un uso eficiente de los recursos y una mejor coordinación entre los diferentes puntos de la cadena de suministro.

## **8. Recomendaciones futuras**

En aras de optimizar y fortalecer la cadena de distribución de ácido sulfúrico, se sugiere considerar varias recomendaciones que puedan enriquecer su funcionamiento en el futuro. Primordialmente, se propone la implementación de un sistema de control en tiempo real para monitorear la cantidad de ácido sulfúrico en cada punto clave de la cadena. Esto permitiría una gestión más precisa y ágil al basarse en datos actualizados continuamente, en contraposición a las actualizaciones periódicas por correo electrónico.

Además, la incorporación de herramientas de simulación específicas, o la obtención de las correspondientes licencias, podría resultar invaluable para la optimización de la logística y la toma de decisiones en Codelco. Estas herramientas podrían brindar una representación virtual de la cadena de distribución, posibilitando la identificación de posibles cuellos de botella, la evaluación de estrategias de mitigación de riesgos y la proyección de escenarios hipotéticos para un ajuste más eficiente en situaciones cambiantes.

Asimismo, se destaca la posibilidad de aumentar la capacidad de descarga de las naves en puertos de Mejillones, lo que podría reducir significativamente el tiempo de ciclo de las mismas, disminuyendo el estrés en la cadena de suministro y mejorando la eficiencia general. En definitiva, estas recomendaciones apuntan a impulsar la eficiencia y la adaptabilidad de la cadena de distribución de ácido sulfúrico en el contexto de Codelco, mejorando su capacidad de respuesta y su capacidad de anticipación a los desafíos logísticos venideros.

## **Bibliografía**

- 1.- Codelco. (2022). *Codelco, la empresa de todos los chilenos y chilenas*. [en línea] <https://www.codelco.com/nosotros/codelco-la-empresa-de-todos-los-chilenos-y-chilenas> [consulta: 11-04-2023]
- 2.- Consejo minero. (s.f.). Codelco. [en línea] <https://consejominero.cl/nosotros/socios/codelco/> [consulta: 11-04-2023]
- 3.- Codelco. Operaciones. [en línea] <https://www.codelco.com/operaciones> [consulta: 11-04-2023]
- 4.-Codelco(s.f), Funciones y competencias [en línea] <https://www.codelco.com/nosotros/ley-de-transparencia/funciones-y-competencias/funciones-y-competencias-0> [consulta: 11-04-2023]
- 5.- Codelco (2023) Dotación por área [en línea] <https://www.codelco.com/transparencia/dotacion-por-area> [consulta: 11-04-2023]
- 6.- Codelco. (2022) Memoria anual 2021 pagina 31 [en línea] [https://www.codelco.com/memoria2021/site/docs/20220219/20220219165533/memoria\\_codelco\\_2021.pdf](https://www.codelco.com/memoria2021/site/docs/20220219/20220219165533/memoria_codelco_2021.pdf)[consulta: 11-04-2023]
- 7.- Codelco. (2020) Memoria anual 2019 [en línea] <https://www.codelco.com/memoria2019/> [consulta: 11-04-2023]
- 8.-Codelco. (2021) Memoria anual 2020 [consulta: 11-04-2023]
- 9.-Codelco. (2019) Memoria anual 2018 [consulta: 11-04-2023]
- 10.-Codelco. (2018) Memoria anual 2017 [consulta: 11-04-2023]
- 11.- Codelco.(s.f.) Marco normativo [en línea] [https://www.codelco.com/marco-normativo/prontus\\_codelco/2016-02-23/175033.html](https://www.codelco.com/marco-normativo/prontus_codelco/2016-02-23/175033.html)
- 12.- Statista.(s.f.) Ranking de los principales países productores de cobre a nivel mundial en 2021 [en línea] <https://es.statista.com/estadisticas/635359/paises-lideres-en-la-produccion-de-cobre-a-nivel-mundial/>
- 13.- Cochilco.(2022) INFORME DE TENDENCIAS MERCADO DEL COBRE [en línea] <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20Tendencias%20de%20Mercado%20Q2%20de%202022%20con%20RPI.pdf>
- 14.-Codelco.(s.f.) Misión vicepresidencia comercialización [en línea] [www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/artic/20110225/asocfile/20110225190628/vicepresidentecorporativodecomercializacion.pdf](http://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110225/asocfile/20110225190628/vicepresidentecorporativodecomercializacion.pdf)

15.-Codelco.(s.f) Transportando el ácido sulfúrico [en línea]  
<https://www.codelco.com/sustentabilidad/publicaciones/informe-sustentable/transportando-el-acido-sulfurico>

16.-Cristóbal, M. (2016). Logística y gestión de la cadena de suministro. Pearson Reino Unido.

17.-Chopra, S. y Meindl, P. (2015). Gestión de la cadena de suministro: estrategia, planificación y operación. Pearson.

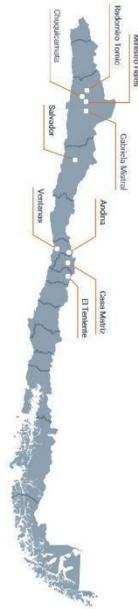
18.-Goldsby, TJ, Martichenko, RO y Zinn, W. (2019). Macrotendencias globales y su impacto en la gestión de la cadena de suministro. En El Manual de Gestión de la Cadena de Suministro Global (págs. 3-26). John Wiley & Sons.

19.-Poco, JD (1961). Una prueba de la fórmula de la cola:  $L = \lambda W$ . Investigación de operaciones, 9(3), 383-387.

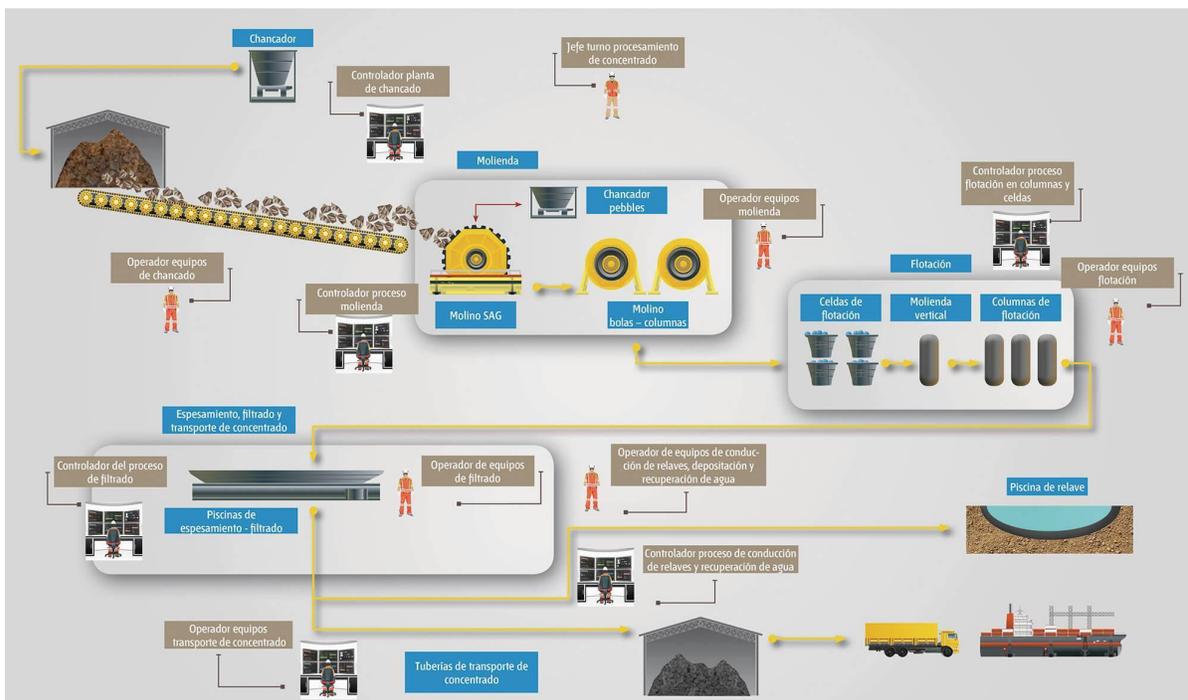
20.-Mentzer, JT, DeWitt, W., Keebler, JS, Min, S., Nix, NW, Smith, CD y Zacharia, ZG (2001). Definición de la gestión de la cadena de suministro. Revista de Logística Empresarial, 22(2), 1-25.

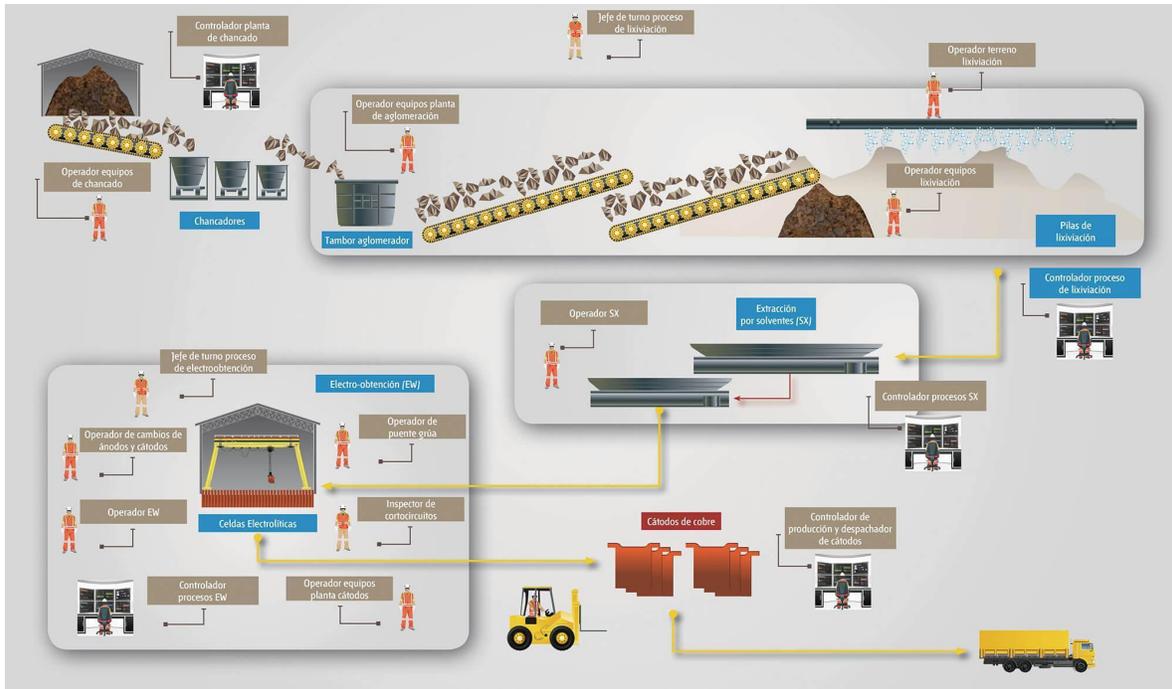
# Anexos

## Anexo A. Divisiones de Codelco



## Anexo B. Diagrama de producción de sulfuros





## Anexo D. Cierre de programación ácido 2022

LOGISTICA ACIDO SULFURICO 2022				Actualizado a: <b>20-jul-23</b>													
				May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic						
				107.895	104.298	108.442	99.434	107.226	99.333	100.902	109.002	1.153.489					
				2.468	2.349	2.428	2.663	2.428	2.639	2.605	2.643	29.481					
Producción				100.873	62.070	55.000	99.015	107.895	104.298	108.442	99.434	107.226	99.333	100.902	109.002	1.153.489	
Consumo Interno				2.426	1.755	2.503	2.468	2.468	2.428	2.663	2.428	2.639	2.605	2.643	2.643	29.481	
Día	Mes/año	Inven.Final Caletones	Producción	Consumo Interno	Inventario San Antonio	Embarques	Desp. Viajes	Est. Transfer.	Despacho a TBA	Inventario TBA	Ventas Nacionales	Despacho a Terquim	Despacho. Cons. Int.	San A			
		<b>14.851.000</b>			<b>17.952.378</b>		2.673			<b>5.405.122</b>							
sábado	01-ene-22	18.968	4.117,00	16.452	17.952					5.405							
domingo	02-ene-22	22.663	3.695,00	16.452	17.952					5.405							
lunes	03-ene-22	24.020	3.192,00	49	19.511	21.111			1.796	3.700	360	3.159					
martes	04-ene-22	22.864	2.344,00	85	21.717	23.217			3.416	4.671	358	2.106					
miércoles	05-ene-22	22.851	3.070,00	77	25.102	26.602			3.007	4.019	303	3.385					
jueves	06-ene-22	21.638	2.896,00		3.488	4.988	25.224,281		4.108	4.191	358	3.610					
viernes	07-ene-22	20.909	3.433,00	49	7.399	8.899			4.113	3.935	529	3.911					
sábado	08-ene-22	21.656	3.682,00		9.656	11.156			2.934	4.560	83	2.256					
domingo	09-ene-22	22.484	3.514,00		9.656	11.156			2.686	7.236							
lunes	10-ene-22	22.862	3.471,00	26	13.567	15.067			3.506	6.535	330	3.911					
martes	11-ene-22	22.474	3.021,00	57	17.477	18.977			3.352	5.678	332	3.911					
miércoles	12-ene-22	22.497	3.054,00	54	21.388	22.888			2.978	4.340	440	3.911					
jueves	13-ene-22	21.036	2.450,00	84	25.224	26.724			3.827	3.979	386	3.836					
viernes	14-ene-22	20.102	3.192,00	84	28.909	30.409			4.042	4.022	304	3.685					
sábado	15-ene-22	20.691	3.693,00	77	810	2.310	32.009,539		3.027	3.089	84	3.911					
domingo	16-ene-22	24.327	3.636,00		438	1.938			3.089	3.089							
lunes	17-ene-22	26.224	3.673,00	82	2.544	4.044			2.586	3.312	276	2.106					
martes	18-ene-22	26.296	3.172,00	57	4.800	6.300			3.043	3.705	414	2.256					
miércoles	19-ene-22	27.232	3.724,00	57	7.056	8.556			2.732	3.787	413	2.256					
jueves	20-ene-22	26.596	2.672,00	86	9.313	10.813			3.222	4.413	359	2.256					
viernes	21-ene-22	26.520	3.553,00	57	12.923	14.423			3.572	3.974	432	3.610					
sábado	22-ene-22	27.358	3.855,00	50	16.383	17.883			2.967	3.401	111	3.460					
domingo	23-ene-22	28.813	3.775,00		18.489	19.989			2.320	3.634		2.106					
lunes	24-ene-22	29.068	3.558,00	85	20.745	22.245			3.246	4.340	304	2.256					
martes	25-ene-22	27.978	3.220,00	57	-149	1.351	24.655		4.253	4.507	358	3.761					

## Anexo E. Simulacion

El Teniente														
Fecha	Día	es domingo	Produccion	Estanque caletone	Estanque caletones fin c	camiones que pueden s	camiones disponible	camiones que puede recibir los linc	Estanque Los Linc	Estanque los lincos fin de cuanto puede salir a terquim	cuanto puede recibir terquim	estanque terquim		
01-01-2024	lunes	1	3342	3342	21	123	132	444	0	0	0	0	0	0
02-01-2024	martes	1	3342	3363	3363	0	185	444	0	0	0	40000	0	0
03-01-2024	miércoles	1	3342	6705	6705	0	167	444	0	0	0	30000	10000	0
04-01-2024	jueves	1	3342	10047	5538	186	167	444	4509	4509	0	30000	10000	0
05-01-2024	viernes	1	3342	8880	5019	143	185	277	8070	4170	3900	30000	13900	0

Millones											
estanque tpm	estanque tpm fin di	estanque interaci	estanque interacid fin di	camiones a venta tpm	camiones dgm	camiones a venta de interacid	camiones dgm	decisión donde desembarc	decisión donde desembarc	trenes que pueden salir de tpm	trenes que pueden salir de inter
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Baquedano				
estanque baquedano	estanque baquedano fin dia	camiones disponibles	camiones a gaby	
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Chuquicamata									
produccion	consumo	estanque chuquicama	estanque chuquicamata fin d	camiones que pueden sal	camiones a gabj	camiones restantes	camiones a rt	camiones restantes	camiones a venta
1905	1272	5000	5000	0	0	0	0	0	0

Salvador								
produccion	consumo	estanque potrerillo	estanque Potrerillos fin d	cuantos camiones puede rec	cuantos camiones neces	estanque barquito	estanque barquito fin d	sale nave

Maxima capacidad alcanzada											
Año	Caletones	Los lirios	San Antonio	Potrerillos	Barquito	Max total en puerto	Baquedano	DCH	DMH	DRT	DGM
2024	15324	11693	40000	6838	25050	78430	3182	17722	3847	9500	18067
2025	14149	10924	39000	6707	26220	74068	3194	18059	3698	9500	18600
2026	25234	11689	40000	6689	26880	50266	3200	17756	3783	9500	18007
2027	14180	10923	40000	6795	27180	45705	3195	18575	3787	9500	17844
2028	14515	10974	39000	6768	27000	42283	3197	17419	3698	9500	17829
2029	12080	10953	39000	6768	28590	48165	3199	18670	3783	9500	17200
2030	11752	10476	39000	6819	28770	40609	3163	18642	3711	9500	16277
2031	11592	10488	39000	6742	25170	44808	3196	18635	3802	9500	17234
2032	11518	11693	40000	6730	26250	45917	3200	18676	3768	9500	17538

## Anexo F. Levantamiento infraestructura

### Zona centro



Nota: 15.000 toneladas en arriendo a manto verde

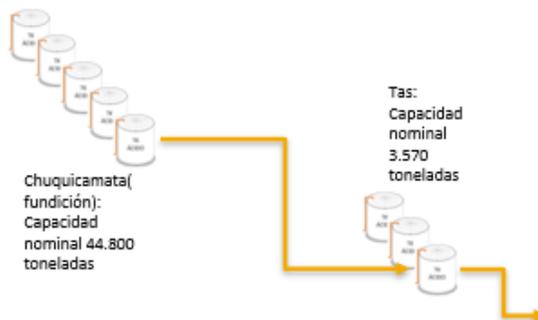
- Producción Potrerillos promedio: 1.595 toneladas/día.
- Días de capacidad:
  - Potrerillos: 6 (3000 de fondo de estanque) 3,1
  - Barquito: 19
  - Total: 25

### Zona sur



- Producción Caletones promedio: 3.302 toneladas/día.
- Días de capacidad:
  - Caletones 9
  - Los lirios: 4
  - Terquim: 12
  - Total: 25

### Chuquicamata



- Producción Chuquicamata promedio: 2.659 toneladas /día.
- Días de capacidad:
  - Total 18

### Radomiro Tomic



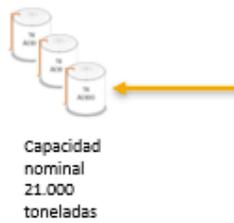
- Consumo promedio: 2.000 toneladas/día.
- Días de autonomía:
  - Total 6

## Ministro Hales



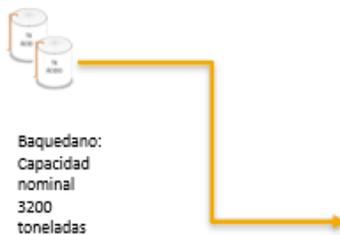
- Producción Ministro Hales promedio: 689 toneladas/día.
- Días de capacidad:
  - Total 22

## Gabriela Mistral



- Consumo promedio: 2.600 toneladas/día.
- Días de autonomía :
  - Total 8

## Terminal Baquedano



Llegada diaria promedio 2.800 Tm  
Días de capacidad : 1

## Puertos



Llegada diaria promedio 4.900 Tm  
Días de capacidad : 15

## Anexo G. Producción diaria de ácido por división

