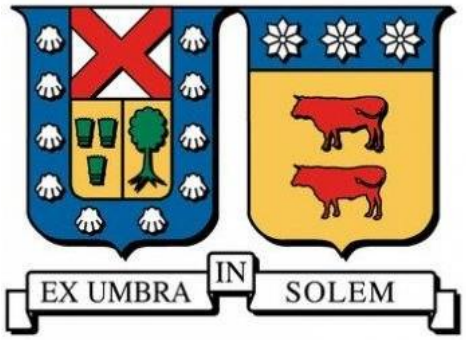


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

OPTIMIZACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE LA CATEGORÍA PACKING EN SQM DIVISIÓN LITIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

JAVIERA NICOL ABARCA VEGA

PROFESOR GUÍA
ESTEBAN SALGADO VALENZUELA

SANTIAGO, 17 DE SEPTIEMBRE, 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: OPTIMIZACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE LA CATEGORÍA PACKING EN SQM DIVISIÓN LITIO

Nombre del candidato(a): JAVIERA NICOL ABARCA VEGA_____

Carrera / Grado: __ INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL _____

Campus: _VITACURA_____ **Departamento:** ___INDUSTRIAS _____

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, _____ESTEBAN SALGADO VALENZUELA_____, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

_____

_____

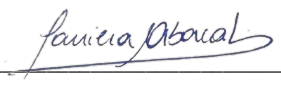
_____

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29-10-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29-10-2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

DEDICATORIA

A Fabián, mi incondicional apoyo y el constante impulso que me motiva a alcanzar la excelencia, cuya pasión por la ingeniería inspiró cada paso de este camino.

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta memoria marca el cierre de una etapa muy importante de mi vida. Más allá de un logro académico, representa años de esfuerzo, aprendizaje, desafíos y crecimiento, tanto en lo personal como en lo profesional. Por ello, quiero agradecer a todas las personas que, de una u otra forma, me acompañaron durante este camino.

Quiero agradecer especialmente a mi profesor guía, Esteban Salgado, por su disposición, apoyo y orientación durante el desarrollo de esta investigación. Sus observaciones, consejos y experiencia fueron fundamentales para enriquecer este trabajo y me ayudaron a enfrentar cada desafío con una mirada más analítica y rigurosa.

A mi familia, gracias por estar siempre presentes. Su apoyo incondicional, confianza y paciencia fueron fundamentales a lo largo de este proceso. En los momentos más difíciles fueron quienes me impulsaron a seguir adelante y me recordaron que era capaz de alcanzar esta meta. Este logro también les pertenece.

Un agradecimiento muy especial a Fabián, por acompañarme en cada etapa de este camino. Gracias por creer en mí incluso cuando yo misma dudaba, por escucharme, aconsejarme y motivarme constantemente a dar lo mejor de mí. Tu apoyo, comprensión y compañía fueron esenciales para llegar hasta aquí.

Finalmente, agradezco a todos quienes formaron parte de esta etapa y contribuyeron, de una u otra manera, a que este proceso fuera más enriquecedor y llevadero. Muchas gracias por el apoyo, las enseñanzas y los momentos compartidos.

GLOSARIO

ABC Método de clasificación de inventarios basado en impacto económico.

AMPL A Mathematical Programming Language. Lenguaje de modelación matemática para optimización.

BOM Bill of Material. Lista de materiales requerida para producir una unidad de producto terminado.

CV Coeficiente de Variación. Indicador estadístico que mide la variabilidad relativa de una serie.

D/E Dentro de Especificación. Producto que cumple requisitos de calidad para comercialización.

LT Lead Time. Tiempo transcurrido entre la emisión de una orden y su recepción.

MAD Mean Absolute Deviation. Desviación Media Absoluta.

MAPE Mean Absolute Percentage Error. Error Porcentual Absoluto Medio.

MOQ Minimum Order Quantity. Cantidad mínima de compra exigida por un proveedor.

MRP Material Requirements Planning. Sistema de planificación de requerimientos de materiales.

MSE Mean Squared Error. Error Cuadrático Medio.

PQL Planta Química Litio.

ROP ReOrder Point. Punto de reorden.

SKU Stock Keeping Unit. Código único de identificación de materiales.

SQM Sociedad Química y Minera de Chile S.A.

SS Safety Stock. Stock de seguridad.

XYZ Método de clasificación de inventarios basado en variabilidad de la demanda.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente memoria aborda la optimización del abastecimiento de la categoría Packing en SQM División Litio, problemática asociada a la limitada visibilidad de largo plazo existente en la planificación de compras de envases. Actualmente, la gestión se encuentra principalmente vinculada al programa de producción y a la lista de materiales (BOM), complementándose con una política de stock objetivo y revisión mensual. En este contexto, el objetivo del estudio fue desarrollar una metodología cuantitativa para planificar las compras e inventarios de los materiales críticos durante 2027, asegurando la continuidad operacional y considerando las principales restricciones de abastecimiento y almacenamiento.

Inicialmente, se realizó una clasificación ABC de los 29 SKU de la categoría, determinándose que cuatro materiales concentran el 81% del presupuesto anual, mientras que pallets y maxisacos representan conjuntamente el 91% del gasto total en envases. A partir de esta priorización se seleccionaron seis SKU críticos. Complementariamente, la clasificación XYZ evidenció que cinco presentan una demanda estable y solo el Maxisaco Micronizado exhibe variabilidad intermedia, identificándose como principales factores de riesgo los extensos Lead Times, cantidades mínimas de compra y condiciones de suministro.

Para extender el horizonte de planificación se proyectó la demanda mensual de 2027 mediante modelos de series de tiempo, seleccionando para cada SKU la alternativa con mejor desempeño estadístico. Posteriormente, se determinaron stocks de seguridad y puntos de reorden para un nivel de servicio objetivo del 99%. Esta definición resulta especialmente relevante para los maxisacos, cuyos tiempos de reposición son cercanos a cinco meses, en contraste con los pallets, que presentan Lead Times inferiores a un mes.

Finalmente, se formuló un modelo de programación lineal entera mixta (MILP), multi-artículo y multi-período, implementado en AMPL y resuelto mediante el solver HiGHS. El modelo incorpora demanda proyectada, inventario inicial, pedidos en tránsito, Lead Times, MOQ, stock de seguridad, costos, activación de órdenes y capacidad de almacenamiento, determinando conjuntamente cuánto y cuándo comprar. Bajo la demanda proyectada, el modelo no admite quiebres de stock y considera órdenes anticipadas durante 2026 cuando los tiempos de reposición así lo requieren.

El escenario base parametrizado según la política actual alcanza un costo anual de USD 16.747.436, mientras que el modelo propuesto alcanza USD 23.719.344 y utiliza stocks de seguridad calibrados para un nivel de servicio objetivo del 99%. Como referencia del desempeño real de la política vigente, se dispone de un nivel de servicio histórico observado cercano al 97%; por lo tanto, ambos porcentajes no corresponden a mediciones directamente equivalentes.

El inventario promedio aumenta desde 44.988 a 84.427 unidades, equivalentes a un incremento desde 639 a 1.714 m^3, mientras que la ocupación promedio de la bodega PQL aumenta desde 13% a 34%. No obstante, la ocupación máxima se mantiene en 69% en ambos escenarios, evidenciando que la infraestructura disponible de 5.000 m^3 permite absorber el mayor nivel de protección sin necesidad de ampliar la capacidad.

El incremento anual de costos alcanza aproximadamente USD 6,97 millones; sin embargo, el escenario base permite llegar a inventario cero y no incorpora explícitamente la variabilidad de la demanda en su stock objetivo. Considerando un precio referencial del litio de USD 21.800 por tonelada, la diferencia económica entre ambas alternativas equivale al valor de venta de aproximadamente 320 toneladas de producto, es decir, cerca de 320 pallets o 640 maxisacos. Por lo tanto, el modelo permite avanzar desde una gestión principalmente

reactiva hacia una planificación anticipada, utilizando el inventario como protección frente al riesgo de interrupción del proceso de envasado y proporcionando una herramienta de apoyo para la gestión de compras, contratos y capacidad logística.

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN **15**

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN **17**

OBJETIVOS **20**

OBJETIVO GENERAL **20**

OBJETIVOS ESPECÍFICOS **20**

ALCANCES **21**

MARCO TEÓRICO **22**

ANTECEDENTES DE LA INDUSTRIA Y LA EMPRESA **22**

Línea de productos de Litio y sus derivados 22

Carbonato de Litio. 22

Hidróxido de Litio. 23

Contexto institucional y la alianza Codelco-SQM 24

Dinámica de mercado y estrategia de precios realizados 25

Categoría Packing – SQM Litio 27

CLASIFICACIÓN DE INVENTARIOS **28**

Clasificación ABC 28

Clasificación XYZ 30

MODELOS DE PRONÓSTICOS Y SERIES DE TIEMPO **31**

Enfoques Fundamentales del Pronóstico 31

Modelos Asociativos (Causales) 32

Modelos de Series de Tiempo. 32
Estructura y descomposición de series de tiempo 32
MÉTODOS DE PRONÓSTICOS 33
Método de promedios móviles simples 33
Método de promedios móviles ponderados 33
Método de regresión lineal simple 35
Modelo de regresión estacional 36
Método de suavizamiento exponencial simple 37
Método de suavizamiento exponencial con ajuste de tendencia 39
Método Holt-Winters 40
ELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE SERIES DE TIEMPO 41
Definición y Clasificación del Error de Pronóstico 42
Mediciones del Sesgo en el Pronóstico 42
Mediciones de la Dispersión del Error 43
Mediciones Relativas del Error 44
MODELOS DE GESTIÓN DE ABASTECIMIENTO 44
Costos asociados a la gestión de inventarios 44
Costos de ordenar (ordering cost). 45
Costos de Almacenamiento (Holding Cost). 45
Costo de Espacio. 46
Costo de Capital (Costo de Oportunidad). 46

Costos de Escasez (Shortage Cost). 47

Costos por Venta Perdida (Lost Sale Cost). 47

Costos por Pedido Pendiente (Backorder Cost). 47

MODELO PROBABILÍSTICO E INVENTARIO DE SEGURIDAD CON DEMANDA VARIABLE Y LEAD TIME CONSTANTE 48

Punto de Reorden (ROP) 48

Inventario o Stock de Seguridad (SS) 50

INDICADORES DE DESEMPEÑO PARA LA GESTIÓN DE ABASTECIMIENTO 51

Nivel de servicio tipo α 52

OTIF (On Time In Full) 52

Asertividad del pronóstico 53

MODELO DE LOT-SIZING MULTIARTÍCULO Y MULTIPERÍODO APLICADO A ABASTECIMIENTO 53

Estructura Multiartículo y Multiperíodo 53

Trade-off de Costos y Función Objetivo 54

Restricciones de Balance y Capacidad Común 55

METODOLOGÍA 57

CLASIFICACIÓN DE LA CATEGORÍA 58

CÁLCULO DE DEMANDA DE CORTO PLAZO 58

PRONÓSTICO DE DEMANDA DE LARGO PLAZO 59

POLÍTICAS DE INVENTARIO 59

MODELO DE OPTIMIZACIÓN 60

EJECUCIÓN EN AMPL 60

RESULTADOS Y ANÁLISIS 61

CLASIFICACIÓN ABC 61

CLASIFICACIÓN XYZ 64

SELECCIÓN Y CÁLCULO DE PRONÓSTICO DE DEMANDA 65

Cálculo demanda mediante BOM (Bill of Material) 65

Cálculo y selección de pronósticos de demanda 71

Cálculo demanda mediante modelos de pronósticos 74

DETERMINACIÓN DE POLÍTICA DE INVENTARIO 75

PROPUESTA DE MODELO DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA 77

Contexto del problema 77

Supuestos y alcances 78

Descripción operativa y reglas 79

MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA 80

Conjuntos 80

Parámetros operacionales 80

Costos 81

Variables 81

Función objetivo 82

Restricciones 82

IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL DEL MODELO EN AMPL Y RESOLUCIÓN MEDIANTE HIGHS 84

ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN 85

CONSTRUCCIÓN DEL ESCENARIO BASE PARAMETRIZADO SEGÚN LA POLÍTICA ACTUAL 88

Modelo matemático que simula la situación base 89

Conjuntos 89

Parámetros 89

Variables 90

Función objetivo 90

Restricciones modificadas 90

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL ESCENARIO BASE Y EL MODELO PROPUESTO 91

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 94

RECOMENDACIONES 96

BIBLIOGRAFÍA 98

ANEXOS 100

ÍNDICE DE FIGURA

FIGURA 1 *PROCESO PRODUCTIVO DE EXTRACCIÓN Y PRODUCCIÓN DE LITIO DE SQM* 24

FIGURA 2 *EVOLUCIÓN DE VOLÚMENES DE VENTAS Y PRECIOS EN EL MERCADO: 2024-2026 Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE VENTAS* 26

FIGURA 3 *GRÁFICO DE ANÁLISIS ABC PARA LA GESTIÓN DE INVENTARIOS* 29

FIGURA 4 *DESGLOSE DE COSTOS DE INVENTARIOS* 45

FIGURA 5 CAMBIOS EN NIVELES DE INVENTARIO CON DEMANDA VARIABLE 49

FIGURA 6 *EJEMPLO DE INVENTARIO DE SEGURIDAD CON NIVEL DE SERVICIO DEL 95%* 51

FIGURA 7 *DETERMINACIÓN DEL COSTO TOTAL MÍNIMO E INVENTARIO ÓPTIMO* 55

FIGURA 8 *METODOLOGÍA DE TRABAJO PROPUESTO* 57

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 *CLASIFICACIÓN DE ENVASES DE LA CATEGORÍA PACKING* 28

TABLA 2 *CLASIFICACIÓN ABC POR SKU* 61

TABLA 3 *RESUMEN CLASIFICACIÓN ABC DE ENVASES 2026* 62

TABLA 4 *CONTRIBUCIÓN AL PRESUPUESTO POR CATEGORÍA* 63

TABLA 5 *CLASIFICACIÓN XYZ PARA CATEGORÍAS CRÍTICAS DEL ABC* 64

TABLA 6 *PROYECCIÓN DE PRODUCCIÓN 2026 - CARBONATO DE LITIO* 66

TABLA 7 *PROYECCIÓN DE PRODUCCIÓN 2026 - HIDRÓXIDO DE LITIO* 68

TABLA 8 *BOM SEGÚN FORMATO DE VENTA CARBONATO E HIDRÓXIDO* 69

TABLA 9 *PROYECCIÓN DE DEMANDA DE MAXISACOS Y PALLETS 2026 MEDIANTE BOM* 70

TABLA 10 *EVALUACIÓN COMPARATIVA DE MODELOS DE PRONÓSTICO SEGÚN RMSE* 72

TABLA 11 *PROYECCIÓN DE DEMANDA DE MAXISACOS Y PALLETS 2027 MEDIANTE PRONÓSTICOS* 74

TABLA 12 *PARÁMETROS DE PLANIFICACIÓN SEGÚN POLÍTICA DE INVENTARIO* 75

TABLA 13 *FORECAST DE COMPRAS 2027 MEDIANTE MODELO DE OPTIMIZACIÓN* 85

TABLA 14 *OCUPACIÓN BODEGA PQL 2027* 87

TABLA 15 *COMPARACIÓN ENTRE ESCENARIO BASE Y MODELO PROPUESTO* 91

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda mundial de litio y sus derivados ha impulsado una expansión significativa de la capacidad productiva de SQM, posicionando a la División Litio como uno de los actores más relevantes dentro de la cadena global de suministro para la industria de la electromovilidad. Este crecimiento ha generado nuevos desafíos operacionales asociados a la planificación de recursos, abastecimiento e infraestructura logística, donde la disponibilidad oportuna de materiales de envase adquiere un rol estratégico para asegurar la continuidad de las operaciones.

La categoría Packing, compuesta por pallets, maxi sacos, bolsas, materiales plásticos, cartones y otros insumos de acondicionamiento, representa aproximadamente USD 15 millones anuales en gastos para la operación. A pesar de su relevancia económica y operativa, la gestión actual de estos materiales se encuentra fuertemente ligada a la planificación de corto plazo, careciendo de herramientas formales que permitan proyectar la demanda futura y optimizar de manera integral las decisiones de compra e inventario. Esta situación resulta particularmente compleja para aquellos materiales importados cuyos tiempos de abastecimiento pueden extenderse por varios meses y cuyas interrupciones podrían comprometer directamente el proceso de envasado y despacho de productos terminados.

Actualmente, las necesidades de envases se calculan a partir de la lista de materiales (BOM) asociada al programa de producción anual, limitando la capacidad de anticipación para la negociación de contratos de suministro, la planificación logística y la administración eficiente de la capacidad de almacenamiento disponible. Frente a este escenario, surge la necesidad de desarrollar una metodología que combine herramientas de pronóstico de

demanda, políticas de gestión de inventarios y modelos de optimización matemática para apoyar la toma de decisiones de abastecimiento.

En este contexto, la presente investigación propone el diseño de un modelo matemático de optimización para la planificación de compras e inventarios de la categoría Packing en SQM División Litio, considerando demanda proyectada, tiempos de abastecimiento, restricciones de almacenamiento, inventarios de seguridad y cantidades mínimas de compra. Para ello, se desarrollan etapas consecutivas de clasificación de materiales, estimación de demanda mediante BOM, pronóstico estadístico, definición de políticas de inventario y optimización matemática implementada en AMPL.

El resultado esperado es una herramienta cuantitativa que permita respaldar la planificación de abastecimiento para el año 2027, mejorando la visibilidad de largo plazo de la categoría, facilitando la negociación con proveedores estratégicos y contribuyendo a una gestión más eficiente de los recursos logísticos y financieros de la organización.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

SQM, el principal extractor de litio en Chile, experimenta un crecimiento sostenido impulsado por la demanda global para la electromovilidad. Tras la reciente estabilización de los precios internacionales, la organización se enfoca en controlar costos y maximizar la eficiencia interna. En este escenario, la gestión de inventarios cobra valor estratégico, particularmente en la categoría Packing (envases), cuya disponibilidad continua es crítica para evitar interrupciones productivas (Axsäter, 2015). A nivel operacional, esta categoría abarca un total de 29 SKU, incluyendo pallets, maxi sacos, sacos, materiales plásticos, cartón y etiquetas, entre otros, y representa un gasto anual estimado de USD 15 millones. Históricamente, SQM carece de un sistema formal de pronóstico y planificación (como un sistema MRP), lo que fomenta una gestión reactiva. Actualmente, la demanda se desglosa únicamente a partir de la lista de materiales (BOM) del programa de producción con un horizonte de corto plazo. Esta falta de visibilidad prolongada, combinada con la gestión reactiva inherente al esquema actual de planificación de compras, genera riesgos duales: quiebres de stock que comprometen el envasado y sobre inventarios que incrementan los costos de almacenamiento y capital inmovilizado (Ballou, 2004).

Dado que la categoría es de carácter estratégico y dada la estricta exigencia de continuidad operacional, no se aceptan quiebres de stock bajo ninguna circunstancia en las subcategorías críticas, tales como pallets, maxi sacos y sacos. Por ello, se requiere anticipar la proyección anual para el año 2027 con el fin de ajustar y renovar oportunamente los contratos de suministro y los servicios de transporte asociados a ellos. La formalización de estos contratos resulta fundamental para asegurar el compromiso de proveedores únicos y/o de aquellos con altos Lead Times, como ocurre en la importación marítima de maxi sacos

desde India o China. Asimismo, estos acuerdos de largo plazo otorgan un resguardo económico indispensable cuando los proveedores deben realizar inversiones de capital asociadas al servicio, tales como la inversión en moldes para pallets plásticos o la apertura de una nueva planta de pallets de madera en Antofagasta.

En este marco, surge la pregunta de investigación central: ¿Cómo diseñar un modelo de optimización matemática para planificar las compras y el almacenamiento mensualizado de la categoría Packing en la división Litio de SQM para el período 2027, considerando demanda variable y Lead Times constantes (diferenciados por SKU), mínimos de compra y la restricción de capacidad de la bodega central, con el objetivo de minimizar el costo total manteniendo la continuidad operativa? Asimismo, la investigación busca resolver interrogantes secundarias: ¿Qué materiales de la categoría concentran la mayor parte del costo y riesgo operacional? y ¿Qué trade-off existe entre costo total y continuidad operacional al implementar el modelo propuesto respecto del escenario base parametrizado según la política actual? (Choi, 2014; Valencia-Cárdenas et al., 2015).

La problemática compromete e involucra a diversas áreas internas dentro de la organización (Douissa & Jabeur, 2020). Por un lado, el área de Abastecimiento y Compras está encargada de ejecutar las órdenes sin contar aún con pronósticos estructurados de largo plazo para negociar los contratos, emitir órdenes de compras y mitigar la incertidumbre en la cadena de suministro. Por otro lado, Operaciones y Producción se ve afectada directamente por eventuales desabastecimientos en la Planta de Envasado. Por su parte, el equipo de Logística y Bodegas se encuentra acotado a la infraestructura propia de almacenamiento de SQM, la cual debe gestionarse bajo la premisa de que no existen planes de expansión ni alternativas de almacenamiento externo en el corto plazo, quedando expuestos a severas restricciones de espacio y sobrecostos operacionales.

Finalmente, el estudio integra variables cuantitativas y operativas clave para abordar integralmente esta gestión (Heizer et al., 2004). La demanda esperada se estimará mediante modelos de pronóstico avanzados para un horizonte de 12 meses correspondiente al año 2027, fijando las políticas básicas de stock de seguridad y punto de reorden. A esto se suman las restricciones de abastecimiento, definidas por los lotes mínimos de compra por tipo de envase (MOQ) y los tiempos de entrega (Lead Time) medidos en meses. Asimismo, la infraestructura de la bodega interna PQL posee una capacidad acotada y exclusiva, donde cada unidad ocupa un volumen físico específico, integrando condiciones iniciales como el inventario disponible y los pedidos en tránsito. Todo esto se complementa con una estructura financiera que contempla el precio variable por envase con polinomios de reajuste contractual, así como los costos asociados al almacenamiento y al proceso de emisión de órdenes.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar un modelo matemático de optimización para la planificación de compras y almacenamiento de la categoría Packing en la División Litio de SQM para el período 2027, con el fin de minimizar los costos totales de gestión, asegurar el cumplimiento de los requerimientos de demanda proyectada sin quiebres de stock bajo las condiciones modeladas y respaldar las negociaciones contractuales de largo plazo.

Objetivos Específicos

- Clasificar los materiales de la categoría Packing mediante metodologías ABC y XYZ, identificando los SKU de mayor impacto económico y relevancia operacional.
- Determinar la demanda proyectada de los materiales críticos a partir del programa de producción y la lista de materiales (BOM) asociada a cada producto terminado.
- Desarrollar y evaluar modelos de pronóstico de demanda, seleccionando la alternativa con mejor desempeño estadístico para proyectar los requerimientos de envases del horizonte 2027.
- Determinar los parámetros de gestión de inventarios, incluyendo stock de seguridad y puntos de reorden, necesarios para asegurar la disponibilidad de materiales y la continuidad operacional.
- Formular e implementar un modelo de optimización matemática multiperíodo y multiartículo, incorporando demanda proyectada, Lead Times, restricciones de capacidad de almacenamiento, inventario de seguridad y cantidades mínimas de compra, con el fin de obtener un plan óptimo de abastecimiento para el período 2027.

ALCANCES

El alcance de esta investigación excluye los siguientes aspectos:

- No se consideran ampliaciones de capacidad de almacenamiento ni alternativas de bodegaje externo.
- No se evalúan cambios en la estructura productiva ni modificaciones en el programa de producción entregado por la compañía.
- No se incorpora la selección o evaluación de nuevos proveedores, manteniendo las condiciones comerciales vigentes.
- No se consideran restricciones financieras asociadas a presupuestos de compras o flujo de caja.
- El análisis se limita a la categoría Packing, excluyendo materias primas, insumos químicos y otras categorías de abastecimiento.
- Para la determinación de las políticas de inventario, se asume que la demanda acumulada durante el Lead Time de los SKU analizados puede aproximarse mediante una distribución Normal. Este supuesto se sustenta en el comportamiento de alta rotación (*fast mover*) de los materiales seleccionados, caracterizados por una demanda frecuente y no intermitente.
- Los resultados obtenidos corresponden al horizonte de planificación definido para el año 2027 y a las condiciones operacionales disponibles durante el desarrollo del estudio.

Esta delimitación permite focalizar la investigación en la optimización del abastecimiento de envases, entregando una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la planificación de compras e inventarios de la División Litio de SQM.

MARCO TEÓRICO

Antecedentes de la Industria y la Empresa

El proceso productivo de SQM se inicia en el Salar de Atacama (SdA) con la extracción de salmuera. Mediante evaporación solar, la concentración de litio se incrementa hasta un rango de 5,6% - 6,2%, permitiendo su envío a la Planta Química Litio (PQL). Allí, la solución se somete a procesos químicos para producir carbonato e hidróxido de litio destinados a la venta.

Desde el año 2018, SQM ha incrementado significativamente su capacidad operativa, pasando de una producción anual de 160 kMT a 220 kMT en 2025.

Este escalamiento productivo ha impactado transversalmente todas las líneas de proceso. Debido a la alta demanda de productividad, se ha requerido una readecuación crítica tanto en las fases de producción como en los programas de mantenimiento, con el fin de garantizar la continuidad operacional bajo estos nuevos estándares de exigencia.

El litio y sus derivados constituyen un insumo clave para el desarrollo de la electromovilidad y de las tecnologías que impulsan el desarrollo global, desempeñando un rol fundamental tanto en la industria farmacéutica como en diversos usos industriales. Las características de este mercado exigen un compromiso directo con la sustentabilidad y el desarrollo de la industria, concentrando los esfuerzos en la entrega de productos de alta calidad de forma oportuna y en la realización de inversiones significativas que garanticen la disponibilidad continua del producto.

Línea de productos de Litio y sus derivados

Carbonato de Litio. El carbonato de litio destaca por su elevada versatilidad y por ser utilizado en una amplia gama de industrias, entre las que se incluyen la electrónica, la

cerámica y la fabricación de vidrios. Su propiedad fisicoquímica más relevante radica en poseer un elevado potencial electroquímico, sumado al hecho de ser el elemento sólido más liviano de la naturaleza. Por estas razones, su uso principal se concentra en la fabricación de materiales de cátodos para baterías de ion litio.

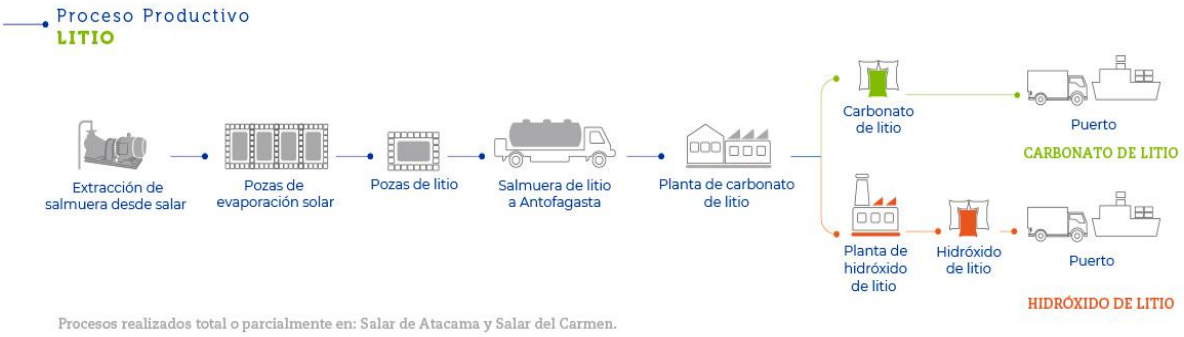
Estas baterías han experimentado una demanda fuertemente creciente en el último tiempo, impulsada en gran medida por el rápido desarrollo del mercado de vehículos eléctricos, así como por su empleo en dispositivos portátiles como computadores, teléfonos móviles y cámaras digitales. En términos de producción, el carbonato de litio es elaborado por SQM en su planta Salar del Carmen, ubicada cerca de Antofagasta, Chile, utilizando como materia prima soluciones con altas concentraciones de litio provenientes del Salar de Atacama.

Hidróxido de Litio. El hidróxido de litio es un derivado cuyo uso principal se orienta a la producción de grasas lubricantes diseñadas para trabajar en condiciones extremas de temperatura y carga. La relevancia de este compuesto en dicho rubro es tal que aproximadamente el 70% de las grasas lubricantes producidas a nivel mundial contienen litio dentro de sus componentes. Adicionalmente, este producto encuentra aplicaciones en la fabricación de baterías y en la industria de colorantes.

La Figura 1 muestra a grandes rasgos el proceso productivo de SQM:

Figura 1

Proceso productivo de extracción y producción de litio de SQM



Nota Tomado de sqm.com/acerca-de-sqm/recursos-naturales/proceso-de-produccion, 2022.

En el ámbito productivo, SQM elabora el hidróxido de litio en la misma Planta Química Litio (PQL), cerca de Antofagasta, Chile. Su procesamiento se realiza a partir del carbonato de litio que es producido previamente en las mismas instalaciones.

Contexto institucional y la alianza Codelco-SQM

El segmento de litio de SQM está experimentando una transformación estructural significativa, impulsada por el acuerdo estratégico con Codelco a través de la creación de Nova Andino Litio SpA. Esta joint venture, que ha obtenido todas las aprobaciones regulatorias, incluida la aprobación condicional de China, permitirá a Codelco acceder anticipadamente a operaciones de litio equivalentes a 33.500 toneladas métricas de carbonato de litio a partir de 2031. Para SQM, esta alianza representa una oportunidad para acceder a capital estatal, reducir riesgos regulatorios y anticipar una disminución de costos operativos del 20-25% en la próxima década. La expansión productiva resultante es considerable; se estima que Nova Andino alcanzará aproximadamente 280.000 toneladas de producción en

2026, mientras que Albemarle contribuirá con alrededor de 74.000 toneladas, llevando a Chile cerca de las 315.000 toneladas anuales. Este aumento en la producción es el resultado de una planificación cuidadosa del crecimiento en operaciones específicas, donde SQM y su socio estatal juegan un papel fundamental. Se proyecta que el crecimiento en volumen para SQM estará entre el 10% y 15% en términos de producción total.

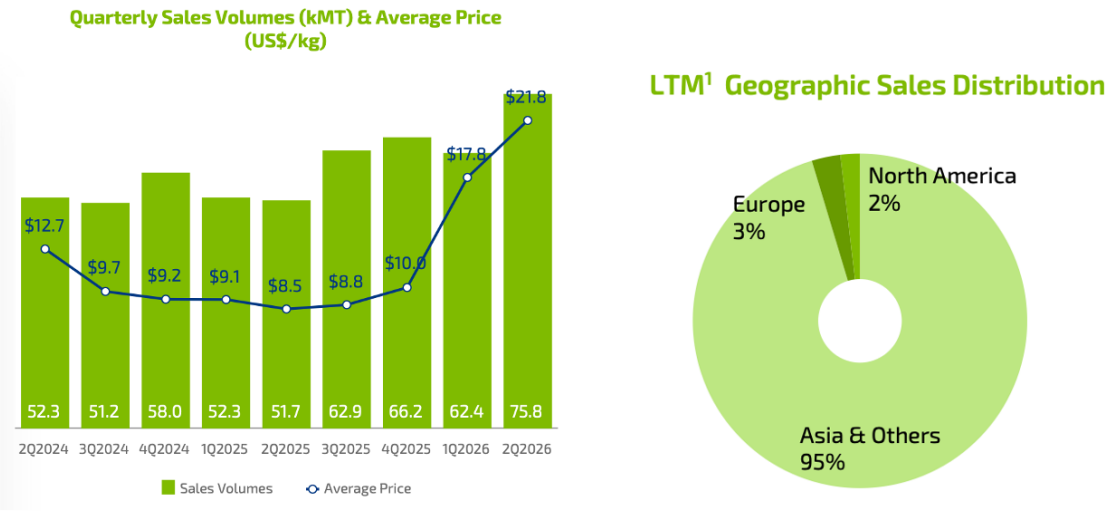
Dinámica de mercado y estrategia de precios realizados

A nivel comercial, SQM Litio ha evolucionado hacia una estrategia de volumen y flexibilidad de mercado. La empresa prioriza la utilización máxima de su capacidad instalada para capturar la creciente demanda de vehículos eléctricos, empleando un modelo de contratos indexados a precios de mercado internacionales (como los índices de China o Fastmarkets). Este enfoque permite que el rendimiento financiero sea altamente sensible a la volatilidad del mercado spot, pero se ve compensado por la escala de producción, que permite diluir costos fijos y mantener márgenes operativos saludables incluso en ciclos de precios bajos. Así, la rentabilidad no depende únicamente del precio del mineral, sino de la optimización de costos asociados, como el almacenamiento y el Packing del producto terminado, así como de la agilidad logística y la capacidad de colocar grandes volúmenes en mercados estratégicos como Asia y Europa.

A continuación, se presenta la Figura 2 que exhibe la tendencia trimestral del volumen de producción y los precios de venta de litio y sus derivados para el período 2024-2026 en la División Litio de SQM:

Figura 2

Evolución de volúmenes de ventas y precios en el Mercado: 2024-2026 y distribución geográfica de ventas



Nota SQM, Informe de Resultados 4T 2025, 2026.

A partir de la Figura 2 se puede observar el comportamiento trimestral de volúmenes y precios entre el 2Q2024 y el 2Q2026, el segmento de litio y derivados muestra un crecimiento continuo en sus volúmenes de venta, pasando de 52,3 kMT a un pico proyectado de 75,8 kMT, acompañado por una recuperación notable en el precio promedio de venta, el cual se eleva desde los $12,7 USD/kg iniciales (con un mínimo de $8,5 USD/kg en el 2Q2025) hasta alcanzar los $21,8 USD/kg en el 2Q2026.

Para responder a estas exigencias del mercado, la estrategia productiva de SQM contempla una estimación de producción de 280 kMT LCE para 2026 y la conversión de su planta de hidróxido en una instalación de doble propósito, capaz de producir tanto carbonato como hidróxido de litio a mediados de 2027, con la meta de superar los 300 kMT LCE (*Lithium Carbonate Equivalent)* de capacidad para 2027.

Desde una perspectiva geográfica, la demanda de las ventas de la compañía evidencia una altísima concentración en Asia y otros mercados (95%), mientras que Europa y Norteamérica representan un 3% y 2%, respectivamente.

Categoría Packing – SQM Litio

La categoría de Packing se considera un componente estratégico clave debido a su impacto en la continuidad operativa, la imagen de marca y el cumplimiento normativo. Actualmente, representa un gasto anual valorado en 15 millones de dólares, ajustado a las necesidades actuales.

Desde una perspectiva operativa, los envases son esenciales para asegurar un flujo continuo en las líneas de envasado. Un manejo eficiente de los empaques minimiza interrupciones, optimiza la logística y garantiza la protección adecuada de los productos durante el almacenamiento y transporte. Esto es crucial para mantener la eficiencia y reducir costos operativos.

Desde el punto de vista del marketing, los empaques juegan un papel fundamental en la percepción de la marca. Un diseño atractivo y funcional no solo mejora la experiencia del cliente, sino que también refuerza la identidad de la marca en el mercado. Los envases de calidad pueden diferenciar un producto de la competencia, transmitir valores de sostenibilidad y generar reconocimiento de marca.

En términos de regulación, ciertos empaques, como maxi sacos y sacos, requieren certificación UN por parte de la entidad Directemar. Esta certificación es vital para la exportación de sustancias peligrosas, asegurando que se cumplan los estándares internacionales de seguridad.

Algunos ejemplos de envases usados para el producto terminado en SQM son:

Tabla 1

Clasificación de envases de la categoría Packing

Categoría	Descripción
Maxisacos	Envase primario que está en contacto directo con el producto terminado. Incluye información regulatoria y la imagen de la empresa. Su capacidad varía entre 500 y 1200 kg según formato de venta.
Sacos (varios modelos)	Envase primario en contacto con el producto terminado, que también contiene información sobre composición, regulaciones, seguridad e imagen corporativa. El formato de venta oscila entre 22,5 y 25 kg, dependiendo del tipo de producto.
Pallets (plásticos y madera)	Envase secundario que facilita el almacenamiento y movimiento del producto utilizando grúas horquillas para su consolidación y transporte terrestre y marítimo.
Capuchas plásticas	Envase terciario que cubre el producto terminado, asegurando la limpieza del envase primario. Es especialmente importante en áreas de almacenamiento donde el "Packing" puede verse afectado por condiciones ambientales (ej. consolidación en puertos).
Film/wrap	Envase terciario que proporciona soporte al producto y ayuda a mantener su integridad durante el transporte y almacenamiento.
Placas de cartón	Envase secundario que sirve como base entre el pallet y el maxi saco, así como entre pallets de producto terminado.
Otros	Envases de uso interno o insumos utilizados para la consolidación de lotes en contenedores destinados a la exportación.

Nota Elaboración propia, 2026.

Clasificación de inventarios

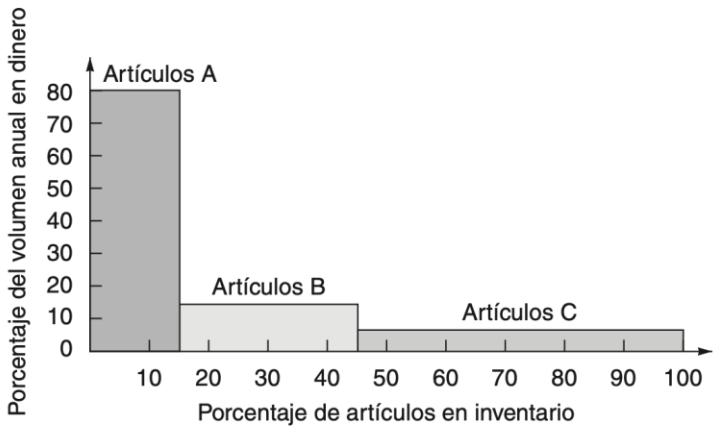
Clasificación ABC

La clasificación ABC es una metodología de gestión de inventarios y abastecimiento que permite segmentar los materiales según su importancia económica, con el fin de priorizar los esfuerzos de control y gestión sobre aquellos artículos que generan el mayor impacto en el negocio. Su fundamento se basa en el principio de Pareto, el cual establece que una pequeña proporción de elementos suele representar la mayor parte de los resultados o efectos observados. Aplicado a la gestión de inventarios, esto significa que un número reducido de productos concentra la mayor parte del valor monetario del stock o del gasto total.

La metodología fue introducida en el ámbito de la administración de materiales por H. Ford Dickie, ejecutivo de General Electric, quien en 1951 propuso clasificar los artículos de inventario según su contribución económica. Posteriormente, esta herramienta se consolidó como una de las técnicas más utilizadas para la gestión de inventarios y compras debido a su simplicidad y utilidad para la toma de decisiones.

Figura 3

Gráfico de análisis ABC para la gestión de inventarios



Nota. Heizer, Jay y Render, Barry. Principios de administración de operaciones, 2004.

El análisis ABC consiste en ordenar los materiales de acuerdo con su valor anual de consumo o gasto acumulado y clasificarlos en tres categorías:

- Categoría A: corresponde a un grupo reducido de artículos que representa el mayor porcentaje del valor total, generalmente entre un 70% y 80% del gasto.
- Categoría B: incluye materiales de importancia intermedia, que representan aproximadamente entre un 15% y 25% del valor total.
- Categoría C: agrupa una gran cantidad de artículos que tienen una baja incidencia económica, normalmente inferior al 10% del valor total.

La principal ventaja de esta metodología es que permite focalizar los recursos de gestión en aquellos materiales que tienen un mayor impacto financiero. En consecuencia, los productos clasificados como categoría A requieren un seguimiento más riguroso, negociaciones estratégicas con proveedores, monitoreo permanente y una planificación detallada del abastecimiento. Por el contrario, los productos de categoría C pueden administrarse mediante controles más simples, debido a su menor incidencia en el presupuesto total.

Clasificación XYZ

El análisis XYZ es una metodología estadística complementaria en la gestión de inventarios utilizada para clasificar los artículos según la variabilidad y predictibilidad de su demanda a lo largo del tiempo. Mientras que la clasificación ABC prioriza los insumos en función de su impacto acumulado (valor monetario), la segmentación XYZ aporta una dimensión dinámica al evaluar el grado de estabilidad, fluctuación o irregularidad en las salidas del inventario, lo cual resulta determinante para definir políticas de abastecimiento, niveles de inventario de seguridad y estrategias de conteo cíclico (Axsäter, 2015; Ballou, 2004).

El fundamento estadístico del modelo se basa en el Coeficiente de Variación (CV), indicador adimensional que mide la dispersión relativa de la demanda de un artículo i respecto a su valor central. Matemáticamente, el CV se define como:

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i}$$

Donde:

- σ_i: Desviación estándar del volumen de unidades demandadas o despachadas por unidad de tiempo.

- μ_i: Promedio del volumen de despachos por unidad de tiempo.

El Coeficiente de Variación resulta idóneo para estandarizar la evaluación de referencias con diferentes escalas de consumo, dado que un valor bajo refleja un comportamiento altamente predecible, mientras que un valor elevado evidencia una alta irregularidad en la demanda.

De acuerdo con la literatura sobre gestión de operaciones, los ítems se categorizan en tres escalones según sus umbrales de CV:

- **Categoría X ($CV_i < 0{,}5$):** Materiales con demanda estable y variabilidad constante. Presentan una alta precisión en los pronósticos de consumo, lo que permite implementar políticas de reposición automatizadas (como Just-in-Time o MRP estándar) y mantener inventarios de seguridad reducidos.
- **Categoría Y ($0{,}5 \leq CV_i < 1{,}0$):** Insumos con variabilidad intermedia o comportamiento estacional. Aunque la demanda presenta fluctuaciones moderadas, es posible predecirla a través de modelos de pronóstico avanzados o series de tiempo con ajustes periódicos en los puntos de reorden.
- **Categoría Z ($CV_i \geq 1{,}0$):** Artículos con demanda inestable, esporádica o errática. La variabilidad extrema dificulta la proyección mediante técnicas cuantitativas tradicionales, exigiendo un monitoreo continuo, políticas de stock de seguridad más robustas o esquemas de abastecimiento bajo pedido.

Modelos de pronósticos y series de tiempo

Enfoques Fundamentales del Pronóstico

En la gestión y el análisis cuantitativos, los métodos para predecir eventos futuros se dividen principalmente en dos grandes categorías conceptuales:

Modelos Asociativos (Causales). Parten del supuesto de que la variable de interés se encuentra en función de una o más variables independientes del entorno. Incorporan factores externos que explican cuantitativamente el comportamiento de la variable a pronosticar.

Modelos de Series de Tiempo. Se basan en el supuesto de que el futuro es una función estricta de sus valores históricos pasados. Ignoran los factores causales externos y proyectan la demanda futura extrayendo patrones latentes en la secuencia cronológica de los datos.

Estructura y descomposición de series de tiempo

Una serie de tiempo se define formalmente como un conjunto de observaciones sobre una variable cuantitativa recopiladas de forma secuencial en intervalos de tiempo regulares.

El análisis formal de una serie de tiempo requiere descomponer la variable observada en cuatro componentes fundamentales:

- **Tendencia (*Tt*)*:*** Movimiento de crecimiento o decrecimiento gradual a largo plazo presente en los datos.
- **Estacionalidad (*St*):** Patrones fluctuantes que se repiten a intervalos regulares de tiempo de corta duración (días, semanas, meses o trimestres).
- **Ciclos (*Ct*):** Oscilaciones o patrones ondulatorios que se repiten a lo largo de lapsos multianuales.
- **Variaciones Aleatorias / Ruido (ϵt):** Fluctuaciones imprevistas o residuales causadas por eventos fortuitos y no discernibles que no pueden predecirse matemáticamente.

Métodos de pronósticos

Método de promedios móviles simples

El método de promedios móviles es una técnica de suavizamiento estocástico dentro de los modelos de series de tiempo. Es óptimo para entornos donde la demanda del mercado presenta un comportamiento relativamente constante o estacionario en el tiempo, ya que su objetivo es amortiguar el ruido o las variaciones aleatorias de corto plazo.

El pronóstico para el período inmediato siguiente t+1, representado por Y, se calcula como la media aritmética de los *n* datos reales más recientes:

$$\hat{Y}_{t+1} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_{t-i+1}}{n} = \frac{Y_t + Y_{t-1} + Y_{t-2} + \cdots + Y_{t-n+1}}{n}$$

Donde:

- $\hat{Y}_{t+1}$ = Pronóstico para el período siguiente.
- Y_t = Demanda real u observación en el período t.
- n = Número de períodos históricos consecutivos considerados en el cálculo.

Método de promedios móviles ponderados

El método de promedios móviles ponderados es una técnica de pronóstico y suavizamiento dentro de los modelos de series de tiempo. A diferencia del promedio móvil simple, el cual otorga una importancia idéntica ($\frac{1}{n}$) a cada observación, el promedio móvil ponderado permite asignar pesos diferenciados a cada período histórico.

Esta técnica responde a la premisa empírica de que los datos más recientes suelen poseer mayor relevancia predictiva para el período futuro inmediato que las observaciones más distantes.

El pronóstico para el período inmediato siguiente $t+1$, denotado como $\hat{Y}_{t+1}$, se calcula como la suma del producto de cada observación pasada por su peso correspondiente:

$$\hat{Y}_{t+1} = \sum_{i=1}^{n} (w_i \cdot Y_{t-i+1}) = w_1 Y_t + w_2 Y_{t-1} + \cdots + w_n Y_{t-n+1}$$

Sujeto a la restricción de normalización:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1$$

Donde:

- $\hat{Y}_{t+1}$ = Pronóstico para el período inmediato siguiente.
- Y_t = Demanda u observación real en el período t (el dato más reciente).
- Y_{t-i+1} = Observación real en el período $t-i+1$.
- w_i = Peso o ponderación asignada a la observación del período $t-i+1$.
- n = Número total de períodos históricos incluidos en el análisis.

Criterios de Aplicación y Propiedades del Modelo

- **Sensibilidad Diferencial:** Asignar ponderaciones mayores a los datos más recientes ($w_1 > w_2 > \ldots > w_n$) permite que el modelo reaccione con mayor rapidez ante cambios de tendencia emergentes.
- **Control de Ruido:** Si se asignan ponderaciones más parejas o distribuidas entre los períodos pasados, el modelo actúa como un filtro suavizador de fluctuaciones aleatorias de corto plazo.
- **Ajuste de Pesos:** Los ponderadores w_i se determinan habitualmente con base en la experiencia del analizador, la intuición del mercado o mediante algoritmos de optimización que minimicen métricas de error (como el MAD o el MSE).

Aunque los promedios móviles, tanto simples como ponderados, resultan efectivos para suavizar las fluctuaciones repentinas en el patrón de la demanda y obtener estimaciones estables, presentan tres desventajas metodológicas principales:

- **Sensibilidad vs. Suavizamiento (**n**):** Aumentar el número de períodos (n) incluidos en el cálculo suaviza de mejor manera las variaciones aleatorias, pero le resta sensibilidad al modelo para responder ante cambios reales en la serie de datos.
- **Rezago ante Tendencias:** Al basarse en promedios, estos métodos no reflejan de manera óptima las tendencias. Los pronósticos permanecen atados a niveles pasados y no capturan proactivamente los virajes hacia valores más altos o más bajos, generando un desfase estructural (retraso) respecto a los valores reales.
- **Requerimiento de Datos:** La aplicación rigurosa de esta técnica exige mantener y procesar amplios registros de datos históricos de forma continua.

Método de regresión lineal simple

La regresión lineal simple es una técnica estadística que permite representar la relación lineal entre una variable dependiente y una variable independiente. Su interpretación depende de la naturaleza de la variable explicativa utilizada. Cuando esta corresponde a un factor externo capaz de explicar cambios en la demanda, el modelo puede utilizarse bajo un enfoque asociativo. Sin embargo, cuando la variable independiente corresponde al tiempo, su aplicación se interpreta como un modelo de tendencia lineal, cuyo objetivo es identificar y proyectar la evolución sistemática de la serie a lo largo del horizonte temporal.

En esta investigación, la regresión lineal simple se utiliza bajo este último enfoque, considerando el tiempo como variable independiente. Por lo tanto, el modelo no busca

establecer una relación causal entre la demanda y factores externos, sino estimar la tendencia temporal presente en los datos históricos y proyectarla hacia períodos futuros.

El modelo puede expresarse como:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 \mathrm{t} + \varepsilon_t$$

Mientras que el valor estimado por la recta de tendencia sería:

$$\hat{Y}_t = \beta_0 + \beta_1 \mathrm{t}$$

Donde:

- Y_t: corresponde a la demanda observada en el período t.
- $\hat{Y}_t$: demanda estimada o pronosticada para el período t.
- β_0: representa el nivel inicial estimado.
- β_1: corresponde a la variación promedio de la demanda por período.
- ε_t: representa el componente de error no explicado por la tendencia.

Modelo de regresión estacional

El modelo de regresión estacional permite representar series de demanda que presentan simultáneamente tendencia y estacionalidad**.** Axsäter (2015) señala que la tendencia puede estimarse mediante una regresión lineal ajustada a los datos históricos, minimizando la suma de los errores cuadrados y extrapolando posteriormente la relación obtenida hacia períodos futuros.

La tendencia básica puede expresarse como:

$$\hat{Y}_t = a + bt$$

donde $\hat{Y}_t$ corresponde a la demanda estimada, a al nivel inicial y b a la variación promedio de la demanda por período. Cuando existe estacionalidad, el modelo puede complementarse mediante un índice estacional:

$$Y_t = (a + bt)S_t + \varepsilon_t$$

donde S_t representa el efecto estacional del período. En un modelo multiplicativo, las variaciones estacionales cambian proporcionalmente con el nivel de la serie; por ejemplo, un índice de 1,2 indica una demanda esperada 20 % superior al nivel base.

Heizer y Render (2004) plantean que el pronóstico ajustado se obtiene multiplicando la tendencia estimada por el índice estacional correspondiente:

$$\hat{Y}_{t,s} = (a + bt)I_s$$

De esta forma, el modelo incorpora tanto la evolución de largo plazo de la demanda como sus fluctuaciones periódicas. Su aplicación resulta adecuada cuando el patrón estacional se mantiene relativamente estable y se repite de forma similar entre períodos.

Método de suavizamiento exponencial simple

El suavizamiento exponencial es una técnica avanzada dentro de los modelos de series de tiempo basada en el principio de los promedios móviles ponderados. Su principal ventaja operativa frente a otros métodos ponderados es que reduce significativamente la necesidad de almacenamiento y procesamiento de datos, ya que no requiere mantener amplios registros históricos de la serie temporal, sino únicamente el último valor real observado y su correspondiente pronóstico. El objetivo del modelo es atenuar el ruido aleatorio adaptando gradualmente las estimaciones mediante un mecanismo de autorregulación o corrección de errores.

El nuevo pronóstico para el período t ($\hat{Y}_t$ o F_t) se define como el pronóstico del período anterior F_{t-1} ajustado por una fracción del error de pronóstico cometido en dicho período ($A_{t-1} - F_{t-1}$):

$$F_t = F_{t-1} + \alpha(A_{t-1} - F_{t-1})$$

Reagrupando los términos:

$$F_t = \alpha A_{t-1} + (1 - \alpha) F_{t-1}$$

Donde:

- F_t: Nuevo pronóstico para el período actual o siguiente.
- F_{t-1}: Pronóstico calculado para el período anterior.
- A_{t-1}: Demanda u observación real registrada en el período anterior.
- α: Constante de suavizamiento o ponderación ($0 \leq \alpha \leq 1$).

El término $(A_{t-1} - F_{t-1})$ representa la discrepancia o error de pronóstico del período previo. Por lo tanto, el nuevo pronóstico equivale a la estimación anterior corregida proporcionalmente a la magnitud del error observado.

La constante de suavizamiento (α) actúa como el parámetro de peso ponderador determinado por el analista. En la práctica empresarial, sus valores comúnmente oscilan en el intervalo de 0,05 a 0,50.

- **Valores elevados de α (alta sensibilidad):** Asignan una mayor ponderación a la información reciente. Permiten responder con mayor rapidez a cambios de nivel o tendencias en la demanda. Caso límite (α=1,0): la ecuación se reduce a $F_t = A_{t-1}$, descartando por completo el historial previo y convirtiéndose en un modelo intuitivo (donde el pronóstico futuro es exactamente igual al último dato real conocido).
- **Valores bajos de α (alta suavización):** Otorgan menor peso a la observación más reciente y distribuyen la ponderación a lo largo de un horizonte de períodos pasados más extenso (por ejemplo, con α=0,1, el modelo distribuye su peso considerando implícitamente hasta 19 períodos anteriores). Es idóneo para series estables con alta variación aleatoria.

Método de suavizamiento exponencial con ajuste de tendencia

El suavizamiento exponencial simple presenta una limitación metodológica sustancial al ser aplicado sobre series temporales con comportamiento tendencial: genera un sesgo o retraso estructural frente a la demanda real. Al comportarse como un promedio móvil, la estimación queda constantemente por debajo (en tendencias crecientes) o por encima (en tendencias decrecientes) de los valores observados.

Para corregir este desfase manteniéndose en el entorno analítico del suavizamiento exponencial, se utiliza el modelo de Suavizamiento exponencial con Ajuste de tendencia (también conocido como Método de Holt). Esta técnica incorpora dos niveles de suavizamiento: uno para el nivel promedio de la serie y otro para la tasa de variación o pendiente (tendencia).

El pronóstico integral que incluye la tendencia, denotado como FIT_t (Forecast Including Trend), se construye a partir de la suma del valor promedio suavizado (F_t) y la componente de tendencia suavizada (T_t):

$$FIT_t = F_t + T_t$$

Para actualizar los componentes en cada período t, el algoritmo utiliza dos constantes de suavizamiento (α y β):

- Pronóstico Suavizado del Promedio (F_t) : Combina la observación real del período anterior con el pronóstico ajustado por tendencia trazado en dicho período:

$$F_t = \alpha A_{t-1} + (1-\alpha)(F_{t-1} + T_{t-1})$$

- Tendencia Suavizada (T_t): Actualiza la pendiente estimada a partir de la diferencia entre el pronóstico actual y el anterior, ponderada con la estimación de tendencia previa:

$$T_t = \beta(F_t - F_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}$$

Donde:

- FIT_t: Pronóstico total que incluye el ajuste de tendencia para el período t.
- F_t : Componente del promedio o nivel suavizado exponencialmente en el período t.
- T_t : Componente de la tendencia suavizada exponencialmente en el período t.
- A_{t-1} : Demanda real observada en el período $t - 1$.
- α : Constante de suavizamiento para el promedio ($0 \leq \alpha \leq 1$).
- β : Constante de suavizamiento para la tendencia ($0 \leq \beta \leq 1$).

Dinámica de los Parámetros de Suavizamiento ($\boldsymbol{\alpha}$ y $\boldsymbol{\beta}$)

- **Constante α (Nivel):** Controla la sensibilidad del promedio ante las observaciones recientes de la demanda.
- **Constante β (Tendencia):** Pondera la tasa de cambio reciente en la tendencia. Un valor de β alto otorga mayor capacidad de respuesta a cambios acelerados en la inclinación de la serie, mientras que un valor bajo estabiliza la pendiente reduciendo el impacto del ruido puntual.

Método Holt-Winters

El método Holt-Winters corresponde a una extensión del suavizamiento exponencial que permite pronosticar series que presentan simultáneamente nivel, tendencia y estacionalidad. A diferencia de la regresión, estos componentes se actualizan de manera progresiva a medida que se incorporan nuevas observaciones, mediante las constantes de suavizamiento α, β y γ. Axsäter (2015) señala que este enfoque es apropiado principalmente cuando las variaciones estacionales son claras y persistentes en el tiempo.

En su formulación multiplicativa, los componentes se actualizan mediante:

$$L_t = \alpha\left(\frac{Y_t}{S_{t-m}}\right) + (1-\alpha)(L_{t-1} + T_{t-1})$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1-\beta)T_{t-1}$$

$$S_t = \gamma\left(\frac{Y_t}{L_t}\right) + (1-\gamma)S_{t-m}$$

A partir de ellos, el pronóstico para h períodos futuros se obtiene combinando el nivel, la tendencia y el índice estacional correspondiente:

$$\hat{Y}_{t+h} = (L_t + hT_t)S_{t+h}$$

De esta forma, el modelo se adapta a los cambios recientes de la demanda, aunque valores elevados de las constantes de suavizamiento aumentan su sensibilidad frente a variaciones aleatorias. Además, Axsäter (2015) advierte que cuando existe alta variabilidad puede ser difícil distinguir entre estacionalidad real y fluctuaciones aleatorias, por lo que su aplicación resulta más adecuada cuando el patrón estacional es evidente y consistente.

Elección y evaluación de métodos de series de tiempo

La selección de un método adecuado para elaborar pronósticos con series de tiempo depende principalmente del desempeño del modelo, el cual se evalúa a través de los errores de pronóstico. Este análisis cuantitativo proporciona los criterios necesarios para determinar qué técnica de pronóstico se adapta de mejor manera a la estructura de la demanda.

- **Importancia del desempeño:** Determina qué tan cerca se encuentra la estimación de la realidad.
- **Detección de fallas:** Permite identificar cuándo un modelo ha dejado de ser preciso o efectivo.
- **Criterio de selección:** Orienta a elegir la técnica óptima según el comportamiento histórico de los datos.

Definición y Clasificación del Error de Pronóstico

El error de pronóstico para un período determinado (E_t) representa la diferencia entre la demanda real (D_t) y el valor pronosticado (F_t), expresándose formalmente como:

$$E_t = D_t - F_t$$

Dado que los pronósticos casi siempre contienen desviaciones, los errores se dividen en dos categorías fundamentales:

- **Errores de sesgo:** Son el resultado de equivocaciones sistemáticas en las que el pronóstico resulta de manera persistente demasiado alto o demasiado bajo. Ocurren con frecuencia cuando se pasan por alto o no se estiman correctamente los patrones de la demanda, como las tendencias, las variaciones estacionales o los comportamientos cíclicos.
- **Errores aleatorios:** Se originan por factores imprevisibles que provocan que el pronóstico se desvíe de la demanda real. Aunque los analistas buscan minimizar sus efectos eligiendo modelos adecuados, es imposible eliminar la aleatoriedad en su totalidad.

Mediciones del Sesgo en el Pronóstico

Para analizar el desempeño a lo largo de varios períodos, se consolidan las mediciones de los errores individuales. Cuando se evalúa la tendencia direccional o la inclinación constante del modelo, se analiza la presencia de sesgos mediante el comportamiento acumulado de las desviaciones.

- **Suma acumulada de errores de pronóstico (CFE):** Mide el error total acumulado mediante la ecuación $\text{CFE} = \sum E_t$. Permite evaluar si existe un sesgo en la estimación; si

el valor crece de forma constante en una dirección, demuestra una deficiencia sistemática del modelo (como la omisión de una tendencia o un cambio estacional).

- **Error de pronóstico promedio:** Muestra la desviación media del modelo por período, calculada dividiendo la suma acumulada entre el número total de períodos (CFE$/n$).

Mediciones de la Dispersión del Error

Existen métricas encargadas de medir la magnitud absoluta o la dispersión de los errores sin importar la dirección que tomen. Un valor pequeño en estas mediciones indica que el pronóstico es cercano a la demanda real, mientras que valores elevados señalan desviaciones considerables.

- **Error cuadrático medio (MSE):** Mide la dispersión elevando al cuadrado los errores (MSE $= \frac{\sum E_t^2}{n}$). Esta métrica otorga una ponderación o castigo mucho mayor a los errores de gran magnitud.
- **Raíz del error cuadrático medio (RMSE):** Corresponde a la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de las diferencias entre los valores reales y pronosticados, y que puede utilizarse para comparar el desempeño de distintos modelos de pronóstico. Considerando el error de pronóstico $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$, el RMSE se calcula como: $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(Y_t - \hat{Y}_t)^2}$, donde Y_t corresponde al valor real, $\hat{Y}_t$ al valor pronosticado y n al número de observaciones evaluadas.
- **Desviación estándar (s):** Mide la dispersión ponderando también con mayor fuerza los errores grandes debido a su naturaleza cuadrática. Es útil para determinar los niveles de inventario de seguridad requeridos.

- **Desviación media absoluta (MAD):** Calcula el promedio de las desviaciones en valor absoluto (MAD $= \frac{\sum |E_t|}{n}$), ignorando si las estimaciones fueron por exceso o por defecto. Es muy utilizada por la gerencia debido a su fácil comprensión, además de aplicarse en señales de rastreo y control de inventarios.

Mediciones Relativas del Error

Para evaluar el desempeño en una perspectiva adecuada con respecto a la escala de las operaciones, se recurre a métricas que expresan el error de forma relativa en lugar de valores absolutos.

- **Error porcentual medio absoluto (MAPE):** Mide la proporción del error con respecto al nivel de la demanda (MAPE $= \frac{\sum(|E_t|/D_t)\times 100}{n}$).
- **Perspectiva del MAPE:** Permite colocar el error en su dimensión correcta, ya que una desviación absoluta de 100 unidades representa un impacto porcentual mucho más grave cuando la demanda es de 200 unidades que cuando es de 1000 unidades.
- **Comparabilidad:** Constituye la mejor medida de error para realizar comparaciones entre diferentes series de tiempo o entre distintas unidades de mantenimiento de stock (SKU).

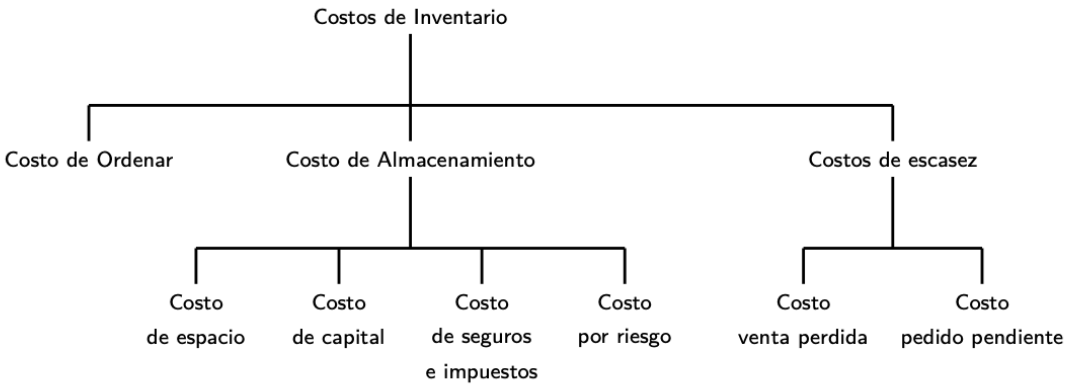
Modelos de gestión de abastecimiento

Costos asociados a la gestión de inventarios

Previo a detallar los modelos de abastecimientos, uno de los parámetros fundamentales para la gestión de inventarios son los costos de ordenar, de almacenamiento y de escasez. La Figura 4 desglosa este ítem mediante el siguiente esquema gráfico:

Figura 4

Desglose de costos de inventarios



Nota Chopra & Meindl, Administración de la cadena de suministro, 2013.

Costos de ordenar (ordering cost). Agrupa los gastos directos e indirectos generados durante el procedimiento, ejecución, transmisión, manejo y adquisición de un pedido para el reabastecimiento de existencias, activándose únicamente al emitir una orden de pedido o de compra. En empresas del rubro retail o de servicios, este concepto abarca los costos administrativos de procesamiento de facturas en contabilidad y de transmisión por parte de compras, así como los gastos de transporte, cuando no vienen incluidos en el precio del artículo, recepción e inspección de las mercancías recibidas. Su unidad de medida se expresa directamente en unidades monetarias (USD o $/OC).

Costos de Almacenamiento (Holding Cost). Representan los gastos asociados a mantener y conservar productos en inventario durante un período determinado. De forma agregada, el costo total de almacenamiento (h) expresa el gasto de mantener una unidad por unidad de tiempo ($/unidad·tiempo) y se determina mediante la relación:

$$h = IC$$

Donde:

- C: valor unitario del artículo.
- I: Tasa de almacenamiento expresada como porcentaje anual de dicho valor ($I \in [20\%, 40\%]$).

Sus componentes principales son:

Costo de Espacio. Cargos derivados del uso de volumen o superficie dentro de la infraestructura de almacenamiento. En instalaciones arrendadas, la renta mensual se distribuye en función del espacio ocupado ($/m2·mes); mientras que en bodegas propias o bajo contrato, se determina prorrateando los costos de operación y costos fijos (como equipos e instalaciones) sobre la base del espacio utilizado.

Costo de Capital (Costo de Oportunidad). Refleja el rendimiento financiero sacrificado al mantener fondos inmovilizados en existencias en lugar de destinarlos a alternativas de inversión más lucrativas. Su cálculo se realiza comúnmente mediante la tasa promedio de costo de capital (WACC), la tasa de retorno requerida o la rentabilidad de inversiones descartadas.

Costos de Seguros e Impuestos: Gastos legales y de protección patrimonial que varían de forma proporcional al valor total del capital y volumen de inventario disponible en bodega.

Costos de Riesgo de Inventario: Pérdidas económicas ocasionadas por eventos imprevistos o la naturaleza del producto durante su estancia en bodega, tales como deterioro físico, robos, mermas, daños accidentales u obsolescencia técnica y comercial.

Costos de Escasez (Shortage Cost). Ocurren cuando la demanda no puede ser satisfecha a tiempo debido a la falta de existencias (quiebres de stock), clasificándose según la reacción del cliente o la naturaleza del contrato:

Costos por Venta Perdida (Lost Sale Cost). Se presentan cuando el cliente cancela definitivamente su solicitud ante la falta de existencias. El costo equivale al margen de beneficio económico que se habría obtenido por la venta no realizada, sumado al impacto negativo en la imagen y reputación de la marca. Su unidad de medida es de monto directo por unidad no entregada ($/unidad).

Costos por Pedido Pendiente (Backorder Cost). Ocurren cuando el cliente acepta esperar el reabastecimiento, retrasando la venta sin cancelarla. Esta espera genera extracostos administrativos, descuentos de compensación, fletes expresos o penalizaciones contractuales. Se penalizan bajo dos esquemas:

- Penalización por Unidad Faltante: Considera únicamente la cantidad total de unidades no entregadas al momento del quiebre ($/unidad).
- Penalización por Unidad y Tiempo: Evalúa tanto el volumen de unidades faltantes como el tiempo total transcurrido hasta la regularización de la entrega ($/unidad·unidad de tiempo), esquema crítico en sectores industriales donde los retrasos generan paradas operativas.

Modelo probabilístico e inventario de seguridad con demanda variable y Lead Time constante

Punto de reorden (ROP)

El nivel de inventario a partir del cual debe emitirse una orden de reposición se denomina punto de reorden o punto de pedido, por sus siglas en inglés ROP ("ReOrder Point"). La fórmula para determinarlo es la siguiente:

$$ROP = dL + SS$$

Donde:

- d: demanda diaria
- L: tiempo de entrega en días
- SS: Stock de seguridad

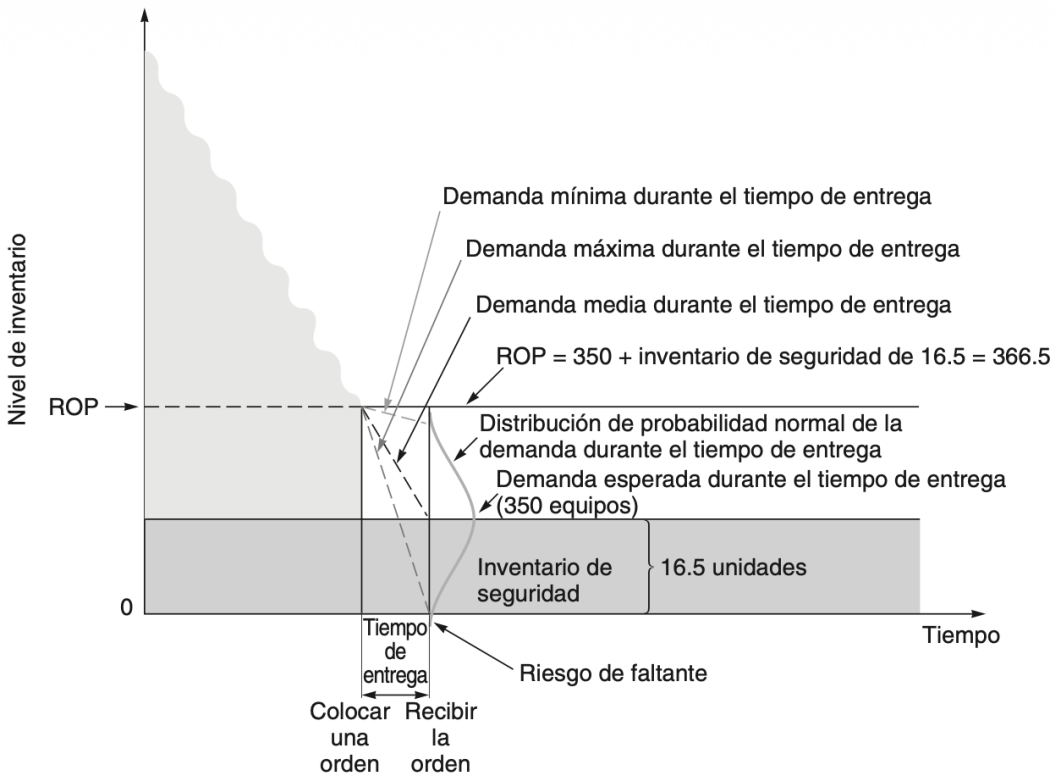
Y la demanda diaria "d" se obtiene:

$$d = \frac{Demanda\ anual}{numero\ de\ dias\ en\ un\ año}$$

La Figura 5 muestra el comportamiento dinámico del inventario continuo bajo condiciones de variabilidad en la demanda durante el tiempo de entrega (Lead Time). La metodología de gestión se articula en torno a la definición del Punto de reorden (ROP), el cual actúa como el umbral de inventario físico que gatilla una nueva orden de compra para reabastecer el sistema antes de que ocurra un quiebre de stock. Esta interpretación corresponde al uso clásico del ROP en sistemas de reposición continua. En el modelo desarrollado en esta investigación, el ROP no actúa como un gatillo automático de compra, sino como una referencia de gestión y condición terminal utilizada para resguardar el abastecimiento futuro.

Figura 5

Cambios en niveles de inventario con demanda variable



Nota Tomado de Principios de administración de operaciones, Heizer Jay, 2004.

A medida que el producto se consume, el nivel de inventario disminuye gradualmente. Cuando las existencias alcanzan exactamente la cota del ROP, el sistema emite una orden de reabastecimiento al proveedor. Mientras que el Lead Time entrega una ventana temporal que corresponde al intervalo transcurrido desde la emisión de la orden hasta la recepción física del lote en bodega. Durante este tiempo, la planta continúa operando y consumiendo existencias exclusivamente del inventario remanente. Dado que el consumo durante el Lead Time no es constante, se modela mediante una distribución de probabilidad normal. Esta curva refleja tres escenarios de consumo posibles durante la espera:

- **Demanda Media:** El comportamiento esperado o promedio durante el período de entrega.
- **Demanda Mínima y Máxima:** Los extremos inferior y superior asociados a las fluctuaciones del proceso.

Inventario o stock de seguridad (SS)

Es un colchón de existencias mantenido por encima de cero para absorber las desviaciones cuando la demanda real supera el consumo medio esperado.

$$SS = Z \cdot \sigma_{dLT}$$

Donde:

- **Desviación estándar de la demanda durante el Lead Time (σ_{dLT}):** representa la variabilidad de la demanda acumulada durante el período de reposición.

Bajo el supuesto de demanda independiente entre períodos y Lead Time constante, esta desviación estándar se calcula mediante:

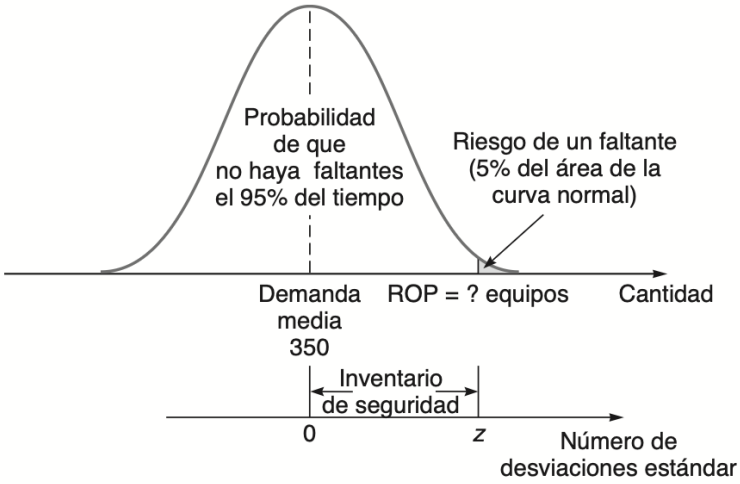
$$\sigma_{dLT} = \sigma_d \sqrt{LT}$$

Donde σ_d corresponde a la desviación estándar de la demanda por período y LT al tiempo de reposición, expresado en la misma unidad temporal. En esta formulación, la incertidumbre proviene exclusivamente de la variabilidad de la demanda, mientras que el Lead Time se considera constante.

- **Factor de Nivel de Servicio (Z):** Parámetro estadístico derivado de la distribución normal estándar, el cual determina el porcentaje deseado de ciclos de reabastecimiento satisfechos sin quiebres de stock.

Figura 6

Ejemplo de Inventario de seguridad con Nivel de servicio del 95%



Nota Tomado de Principios de administración de operaciones, Heizer Jay, 2004.

La Figura 6 corresponde a un ejemplo de un nivel de servicio del 95%, aquí se puede observar que existe una zona de riesgo de faltante, representada gráficamente por la cola inferior de la distribución gaussiana que sobrepasa el nivel de inventario de seguridad (5%). Este segmento cuantifica la probabilidad estadística de incurrir en un quiebre de stock cuando la demanda real acumulada durante el tiempo de entrega excede la capacidad máxima de cobertura provista por el Punto de reorden (ROP).

Indicadores de desempeño para la gestión de abastecimiento

Los indicadores clave de desempeño permiten evaluar cuantitativamente el funcionamiento de la gestión de abastecimiento e inventarios. En esta investigación se consideran indicadores asociados a tres dimensiones: disponibilidad de inventario, cumplimiento de abastecimiento y calidad del pronóstico, mediante el nivel de servicio tipo α, OTIF y la asertividad del pronóstico, respectivamente.

Nivel de servicio tipo α

El nivel de servicio tipo α, representa la probabilidad de completar un ciclo de reposición sin experimentar un quiebre de inventario. Axsäter (2015) define esta medida como la probabilidad de que la demanda durante el Lead Time sea inferior al punto de reposición establecido.

Se expresa como $\alpha = P(D_L \leq R)$, donde D_L corresponde a la demanda acumulada durante el Lead Time y R al punto de reposición. Bajo el supuesto de demanda Normal utilizado en esta investigación $\alpha = \Phi\left(\frac{R-\mu_L}{\sigma_L}\right)$, donde μ_L y σ_L corresponden a la media y desviación estándar de la demanda durante el Lead Time. De esta relación se obtiene el stock de seguridad y el punto de reposición, por lo tanto, un mayor nivel de servicio implica mantener un mayor stock de seguridad para disminuir la probabilidad de quiebre.

OTIF (On Time In Full)

El indicador OTIF mide el porcentaje de órdenes que son entregadas en la fecha comprometida y en la cantidad completa solicitada. Por lo tanto, ambas condiciones deben cumplirse simultáneamente para considerar una orden como satisfactoria. Para efectos del abastecimiento de materiales, el indicador puede expresarse como:

$$OTIF = \frac{\text{Ordenes recibidas completas y a tiempo}}{\text{Total de ordenes recibidas}} \times 100$$

En el contexto de esta investigación, este KPI permite evaluar el cumplimiento de los proveedores respecto de las condiciones de cantidad y fecha comprometidas, constituyendo una medida relevante de confiabilidad del abastecimiento. El monitoreo del OTIF permite evaluar el cumplimiento de los plazos de abastecimiento y complementar la caracterización

del Lead Time real de los proveedores, identificando atrasos y desviaciones respecto de los tiempos comprometidos.

Asertividad del pronóstico

La asertividad o exactitud del pronóstico representa el grado de correspondencia entre la demanda estimada y la demanda efectivamente observada. Heizer y Render (2004) señalan que la precisión de un modelo de pronóstico se evalúa comparando los valores pronosticados con los reales y utilizando medidas de error como MAD, MSE y MAPE.

Para expresar la exactitud como un KPI porcentual, en esta investigación puede definirse como el complemento del MAPE:

$$\text{Asertividad del pronóstico} = 100\% - MAPE$$

Modelo de Lot-Sizing multiartículo y multiperíodo aplicado a abastecimiento

El problema de determinación del tamaño de lote (Lot-Sizing) aplicado a la gestión de compras consiste en un enfoque de optimización matemática orientado a la toma de decisiones tácticas y operativas sobre el reabastecimiento de inventarios. Su propósito es definir de manera simultánea la cantidad óptima de unidades a adquirir y el momento temporal exacto para emitir las órdenes de compra. A diferencia de los modelos de lote económico tradicionales y estáticos, este enfoque asume que la demanda es dinámica y conocida a lo largo de un horizonte de planificación específico, permitiendo fluctuaciones significativas entre los distintos períodos de tiempo analizados.

Estructura Multiartículo y Multiperíodo

La naturaleza multiartículo del modelo aborda la gestión de un portafolio diversificado de productos de forma simultánea, reconociendo que los diferentes ítems no se

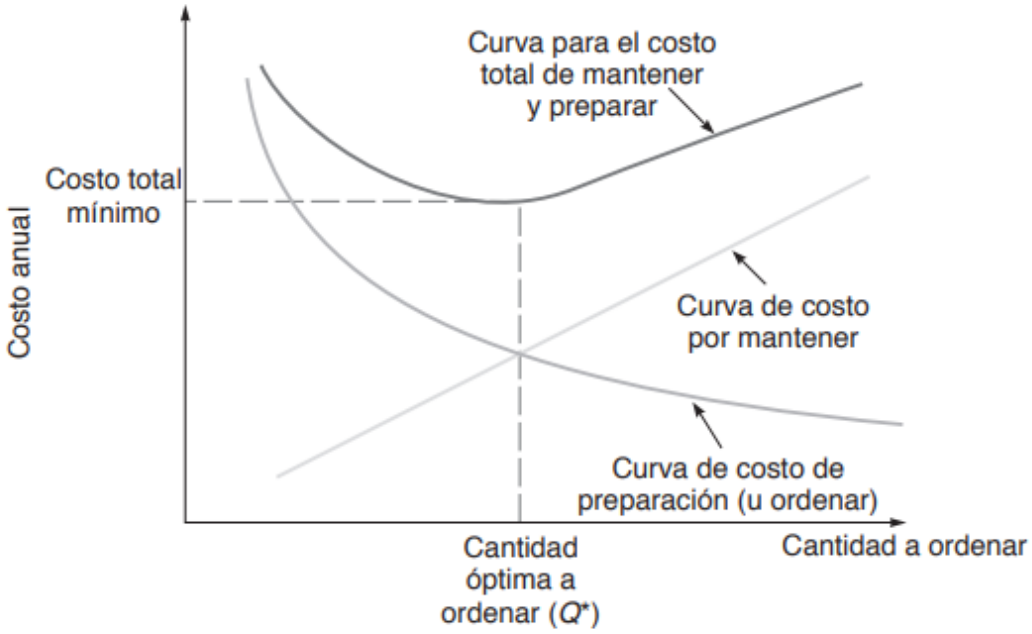
comportan de manera aislada, sino que interactúan al compartir los mismos recursos logísticos o restricciones organizacionales. Por su parte, la estructura multiperíodo fragmenta el horizonte temporal global en intervalos discretos e interconectados. Esta configuración permite que las decisiones tomadas en un período determinado afecten directamente los estados financieros y los niveles de existencias de los períodos subsecuentes, estableciendo una dependencia temporal mediante la transferencia de inventarios remanentes.

Trade-off de Costos y Función Objetivo

El fundamento económico del modelo radica en la resolución de un conflicto de costos contrapuestos (trade-off), modelado formalmente a través de una función objetivo de minimización. Por un lado, se presentan los costos fijos de emisión de pedido, que se activan de forma binaria e independiente del volumen adquirido cada vez que se genera una orden de compra para un artículo. Por otro lado, operan los costos variables de adquisición y los costos de mantener inventario, los cuales crecen de manera lineal o proporcional a la cantidad de stock retenido al cierre de cada período temporal. El modelo matemáticamente balancea la penalización de realizar pedidos frecuentes frente a la penalización de almacenar excesos de mercancía.

Figura 7

Determinación del costo total mínimo e inventario óptimo



Nota Tomado de Principios de administración de operaciones, Heizer Jay, 2004.

Como se muestra en la figura anterior, el costo total mínimo se alcanza mediante la cantidad óptima de pedido (Q*), obtenida al equilibrar los costos de mantenimiento de inventario y los costos de preparación de pedidos.

Restricciones de Balance y Capacidad Común

La viabilidad operativa del modelo se rige por dos tipologías principales de restricciones matemáticas. Las ecuaciones de balance de inventario imponen la continuidad del flujo material, decretando que el stock final de un período debe equivaler estrictamente al inventario inicial, sumado a las compras ingresadas y restando la demanda requerida en ese mismo lapso. Paralelamente, las restricciones de capacidad acoplada modelan la competencia de los múltiples artículos por un recurso limitado y compartido de la

organización. Estas fronteras delimitan que la agregación del volumen, peso, presupuesto financiero o espacio físico requerido por las órdenes de compra de todos los productos en un período no puede exceder la capacidad máxima disponible para dicho intervalo.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta para el desarrollo de esta investigación se estructura en seis etapas secuenciales, las cuales permiten avanzar desde la caracterización de los materiales de la categoría Packing hasta la obtención de un plan de compras mediante herramientas de optimización matemática. El proceso integra técnicas de clasificación de inventarios, cálculo y proyección de demanda, definición de políticas de inventario, formulación de un modelo de optimización y su implementación computacional, con el propósito de diseñar una estrategia de abastecimiento que minimice los costos totales de gestión y resguarde la continuidad operacional de la División Litio de SQM.

La Figura 8 resume la metodología general empleada en el estudio.

Figura 8

Metodología de trabajo propuesto



Nota Elaboración propia, 2026.

Clasificación de la categoría

La primera etapa consiste en identificar y priorizar los materiales más relevantes dentro de la categoría Packing. Dado que la categoría está compuesta por 29 SKU de distinta naturaleza y relevancia económica, resulta necesario focalizar el análisis en aquellos materiales que generan un mayor impacto financiero y operacional.

Para ello se emplean de manera complementaria las metodologías ABC y XYZ. La clasificación ABC permite segregar los SKU de mayor impacto económico dentro de la categoría, mientras que la clasificación XYZ permite caracterizar el comportamiento histórico de la demanda según su nivel de variabilidad. La combinación de ambas herramientas permite seleccionar los materiales críticos que serán analizados en mayor profundidad durante las etapas posteriores.

Cálculo de demanda de corto plazo

Una vez identificados los materiales estratégicos, se procede a determinar la demanda proyectada de los envases a partir del programa de producción de la División Litio. La planificación de operaciones proporciona el volumen mensual esperado de producción de Carbonato e Hidróxido de Litio para el horizonte de análisis. Sin embargo, estos datos se encuentran expresados en toneladas de producto terminado y no en unidades de envases requeridos. Por esta razón, es necesario transformar dicha información utilizando la lista de materiales o Bill of Material (BOM). El BOM corresponde al manual de envasado de SQM y establece la relación existente entre cada tonelada producida y los insumos de Packing requeridos para su comercialización, incluyendo pallets, maxi sacos y otros materiales complementarios. Mediante esta conversión se obtiene la demanda mensual de cada SKU,

generándose la serie de tiempo que servirá como base para el desarrollo de los modelos de pronóstico.

Pronóstico de demanda de largo plazo

La tercera etapa tiene como objetivo proyectar la demanda de envases en el largo plazo, específicamente para el horizonte 2027, con el fin de entregar visibilidad anticipada para la toma de decisiones de abastecimiento y negociación contractual. Para ello, se preseleccionan distintos métodos de pronóstico a partir de la información histórica disponible.

Los métodos considerados en esta investigación corresponden a regresión lineal, regresión estacional, Holt-Winters y promedio móvil. Posteriormente, se calcula el error de pronóstico de cada alternativa, seleccionando el método más adecuado mediante el uso del RMSE (Root Mean Squared Error). Esta métrica fue escogida debido a que penaliza en mayor medida las desviaciones grandes, criterio especialmente pertinente en materiales críticos, donde errores significativos de pronóstico pueden traducirse en quiebres de stock o sobreinventarios relevantes.

Políticas de inventario

Una vez obtenida la demanda esperada para cada material, se establecen las políticas de inventario necesarias para asegurar la continuidad operacional de la planta. Considerando que la demanda presenta variabilidad y que los tiempos de abastecimiento son significativos, especialmente para materiales importados, se adopta un modelo probabilístico de inventarios con demanda variable y Lead Time constante. A partir de este enfoque se determinan dos parámetros fundamentales: el punto de reorden (ROP) y el stock de seguridad (SS).

Modelo de optimización

Con la demanda proyectada y las políticas de inventario definidas, se desarrolla un modelo matemático de optimización multiperíodo y multiartículo para determinar las decisiones óptimas de compra durante el año 2027.

El modelo incorpora los principales elementos operacionales presentes en la gestión de abastecimiento de la categoría Packing: demanda mensual proyectada, Lead Times de abastecimiento, stock de seguridad, puntos de reorden, capacidad de almacenamiento, inventario inicial, pedidos en tránsito, cantidades mínimas de compra (MOQ), costos de compra, costos de almacenamiento y costos de emisión de órdenes.

Ejecución en AMPL

Finalmente, la sexta etapa corresponde a la implementación computacional del modelo. Para ello, la formulación matemática se desarrolla en AMPL, lenguaje especializado en optimización que permite representar de manera estructurada los conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y restricciones del problema.

Posteriormente, se realiza la selección del solver de acuerdo con las características del modelo, el cual corresponde a una formulación MILP (Mixed-Integer Linear Programming). La ejecución en AMPL permite obtener los resultados del modelo, particularmente el forecast de compra o plan de abastecimiento óptimo para el período analizado.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Clasificación ABC

Con el objetivo de identificar oportunidades de optimización y priorizar los esfuerzos de gestión sobre los materiales de mayor impacto económico, se realizó un análisis de clasificación ABC para la proyección de costos de envases correspondiente al año 2026. Esta metodología permite segmentar los materiales según su contribución al gasto total, facilitando la toma de decisiones y la focalización de iniciativas de abastecimiento, negociación y control.

La Tabla 2 presenta el detalle de los SKU analizados, ordenados según su participación en el gasto total y su correspondiente clasificación ABC. Esta información permite identificar los materiales que concentran la mayor proporción del presupuesto y que, por lo tanto, requieren una gestión más estratégica.

Tabla 2

Clasificación ABC por SKU

#	Categoría	Nombre envase	Monto del presupuesto (usd)	% del presupuesto	Indicador ABC
1	Pallet	Pallet Plástico	5.044.706	34%	A
2	Pallet	Pallet Madera 6x6	2.988.915	20%	A
3	Maxisaco	Maxisaco Fino	2.126.486	14%	A
4	Maxisaco	Maxisaco Micronizado	2.000.728	13%	A
5	Maxisaco	Maxisaco Hidróxido	790.337	5%	B
6	Maxisaco	Maxisaco Cristal	617.831	4%	B
7	Cartón	Placa Cartón Corrugado	260.335	2%	B
8	Plástico	Strech Film	239.986	2%	B
9	Bolsa	Bolsa 25 Kg H-11 (LHI)	226.715	2%	B
10	Plástico	Capucha Grande	137.228	1%	C
11	Pallet	Pallet Madera 5x3	109.215	1%	C
12	Otros	Zuncho PET	93.319	1%	C
13	Cartón	Placa Cartón Punta Roma	76.986	1%	C
14	Plástico	Capucha chica	64.414	0%	C
15	Plástico	Bolsas para muestras (chica)	55.477	0%	C

16	Otros	Zuncho para embarque	48.075	0%	C
17	Plástico	Bolsas para muestras (grande)	35.215	0%	C
18	Bolsa	Bolsa 20 Kg (MIC9000)	21.203	0%	C
19	Bolsa	Bolsa 20 Kg (Fino)	18.781	0%	C
20	Pallet	Pallet Madera 7x4	12.775	0%	C
21	Bolsa	Bolsa 25 Kg (Cry)	11.750	0%	C
22	Bolsa	Bolsa 50 Lb H-22	8.072	0%	C
23	Otros	Sellos para embarque	7.261	0%	C
24	Bolsa	Bolsa H-33 (LHT-B)	5.720	0%	C
25	Otros	Hebilla (embarque)	5.717	0%	C
26	Plástico	Film Top Sheet	1.625	0%	C
27	Etiqueta	Etiqueta UN2680	1.454	0%	C
28	Etiqueta	Etiqueta corrosiva 8	1.396	0%	C
29	Otros	Sellos para segregado	1.304	0%	C

Nota Elaboración propia, 2026.

A partir de la información anterior, la Tabla 3 resume la distribución de los materiales por categoría ABC, mostrando la cantidad de SKU y el porcentaje de gasto asociado a cada grupo.

Tabla 3

Resumen Clasificación ABC de envases 2026

Clasificación ABC	N° SKU	% SKU	Monto del presupuesto 2026 (usd)	% del presupuesto
A	4	14%	12.160.836	81%
B	5	17%	2.135.204	14%
C	20	69%	716.985	5%

Nota Elaboración propia, 2026.

Los resultados evidencian una alta concentración del gasto en un número reducido de materiales. De los 29 SKU analizados, solo 4 productos fueron clasificados como categoría A, representando el 14% del total de referencias y concentrando el 81% del gasto proyectado, equivalente a USD 12,16 millones. Por su parte, la categoría B agrupa 5 SKU (17% del total), los cuales representan un 14% del gasto, mientras que la categoría C concentra 20 SKU (69%

del total), pero únicamente un 5% del gasto proyectado. Con el propósito de visualizar el peso específico de las categorías más relevantes, la Tabla 4 agrupa los materiales estratégicos en función de su tipología, permitiendo identificar la contribución de pallets y maxi sacos al gasto total de envases.

Tabla 4

Contribución al presupuesto por categoría

Categoría	Costo 2026	N° SKU
Pallet	8.155.612	4
Maxisaco	5.535.382	4
Plástico	533.946	6
Cartón	337.321	2
Bolsa	292.241	6
Otros	155.675	5
Etiqueta	2.850	2
Total	**15.013.026**	**29**

Nota Elaboración propia, 2026.

Los resultados muestran que las categorías de pallets y maxi sacos concentran conjuntamente el 91% del presupuesto total de envases, equivalente a USD 13,69 millones. En particular, los pallets representan el 54% del gasto total, mientras que los maxi sacos alcanzan el 37%, posicionándose como las categorías de mayor relevancia económica dentro del portafolio analizado.

La importancia de analizar estas categorías radica en que cualquier mejora en precios, especificaciones técnicas, condiciones comerciales o estrategias de abastecimiento puede generar un impacto significativo en el costo total de envases. Por esta razón, pallets y maxi sacos deben ser considerados materiales estratégicos, requiriendo una gestión prioritaria que contemple análisis de mercado, procesos de licitación, evaluación de proveedores y seguimiento permanente de oportunidades de optimización. En consecuencia, concentrar los

esfuerzos de gestión en estas categorías permite maximizar el potencial de ahorro y generar un mayor impacto en la competitividad y continuidad operacional de la compañía.

Clasificación XYZ

A partir de los resultados de la clasificación ABC, se priorizaron las subcategorías de *pallets* y *maxi sacos* (correspondientes a las categorías A y B), por concentrar el mayor impacto económico y operacional dentro de la estrategia de abastecimiento de SQM. Con el propósito de evaluar la predictibilidad y estabilidad de sus consumos, la Tabla 5 presenta el análisis XYZ aplicado a los seis materiales críticos seleccionados, utilizando la información histórica del período 2024–2025.

Tabla 5

Clasificación XYZ para categorías críticas del ABC

Item	Pallet Plástico	Pallet Madera 6x6	Maxisaco Fino	Maxisaco Micronizado	Maxisaco Hidróxido	Maxisaco Cristal
Σ	2.553	5.333	4.443	3.921	1.854	2.920
μ	6.421	19.074	13.463	8.389	4.877	7.285
CV	0,4	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4
Ind. XYZ	X	X	X	Y	X	X

Nota Elaboración propia, 2026.

El análisis mediante la clasificación XYZ evidencia un comportamiento favorable para la gestión de compras de los seis materiales críticos seleccionados por clasificación ABC. Al evaluar el Coeficiente de Variación cinco de los seis SKU se sitúan en la Categoría X (CV<0,5). Esto indica que un 83,3% de los insumos clave presenta una demanda altamente estable y predecible, directamente acoplada al ritmo de producción continuo de las plantas de la División Litio.

Por su parte, el Maxisaco Micronizado alcanza un CV=0,5, clasificándose en la Categoría Y al ubicarse justo en el límite inferior de variabilidad intermedia. Esta fluctuación moderada sugiere que, si bien su comportamiento es mayoritariamente controlado, requiere un monitoreo más fino y un ajuste específico en el cálculo de su stock de seguridad (SS) para absorber desviaciones puntuales de la planta sin incurrir en sobre inventarios o falta de insumos. Desde la perspectiva estratégica y operacional, los resultados demuestran la ausencia total de materiales en la Categoría Z (CV≥1,0), lo que significa que el riesgo de quiebres de stock en SQM no está originado por un comportamiento errático de la demanda interna. Por el contrario, los mayores desafíos provienen de variables exógenas del abastecimiento.

Finalmente, la prevalencia de insumos tipo X beneficia directamente la formulación del modelo de optimización matemática para el año 2027. Al contar con patrones de consumo consolidados y de baja dispersión, es posible utilizar proyecciones de demanda altamente confiables para determinar los lotes óptimos y las frecuencias de reposición. Esto facilita la planificación mensualizada y proporciona una base cuantitativa sólida para negociar y cerrar los contratos de suministro y servicios de transporte de largo plazo con los proveedores clave.

Selección y cálculo de pronóstico de demanda

Cálculo demanda mediante BOM (Bill of Material)

La estimación precisa de las necesidades de abastecimiento de la categoría Packing se fundamenta en el programa mensualizado de producción elaborado por el equipo de Planificación de Operaciones. La Tabla 6 detalla la proyección de producción de Carbonato de Litio para el horizonte 2026 (expresada en toneladas por mes), la cual constituye la

variable de entrada directa para calcular el consumo de envases a través de la lista de materiales (BOM).

Tabla 6

Proyección de producción 2026 - Carbonato de Litio

Proyección producción Carbonato de Litio 2026 (ton/mes)													
Mes	**MIC**	**FIN 9500**	**FIN 9000**	**CRY 9000**	**CRY 9024**	**Total D/E**	**Pulpa**	**Segregado**	**A LiOH**	**Reciclo LC**	**Producto Off**	**Producción Fresca**	**Producción Total**
ene-26	3.180	7.900	825	516	3.463	15.884	0	301	479	-619	2.012	18.057	18.676
feb-26	5.873	3.242	1.229	709	3.829	14.882	0	399	723	-362	817	16.459	16.821
mar-26	7.185	3.126	942	482	2.403	14.138	0	463	757	-494	3.639	18.503	18.997
abr-26	6.814	4.652	1.743	908	2.281	16.397	0	398	223	-411	1.411	18.018	18.429
may-26	6.050	4.599	1.42	448	1.724	14.240	0	283	1.094	-95	2.064	17.586	17.681
jun-26	5.804	4.355	1.25	751	1.585	13.745	855	271	3.905	-391	0	18.385	18.776
jul-26	8.937	3.586	1.505	903	280	15.210	885	280	2.684	-590	0	18.469	19.059
ago-26	8.634	3.464	1.454	921	235	14.707	855	271	2.595	-570	0	17.858	18.428
sept-26	8.634	3.464	1.454	921	225	14.697	855	271	2.594	-570	0	17.847	18.417
oct-26	8.937	3.586	1.505	953	226	15.206	885	280	2.683	-590	0	18.464	19.054
nov-26	8.331	3.343	1.403	888	248	14.213	825	261	2.508	-550	0	17.257	17.807
dic-26	8.937	3.586	1.505	953	221	15.201	885	280	2.682	-590	0	18.458	19.048
Total	**87.316**	**48.903**	**13.565**	**9.353**	**16.720**	**178.520**	**6.045**	**3.758**	**22.927**	**-5.832**	**9.943**	**215.361**	**221.193**

Nota SQM – Programa de producción Carbonato de Litio, 2026.

Dentro de este esquema, el programa clasifica los volúmenes procesados según sus estándares de calidad comercial dentro de especificación (Total D/E), los cuales se canalizan hacia el proceso de envasado final conforme a las exigencias de venta y planes de almacenamiento:

- **Micronizado (MIC):** Corresponde al producto de mayor grado de refinación, granulometría fina y más alto valor comercial, el cual exige estándares estrictos de envasado para evitar la contaminación o compactación del material.
- **Fino (FIN 9500 y FIN 9000):** Material de granulometría intermedia y valor comercial medio, diferenciado según su grado de pureza química (95,0% o 90,0%).
- **Cristal (CRY 9000 y CRY 9024):** Producto de menor grado de refinación y menor precio relativo, subdividido según su perfil de especificación técnica.

Adicionalmente, el plan de operaciones contempla la dinámica del material fuera de norma, el cual no cumple de manera directa con los parámetros comerciales, pero sigue rutas

operativas definidas de reprocesamiento. Estas alternativas incluyen la alimentación como materia prima a la Planta de Hidróxido (A LiOH), la recirculación interna a la línea de Carbonato (Reciclo LC) o su separación como material descartado (Segregado).

Por último, el balance global de la planta distingue entre la "Producción Fresca", aquella extraída y procesada por primera vez desde las salmueras del Salar de Atacama, y la "Producción Total", la cual consolida la capacidad efectiva al sumar los flujos de reciclo y reprocesamiento. Esta distinción es clave, ya que determina el volumen real físico que deberá ser contenido en maxi sacos y paletizado durante cada período del horizonte de planificación.

Por otra parte, la Tabla 7 expone la Proyección de Producción de Hidróxido de Litio para el año 2026 (expresada en toneladas por mes), desagregada por sus distintas líneas de proceso (L1, L2, L3 y L5). Esta operación se encuentra directamente acoplada al balance global de la planta, dado que su materia prima proviene del Carbonato de Litio desviado hacia este proceso (columna A LiOH de la proyección anterior). Tras su procesamiento, la planta genera dos familias de producto terminado que requieren soluciones específicas de Packing: Hidróxido de Grado Industrial (LHI) e Hidróxido de Grado Batería (LHT-B).

Tabla 7

Proyección de producción 2026 - Hidróxido de Litio

Proyección producción Hidroxido de Litio 2026 (ton/mes)					
Mes	**L1**	**L2**	**L3**	**L5**	**Total**
ene-26	0	302	734	0	1.036
feb-26	0	552	1.319	0	1.871
mar-26	0	168	1478	0	1.646
abr-26	0	0	1.097	0	1.097
may-26	0	395	1823	0	2.218
jun-26	0	364	1913	0	2.277
jul-26	0	0	1.994	0	1.994
ago-26	0	0	2.002	0	2.002
sept-26	0	0	1.897	360	2.257
oct-26	0	0	1.966	0	1.966
nov-26	0	0	1.846	0	1.846
dic-26	0	0	1.965	0	1.965
Total	**0**	**1.781**	**20.034**	**360**	**22.175**

Nota SQM – Programa de producción Hidróxido de Litio, 2026.

En la distribución mensual se observa que la Línea 1 (L1) registra una producción nula durante todo el horizonte 2026. Esta inactividad responde al cese definitivo de sus operaciones a fines de 2025 debido a la obsolescencia técnica de su infraestructura. Para suplir esta capacidad y expandir el volumen productivo, la compañía proyectó la puesta en marcha de la Línea 5 (L5). Sin embargo, dadas las condiciones actuales del mercado global, caracterizadas por una mayor demanda relativa de carbonato por sobre hidróxido, la entrada en operación de la L5 se ha adaptado operacionalmente, enfocando los esfuerzos en su acondicionamiento técnico para brindarle la flexibilidad de procesar ambas líneas de producto (Carbonato e Hidróxido) según los requerimientos del mercado.

Una vez consolidadas las proyecciones de producción mensual para Carbonato e Hidróxido de Litio, el paso clave para determinar los requerimientos netos de la categoría Packing consiste en transformar dichos volúmenes en consumo de insumos físicos.

La Tabla 8 exhibe un extracto del Manual de Envasado de SQM, el cual actúa como la lista de materiales (BOM) o "receta de envasado" estándar de la operación. Este estándar operativo establece la matriz de distribución porcentual por formato de comercialización y sus correspondientes factores de consumo unitario.

Tabla 8

BOM según formato de Venta Carbonato e Hidróxido

Distribución por formato de venta - Carbonato				Factor consumo (un/ton)		
Producto	**Formato**	**% producción**	**Unidad venta**	**Env. Primario**	**Pallet Madera**	**Pallet plástico**
Mic	Maxisaco Mic	99,60%	1000 kg	2	-	1
Mic	Bolsa 20 kg	0,40%	1000 kg	50	1	-
Fin 9500	Maxisaco Fin	100%	1000 kg	2	1	-
Fin 9000	Maxisaco Fin	98,31%	1000 kg	2	1	-
Fin 9000	Bolsa 20 kg	0,64%	1000 kg	50	1	-
Fin 9001	Bolsa 20 kg	1,05%	1000 kg	50	1	-
Cry 9000	Maxisaco Cry	97,68%	1200 kg	0,8	0,8	-
Cry 9000	Bolsa 25 kg	2,32%	1000 kg	40	1	-
Cry 9500	Maxisaco Cry	100%	600 kg	1,7	1,7	-

Distribución por formato de venta - Hidróxido				Factor consumo		
Producto	**Formato**	**%**	**Unidad venta**	**Env. Primario**	**Pallet Madera**	**Pallet plástico**
LHI	Bolsa 50 lb (22,675 kg)	0,37%	907 kg	44	1,1	-
LHI	Bolsa 25 kg	11,56%	1000 kg	40	1	-
LHI	Maxisaco Hidroxido	4,37%	450 kg	2,2	-	1,1
LHT-B	Bolsa 25 kg	0,47%	1000 kg	40	1	-
LHT-B	Maxisaco Hidroxido	83,23%	450 kg	2,2	-	1,1

Nota Elaboración propia – Basado en Manual de Envasado SQM.

A través de esta estructura, el modelo vincula directamente la tonelada de producto terminado con los insumos requeridos para su "vestido" y empaque final:

- **Distribución por Formato de Venta (% producción):** Define la participación relativa con la que se empaca cada calidad de producto. Como se aprecia en la tabla, la gran mayoría del Carbonato y del Hidróxido se comercializa en gran formato mediante maxisacos mientras que fracciones menores se destinan al formato en saco/bolsa (de 20 kg, 25 kg o 50 lb).

- **Factores de Consumo (un/ton):** Especifican la cantidad exacta de envases primarios (maxi sacos o bolsas) y secundarios (pallets de madera o plástico) necesarios para acondicionar una tonelada de litio.

De este modo, la integración de las proyecciones de producción con la lista de materiales (BOM) permite calcular la demanda bruta mensualizada de cada uno de los SKU de Packing para el horizonte 2026 que se entregan a continuación en la Tabla 9:

Tabla 9

Proyección de demanda de maxisacos y pallets 2026 mediante BOM

Proyección de demanda mediante BOM													
Nombre de envase	**ene-26**	**feb-26**	**mar-26**	**abr-26**	**may-26**	**jun-26**	**jul-26**	**ago-26**	**sept-26**	**oct-26**	**nov-26**	**dic-26**	**Total**
Maxisaco Micronizado	6.840	12.846	16.468	14.817	14.039	15.252	16.298	15.444	18.756	19.413	18.100	19.413	**187.686**
Maxisaco Fino	18.898	9.402	8.776	13.388	12.837	12.994	14.994	11.890	12.812	13.260	12.367	13.260	**154.879**
Maxisaco Cristal	8.917	8.450	9.160	5.780	6.140	4.978	2.090	1.702	3.003	3.095	2.950	3.086	**59.350**
Maxisaco Hidróxido	2.091	3.111	3.298	2.224	4.069	4.233	4.258	4.258	5.016	4.369	4.102	4.367	**45.396**
Pallet Madera 6x6	16.853	11.641	11.097	11.758	11.651	11.189	10.553	8.408	9.892	10.230	9.581	10.224	**133.077**
Pallet Plástico	4.926	7.339	9.824	8.521	8.973	9.603	10.148	9.831	11.886	11.891	11.101	11.890	**115.931**

Nota Elaboración propia – Basado en Manual de Envasado SQM.

Una de las principales restricciones metodológicas de la planificación actual radica en su alta dependencia del programa de producción de corto plazo. Este plan operativo presenta un alcance estrictamente anual (limitado al año en curso), careciendo de una visión proyectada a largo plazo. Para el área de Compras de la categoría Packing, esta falta de visibilidad genera una vulnerabilidad crítica: insumos clave como los maxi sacos requieren ser programados con varios meses de anticipación debido a los extensos Lead Times de fabricación y transporte marítimo desde sus países de origen (India y China).

Históricamente, la ausencia de un programa de producción consolidado para el año venidero ha forzado a la organización a tomar decisiones de abastecimiento para el primer trimestre de cada ejercicio de manera "a ciegas". Esto se traduce habitualmente en la emisión de órdenes de compra que no conversan con el plan real de producción que termina

ejecutándose, desencadenando descalces de inventario o costos por sobre stock y fletes de urgencia.

Contar con una proyección extendida resulta vital no solo para la operación diaria, sino también para la gestión estratégica de contratos. Una mirada de largo plazo permite al área de compras:

- **Sustentar compromisos contractuales:** Validar y asegurar los volúmenes anuales de compra negociados con los proveedores.
- **Evaluar la capacidad de la red:** Identificar oportunamente si la demanda proyectada superará la capacidad de los proveedores actuales, habilitando la búsqueda y homologación de nuevas fuentes de suministro.
- **Apalancar negociaciones comerciales:** Reprocesar y renegociar las estructuras tarifarias de compras y servicios de transporte con mayor poder de negociación.

Para mitigar esta limitación dentro del marco del proyecto, resulta fundamental incorporar la tasa de consumo proyectada mediante la lista de materiales (BOM) durante el último cuatrimestre del año en curso (septiembre a diciembre). Esta base de datos reciente más los consumos reales desde 2024 a la fecha funcionarán como el insumo de entrada para alimentar los modelos cuantitativos de pronóstico de demanda, permitiendo estructurar y proyectar con solidez matemática las decisiones de abastecimiento y la formulación del modelo de optimización para el horizonte 2027.

Cálculo y selección de pronósticos de demanda

Los modelos de pronóstico fueron construidos utilizando la información histórica disponible para los años 2024 y 2025. Posteriormente, su desempeño fue evaluado utilizando

como período de contraste la demanda mensual correspondiente a 2026, calculada a partir del programa de producción y de la lista de materiales (BOM). De esta manera, las estimaciones generadas por cada modelo fueron comparadas con una referencia operacional independiente de los datos utilizados para su ajuste.

Para los 12 meses de 2026 se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE), utilizada como principal criterio cuantitativo para la selección del modelo. Este procedimiento permitió identificar la alternativa que presenta la menor desviación respecto de los requerimientos de envases derivados de las necesidades productivas de la compañía, manteniendo coherencia con el objetivo de proyectar la demanda para el horizonte 2027.

Los resultados comparativos presentados en la Tabla 10 muestran diferencias en el desempeño de los modelos según las características de cada SKU.

Tabla 10

Evaluación comparativa de modelos de pronóstico según RMSE

Material	**Regresión Lineal**	**Regresión Estacional**	**Holt-Winters**	**Promedio Móvil**	**Modelo Ganador**
Maxisaco Cristal	5.589	3.901	**1.856**	2.133	**Holt-Winters**
Maxisaco Fino	2.497	14.914	**2.205**	3.202	**Holt-Winters**
Maxisaco Micronizado	2.381	**2.381**	2.568	3.028	**Regresión Estacional**
Maxisaco Hidróxido	1.162	5.754	**1.004**	1.033	**Holt-Winters**
Pallet Madera 6x6	1.951	20.760	**1.551**	4.624	**Holt-Winters**
Pallet Plástico	**1.426**	6.724	1.842	1.539	**Regresión Lineal**

Nota: Elaboración propia, 2026. Los valores corresponden a la raíz del error cuadrático medio (RMSE). En negrita se destaca la métrica del modelo seleccionado.

- **Maxisaco Cristal**: Presenta la mayor variabilidad observada dentro de los SKU analizados, ya que su generación responde a desviaciones de calidad en planta para alcanzar especificaciones de Finos y Micronizados, dando lugar a una demanda altamente volátil e irregular. Se selecciona Holt-Winters, cuya estructura permite representar de mejor manera los cambios de nivel y tendencia observados en la serie.
- **Maxisaco Fino y Pallet Madera 6x6**: Muestran aumentos recurrentes de consumo hacia los últimos meses del año, sugiriendo un comportamiento estacional. Modelos sin componentes adaptativas o estacionales, como la regresión lineal o los promedios móviles, fallan en predecir estos saltos sistemáticos. La Regresión Estacional presenta un desempeño considerablemente inferior en el Pallet de Madera (RMSE $= 20.760$) debido a la tendencia bajista del 2026, mientras que Holt-Winters equilibra de manera óptima tanto la tendencia de fondo como el patrón estacional anual.
- **Maxisaco Micronizado:** Este producto experimentó un marcado crecimiento estructural a lo largo de los 36 meses, pasando de niveles bajos en 2024 a superar las 19.000 unidades en 2026. La Regresión Estacional iguala en rendimiento a la Regresión Lineal pura y supera a Holt-Winters (RMSE $= 2.568$), ya que captura con mayor firmeza la tendencia lineal ascendente sostenida del mercado sin sobre-reaccionar a pequeñas fluctuaciones mensuales.
- **Maxisaco Hidróxido:** Muestra la escala de error absoluto más baja del grupo. La pérdida de participación de mercado frente al Carbonato a finales de 2025 generó un cambio de nivel estructural en su consumo (cayendo de picos de 8.000 unidades a un rango de 3.000–4.000 en 2026). Holt-Winters se adapta rápidamente a este "escalón"

o cambio de media histórica, superando a la Regresión Estacional (RMSE = 5.754) que intenta erróneamente proyectar patrones del pasado que ya no aplican.

- **Pallet Plástico:** Es el producto con el comportamiento más estable, predecible y de crecimiento constante del portafolio. No presenta estacionalidades marcadas ni cambios bruscos de nivel; por lo tanto, añadir componentes de suavizado complejo o estacionalidad (como Holt-Winters con RMSE = 1.842) introduce ruido innecesario. La regresión lineal de tendencia presenta el menor RMSE y representa adecuadamente la trayectoria sostenida de su demanda

Cálculo demanda mediante modelos de pronósticos

La Tabla 11 presenta la demanda mensual proyectada para los principales materiales de Packing durante el año 2027, obtenida a partir de los modelos de pronóstico seleccionados para cada SKU. En términos generales, se observan comportamientos diferenciados entre los materiales: el Maxisaco Micronizado mantiene una demanda relativamente estable durante el año, alcanzando un total proyectado de 227.631 unidades, mientras que el Maxisaco Fino, el Maxisaco Cristal y el Pallet Madera 6x6 presentan una tendencia decreciente a lo largo del horizonte. Por el contrario, el Pallet Plástico muestra un crecimiento sostenido, aumentando desde 11.155 unidades en enero hasta 13.320 unidades en diciembre, con una demanda anual estimada de 146.812 unidades.

Tabla 11

Proyección de demanda de maxisacos y pallets 2027 mediante pronósticos

Proyección de demanda mediante modelos de pronósticos													
Nombre de envase	**ene-27**	**feb-27**	**mar-27**	**abr-27**	**may-27**	**jun-27**	**jul-27**	**ago-27**	**sept-27**	**oct-27**	**nov-27**	**dic-27**	**Total**
Maxisaco Micronizado	18.975	18.829	19.073	18.959	18.954	18.995	18.969	18.973	18.979	18.974	18.975	18.976	**227.631**
Maxisaco Fino	9.178	9.007	8.836	8.664	8.493	8.321	8.150	7.979	7.807	7.636	7.465	7.293	**98.829**
Maxisaco Cristal	3.887	3.723	3.559	3.395	3.232	3.068	2.904	2.740	2.576	2.413	2.249	2.085	**35.831**
Maxisaco Hidróxido	4.337	4.341	4.345	4.350	4.354	4.358	4.363	4.367	4.372	4.376	4.380	4.385	**52.328**
Pallet Madera 6x6	9.778	9.489	9.201	8.913	8.625	8.336	8.048	7.760	7.471	7.183	6.895	6.607	**98.306**
Pallet Plástico	11.155	11.356	11.537	11.738	11.933	12.134	12.328	12.529	12.730	12.925	13.126	13.320	**146.812**

Nota Elaboración propia.

Estos resultados evidencian que cada SKU presenta una dinámica de consumo particular, lo que permite obtener una estimación mensual anticipada de sus requerimientos. Estas proyecciones constituyen, a su vez, el parámetro de demanda utilizado posteriormente en el modelo de optimización de inventarios y planificación de compras.

Determinación de política de inventario

La Tabla 12 presenta los parámetros de gestión de inventarios calculados a partir de la demanda 2026, utilizando un nivel de servicio objetivo del 99% para dimensionar el stock de seguridad. Este porcentaje corresponde a un parámetro de diseño y no a un resultado directo del modelo de optimización.

Tabla 12

Parámetros de planificación según política de inventario

Material	LT (mes)	Z (99%)	σ	ROP (un)	SS (un)
Maxisaco Cristal	5	2,326	2.718	38.867	14.138
Maxisaco Fino	5	2,326	2.435	66.721	12.668
Maxisaco Micronizado	5	2,326	3.491	96.360	18.157
Maxisaco Hidróxido	5	2,326	905	23.625	4.710
Pallet Madera 6x6	0,3	2,326	2.066	6.472	2.775
Pallet Plástico	0,7	2,326	2.064	10.360	3.920

Nota Elaboración propia, 2026.

Los resultados evidencian diferencias relevantes según el origen de suministro. Mientras los maxisacos presentan un Lead Time aproximado de 5 meses debido a su condición de importados, los pallets registran tiempos de reposición locales de 0,3 y 0,7 meses. Esta diferencia impacta directamente en el stock de seguridad requerido, ya que, bajo

el supuesto de demanda independiente y Lead Time constante, la desviación estándar de la demanda acumulada durante el tiempo de reposición aumenta proporcionalmente a la raíz cuadrada del Lead Time.

Una vez determinado el stock de seguridad, el modelo MILP incorpora su cumplimiento mediante una restricción mínima de inventario, operando posteriormente sobre una demanda proyectada de carácter determinístico.

El efecto del Lead Time se refleja directamente en los niveles de inventario requeridos. En los maxisacos, cuyo tiempo de reposición alcanza aproximadamente cinco meses, el punto de reorden puede representar varios meses de demanda. En contraste, los pallets, abastecidos localmente y con Lead Times inferiores a un mes, requieren niveles considerablemente menores de protección, reduciendo el inventario necesario y, en consecuencia, el capital inmovilizado.

La variabilidad de la demanda también genera diferencias relevantes entre los SKU. El Maxisaco Cristal presenta un coeficiente de variación cercano al 40%, situándose entre los materiales con mayor variabilidad relativa dentro de la categoría X. Como resultado, requiere un stock de seguridad equivalente a aproximadamente 2,86 meses de demanda y un punto de reorden cercano a 7,9 meses. Este comportamiento se relaciona con la mayor variabilidad de los requerimientos del producto Cristal, cuya demanda puede incrementarse ante desviaciones del proceso productivo que modifican la proporción de producto destinado a esta presentación.

Por su parte, el Maxisaco Hidróxido presenta una variabilidad aproximada de 38%, manteniéndose también dentro de la categoría X y evidenciando un comportamiento de demanda relativamente estable, permitiendo mantener un stock de seguridad equivalente a aproximadamente 1,24 meses de demanda. Su menor variabilidad refleja un comportamiento

más estable de los requerimientos considerados para 2026, reduciendo la protección adicional necesaria frente a fluctuaciones de la demanda.

Propuesta de modelo de optimización matemática

Contexto del problema

SQM, en su división Litio, se encuentra en un proceso de optimización para la gestión de inventarios de la categoría Packing. Esta categoría representa un activo estratégico para la operación global, con un gasto anual estimado en aproximadamente 15 millones de dólares (SQM Presupuesto, 2026). Con el fin de enfocar los esfuerzos en los insumos de mayor impacto operativo y financiero, se aplicó una clasificación ABC que determinó como elementos críticos a las familias de maxi sacos y pallets, las cuales conforman el conjunto de envases seleccionados I.

Para fortalecer la continuidad operacional de la compañía durante el año 2027, SQM requiere diseñar un plan de compras y almacenamiento mensualizado para un horizonte de planificación de 12 meses, representado por el conjunto T. La demanda esperada de cada envase $D_{i,t}$ ha sido estimada mediante modelos de pronóstico avanzados, mientras que las políticas de inventario, expresadas en el stock de seguridad SS_i y el punto de reorden ROP_i, se fijaron mediante los métodos probabilísticos.

La dinámica de abastecimiento se encuentra regulada por restricciones operativas y físicas. Los proveedores establecen un lote mínimo de compra MOQ_i por tipo de envase (en múltiplos del MOQ) y requieren un tiempo de entrega o Lead Time LT_i medido en meses. En términos de infraestructura, cada unidad ocupa un volumen físico V_i (m^3) y se almacena en la bodega PQL, la cual posee una capacidad máxima acotada por CAP (m^3). Adicionalmente, la planificación debe considerar la condición inicial de la red, dada por el inventario

disponible I_i^0 y los pedidos históricos en tránsito $TR_{i,t}$ programados para arribar en los primeros períodos.

Desde la perspectiva financiera, adquirir cada envase implica un precio variable $c_{i,s}$ que incorpora reajustes acordados según el tipo de negociación con cada proveedor, además de un costo unitario de almacenamiento $h_{i,t}$ y un costo fijo de emisión por orden realizada K. Frente a esta estructura, SQM busca desarrollar un modelo de optimización matemática que minimice el costo total de gestión anual para el período 2027.

Supuestos y alcances

El modelo matemático se desarrollará bajo los siguientes supuestos:

- Se contemplan los 6 SKU de mayor relevancia según el análisis de clasificación ABC.
- Corresponde a un período de 12 meses (enero a diciembre de 2027), utilizando el mes como unidad discreta de tiempo.
- Los Lead Times de pallets de madera y plásticos, de 0,3 y 0,7 meses, se aproximan a 0 y 1 mes para representar las recepciones mensuales. Esta aproximación se aplica solo al balance del modelo, manteniéndose los valores reales en las políticas de inventario.
- No se permiten quiebres de stock, debido a que los envases analizados resultan críticos para la continuidad operativa de la Planta de Envasado.
- El modelo asume que las fechas de entrega de las órdenes de compra ya emitidas (pedidos en tránsito) no pueden adelantarse en ninguna circunstancia. Esta restricción responde a factores exógenos insalvables.
- Se considera únicamente la capacidad interna de la bodega, dado que no existen contratos ni proyectos vigentes para la ampliación o externalización del almacenamiento.

- Los costos para las categorías pallets y maxisacos presentan un reajuste trimestral definido por el polinomio contractual, independientemente del volumen de compra.
- Se asume un único proveedor para el suministro de pallets de madera y pallets plásticos.
- Para la categoría maxisacos se consideran dos proveedores, utilizando un precio equivalente al promedio ponderado según la estrategia de adjudicación vigente (60% Proveedor 1 y 40% Proveedor 2).

Descripción operativa y reglas

El modelo de optimización debe garantizar que el plan de inventario y compras propuesto cumpla de manera estricta con las siguientes condiciones operativas:

- **Extensión de datos:** Para los períodos posteriores a diciembre requeridos por el Lead Time, se mantiene el valor del mes 12 como referencia, evitando parámetros faltantes en el horizonte extendido.
- **Compras por MOQ:** Toda compra debe realizarse en múltiplos enteros del lote mínimo definido por el proveedor. No se permiten cantidades inferiores ni fraccionadas respecto del MOQ.
- **Activación de órdenes:** Si no se emite una orden, la cantidad comprada debe ser cero. Si se genera una orden, se debe comprar al menos un lote MOQ.
- **Lead Time:** Las compras ingresan al inventario una vez transcurrido el tiempo de entrega de cada producto. Por ello, las necesidades futuras deben ser anticipadas al momento de emitir la orden.
- **Órdenes previas a 2027:** Cuando el inventario inicial y los pedidos en tránsito no son suficientes para cubrir los primeros meses del año, el modelo considera órdenes emitidas previamente para evitar quiebres de stock.

- **Balance de inventario:** El inventario final de cada mes corresponde al inventario anterior más las recepciones, menos la demanda del período.
- **Stock de seguridad:** El inventario debe mantenerse siempre igual o superior al stock de seguridad definido para cada producto, por lo que no se permiten quiebres de stock.
- **Capacidad de bodega:** La suma del volumen ocupado por todos los productos no puede superar la capacidad disponible de la bodega PQL.
- **Ocupación de PQL:** La utilización mensual de la bodega se controla mediante el porcentaje de ocupación, el cual debe mantenerse igual o inferior al 100 %.
- **Cierre del horizonte:** Al finalizar el período de planificación, cada producto debe mantener un nivel de inventario suficiente para no comprometer el abastecimiento del período siguiente.

Modelo de programación matemática

Conjuntos

$i \in I = \{1,2,\dots,6\}$: Conjunto de productos o envases considerados (maxi sacos y pallets).

$t \in T = \{1,2,\dots,12\}$: Conjunto de períodos dentro del horizonte de planificación.

$T^{+} = \{1,2,\dots,12 + L_{max}\}$: Horizonte extendido para representar recepciones posteriores a diciembre producto del Lead Time.

$s \in S = \{1 - L_{max},\dots,12\}$: Períodos posibles de emisión de órdenes. Los valores s ≤ 0 representan órdenes que debieron emitirse antes de enero de 2027 para abastecer los primeros meses del horizonte.

Parámetros operacionales

- $D_{i,t}$: Demanda del envase i proyectada para el período t [unidades].

- LT_i: Tiempo de entrega del proveedor (Lead Time) para el envase i, medido en períodos ($LT_i \in \mathbb{Z}^+$).
- MOQ_i: Cantidad mínima de pedido (Minimum Order Quantity) impuesta por el proveedor para el envase i [unidades].
- SS_i: Stock de seguridad requerido para el producto i [unidades].
- ROP_i : El nivel de inventario de referencia asociado a la política probabilística de reposición para el producto i. [unidades].
- V_i: Volumen ocupado por una unidad del envase i en bodega [m^3/unidad].
- CAP: Capacidad máxima de almacenamiento disponible en la bodega PQL [m^3].
- $TR_{i,t}$: Pedidos históricos programados para arribar en los primeros períodos [unidades].
- I_i^0: Inventario inicial del envase i antes de comenzar el primer período [unidades].

Costos

- $c_{i,s}$: Costo variable de compra por unidad del envase i en el período s [$/unidad].
- $h_{i,t}$: Costo unitario de mantener inventario del envase i al final del período t [$/unidad-período].
- K: Costo fijo de ordenar [$/orden].

Variables

- $Q_{i,s} \geq 0$: Cantidad a comprar del envase i en el período s.
- $I_{i,t} \geq 0$: Nivel de inventario del envase i al final del período t.
- $Y_{i,s} \in \{0,1\}$: Variable binaria (1 si se realiza pedido del envase i en el período s, 0 en caso contrario).
- $N_{i,s} \in \mathbb{Z}^+$: número de lotes MOQ del producto i ordenados en el período s.

Función objetivo

Minimizar el Costo Total Operativo a lo largo del horizonte anual:

$$\min Z = \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} c_{i,s} * Q_{i,s} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T^+} h_{i,t} * I_{i,t} + \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} K * Y_{i,s}$$

Restricciones

Extensión de datos después de diciembre: Cuando se requieren parámetros para períodos t y s > 12 debido al Lead Time, se repite el valor del mes 12.

$$D_{i,t} = D_{i,12}\ ;\ c_{i,s} = \ c_{i,12}\ ;\ h_{i,t} = h_{i,12}$$

Compra en múltiplos del MOQ: La cantidad ordenada debe ser un múltiplo entero del lote mínimo de compra.

$$Q_{i,s} = MOQ_i \cdot N_{i,s} \quad \forall i \in I,\ s \in S$$

Activación de la orden: La variable binaria se vincula con el número de lotes comprados, de modo que, si $Y_{i,s} = 0$ no puede existir compra; si $Y_{i,s} = 1$, al menos un lote MOQ debe ser ordenado.

$$N_{i,s} \leq 10000 \cdot Y_{i,s} \quad \forall i \in I,\ s \in S$$

$$N_{i,s} \geq Y_{i,s} \quad \forall i \in I,\ s \in S$$

Recepción de compras considerando Lead Time: Una orden emitida en el período s llega al inventario en el período:

$$t = s + LT_i$$

Equivalentemente, la orden que llega en el mes t fue emitida en:

$$s = t - LT_i$$

- Por ello, la cantidad que ingresa físicamente al inventario durante el mes t corresponde a $Q_{i,t-LT_i}$.

- Los períodos $s \leq 0$ permiten representar las órdenes previas necesarias para que el sistema comience 2027 sin quiebres.

Balance de inventario: Esta restricción conserva el flujo físico del inventario: inventario anterior + recepciones − demanda = inventario final.

Para enero de 2027:

$$I_{i,1} = I_i^0 + TR_{i,1} + Q_{i,1-LT_i} - D_{i,1} \quad \forall i \in I$$

Para los períodos siguientes:

$$I_{i,t} = I_{i,t-1} + TR_{i,t} + Q_{i,t-LT_i} - D_{i,t} \quad \forall i \in I,\ t = 2, \dots, 12 + L_{max}$$

Stock de seguridad y prohibición de quiebres: Esta restricción obliga al modelo a mantener un inventario igual o superior al stock de seguridad previamente calculado. Por lo tanto, el modelo no estima probabilísticamente el nivel de servicio durante su resolución, sino que incorpora como parámetro un stock de seguridad dimensionado con base en un nivel de servicio objetivo del 99%.

$$I_{i,t} \geq SS_i \quad \forall i \in I,\ t \in T^+$$

Capacidad de almacenamiento de PQL: La ocupación física de todos los productos almacenados no puede superar la capacidad disponible de la bodega.

$$\sum_{i \in I} V_i \cdot I_{i,t} \leq CAP \quad \forall t \in T^+$$

La ocupación porcentual mensual puede calcularse como:

$$\text{Ocupación}_t(\%) = \left(\frac{\sum_{i \in I} V_i \cdot I_{i,t}}{CAP} \right) \cdot 100$$

Condición de cierre del horizonte: Para evitar que el modelo reduzca artificialmente el inventario al final del horizonte, se exige que cada producto termine su horizonte relevante al menos en su punto de reorden:

$$I_{i,12+LT_i} \geq ROP_i \quad \forall i \in I$$

Implementación computacional del modelo en AMPL y resolución mediante HiGHS

El modelo matemático fue implementado mediante AMPL (A Mathematical Programming Language), lenguaje especializado en optimización que permite representar de forma estructurada los conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y restricciones del problema. Una de sus principales ventajas es que separa la formulación matemática de los datos de entrada, facilitando la modificación de escenarios, la validación del modelo y la actualización de parámetros sin alterar su estructura. Asimismo, AMPL permite conectar una misma formulación con distintos solvers de optimización sin necesidad de reescribir el modelo.

Para la resolución se utilizó el solver HiGHS, herramienta de código abierto que soporta problemas de programación lineal y programación lineal entera mixta (MILP), por lo que resulta adecuada para la formulación desarrollada. En este caso, el modelo combina variables continuas asociadas a inventarios y cantidades, junto con variables enteras y binarias utilizadas para representar decisiones discretas, tales como la cantidad de lotes de compra y la activación de órdenes. Por esta razón, el problema corresponde a un MILP.

La utilización de HiGHS permite resolver el modelo considerando simultáneamente las restricciones operacionales definidas. En este contexto, AMPL se utiliza para la formulación del modelo, mientras que HiGHS determina la solución que minimiza el costo total respetando dichas restricciones.

Análisis de resultados del modelo de optimización

La Tabla 13 presenta el plan de compras obtenido mediante el modelo de optimización implementado en AMPL. Los resultados reflejan una planificación diferenciada por SKU, considerando simultáneamente la demanda proyectada, los Lead Times, el stock de seguridad, los lotes mínimos de compra (MOQ), la capacidad de almacenamiento y los costos asociados. El modelo exige además que las compras se realicen en múltiplos enteros del MOQ y que no se produzcan quiebres de stock durante el horizonte analizado.

Tabla 13

Forecast de compras 2027 mediante Modelo de optimización

Fecha	Maxisaco Cristal	Maxisaco Fino	Maxisaco Micronizado	Maxisaco Hidróxido	Pallet Madera 6x6	Pallet Plástico
ago-26	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
sept-26	*0*	*0*	*0*	*4.800*	*0*	*0*
oct-26	*8.400*	*0*	*0*	*4.800*	*0*	*0*
nov-26	*0*	*0*	*0*	*4.800*	*0*	*0*
dic-26	*0*	*5.720*	*13.440*	*0*	*0*	*0*
ene-27	8.400	11.440	20.160	4.800	4.400	7.644
feb-27	0	5.720	20.160	4.800	9.240	11.466
mar-27	0	11.440	20.160	4.800	8.800	11.466
abr-27	8.400	5.720	20.160	4.800	8.800	12.012
may-27	0	5.720	20.160	4.800	8.360	12.558
jun-27	0	11.440	13.440	4.800	7.920	12.012
jul-27	8.400	5.720	20.160	4.800	7.480	12.558
ago-27	0	5.720	20.160	4.800	7.480	12.558
sept-27	0	11.440	20.160	4.800	7.480	13.104
oct-27	0	5.720	20.160	4.800	6.600	13.104
nov-27	8.400	5.720	20.160	0	6.600	13.104
dic-27	25.200	62.920	94.080	24.000	10.560	20.202

Nota Elaboración propia a partir de los resultados entregados por AMPL, 2026. Según código de programación (Anexo 1).

Un primer aspecto relevante corresponde a la aparición de órdenes de compra durante los últimos meses de 2026, aun cuando el horizonte principal de planificación corresponde a 2027. Esto se explica por los extensos tiempos de reposición de los maxisacos, cuyo Lead Time alcanza aproximadamente cinco meses, lo que obliga a anticipar determinadas órdenes para asegurar la disponibilidad de material durante los primeros meses de 2027. En contraste, los pallets presentan tiempos de abastecimiento considerablemente menores, de 0,3 y 0,7 meses, por lo que no requieren órdenes anticipadas durante 2026.

Asimismo, las cantidades de compra presentan una estructura discreta y concentrada en determinados períodos, coherente con la restricción de adquisición en múltiplos del MOQ. En consecuencia, el modelo no busca igualar mensualmente las compras con la demanda, sino determinar el momento y tamaño de pedido más conveniente, considerando simultáneamente los costos de compra, emisión de órdenes, mantenimiento de inventario y las restricciones operacionales definidas.

Hacia el cierre de 2027 se observa un aumento de las cantidades ordenadas, particularmente en los maxisacos. Este comportamiento responde en parte a las condiciones de borde incorporadas en la formulación. La condición terminal exige mantener un nivel mínimo de inventario al finalizar el horizonte, evitando que el modelo reduzca artificialmente las existencias con el solo propósito de disminuir los costos de almacenamiento. Adicionalmente, debido a los Lead Times, la demanda posterior a diciembre se extiende utilizando como referencia los parámetros del último mes, con el fin de representar los requerimientos asociados al abastecimiento de períodos posteriores. Por lo tanto, parte del incremento observado en las compras de diciembre se explica por estas condiciones de cierre y no exclusivamente por la demanda correspondiente al año 2027.

En una implementación mediante horizonte móvil, este efecto tendería a reducirse, ya que el modelo sería actualizado y resuelto periódicamente con nueva información de demanda, inventarios y órdenes en tránsito. De esta manera, el término del horizonte se desplazaría continuamente, disminuyendo la incidencia de una condición terminal fija sobre las decisiones de compra.

En cuanto a la capacidad logística, la Tabla 14 muestra que la ocupación proyectada de la bodega PQL se mantiene en todo momento por debajo de su capacidad máxima de 5.000 m³. La mayor utilización alcanza aproximadamente un 69%, equivalente a 3.456 m³, mientras que durante gran parte del horizonte la ocupación se estabiliza en torno al 28%-31%. En promedio, la utilización de la bodega alcanza aproximadamente un 34% de su capacidad, lo que evidencia que la restricción de almacenamiento es cumplida con holgura durante el período analizado.

Tabla 14

Ocupación Bodega PQL 2027

Ocupación (m3)	Capacidad (m3)	Ocupación (%)
3.456	5.000	69%
2.089	5.000	42%
1.859	5.000	37%
1.507	5.000	30%
1.379	5.000	28%
1.533	5.000	31%
1.443	5.000	29%
1.436	5.000	29%
1.470	5.000	29%
1.500	5.000	30%
1.428	5.000	29%
1.465	5.000	29%

Nota Elaboración propia a partir de los resultados entregados por AMPL, 2026.

La mayor ocupación se concentra al comienzo del horizonte, disminuyendo progresivamente durante los meses siguientes hasta estabilizarse en niveles cercanos al 30%. Este comportamiento indica que el modelo logra absorber las condiciones iniciales de inventario y los pedidos en tránsito sin generar una acumulación excesiva de materiales. En consecuencia, la capacidad actual de la bodega PQL resulta suficiente para ejecutar el plan de abastecimiento propuesto para 2027, sin requerir ampliaciones de infraestructura ni alternativas externas de almacenamiento bajo las condiciones consideradas en el estudio. Esto resulta especialmente relevante dado que el modelo fue formulado bajo la premisa de utilizar exclusivamente la capacidad interna disponible.

En conjunto, los resultados de ambas tablas muestran que el modelo genera un plan de abastecimiento operacionalmente factible, capaz de anticipar las compras asociadas a materiales con largos Lead Times, respetar los lotes mínimos exigidos por los proveedores, mantener los niveles de inventario requeridos para asegurar la continuidad operacional y, simultáneamente, operar dentro de la capacidad disponible de almacenamiento.

Construcción del escenario base parametrizado según la política actual

Con el propósito de establecer una referencia para evaluar el modelo propuesto, se construye un escenario base parametrizado a partir de las principales características de la política de abastecimiento utilizada actualmente por la organización. Este escenario considera la revisión mensual y los niveles de cobertura empleados para la gestión de los materiales; sin embargo, no busca reproducir de manera exacta las órdenes históricas ni simular mecánicamente las decisiones de compra observadas.

Para mantener una base metodológica comparable entre ambos escenarios, las decisiones de compra continúan siendo determinadas mediante optimización, conservando la

función objetivo de minimización de los costos de compra, almacenamiento y emisión de órdenes. La diferencia radica en las condiciones operacionales impuestas a cada formulación, particularmente en los niveles de protección de inventario y las restricciones incorporadas.

En consecuencia, el escenario base debe interpretarse como una representación optimizada de las condiciones asociadas a la política vigente, utilizada como referencia para cuantificar el efecto económico y operacional de incorporar restricciones adicionales de protección frente al riesgo de desabastecimiento.

Modelo matemático que simula la situación base

Conjuntos

No se incorporan nuevos conjuntos respecto del modelo propuesto, dado que la revisión se realiza mensualmente y, por lo tanto, coincide con el conjunto de períodos (T).

Parámetros

- Se elimina el parámetro correspondiente al punto de reorden ROP_i.
- Se reemplaza el stock de seguridad estadístico SS_i por un parámetro de cobertura MC_i, definido según el tipo de material:

$$MC_i = \begin{cases} 2{,}5 & \text{si } i \text{ corresponde a maxisaco} \\ 0{,}5 & \text{si } i \text{ corresponde a pallet de madera} \\ 1{,}0 & \text{si } i \text{ corresponde a pallet plástico} \end{cases}$$

El stock target utilizado en la política actual queda definido como:

$$ST_i = MC_i * \frac{1}{n} \sum_{t \in T} D_{t,i} \quad \forall i \in I$$

El stock target se incorpora como un parámetro descriptivo de la política vigente y permite caracterizar los niveles de cobertura utilizados actualmente por la organización. Sin embargo, en el escenario base desarrollado no actúa como un gatillo matemático de

reposición, dado que las cantidades y períodos de compra son determinados endógenamente por la función de optimización.

Variables

No se incorporan nuevas variables respecto del modelo propuesto.

Función objetivo

La mantención de la misma función objetivo permite aislar el efecto de las diferencias entre las restricciones de ambos escenarios, evitando que la comparación de resultados esté influenciada por criterios de optimización distintos.

Restricciones modificadas

- **Eliminación del stock de seguridad mínimo:** Se elimina la restricción del modelo propuesto $I_{i,t} \geq SS_i$, dado que el escenario base no incorpora un inventario de seguridad probabilístico como límite inferior obligatorio. El stock target caracteriza los niveles de cobertura utilizados como referencia en la política vigente, pero no se implementa como una restricción mínima ni como un gatillo automático de reposición dentro de esta formulación. En consecuencia, se establece $I_{i,t} \geq 0$, permitiendo que el inventario disminuya por debajo del nivel de cobertura de referencia e incluso alcance un nivel nulo.
- **Eliminación de la restricción de capacidad:** Se elimina la restricción física utilizada en el modelo propuesto $\sum_{i \in I} V_i \, I_{i,t} \leq CapPQL$. En la situación actual, la capacidad de la bodega se utiliza únicamente como indicador de desempeño.
- **Eliminación de la condición final basada en ROP**: Finalmente, se elimina la condición terminal utilizada en el modelo propuesto $I_{i,N+LT_i} \geq ROP_i$ debido a que la política actual no establece un punto de reorden ni exige finalizar el

horizonte manteniendo dicho nivel de inventario. En consecuencia, el inventario final del escenario base queda determinado por la evolución de la demanda, las recepciones y las decisiones de compra obtenidas mediante optimización, sin imponer un nivel mínimo de cierre asociado al ROP.

Análisis comparativo entre el escenario base y el modelo propuesto

A continuación, la Tabla 15 compara los principales indicadores económicos, operacionales y de inventario obtenidos para el escenario base parametrizado según la política actual y para el modelo propuesto.

Tabla 15

Comparación entre escenario base y modelo propuesto

Indicador	**Unidad**	**Escenario base**	**Modelo**	**Diferencia**
Costo total anual	Usd	16.747.436	23.719.344	42%
Costo de compra	Usd	15.272.302	18.781.731,60	23%
Costo de almacenamiento	Usd	1.467.454	4.929.212	236%
Costo fijo de órdenes	Usd	7.680	8.400	9%
Inventario promedio	Un	44.988	84.427	88%
Inventario promedio	m3	639	1.714	168%
Inventario máximo	Un	167.518	167.518	N/A
Ocupación promedio bodega	%	13%	34%	21 pp
Ocupación máxima bodega	%	69%	69%	-
Protección mínima	-	$I_{i,t} \geq 0$	$I_{i,t} \geq SS_i$	-
Nivel de servicio (α)	%	97%*	objetivo 99 %	-

Nota Elaboración propia a partir de los resultados entregados por AMPL, 2026. El 97 % corresponde a un desempeño histórico observado (medido mediante cumplimiento de reservas). El 99% corresponde al nivel de servicio objetivo utilizado para parametrizar el stock de seguridad del modelo; por lo tanto, ambos valores no constituyen mediciones directamente equivalentes.

Los resultados evidencian una diferencia relevante entre el escenario base y el modelo propuesto. Mientras la situación base presenta un costo total anual de USD 16.747.436, el modelo propuesto alcanza USD 23.719.344, equivalente a un incremento aproximado de 42%. Esta diferencia debe analizarse considerando que ambos escenarios operan bajo distintos niveles de protección frente al riesgo de desabastecimiento. En particular, el modelo propuesto minimiza el costo total sujeto a condiciones de continuidad operacional más exigentes y a un nivel de servicio objetivo superior.

Esta diferencia adquiere especial relevancia dada la criticidad operacional de los materiales de Packing, cuya indisponibilidad puede afectar directamente el envasado y despacho del producto terminado. Los antecedentes históricos confirman esta exposición, registrándose quiebres de maxisaco fino durante 2024 y de maxisaco cristal durante 2025. En este contexto, el modelo propuesto incorpora stocks de seguridad calibrados para un nivel de servicio objetivo del 99%, con el propósito de aumentar la protección frente al riesgo de desabastecimiento. Este valor no debe interpretarse como un nivel de servicio observado directamente en los resultados del MILP, sino como un parámetro de diseño superior al desempeño histórico cercano al 97% registrado bajo la política actual.

Como consecuencia de este mayor nivel de protección, el inventario promedio aumenta desde 44.988 a 84.427 unidades, equivalentes a un incremento de 639 a 1.714 m^3. Esto eleva la ocupación promedio de la bodega principal desde aproximadamente 13% a 34%. No obstante, la ocupación máxima se mantiene cercana al 69% en ambos escenarios, evidenciando que el incremento de inventario puede ser absorbido por la capacidad disponible de PQL, sin requerir ampliaciones de infraestructura ni almacenamiento externo.

La diferencia económica entre ambos escenarios alcanza aproximadamente USD 6.971.908. Este monto no debe interpretarse únicamente como un sobrecosto operacional, ya

que una parte corresponde a mayor inventario disponible al cierre del horizonte, el cual continúa constituyendo un activo utilizable en períodos posteriores. Por lo tanto, parte del incremento representa una mayor inversión en capital de trabajo y no un recurso consumido durante 2027.

Para dimensionar económicamente esta diferencia, considerando un precio referencial del litio de USD 21.800 por tonelada, una interrupción que impidiera comercializar aproximadamente 320 toneladas de producto terminado comprometería ingresos de magnitud equivalente al diferencial de costos entre ambos escenarios. Este volumen corresponde, de forma referencial, a aproximadamente 320 pallets de una tonelada o 640 maxisacos de 500 kg. Si bien esta comparación corresponde a ingresos potencialmente no percibidos y no a utilidad perdida, permite dimensionar el impacto económico asociado a un eventual quiebre de materiales de Packing.

En consecuencia, los resultados muestran un trade-off entre costo y protección operacional. El modelo propuesto requiere una mayor inversión en inventario, dado que incorpora stocks de seguridad asociados a un nivel de servicio objetivo superior. Bajo la demanda determinística proyectada, estas restricciones aumentan la protección frente al riesgo de desabastecimiento, aunque el nivel de servicio efectivo deberá ser evaluado posteriormente mediante indicadores operacionales durante la aplicación real del modelo. Su aporte, por tanto, no radica necesariamente en disminuir el desembolso anual respecto de la situación actual, sino en determinar la alternativa de menor costo compatible con un estándar de continuidad operacional más exigente y con la capacidad de almacenamiento disponible.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de esta investigación permitió estructurar una metodología integral para la planificación del abastecimiento de la categoría Packing en SQM División Litio, integrando clasificación de inventarios, pronóstico de demanda, políticas de reposición y optimización matemática. A partir de la información operacional disponible, se construyó un plan mensualizado de abastecimiento para 2027, incorporando las principales restricciones comerciales, logísticas y operacionales asociadas a la gestión de estos materiales.

La clasificación ABC evidenció una elevada concentración del gasto, dado que cuatro de los 29 SKU analizados representan el 81% del presupuesto anual, mientras que las categorías de pallets y maxisacos concentran conjuntamente cerca del 91%. Complementariamente, la clasificación XYZ mostró que cinco de los seis materiales críticos presentan una demanda relativamente estable. Estos resultados permiten concluir que los principales desafíos de abastecimiento no dependen únicamente de la variabilidad de la demanda, sino también de factores como los Lead Times, las cantidades mínimas de compra (MOQ) y las condiciones particulares de suministro.

La política vigente se basa en una revisión mensual y en stocks objetivo equivalentes a 2,5 meses de consumo para maxisacos, 0,5 meses para pallets de madera y 1 mes para pallets plásticos, determinados a partir del consumo promedio anual proyectado. Si bien este mecanismo proporciona una cobertura operacional, no incorpora explícitamente la variabilidad de la demanda ni vincula los niveles de inventario con un objetivo probabilístico de servicio. Esta exposición se refleja en los quiebres históricos registrados para el maxisaco fino durante 2024 y el maxisaco cristal durante 2025, aun cuando el desempeño histórico observado presenta un nivel de servicio cercano al 97%.

Frente a esta situación, el modelo propuesto incorpora stocks de seguridad y puntos de reorden dimensionados a partir de un nivel de servicio objetivo del 99%. El ROP constituye una referencia de gestión, mientras que las decisiones de cuánto y cuándo comprar son determinadas endógenamente por el modelo considerando demanda proyectada, Lead Time, MOQ, inventario disponible, pedidos en tránsito y estructura de costos. Esta capacidad de anticipación resulta especialmente relevante para los maxisacos, cuyos tiempos de reposición cercanos a cinco meses requieren emitir determinadas órdenes durante 2026 para asegurar el abastecimiento de los primeros meses de 2027.

El modelo multiartículo y multiperíodo, formulado como un problema de programación lineal entera mixta (MILP) e implementado en AMPL mediante el solver HiGHS, permite integrar estas condiciones y generar un plan de abastecimiento operacionalmente factible. Al comparar el modelo propuesto con el escenario base asociado a la política vigente, el costo total anual aumenta desde USD 16.747.436 hasta USD 23.719.344, equivalente a aproximadamente un 42%, mientras que el inventario promedio aumenta desde 44.988 hasta 84.427 unidades. Como consecuencia, la ocupación promedio de la bodega aumenta desde 13% hasta 34%; sin embargo, la utilización máxima se mantiene cercana al 69%, por lo que la capacidad disponible de 5.000 m³ resulta suficiente bajo las condiciones analizadas.

El diferencial de aproximadamente USD 6,97 millones debe interpretarse como el resultado conjunto de un mayor nivel de protección frente al riesgo de desabastecimiento y de las condiciones de borde incorporadas en la formulación. En particular, parte del incremento del inventario y de las compras concentradas hacia el cierre de 2027 responde a la condición terminal y a la extensión de la demanda posterior a diciembre. Por esta razón, la diferencia económica no puede atribuirse exclusivamente al stock de seguridad asociado al

nivel de servicio objetivo del 99%. Asimismo, una parte del mayor desembolso permanece materializada en inventario disponible para períodos posteriores. En una implementación mediante horizonte móvil, este efecto de cierre tendería a disminuir, ya que el modelo sería actualizado y resuelto periódicamente con nueva información de demanda, inventarios y órdenes en tránsito.

En síntesis, los resultados evidencian un compromiso entre costo y protección operacional. El escenario base presenta menores costos y niveles de inventario, pero una mayor exposición al riesgo de desabastecimiento, mientras que el modelo propuesto requiere una mayor inversión en inventario para operar bajo condiciones de protección más exigentes. No obstante, este incremento se mantiene dentro de la capacidad de almacenamiento disponible y proporciona una herramienta cuantitativa para anticipar las necesidades de abastecimiento, apoyar la planificación de compras y fortalecer la continuidad operacional de la categoría Packing.

Recomendaciones

Se recomienda implementar el modelo bajo un esquema de horizonte móvil, actualizándolo mensualmente con consumos reales, inventarios, pedidos en tránsito, programas de producción y antecedentes de proveedores. Asimismo, resulta conveniente mantener un horizonte de planificación mínimo de 12 meses, especialmente para los maxisacos importados, cuyas decisiones de compra y negociación deben comenzar con varios meses de anticipación.

Respecto de la gestión de inventarios, se recomienda avanzar desde stocks objetivo expresados únicamente en meses de consumo hacia parámetros asociados a la variabilidad de la demanda y al nivel de servicio requerido. El stock de seguridad y el ROP deberían

recalcularse periódicamente, utilizando este último como referencia para la gestión, mientras la programación efectiva de compras continúa siendo determinada mediante optimización.

También se recomienda utilizar las proyecciones obtenidas como apoyo en la negociación de capacidad, volúmenes y flexibilidad con los proveedores, con el propósito de reducir la dependencia de altos inventarios físicos. No se considera necesaria una ampliación de la bodega PQL en las condiciones analizadas, aunque resulta conveniente definir niveles internos de alerta ante posibles variaciones de demanda, Lead Time o recepciones simultáneas.

Finalmente, se propone complementar la implementación del modelo con un tablero mensual de KPI que incluya nivel de servicio tipo α, OTIF y exactitud del pronóstico. En particular, el monitoreo del nivel de servicio permitirá contrastar el desempeño operacional efectivamente observado con el nivel objetivo utilizado para parametrizar el stock de seguridad, facilitando la recalibración periódica de las políticas de inventario.

BIBLIOGRAFÍA

1. Axsäter, S. (2015). Multi-echelon systems: Structures and ordering policies. En *Inventory Control*. Springer International Publishing.
2. Ballou, R. H. (2004). Logística: Administración de la cadena de suministro. Pearson Educación.
3. Choi, T. M. (2014). Handbook of EOQ inventory problems. AMC.
4. Dickie, H. F. (1951). *ABC Inventory Analysis Shoots for Dollars, Not Pennies*. Factory Management and Maintenance, 109(7), 92-94.
5. Douissa, M. R., & Jabeur, K. (2020). A non-compensatory classification approach for multi-criteria ABC analysis. *Soft Computing*.
6. Gómez-Herrera, J. A., Escobar, J. W., & Figueroa-Cabrera, Á. (2013). A multi-product lot-sizing model for a manufacturing company. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, *14*(3), 413–419. https://doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72254-2
7. Gutiérrez, V., & Vidal, C. J. (2008). Modelos de gestión de inventarios en cadenas de abastecimiento: Revisión de la literatura. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*.
8. Heizer, J., Render, B., & Pérez de Lara Choy, M. I. T. (2004). Principios de administración de operaciones (5.ª ed.). Pearson Educación.
9. Pareto, V. (2014). Manual of political economy: A critical and variorum edition. Oxford University Press.
10. Schneider, H. (1981). Effect of service levels on order points or order levels in inventory models. *International Journal of Production Research*.

11. SQM. (2022). *Proceso de producción*. https://sqm.com/acerca-de-sqm/recursos-naturales/proceso-de-produccion/

12. SQM. (2025.). *Estados financieros consolidados Litio*. https://ir.sqm.com/static-files/67fa99dc-1a8f-4e80-8fd0-a36fb68de182

13. SQM. (2026). *SQM reporta resultados para los doce meses finalizados el 31 de diciembre de 2025.* https://ir.sqm.com/system/files-encrypted/nasdaq_kms/assets/2026/02/27/23-18-45/PR_4Q2025%20Earnings%20release_esp_vf.pdf

14. SQM. (2026.). *4Q2025 RESULTS PRESENTATION.* https://ir.sqm.com/static-files/bd268d17-209c-492f-89e8-a548f1e8b0b7

15. Valencia-Cárdenas, M., Díaz-Serna, F. J., & Correa-Morales, J. C. (2015). Planeación de inventarios con demanda dinámica: Una revisión del estado del arte. *DYNA*.

16. Zipkin, P. H. (1986). Inventory service-level measures: Convexity and approximation. *Management Science*.

ANEXOS

Anexo 1 “Código de modelo de optimización propuesto”

```
# ============================================================
# HORIZONTE
# ============================================================

param NT integer > 0;
# Numero de periodos oficiales del horizonte (12 meses de 2027).
# Parametro auxiliar de implementacion; en el informe T={1,...,12}.

param Lmax integer > 0;
# Lead Time maximo.

param Hmax integer := NT + Lmax;
# Limite superior del horizonte extendido T+.

param FIRST integer := 1 - Lmax;
# Primer periodo posible de emision de una orden previa.


# ============================================================
# CONJUNTOS
# ============================================================

set I;
# i in I: conjunto de productos o envases considerados.

set T := 1..NT;
# t in T: periodos oficiales del horizonte de planificacion.

set Tplus := 1..Hmax;
# T+ del informe: horizonte extendido para representar recepciones
# posteriores a diciembre producto del Lead Time.

set S := FIRST..NT;
# s in S: periodos posibles de emision de ordenes.
# Los valores s <= 0 representan ordenes previas a enero de 2027.
```

```
# ============================================================
# COSTOS
# ============================================================

param c {I,Tplus} >= 0;
# c[i,t]: costo variable de compra del producto i
# en el periodo t [USD/unidad].

param h {I,Tplus} >= 0;
# h[i,t]: costo unitario de almacenamiento del producto i
# en el periodo t [USD/unidad-periodo].

param K >= 0;
# K: costo fijo de emision de una orden [USD/orden].
```

```
# ============================================================
# PARAMETROS OPERACIONALES
# ============================================================

param D {I,Tplus} >= 0;
# D[i,t]: demanda proyectada del producto i
# en el periodo t [unidades].

param LT {I} integer >= 0 <= Lmax;
# LT[i]: Lead Time del producto i medido en periodos.
# Se permite LT = 0 para representar el pallet de madera
# en el balance mensual del MILP.

param MOQ {I} > 0;
# MOQ[i]: cantidad minima de pedido del producto i [unidades].

param SS {I} >= 0;
# SS[i]: stock de seguridad requerido para el producto i [unidades].

param ROP {I} >= 0;
# ROP[i]: punto de reorden utilizado como referencia
# y condicion terminal [unidades].

param V {I} >= 0;
# V[i]: volumen ocupado por una unidad del producto i [m3/unidad].

param CAP > 0;
# CAP: capacidad maxima de almacenamiento de PQL [m3].

param TR {I,Tplus} >= 0 default 0;
# TR[i,t]: pedidos historicos/en transito programados
# para arribar en el periodo t [unidades].

param I0 {I} >= 0;
# I0[i]: inventario inicial del producto i [unidades].
```

```
# ============================================================
# VARIABLES
# ============================================================

var Q {I,S} >= 0;
# Q[i,s]: cantidad a comprar del producto i
# mediante una orden emitida en el periodo s.

var Inv {I,Tplus} >= 0;
# Inv[i,t]: inventario del producto i al final del periodo t.

var Y {I,S} binary;
# Y[i,s] = 1 si se emite una orden del producto i en s;
#          0 en caso contrario.

var N {I,S} integer >= 0;
# N[i,s]: numero de lotes MOQ del producto i
# ordenados en el periodo s.
```

```
# ============================================================
# RESTRICCIONES
# ============================================================


# ------------------------------------------------------------
# 1. COMPRA EN MULTIPLOS DEL MOQ
# Q[i,s] = MOQ[i] * N[i,s]
# ------------------------------------------------------------

subject to MOQ_Multiple {i in I, s in S}:
    Q[i,s] = MOQ[i] * N[i,s];


# ------------------------------------------------------------
# 2. ACTIVACION DE LA ORDEN
#
# Si Y[i,s] = 0 -> N[i,s] = 0
# Si Y[i,s] = 1 -> N[i,s] >= 1
# ------------------------------------------------------------

subject to Order_Upper {i in I, s in S}:
    N[i,s] <= 10000 * Y[i,s];

subject to Order_Lower {i in I, s in S}:
    N[i,s] >= Y[i,s];
```

```
# ------------------------------------------------------------
# 3. RECEPCION CON LEAD TIME Y BALANCE DE INVENTARIO
#
# Una orden emitida en s llega en:
# t = s + LT[i]
#
# Equivalentemente:
# s = t - LT[i]
# ------------------------------------------------------------

subject to Inventory_Balance {i in I, t in Tplus}:

    Inv[i,t]

    =
    (
        if t = 1
        then I0[i]
        else Inv[i,t-1]
    )

    + TR[i,t]

    +
    (
        if t - LT[i] >= FIRST
           and t - LT[i] <= NT
        then Q[i,t-LT[i]]
        else 0
    )

    -
    (
        if t <= NT + LT[i]
        then D[i,t]
        else 0
    );
```

```
# ------------------------------------------------------------
# 4. STOCK DE SEGURIDAD Y PROHIBICION DE QUIEBRES
#
# El modelo no calcula probabilisticamente el nivel de servicio.
# SS[i] es un parametro previamente dimensionado para un
# nivel de servicio objetivo del 99%.
# ------------------------------------------------------------

subject to Safety_Stock {i in I, t in Tplus}:
    Inv[i,t] >= SS[i];


# ------------------------------------------------------------
# 5. CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE PQL
# ------------------------------------------------------------

subject to Warehouse_Capacity {t in Tplus}:
    sum {i in I} V[i] * Inv[i,t] <= CAP;


# ------------------------------------------------------------
# 6. CONDICION DE CIERRE DEL HORIZONTE
#
# El ROP no gatilla directamente las ordenes.
# Se utiliza como condicion terminal del modelo.
# ------------------------------------------------------------

subject to Final_ROP {i in I}:
    Inv[i,NT + LT[i]] >= ROP[i];


# ============================================================
# FUNCION OBJETIVO
#
# min Z =
#   costo de compra
# + costo de almacenamiento
# + costo fijo de emision de ordenes
# ============================================================
```

```
minimize Z:

    # ---------------------------------------------------------
    # Costo de compra
    #
    # Para ordenes emitidas antes de enero de 2027 (s <= 0),
    # se utiliza como referencia el costo de enero.
    # ---------------------------------------------------------

    sum {i in I, s in S}
    (
        if s <= 0
        then c[i,1]
        else c[i,s]
    ) * Q[i,s]

    +

    # ---------------------------------------------------------
    # Costo de almacenamiento
    #
    # Para t > NT se mantiene como referencia el costo
    # correspondiente al mes 12.
    # ---------------------------------------------------------

    sum {i in I, t in Tplus}
    (
        if t <= NT
        then h[i,t]
        else h[i,NT]
    ) * Inv[i,t]

    +

    # ---------------------------------------------------------
    # Costo fijo de emision de orden
    # ---------------------------------------------------------

    sum {i in I, s in S}
        K * Y[i,s]
;
```