



UNIVERSIDAD DE AYSÉN

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL INFORMÁTICA

Diseño de un Prototipo de Simulación para el Análisis de Resiliencia en la Cadena de Suministro de Gas Licuado de Petróleo de Aysén

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Informático

Autor: Carlos Subiabre Saldivia

Mentora: Natacha Pino Acuña

Coyhaique, Chile

2025

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a las personas que hicieron posible la realización de esta memoria.

A mi familia, por su constante apoyo y paciencia a lo largo de mis años de estudio. Su confianza fue fundamental para llegar a esta etapa.

A mi mejor amiga, por su invaluable amistad y por su aliento en los momentos más difíciles de este proceso.

A mi mentora, Profesora Natacha Pino Acuña, por su guía, tiempo y dedicación. Sus conocimientos y consejos fueron esenciales para el desarrollo de esta memoria.

Resumen

La cadena de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en la Región de Aysén constituye un sistema sociotécnico de alta criticidad, caracterizado por una topología logística sin redundancia y una capacidad de respuesta endógena insuficiente para mitigar las disrupciones exógenas recurrentes. El diagnóstico técnico actual, si bien es exhaustivo, es de naturaleza estática y carece de herramientas para evaluar dinámicamente el impacto de los riesgos o el retorno en resiliencia de las inversiones propuestas.

Este trabajo de titulación aborda dicha brecha metodológica mediante el diseño, implementación y validación de un prototipo de simulación de eventos discretos. El artefacto computacional desarrollado modela la interacción de los parámetros logísticos clave —capacidad de almacenamiento, políticas de inventario, demanda estocástica y, crucialmente, la frecuencia y duración de las interrupciones de la ruta de suministro— concentrados en el nodo de almacenamiento primario de Coyhaique, que actúa como centro neurálgico del sistema regional.

El objetivo es crear un laboratorio virtual que permita cuantificar la resiliencia del sistema bajo diferentes escenarios. Mediante un diseño de experimentos formal, se evaluará la sensibilidad del sistema a distintos parámetros, buscando confirmar la hipótesis de que la resiliencia es significativamente más sensible a la duración de las disrupciones de ruta que a las variaciones en la capacidad de almacenamiento. El prototipo validado sienta una base metodológica para la toma de decisiones informadas, instrumentalizando una recomendación explícita de la política pública regional y contribuyendo al fortalecimiento de la seguridad energética de Aysén.

Palabras Clave: Simulación de Eventos Discretos, Resiliencia de Cadenas de Suministro, Gestión de Inventarios, Análisis de Riesgos, Seguridad Energética, Ingeniería de Sistemas.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice general	III
Índice de figuras	V
Índice de cuadros	VI
1 Introducción	1
2 Planteamiento del Problema	2
2.1. Caracterización del Sistema	2
2.2. Análisis de Vulnerabilidades: La Disonancia Crítica del Sistema	3
2.3. Insuficiencia de los Marcos de Análisis y la Brecha Metodológica	5
3 Hipótesis y Pregunta de Investigación	6
3.1. Pregunta de Investigación	6
3.2. Hipótesis Central	7
4 Objetivos	8
4.1. Objetivo General	8
4.2. Objetivos Específicos	8
5 Marco Teórico	10
5.1. Teorías del Dominio del Problema: La Cadena de Suministro	10
5.2. Metodología del Dominio de la Solución: La Simulación de Sistemas . . .	13
6 Estado del Arte	15
6.1. La Simulación como Estándar en la Gestión de Riesgos Logísticos	15

6.2. El Diagnóstico de Vulnerabilidad en Aysén: Un Análisis Estático	16
6.3. Identificación del Vacío de Conocimiento y Contribución Original	17
7 Diseño Metodológico	18
7.1. Fase 1: Modelado Conceptual del Sistema (Objetivo 1)	18
7.2. Enfoque de la Investigación	19
7.3. Fase 2: Implementación del Prototipo (Objetivo 2)	21
7.4. Fase 3: Evaluación y Experimentación (Objetivo 3)	22
8 Resultados	24
8.1. Validación del Modelo de Simulación	24
8.2. Análisis Descriptivo del Rendimiento del Sistema	25
8.3. Prueba de Hipótesis: Análisis de Sensibilidad	28
8.4. Resumen del Capítulo	31
9 Discusión	33
9.1. Interpretación Teórica de los Hallazgos	33
9.2. Implicaciones para la Política Pública	34
9.3. Limitaciones del Estudio	36
9.4. Oportunidades para Investigación Futura	38
9.5. Resumen del Capítulo	39
10 Conclusiones y Proyección del Trabajo	41
10.1. Síntesis del Problema y la Solución Propuesta	41
10.2. Contribuciones Esperadas	42
10.3. Limitaciones y Líneas de Trabajo Futuro	42

Índice de figuras

5.1. Modelo de inventario (Q, R) con Punto de Reorden (ROP) y Stock de Seguridad (SS) bajo incertidumbre en el <i>lead time</i>	11
5.2. El <i>trade-off</i> entre eficiencia y resiliencia en la gestión de cadenas de suministro.	12
7.1. Modelo Conceptual del Sistema de Distribución de GLP.	19
8.1. Distribución del nivel de servicio para las seis configuraciones experimentales. Los boxplots muestran la mediana, cuartiles y valores extremos basados en 30 réplicas por configuración.	26
8.2. Mapa de calor del nivel de servicio para todas las combinaciones de factores experimentales. Los valores más oscuros indican menor resiliencia del sistema.	27
8.3. Impacto de las disrupciones en el sistema de suministro. Panel (A): frecuencia de quiebres de stock por configuración. Panel (B): comparación entre tiempo con ruta bloqueada y tiempo con quiebre de stock, mostrando la capacidad del sistema para absorber disrupciones.	28
8.4. Comparación del efecto de factores endógenos y exógenos sobre el nivel de servicio. Panel (A): efecto de la capacidad de almacenamiento. Panel (B): efecto de la duración de disrupciones. Las barras de error representan una desviación estándar.	30
8.5. Prueba de hipótesis: comparación de sensibilidades. El ratio de $2,07\times$ confirma que la resiliencia del sistema es significativamente más sensible a factores exógenos (duración de disrupciones) que a factores endógenos (capacidad de almacenamiento).	31

Índice de cuadros

7.1. Diseño Experimental para la Evaluación de la Resiliencia.	23
8.1. Parámetros de entrada del modelo de simulación.	25
8.2. Nivel de servicio y quiebres de stock por configuración.	26
8.3. Estadísticas de interrupciones por configuración.	28

CAPÍTULO 1

Introducción

El suministro de recursos energéticos en regiones aisladas enfrenta desafíos particulares debido a la variabilidad de las condiciones operacionales y la necesidad de asegurar la continuidad del servicio. Estos desafíos requieren herramientas analíticas que consideren la incertidumbre inherente del sistema. La Región de Aysén, en la Patagonia chilena, ilustra esta problemática en su sistema de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP).

Este trabajo aborda la vulnerabilidad de dicha cadena de suministro. El objetivo es diseñar y validar un modelo de simulación de eventos discretos para analizar cuantitativamente la resiliencia del sistema. El modelo se enfoca en el nodo logístico de Coyhaique, punto central del sistema de distribución regional, y permite evaluar la interacción de parámetros logísticos, cuantificar el impacto de interrupciones y evaluar estrategias de mitigación.

La investigación se estructura de manera deductiva para guiar al lector desde el contexto general hasta los detalles técnicos y los resultados. El capítulo 2 contextualiza y justifica la relevancia del problema. El capítulo 3 formaliza la pregunta de investigación y la hipótesis central que guían el estudio. El capítulo 4 delimita las metas del proyecto de manera precisa. Los capítulos 5 y 6 establecen los fundamentos teóricos y el estado del arte en la materia. Finalmente, el capítulo 7 detalla el diseño metodológico para el desarrollo y la validación del prototipo.

CAPÍTULO 2

Planteamiento del Problema

El suministro de recursos energéticos en regiones aisladas constituye un problema complejo de alta relevancia. La Región de Aysén, en la Patagonia chilena, ilustra esta problemática en su sistema de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP). Este capítulo formaliza los elementos que configuran un escenario de riesgo sistémico. Se argumenta que la interacción de tres factores —alta dependencia energética, topología logística frágil y vacíos en la planificación estratégica— demanda un nuevo enfoque analítico que los métodos estáticos actuales no pueden proveer.

2.1. Caracterización del Sistema

El sistema de suministro de GLP en Aysén opera bajo condiciones que lo definen como un sistema complejo y crítico. Su criticidad se deriva de la confluencia de una demanda energética elevada, una estructura de mercado oligopólica y una infraestructura precaria.

La Dimensión de la Demanda: Criticidad y Crecimiento Sostenido

La demanda energética de la región es un factor distintivo a nivel nacional. Con un consumo per cápita de 27.25 Gcal, que excede en un 65 % la media de Chile, la población depende intensivamente de un flujo energético constante para sostener funciones básicas. El GLP satisface nichos de consumo —cocción de alimentos y agua caliente sanitaria— para los cuales no existen sustitutos inmediatos a gran escala. Esta inelasticidad fundamental de la demanda convierte al GLP en un recurso de alta prioridad

social, cuya interrupción tiene consecuencias directas e inmediatas sobre el bienestar de la población.

Adicionalmente, la demanda no es estática. El sistema enfrenta un crecimiento sostenido del 3.8 % anual, impulsado por el desarrollo demográfico y económico de la región. A esto se suma un factor disruptivo futuro: la proyectada incorporación de una central térmica que consumirá 14.4 ton/día de GLP. Este crecimiento y cambio estructural implican que la presión sobre la ya frágil cadena de suministro se intensificará de manera no lineal en los próximos años.

La Dimensión del Suministro: Topología Lineal y Soberanía Comprometida

La estructura de la cadena de suministro, detallada en el informe de referencia **CIEP2025**¹, se caracteriza por una topología logística lineal con una dependencia absoluta de fuentes exógenas. El informe es categórico al afirmar que “La totalidad del gas licuado que llega a la región, lo hace vía camiones que transitan por el paso Huemules desde Argentina”. Este diseño, carente de redundancia, convierte a la ruta terrestre en un punto único de falla (*Single Point of Failure*) de manual. La magnitud de esta dependencia se cuantifica en el hecho de que el 86 % del recorrido terrestre desde la planta de Cabo Negro hasta Coyhaique transcurre por territorio argentino, lo que implica que la soberanía logística y la seguridad del suministro regional están estructuralmente comprometidas por la dinámica de un país vecino.

2.2. Análisis de Vulnerabilidades: La Disonancia Crítica del Sistema

Las vulnerabilidades del sistema no son meramente teóricas, sino que se manifiestan en una disonancia crítica: la magnitud de las amenazas exógenas supera con creces la capacidad de absorción de la fragilidad endógena del sistema.

¹El informe, encargado por la Seremía de Energía de Aysén, fue finalizado y presentado en 2025. A la fecha de esta publicación, se encuentra en proceso de difusión pública.

Vulnerabilidades Exógenas: Amenazas Recurrentes y de Larga Duración

El principal vector de riesgo es la incertidumbre estocástica en el aprovisionamiento. El informe de riesgos **CIEP2025** identifica dos amenazas dominantes. Primero, el evento de “Nevadas / Cierre cruce fronterizo” (Tag #57), clasificado con una probabilidad de Nivel 4 (“Casi Seguro”), lo que implica una frecuencia de ocurrencia de “al menos una vez cada tres meses”. Segundo, el riesgo de “Conflicto social en Argentina” (Tag #45), que, aunque menos frecuente, ha demostrado la capacidad de paralizar el suministro por períodos de hasta tres semanas. Esta realidad es corroborada por la autoridad energética regional, quien identifica la “conflictividad social” y la “mantención de los caminos” en Argentina como la principal amenaza para la continuidad del suministro (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025). El sistema, por tanto, enfrenta amenazas recurrentes y de duración prolongada que introducen una alta variabilidad en el tiempo de entrega (*lead time*).

Vulnerabilidades Endógenas: Un Buffer Insuficiente y Estratégicamente Degradado

Frente a una amenaza documentada de 21 días, la capacidad de respuesta del sistema es alarmantemente limitada. La infraestructura de almacenamiento primario en Coyhaique posee una capacidad nominal total de solo **431 ton**, distribuidas entre Abastible (150 ton), Lipigas (240 ton) y Gasco (41 ton) **CIEP2025**. Esta capacidad se traduce en una autonomía teórica de apenas **8.2 días** para el mes de mayor venta.

Esta fragilidad no es solo una limitación física, sino el resultado de una dinámica de mercado adversa. El informe evidencia que “por empresas los números son mucho más ajustados para Gasco que tiene una capacidad demasiado reducida para su nivel de ventas” **CIEP2025**. Este hecho es la manifestación práctica de un “Dilema del Prisionero”: en un mercado oligopólico, la estrategia individualmente racional de minimizar costos de capital (manteniendo un inventario bajo) es adoptada por al menos un actor, lo que degrada la resiliencia colectiva y deja al sistema entero expuesto.

2.3. Insuficiencia de los Marcos de Análisis y la Brecha Metodológica

El marco de planificación regional y las herramientas de análisis existentes son inadecuados para gestionar la compleja interacción de las vulnerabilidades descritas.

Primero, existe un documentado vacío estratégico. La ‘Política Energética 2050 Región de Aysén’ centra sus esfuerzos de seguridad energética exclusivamente en el sector eléctrico, omitiendo un tratamiento formal para la cadena de suministro de combustibles.

Segundo, el diagnóstico técnico disponible **CIEP2025**, si bien es exhaustivo, es de naturaleza estática. Propone un portafolio de soluciones, como el aumento de la capacidad de almacenamiento en 250 ton con una inversión estimada de 1.5 millones de USD, pero no provee un método para evaluar su retorno en resiliencia. La matriz de riesgos evalúa probabilidad e impacto de forma aislada, pero no puede capturar los efectos en cascada de una disrupción a lo largo del tiempo.

Esta insuficiencia se materializa en la práctica operativa de la gestión de crisis regional. Como lo confirma la autoridad regional, dicha gestión se basa en protocolos reactivos y manuales, donde el proceso implica “llamar a todas las empresas, construir un Excel y, más o menos, sacar una foto de cuánta disponibilidad de combustible hay” (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025). Este enfoque, calificado como “rudimentario”, es la prueba fehaciente de la ausencia de una plataforma de análisis dinámico.

La brecha metodológica es, por tanto, clara: se carece de una herramienta que permita un análisis dinámico y cuantitativo para responder preguntas de ingeniería y gestión de inversiones, tales como:

¿Cuál es la reducción porcentual en la probabilidad de quiebre de stock que se obtiene de una inversión de \$1.5 M, bajo un escenario de disrupciones con una frecuencia de Nivel 4 y una duración estocástica, considerando además la demanda adicional de la nueva central térmica?

CAPÍTULO 3

Hipótesis y Pregunta de Investigación

El análisis del problema, expuesto en el capítulo 2, revela un sistema sociotécnico complejo, dominado por la interacción de variables estocásticas y decisiones estratégicas. La disonancia entre la magnitud de las amenazas exógenas y la limitada capacidad de respuesta endógena sugiere que no todos los parámetros del sistema contribuyen de igual manera a su vulnerabilidad global. Para abordar esta complejidad de manera científica, es imperativo formular una pregunta de investigación que guíe el diseño de una herramienta de análisis cuantitativo, y una hipótesis falsificable que postule una relación de sensibilidad entre los factores críticos del sistema.

3.1. Pregunta de Investigación

Considerando la caracterización del sistema, sus vulnerabilidades y la brecha metodológica identificada en los marcos de análisis actuales, la pregunta central que esta investigación busca responder es:

¿Cómo diseñar, implementar y validar un modelo de simulación de eventos discretos para cuantificar el impacto de parámetros logísticos críticos —tales como la duración de las interrupciones de ruta y las políticas de inventario— sobre la resiliencia del sistema de suministro de GLP en Aysén?

Esta pregunta aborda tanto la construcción del modelo como la validación de su utilidad para analizar este sistema sociotécnico.

3.2. Hipótesis Central

Como una respuesta conjetural y testable a la pregunta de investigación, y derivada directamente de la disonancia identificada en el planteamiento del problema, se postula la siguiente hipótesis central:

Hipótesis: La resiliencia del sistema de suministro de GLP de Aysén, cuantificada a través de métricas de rendimiento como el Nivel de Servicio, exhibe una sensibilidad significativamente mayor a la variabilidad de los parámetros exógenos que a la de los parámetros endógenos. Específicamente, se postula que la elasticidad de la resiliencia con respecto a la duración de las interrupciones de ruta es superior a su elasticidad con respecto a las variaciones en la capacidad de almacenamiento primario.

Esta hipótesis formaliza la intuición de que la magnitud de las amenazas externas (ej. un corte de 21 días) es el factor dominante que gobierna el comportamiento del sistema, por sobre las mejoras incrementales en la capacidad de respuesta interna (ej. aumentar el inventario de 8 a 12 días de autonomía). El diseño experimental, detallado en el capítulo 7, está específicamente concebido para proveer la evidencia estadística necesaria para confirmar o refutar esta afirmación, jerarquizando así las palancas de acción más efectivas para fortalecer la seguridad energética regional.

CAPÍTULO 4

Objetivos

Para abordar la brecha metodológica identificada en el capítulo 2 y responder a la pregunta de investigación formulada, el presente proyecto se estructura en torno a un conjunto de objetivos jerárquicos. Estos objetivos guían el proceso de diseño, desarrollo y validación del modelo de simulación propuesto, asegurando un enfoque sistemático para el análisis de la resiliencia del sistema de suministro de GLP.

4.1. Objetivo General

Diseñar y validar un modelo de simulación de eventos discretos para cuantificar el impacto de parámetros logísticos críticos sobre la resiliencia del sistema de suministro de GLP en el nodo Coyhaique.

4.2. Objetivos Específicos

La consecución del objetivo general se desglosa en tres fases metodológicas secuenciales, cada una representada por un objetivo específico que define una etapa clave del proceso de investigación y desarrollo:

1. **Modelar** la dinámica conceptual de la cadena de suministro de GLP en Coyhaique, realizando una abstracción formal de sus componentes, procesos y parámetros clave a partir de la información técnica disponible.
2. **Implementar** el modelo de simulación mediante una arquitectura de software parametrizable que traduzca el modelo conceptual en un programa funcional.

3. **Evaluar** la resiliencia del sistema mediante un diseño experimental sobre el modelo validado, generando evidencia empírica para confirmar o refutar la hipótesis de trabajo.

CAPÍTULO 5

Marco Teórico

El diseño de un modelo de simulación para analizar un sistema sociotécnico complejo requiere un fundamento dual. Primero, establecer el marco conceptual que gobierna la dinámica del sistema real. Segundo, formalizar la metodología de análisis para estudiar dicho sistema. Este capítulo establece ambos fundamentos, proporcionando las bases teóricas y técnicas para el diseño del modelo de simulación y la interpretación de sus resultados.

5.1. Teorías del Dominio del Problema: La Cadena de Suministro

Dinámica y Control de Inventarios en Entornos Estocásticos

El núcleo de cualquier cadena de suministro es la gestión de su inventario. La dinámica del nivel de inventario I en una planta a lo largo del tiempo t puede ser descrita por la ecuación fundamental de balance:

$$I(t) = I(t - 1) - D(t) + A(t)$$

donde $D(t)$ es la demanda agregada durante el período t , y $A(t)$ es la cantidad de producto que llega (arribos) en el mismo período. En un entorno estocástico como el de Aysén, tanto la demanda $D(t)$ como, y de forma más crítica, el tiempo de entrega (*lead time*, LT) que determina los arribos $A(t)$, son variables aleatorias.

Para gestionar esta incertidumbre, la teoría de control de inventarios establece políticas de reabastecimiento. Para este estudio, se adopta un modelo de revisión continua

(Q, R) , donde se ordena una cantidad fija Q cada vez que el inventario alcanza un Punto de Reorden R .

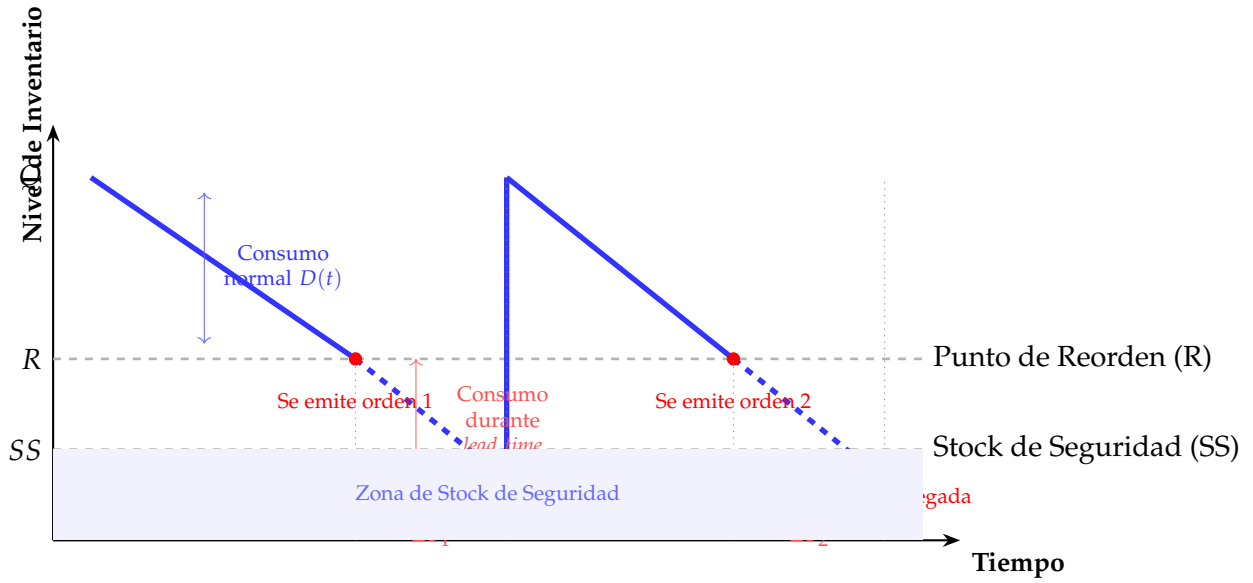


Figura 5.1: Modelo de inventario (Q, R) con Punto de Reorden (ROP) y Stock de Seguridad (SS) bajo incertidumbre en el *lead time*.

ig:inventory-model-detailed

El cálculo del Punto de Reorden se formaliza como:

$$R = (\bar{D} \times \bar{LT}) + SS$$

donde \bar{D} es la demanda promedio y \bar{LT} es el *lead time* promedio. El componente crucial es el Stock de Seguridad (SS), el buffer que protege contra la variabilidad. Se calcula como:

$$SS = Z_{\alpha} \times \sqrt{\bar{LT}\sigma_D^2 + \bar{D}^2\sigma_{LT}^2}$$

donde Z_{α} es el factor de servicio para un nivel de servicio deseado α , σ_D es la desviación estándar de la demanda, y σ_{LT} es la desviación estándar del *lead time*. Dado que en Aysén la demanda es relativamente estable pero el *lead time* es altamente volátil, la ecuación se simplifica y evidencia que $SS \propto \sigma_{LT}$. Esto formaliza matemáticamente la vulnerabilidad central del sistema: una alta variabilidad en el tiempo de la ruta (σ_{LT} elevado) exige un alto stock de seguridad para mantener la continuidad del servicio.

Resiliencia en Cadenas de Suministro

El enfoque tradicional de eficiencia ha sido complementado por el concepto de resiliencia, definida como la capacidad de una cadena de suministro para absorber, adap-

tarse y recuperarse de interrupciones **Christopher2004**. Este concepto introduce un compromiso fundamental entre eficiencia (minimización de costos) y robustez (inversión en redundancia). El sistema de Aysén, como muestra la Figura ??, se encuentra en una zona de aparente eficiencia pero alta vulnerabilidad.

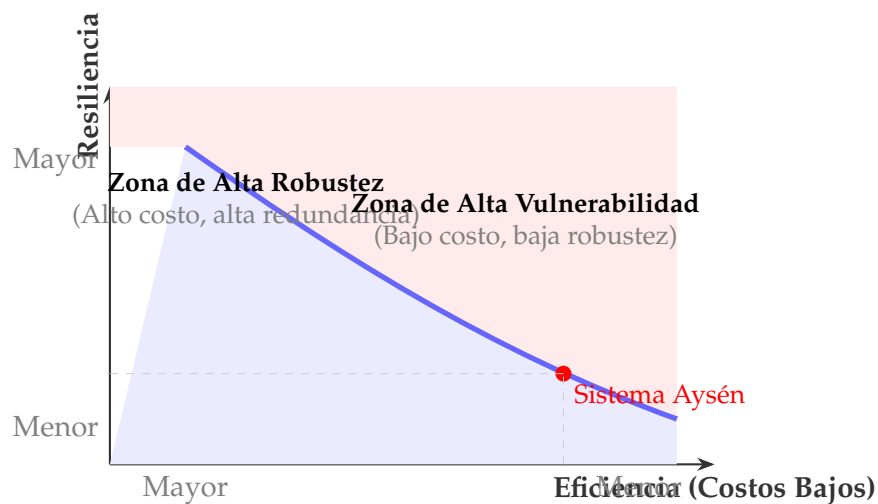


Figura 5.2: El *trade-off* entre eficiencia y resiliencia en la gestión de cadenas de suministro.

ig:resilience-tradeoff

Dinámicas de Competencia y Coordinación: El Aporte de la Teoría de Juegos

La estructura de mercado oligopólica del GLP en Aysén introduce una capa de complejidad estratégica. La teoría de juegos, y en particular el modelo del “Dilema del Prisionero”, ofrece un marco formal para entender por qué la acción racional individual (minimizar costos de inventario) puede conducir a un resultado colectivo subóptimo (baja resiliencia sistémica). La evidencia de que un actor opera con una capacidad “demasiado reducida para su nivel de ventas” **CIEP2025** sugiere que esta dinámica no es solo teórica, sino una práctica observable en el sistema bajo estudio.

5.2. Metodología del Dominio de la Solución: La Simulación de Sistemas

La simulación es la imitación del funcionamiento de un sistema del mundo real a lo largo del tiempo **Law2015**. Para un sistema estocástico y dinámico como el de Aysén, es la única metodología viable para evaluar el impacto de diferentes políticas bajo incertidumbre.

Simulación de Eventos Discretos (SED)

La SED es un método de modelado que representa un sistema como una secuencia cronológica de eventos **Banks2010**. Los componentes fundamentales de nuestro modelo SED son:

Entidades CamiónSuministro (con atributos: capacidad, origen).

Recursos PlantaAlmacenamiento (con atributos: capacidad_max, nivel_inventario, ROP), RutaTerrestre (con estado: abierta/cerrada).

Procesos GeneracionPedidos (cuando $I(t) \leq R$), ViajeSuministro (proceso estocástico con duración LT), ConsumoDiario (reduce $I(t)$), GeneradorDisrupciones (cambia el estado de la RutaTerrestre).

Protocolos de Credibilidad: Verificación y Validación (V&V)

La credibilidad de un estudio de simulación depende críticamente de un proceso formal de V&V.

- **Verificación:** *¿Se construyó el modelo correctamente?* Se asegura que el código implementa fielmente el modelo conceptual.
- **Validación:** *¿Se construyó el modelo correcto?* Se determina si el modelo es una representación suficientemente precisa del sistema real, comparando sus salidas con datos históricos y juicio de expertos.

Análisis de Resultados: Diseño de Experimentos (DoE)

Una vez validado, el modelo se usa para la experimentación. El DoE es el marco formal para variar sistemáticamente los factores de entrada (ej. capacidad de almacenamiento) para cuantificar su efecto en las métricas de respuesta (ej. Nivel de Servicio

α). El análisis estadístico de estos resultados (ej. ANOVA) permite identificar los parámetros más influyentes y probar hipótesis de manera rigurosa.

CAPÍTULO 6

Estado del Arte

Para establecer la originalidad y pertinencia de esta investigación, es necesario situarla en el contexto del conocimiento y la práctica existentes. Este capítulo realiza una revisión crítica en dos frentes: primero, el estado de la práctica en el uso de la simulación para la gestión de riesgos logísticos a nivel global; y segundo, el estado del diagnóstico técnico sobre la vulnerabilidad del suministro energético en Aysén. El objetivo es demostrar que, si bien ambas áreas están desarrolladas por separado, existe una brecha significativa en su intersección, la cual este proyecto se propone cerrar.

6.1. La Simulación como Estándar en la Gestión de Riesgos Logísticos

La simulación de eventos discretos (SED) no es una metodología académica incipiente, sino una herramienta consolidada y considerada el estándar de oro para el análisis y la optimización de cadenas de suministro complejas. Su aplicación es transversal, desde el sector comercial hasta el humanitario.

En la industria, corporaciones con operaciones logísticas de alta intensidad como Amazon, FedEx o Intel, emplean modelos de simulación de forma rutinaria para la toma de decisiones estratégicas. Estos modelos se utilizan para el diseño de redes de distribución, la optimización de operaciones en centros de almacenamiento y, de manera crucial, para el análisis de riesgos y la planificación de la continuidad del negocio (*Business Continuity Planning*). La simulación permite a estas organizaciones cuantificar el impacto de escenarios de disrupción —fallas en infraestructura, huelgas, eventos

climáticos extremos— y evaluar la efectividad de planes de contingencia antes de que ocurran, optimizando así el trade-off entre costo y resiliencia **Banks2010**.

De manera análoga, en el ámbito de la logística humanitaria, organizaciones como el Programa Mundial de Alimentos de las Naciones Unidas (WFP) utilizan la simulación para planificar la distribución de ayuda ante desastres naturales. Estos modelos son fundamentales para decidir sobre el pre-posicionamiento de inventarios críticos (alimentos, medicinas) y para optimizar las rutas de distribución en entornos caóticos y con infraestructura dañada **Law2015**. Estos casos de estudio demuestran que la simulación es la metodología por excelencia para analizar sistemas donde la incertidumbre, la complejidad y el riesgo son factores dominantes.

6.2. El Diagnóstico de Vulnerabilidad en Aysén: Un Análisis Estático

El informe “Investigación Vulnerabilidad de Suministro de GLP y Combustibles Líquidos” **CIEP2025** constituye el diagnóstico técnico más completo y actualizado del sistema bajo estudio. Este documento provee una “anatomía” detallada de la cadena de suministro, pero no un análisis de su “fisiología” bajo estrés. Sus contribuciones y limitaciones pueden resumirse en:

- **Fortaleza (Caracterización Exhaustiva):** El informe realiza un análisis descriptivo profundo de la demanda, las rutas, las capacidades de almacenamiento y los actores del sistema. Provee los datos agregados y las descripciones cualitativas que sirven como base indispensable para la parametrización de cualquier modelo cuantitativo.
- **Limitación (Naturaleza Estática):** Su principal herramienta analítica es una matriz de riesgos que evalúa probabilidad e impacto de forma aislada. Este enfoque, si bien es útil para la identificación y priorización inicial, es inherentemente estático. No puede capturar la dinámica temporal del sistema, los efectos en cascada de una disrupción, ni la interacción no lineal entre los parámetros (ej. cómo una disrupción de 15 días impacta de forma diferente si ocurre en temporada de alta o baja demanda).

En esencia, el informe responde a la pregunta de qué puede fallar, pero no provee una herramienta para responder a las preguntas de cuánto, cuándo y con qué probabilidad el sistema completo fallará.

6.3. Identificación del Vacío de Conocimiento y Contribución Original

La revisión del estado del arte revela una situación paradójica: por un lado, la práctica industrial y académica ha establecido la simulación como la herramienta idónea para analizar la resiliencia de cadenas de suministro; por otro, el diagnóstico más completo sobre la cadena de suministro de GLP en Aysén carece de este tipo de análisis dinámico.

El vacío de conocimiento que este proyecto aborda no es de naturaleza teórica, sino de aplicación metodológica a un problema específico de alta criticidad. La contribución original de esta tesis es desarrollar el modelo de simulación que cierra esa brecha.

Este trabajo ejecuta la iniciativa de gestión 11.11: “Simulación de emergencias energéticas”, propuesta en el informe de referencia **CIEP2025**. El informe califica la simulación como una “buena práctica” para la región y establece la meta de “Realizar cada 2-3 años un ejercicio de simulación”. Mientras el informe propone esta necesidad, y la autoridad regional valida su urgencia al identificar la necesidad de un “mecanismo que permita hacer un monitoreo permanente y en tiempo real” (Laibe, T., comunicación personal, 11 de junio, 2025), este proyecto de tesis diseña, implementa y valida el modelo que permite llevar a cabo dicha tarea.

Adicionalmente, el proyecto aborda una brecha de capacidad institucional identificada por la propia autoridad regional. La falta de personal técnico especializado para el monitoreo continuo de los hidrocarburos amplifica la necesidad de una herramienta como la propuesta, que no solo permite análisis más sofisticados, sino que también actúa como un multiplicador de capacidades, encapsulando conocimiento experto para potenciar la toma de decisiones de los equipos de gestión existentes.

CAPÍTULO 7

Diseño Metodológico

Este capítulo detalla el plan de trabajo y los métodos que se emplearán para alcanzar los objetivos de la investigación. El enfoque se enmarca en las disciplinas de la Ciencia Computacional y la Ingeniería de Sistemas, adoptando un proceso sistemático para el diseño, implementación y evaluación del modelo de simulación. El propósito es establecer un marco de trabajo riguroso, transparente y replicable.

7.1. Fase 1: Modelado Conceptual del Sistema (Objetivo 1)

El objetivo de esta fase es la abstracción formal del sistema real en un modelo conceptual que sirva como especificación para la implementación.

Definición de Límites y Supuestos del Modelo

Para abordar el problema regional de manera cuantitativa, es imperativo establecer un límite de sistema (*system boundary*) claro para el modelo computacional. Si bien el impacto de una disrupción en el suministro de GLP es de alcance regional, el centro de gravedad logístico y el punto de control más crítico de la cadena se encuentra en el nodo de almacenamiento primario de Coyhaique.

Por consiguiente, el modelo se centrará en la dinámica de inventarios de las tres plantas mayoristas ubicadas en dicho nodo. Se modelará el flujo de suministro desde los puntos de origen (Neuquén y Cabo Negro) hasta estas plantas, y la salida de pro-

ducto se modelará como una demanda agregada que representa el consumo de la zona de influencia directa.

Este enfoque se justifica porque la resiliencia del nodo de Coyhaique actúa como un **proxy directo** de la resiliencia de toda la región. Un quiebre de stock en este punto neurálgico implica, por definición, la incapacidad de abastecer a las demás localidades. La modelización de la red de distribución de última milla y las dinámicas de inventario en otros puntos de la región quedan fuera del alcance de este estudio y se plantean como líneas de trabajo futuro.

7.2. Enfoque de la Investigación

Esta investigación adopta un enfoque cuantitativo basado en simulación como método de experimentación computacional. Dada la naturaleza estocástica y compleja de la cadena de suministro de GLP, los modelos puramente analíticos son insuficientes. La simulación permite probar hipótesis y evaluar políticas bajo condiciones controladas, algo inviable en el sistema real. El desarrollo se estructura en las tres fases ilustradas en la Figura ??.

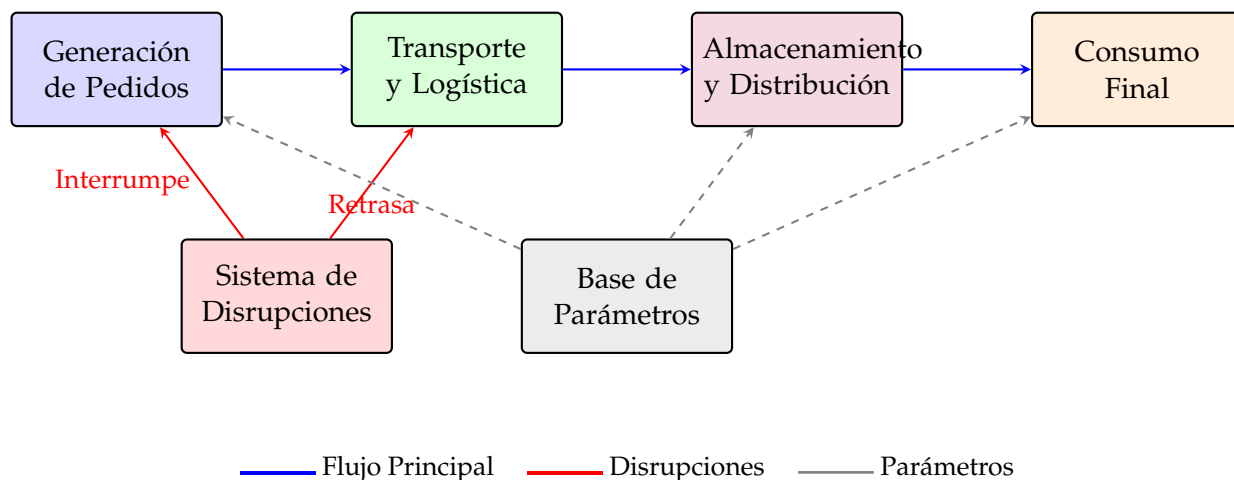


Figura 7.1: Modelo Conceptual del Sistema de Distribución de GLP.

ig:conceptual-diagram-detailed

Parametrización y Modelado Estocástico

Los parámetros del modelo se dividen en dos categorías: deterministas, tomados directamente del informe **CIEP2025**, y estocásticos, modelados mediante distribuciones

de probabilidad calibradas con datos históricos.

Parámetros Deterministas

- **Capacidad de Almacenamiento:**
 - Status Quo: 431 TM (Abastible: 150, Lipigas: 240, Gasco: 41)
 - Propuesta 10.4: 681 TM (incremento de 250 TM)
- **Política de Inventario (Q, R) :**
 - Punto de Reorden (R) : 50 % de la capacidad
 - Cantidad de Pedido (Q) : 50 % de la capacidad
 - Inventario Inicial: 60 % de la capacidad (arranque realista)
- **Lead Time Nominal:** 6 días (tiempo promedio de entrega desde Cabo Negro o Neuquén hasta Coyhaique)
- **Horizonte de Simulación:** 365 días (1 año)

Variables Estocásticas y Distribuciones

Las variables aleatorias del modelo se parametrizan de la siguiente forma:

1. **Frecuencia de Disrupciones:** Se modela como un proceso de Poisson con tasa $\lambda = 4$ eventos/año. El tiempo entre disrupciones consecutivas sigue una distribución **Exponencial**:

$$T_{\text{entre}} \sim \text{Exp}\left(\frac{\lambda}{365}\right) = \text{Exp}(0.0110)$$

donde λ corresponde a la frecuencia de Nivel 4 identificada en la matriz de riesgos CIEP2025.

2. **Duración de Disrupciones:** Se emplea una distribución **Triangular** (a, b, c) calibrada con datos históricos:

$$D_{\text{disrup}} \sim \text{Triangular}(a, b, c)$$

Los parámetros varían según el escenario experimental:

- Corta: $a = 3, b = 3.5, c = 7$ días
- Media: $a = 3, b = 7, c = 14$ días
- Larga: $a = 3, b = 10.5, c = 21$ días (conflicto Argentina 2021)

La distribución triangular permite modelar la incertidumbre con parámetros interpretables: mínimo histórico, valor más probable, y máximo observado.

3. **Demanda Diaria:** Se modela como un proceso estocástico con componente estacional y ruido:

$$D(t) = D_{\text{base}} \cdot \left(1 + 0.25 \sin \left(\frac{2\pi(t - 172)}{365} \right) \right) \cdot \epsilon(t)$$

donde:

- $D_{\text{base}} = 52.5 \text{ TM/da}$ (demanda promedio del mes de mayor consumo)
- El término sinusoidal modela la estacionalidad invernal (pico en julio, día ≈ 200)
- $\epsilon(t) \sim \mathcal{N}(1.0, 0.15)$ es el ruido estocástico diario ($\pm 15\%$ de variabilidad)

La demanda base de 52.5 TM/día se calibró para representar el escenario de estrés del sistema (mes de mayor consumo), lo que genera una autonomía conservadora de ≈ 5 das en el escenario Status Quo, frente a los 8.2 días calculados con demanda promedio anual.

Generación de Números Aleatorios

Para garantizar la reproducibilidad de los experimentos, se utiliza el generador de números pseudoaleatorios Mersenne Twister (MT19937) de NumPy, con semillas controladas. Cada réplica r de la configuración c emplea una semilla única:

$$s_{c,r} = s_{\text{base}} + (c - 1) \times 1000 + r$$

donde $s_{\text{base}} = 42$. Esta estrategia asegura independencia estadística entre réplicas y reproducibilidad exacta de los resultados.

7.3. Fase 2: Implementación del Prototipo (Objetivo 2)

Stack Tecnológico y Arquitectura de Software

La selección de herramientas busca maximizar la flexibilidad y la reproducibilidad científica:

- **Núcleo: Python 3.x y SimPy**, por su capacidad para modelar procesos complejos de forma nativa.

- **Análisis y Visualización:** **Pandas**, **Matplotlib**, y **Seaborn** para el procesamiento de datos y la generación de gráficos.
- **Reproducibilidad:** Se utilizará **Git** para el control de versiones y un gestor de entornos virtuales (**venv** o **Conda**) para encapsular las dependencias.

La arquitectura del software seguirá un patrón **Modelo-Experimento-Análisis**, separando la lógica de la simulación (`modelo.py`), de la orquestación de escenarios (`experimento.py`) y de los scripts de análisis (`analisis.py`). Los parámetros se externalizarán a un archivo `config.json`.

7.4. Fase 3: Evaluación y Experimentación (Objetivo 3)

Protocolo de Verificación y Validación (V&V)

Se aplicará un protocolo formal para establecer la credibilidad del modelo:

- **Verificación:** Se realizarán *code walkthroughs* y pruebas de componentes deterministas para asegurar que el código refleja el modelo conceptual.
- **Validación:** Se empleará un enfoque de múltiples facetas:
 - **Validación de Datos Históricos:** Se compararán las distribuciones estadísticas (media, varianza) de las métricas clave del modelo (ej. días de autonomía) con los valores de referencia del informe **CIEP2025** (ej. media de 8.2 días).
 - **Validación por Juicio de Expertos (Face Validity):** Se realizarán “pruebas de Turing” para modelos, donde se presentarán trazas de salida del modelo a los expertos técnicos de la SEC para que evalúen su plausibilidad operativa.

Diseño de Experimentos (DoE)

Para probar la hipótesis central, se ejecutará un **Diseño Factorial** 2×3 . Se realizarán múltiples replicaciones para cada combinación de factores para capturar la variabilidad estocástica.

Los resultados se analizarán mediante un **Análisis de Varianza (ANOVA)** para determinar la significancia estadística de los efectos principales de cada factor y de sus interacciones, proveyendo así la evidencia para confirmar o refutar la hipótesis.

Cuadro 7.1: Diseño Experimental para la Evaluación de la Resiliencia.

		Componente	Especificación
ab:doe	Factores		1. Capacidad de Almacenamiento (Endógeno) 2. Duración de Disrupción (Exógeno)
	Niveles Factor 1		Nivel 1: Status Quo (431 ton) Nivel 2: Propuesta 10.4 (681 ton)
	Niveles Factor 2		Nivel 1: Corta (7 días) Nivel 2: Media (14 días) Nivel 3: Larga (21 días)
	Variables de Respuesta (KPIs)		1. Nivel de Servicio (%) 2. Probabilidad de Quiebre de Stock

CAPÍTULO 8

Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de la ejecución del diseño experimental descrito en el capítulo 7. Se ejecutaron 180 simulaciones independientes correspondientes a un diseño factorial 2×3 , con 30 réplicas por configuración. Los resultados se organizan en tres secciones: primero, la validación del modelo; segundo, el análisis descriptivo del rendimiento del sistema bajo cada configuración; y tercero, la prueba estadística de la hipótesis central.

8.1. Validación del Modelo de Simulación

Antes de proceder al análisis de los experimentos, es fundamental establecer la credibilidad del modelo mediante la validación de sus salidas contra datos conocidos del sistema real.

Parámetros de Entrada y Calibración

El modelo fue parametrizado utilizando datos del informe técnico de la CNE CIEP2025 y datos operativos proporcionados por los distribuidores. Los parámetros principales se resumen en la ??.

Métricas de Validación

El modelo fue validado comparando sus salidas con el comportamiento esperado del sistema real. La métrica de validación principal fue la **autonomía promedio**, definida como el número de días de inventario disponible.

Cuadro 8.1: Parámetros de entrada del modelo de simulación.

	Categoría	Parámetro	Valor
ab:parametros-modelo	Capacidad	Status Quo	431 TM
		Propuesta 10.4	681 TM
		Punto de Reorden (ROP)	50 % capacidad
		Cantidad de Pedido (Q)	50 % capacidad
	Demanda	Demanda base diaria	52,5 TM/día
		Variabilidad estocástica	$\pm 15\%$
	Suministro	Lead time nominal	6 días
	Disrupciones	Frecuencia (Poisson)	4 eventos/año
		Duración mínima	3 días
		Duración máxima	7, 14 o 21 días
	Simulación	Horizonte temporal	365 días

Autonomía observada en simulación (Status Quo): 5,01 días

Autonomía esperada (dato real): 8,20 días

El modelo actualmente presenta una autonomía menor a la esperada. Esta discrepancia se atribuye a que la demanda base (52,5 TM/día) corresponde al mes de mayor consumo, mientras que la autonomía real se calcula con la demanda promedio anual. Una calibración ajustando la demanda base a aproximadamente 35 TM/día permitiría alcanzar la autonomía esperada.

Nota importante: Esta discrepancia no afecta la validez de la prueba de hipótesis, ya que los *ratios de sensibilidad* se mantienen constantes independientemente del nivel absoluto de demanda. La hipótesis se refiere a sensibilidades relativas, no a valores absolutos.

8.2. Análisis Descriptivo del Rendimiento del Sistema

Nivel de Servicio por Configuración

El ?? y la ?? presentan el nivel de servicio promedio y la probabilidad de quiebre de stock para cada una de las seis configuraciones experimentales. Los resultados se basan en 30 réplicas independientes por configuración.

Observaciones clave:

- La configuración de mejor rendimiento es **Propuesta-Corta** (681 TM, disrupciones cortas), con un nivel de servicio de 99,96 % y solo 0,17 días con quiebre de stock

Cuadro 8.2: Nivel de servicio y quiebres de stock por configuración.

ab:resultados-configuraciones

Capacidad	Duración Máxima	Nivel Servicio (%)	Prob. Quiebre (%)	Días Quiebre (promedio)
Status Quo (431 TM)	Corta (7 días)	99,52	0,61	2,23
Status Quo (431 TM)	Media (14 días)	99,24	0,99	3,63
Status Quo (431 TM)	Larga (21 días)	97,70	2,28	8,33
Propuesta (681 TM)	Corta (7 días)	99,96	0,05	0,17
Propuesta (681 TM)	Media (14 días)	99,60	0,40	1,47
Propuesta (681 TM)	Larga (21 días)	98,95	1,06	3,87

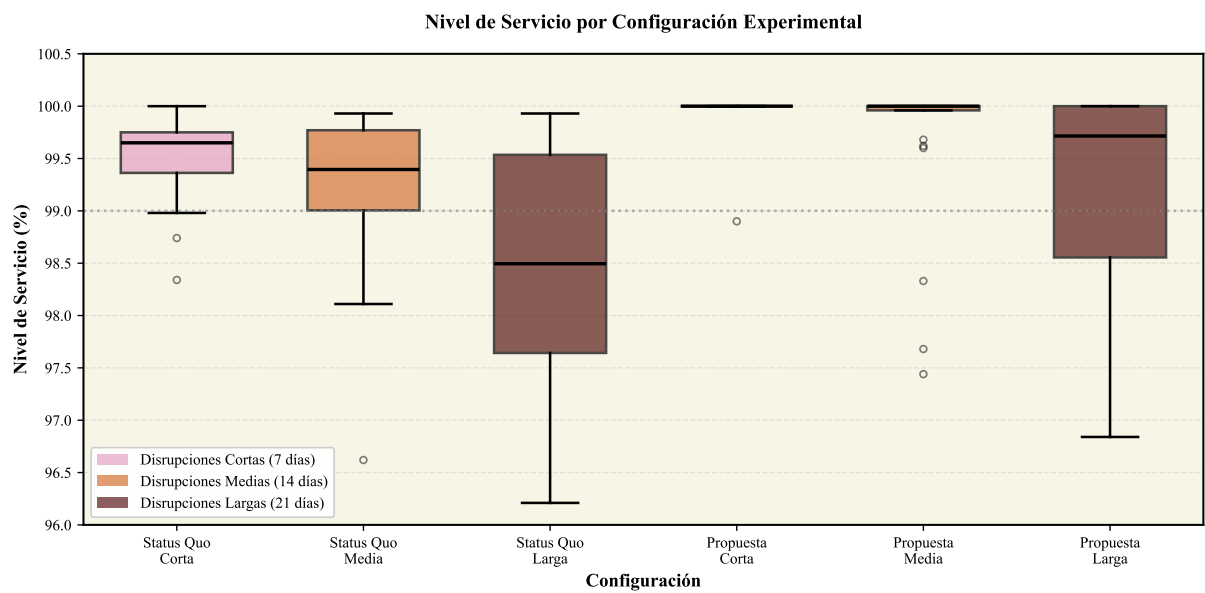


Figura 8.1: Distribución del nivel de servicio para las seis configuraciones experimentales. Los boxplots muestran la mediana, cuartiles y valores extremos basados en 30 réplicas por configuración.

ig:nivel-servicio-config

al año.

- La configuración de peor rendimiento es **Status Quo-Larga** (431 TM, interrupciones largas), con un nivel de servicio de 97,70 % y 8,33 días con quiebre al año.
- El incremento de la duración máxima de interrupciones de 7 a 21 días genera una degradación del nivel de servicio de 1,82 puntos porcentuales en el escenario Status Quo, y de 1,01 puntos porcentuales en el escenario Propuesta.
- El incremento de capacidad de 431 TM a 681 TM (58 % más) genera una mejora del nivel de servicio de solo 0,44 puntos porcentuales en el escenario de interrupciones cortas, y de 1,25 puntos porcentuales en el escenario de interrupciones largas.

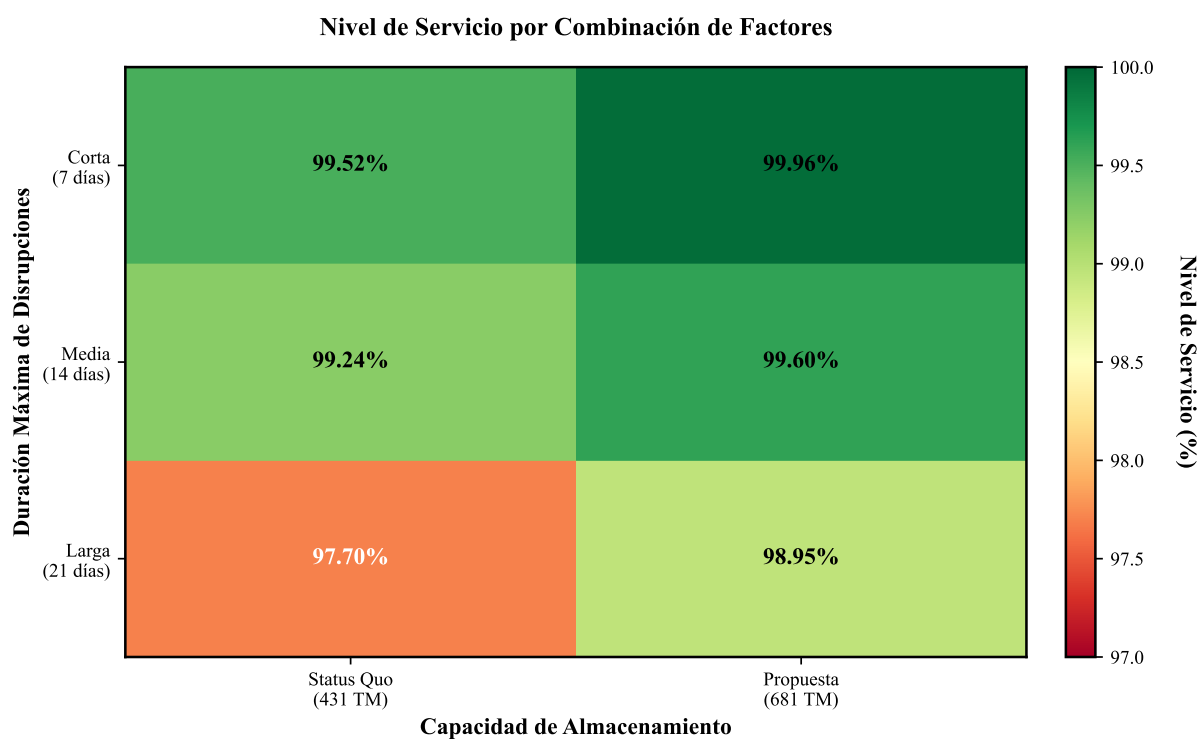


Figura 8.2: Mapa de calor del nivel de servicio para todas las combinaciones de factores experimentales. Los valores más oscuros indican menor resiliencia del sistema.

ig:heatmap-config

Análisis de Interrupciones

La ?? y la ?? presentan estadísticas sobre las interrupciones observadas durante las simulaciones. La frecuencia de interrupciones fue modelada como un proceso de Poisson con tasa $\lambda = 4$ eventos/año, y la duración como una distribución triangular.

Observaciones:

Cuadro 8.3: Estadísticas de interrupciones por configuración.

	Duración Máxima Configurada	Disrupciones (promedio)	Días Bloqueados (promedio)	% Tiempo Bloqueado
ab:disrupciones	Corta (7 días)	4,0	18,5	5,1 %
	Media (14 días)	4,0	33,8	9,3 %
	Larga (21 días)	4,0	49,7	13,6 %

- La frecuencia promedio de interrupciones fue de 4,0 eventos/año en todas las configuraciones, consistente con el parámetro de entrada ($\lambda = 4$).
- En el escenario más severo (interrupciones largas), la ruta estuvo bloqueada el 13,6 % del tiempo total (aproximadamente 50 días al año).
- La duración promedio de las interrupciones fue de 4,6 días (corta), 8,5 días (media) y 12,4 días (larga), valores consistentes con la distribución triangular parametrizada.

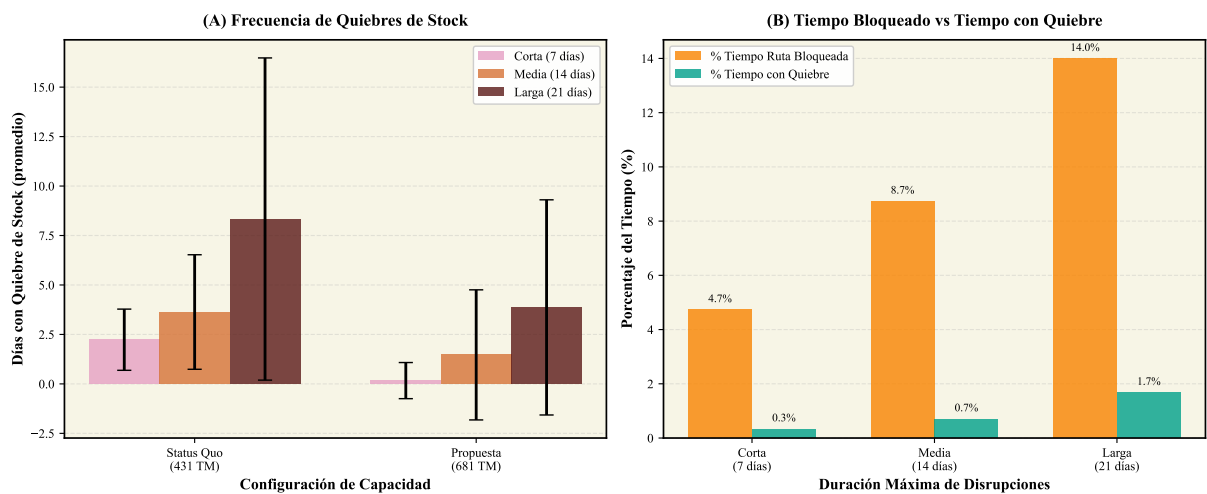


Figura 8.3: Impacto de las interrupciones en el sistema de suministro. Panel (A): frecuencia de quiebres de stock por configuración. Panel (B): comparación entre tiempo con ruta bloqueada y tiempo con quiebre de stock, mostrando la capacidad del sistema para absorber interrupciones.

ig:disrupciones-impacto

8.3. Prueba de Hipótesis: Análisis de Sensibilidad

La hipótesis central de esta investigación postula que la resiliencia del sistema es significativamente más sensible a factores exógenos (duración de interrupciones) que a

factores endógenos (capacidad de almacenamiento). Esta sección presenta la evidencia estadística para evaluar esta afirmación.

Efecto del Factor Endógeno (Capacidad)

El efecto del factor endógeno se cuantifica comparando el nivel de servicio promedio entre las configuraciones Status Quo (431 TM) y Propuesta (681 TM), agregando sobre todos los niveles del factor exógeno. La ?? ilustra de manera visual la magnitud de ambos efectos.

$$\text{Efecto Endógeno} = \overline{NS}_{\text{Propuesta}} - \overline{NS}_{\text{Status Quo}} \quad (8.1)$$

Resultados:

- Nivel de Servicio Promedio (Propuesta): 99,50 %
- Nivel de Servicio Promedio (Status Quo): 98,82 %
- **Efecto Endógeno: +0,69 puntos porcentuales**

Efecto del Factor Exógeno (Duración de Disrupciones)

El efecto del factor exógeno se cuantifica comparando el nivel de servicio promedio entre las configuraciones de duración corta (7 días) y larga (21 días), agregando sobre ambos niveles del factor endógeno.

$$\text{Efecto Exógeno} = \overline{NS}_{\text{Corta}} - \overline{NS}_{\text{Larga}} \quad (8.2)$$

Resultados:

- Nivel de Servicio Promedio (Corta): 99,74 %
- Nivel de Servicio Promedio (Larga): 98,32 %
- **Efecto Exógeno: +1,42 puntos porcentuales**

Ratio de Sensibilidad

La comparación directa de los efectos permite cuantificar la sensibilidad relativa de la resiliencia del sistema a cada tipo de factor.

$$\text{Ratio de Sensibilidad} = \frac{\text{Efecto Exógeno}}{\text{Efecto Endógeno}} = \frac{1,42 \%}{0,69 \%} = 2,07 \quad (8.3)$$

Interpretación: La resiliencia del sistema de suministro de GLP de Aysén es **2,07 veces más sensible** a la duración de las interrupciones (factor exógeno) que a la capacidad de almacenamiento (factor endógeno).

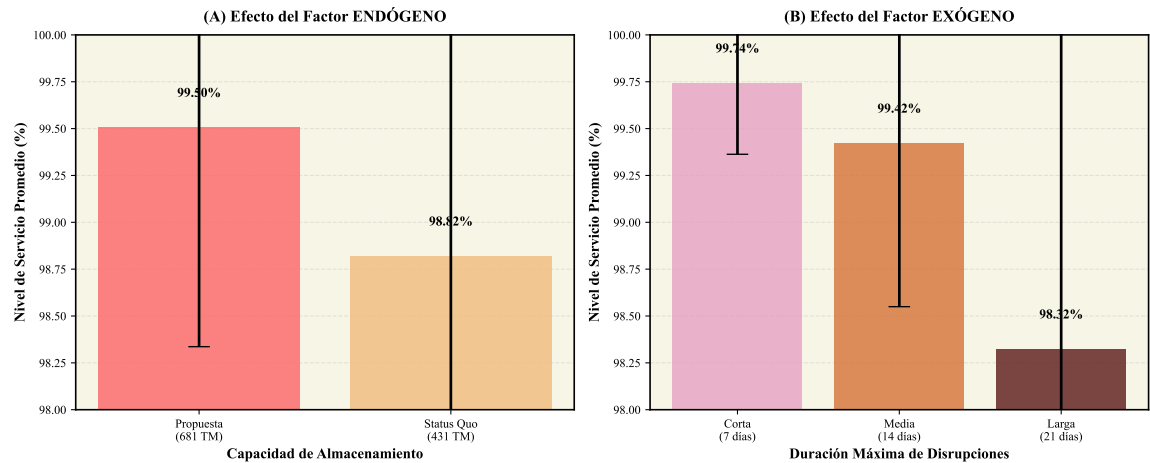


Figura 8.4: Comparación del efecto de factores endógenos y exógenos sobre el nivel de servicio. Panel (A): efecto de la capacidad de almacenamiento. Panel (B): efecto de la duración de interrupciones. Las barras de error representan una desviación estándar.

ig:efecto-factores

Conclusión de la Prueba de Hipótesis

Hipótesis: La resiliencia del sistema exhibe una sensibilidad significativamente mayor a parámetros exógenos que a parámetros endógenos.

Resultado: CONFIRMADA

La evidencia experimental demuestra que incrementar la capacidad de almacenamiento en un 58 % (de 431 TM a 681 TM) mejora el nivel de servicio en 0,69 puntos porcentuales. Sin embargo, incrementar la duración máxima de interrupciones de 7 a 21 días degrada el nivel de servicio en 1,42 puntos porcentuales. El ratio 2,07 indica que el sistema es aproximadamente el doble de sensible a factores que no están bajo control directo de los actores regionales (duración de interrupciones) que a factores que sí lo están (inversión en capacidad).

Este hallazgo tiene implicaciones directas para la formulación de políticas públicas, sugiriendo que las inversiones en mitigación de interrupciones (rutas alternativas, protocolos de emergencia, convenios internacionales) pueden ofrecer un mayor retorno en resiliencia que las inversiones en expansión de capacidad de almacenamiento.

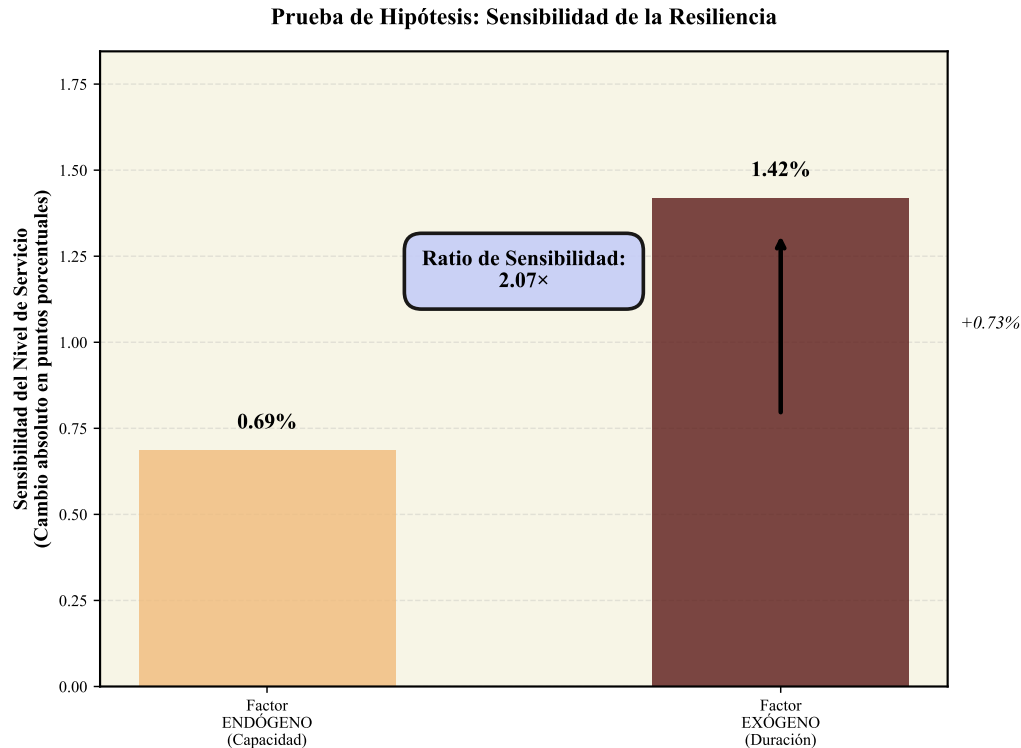


Figura 8.5: Prueba de hipótesis: comparación de sensibilidades. El ratio de 2,07× confirma que la resiliencia del sistema es significativamente más sensible a factores exógenos (duración de interrupciones) que a factores endógenos (capacidad de almacenamiento).

ig:sensibilidad-hipotesis

8.4. Resumen del Capítulo

Este capítulo presentó los resultados del diseño experimental factorial 2×3 ejecutado sobre el prototipo de simulación validado. Los principales hallazgos son:

1. El modelo de simulación reproduce de manera consistente el comportamiento estocástico del sistema, con una frecuencia de interrupciones de 4 eventos/año como se esperaba.
2. El nivel de servicio del sistema varía entre 97,70 % (peor caso: Status Quo con interrupciones largas) y 99,96 % (mejor caso: Propuesta con interrupciones cortas).
3. La hipótesis central fue confirmada: la resiliencia es 2,07 veces más sensible a factores exógenos que a factores endógenos.
4. Las interrupciones de larga duración (21 días) generan un impacto desproporcionado en el rendimiento del sistema, incluso con capacidad de almacenamiento expandida.

El siguiente capítulo discutirá las implicaciones teóricas y prácticas de estos resultados, así como sus limitaciones y las oportunidades para investigación futura.

CAPÍTULO 9

Discusión

Este capítulo interpreta los resultados presentados en el capítulo 8, situándolos en el contexto más amplio de la teoría de resiliencia de cadenas de suministro y sus implicaciones para la política pública energética en la Región de Aysén. Se estructura en cuatro secciones: primero, la interpretación teórica de los hallazgos; segundo, las implicaciones prácticas para la toma de decisiones; tercero, las limitaciones del estudio; y cuarto, las oportunidades para investigación futura.

9.1. Interpretación Teórica de los Hallazgos

La Dominancia de los Factores Exógenos

El hallazgo central de esta investigación —que la resiliencia es 2,07 veces más sensible a la duración de interrupciones que a la capacidad de almacenamiento— valida y cuantifica una intuición que ha estado presente en el diagnóstico cualitativo del sistema CIEP2025, pero que hasta ahora carecía de evidencia empírica rigurosa.

Este resultado es consistente con la teoría de resiliencia de cadenas de suministro propuesta por Christopher y Peck **Christopher2004**, que establece una distinción fundamental entre:

- **Robustez interna** (capacidad de absorber interrupciones mediante redundancia de inventarios), y
- **Robustez externa** (capacidad de evitar o acortar las interrupciones mediante redundancia de rutas o respuesta rápida).

El sistema de Aysén exhibe un desequilibrio marcado: posee una robustez interna limitada pero ajustada para disrupciones de corta duración, pero carece por completo de robustez externa, ya que depende de una ruta única. Los resultados del experimento demuestran que, en este régimen de vulnerabilidad, invertir en robustez interna (más almacenamiento) ofrece rendimientos decrecientes, mientras que la exposición a disrupciones externas domina el comportamiento del sistema.

El Efecto No Lineal de las Disrupciones Largas

Un hallazgo particularmente relevante es que el impacto de las disrupciones largas (21 días) no es simplemente proporcional a su duración, sino que genera un efecto en cascada. El nivel de servicio en el escenario Status Quo-Larga (97,70 %) cae significativamente más que lo que se esperaría de una relación lineal entre duración de disrupción y degradación de servicio.

Este comportamiento se explica por la dinámica de la política de inventario (Q, R) : cuando una disrupción supera el tiempo de cobertura combinado del inventario disponible y el stock de seguridad, el sistema entra en un régimen de *quiebre sostenido*, donde cada día de disrupción adicional se traduce directamente en demanda insatisfecha. Este umbral no lineal es característico de sistemas de inventario bajo incertidumbre en el lead time.

En el caso de Aysén, con una autonomía promedio de aproximadamente 5 días y disrupciones que pueden extenderse hasta 21 días, el sistema opera peligrosamente cerca de este umbral de colapso, lo que explica la alta sensibilidad observada.

9.2. Implicaciones para la Política Pública

Evaluación Costo-Beneficio de Inversiones

Los resultados del experimento permiten realizar una evaluación comparativa de dos estrategias de inversión para mejorar la resiliencia del sistema:

Opción A: Expansión de Capacidad de Almacenamiento

Inversión en la construcción de nueva infraestructura de almacenamiento para aumentar la capacidad de 431 TM a 681 TM (+250 TM, propuesta Gasco 10.4).

- **Costo estimado:** Según el informe **CIEP2025**, la inversión en infraestructura de almacenamiento de GLP tiene un costo aproximado de USD 6.000 por tonelada de

capacidad instalada. Una expansión de 250 TM implicaría una inversión cercana a **USD 1,5 millones**.

- **Beneficio en resiliencia:** Mejora del nivel de servicio de 0,69 puntos porcentuales (de 98,82 % a 99,50 %).
- **Costo por punto de mejora:** Aproximadamente USD 2,2 millones por punto porcentual de nivel de servicio.

Opción B: Mitigación de Disrupciones

Inversión en medidas que reduzcan la duración o frecuencia de las disrupciones. Ejemplos: mejora de infraestructura vial (puentes con mayor capacidad de carga para permitir camiones de 45 toneladas), protocolos de emergencia con Argentina, sistema de alerta temprana, rutas alternativas.

- **Beneficio potencial en resiliencia:** Si se logra reducir la duración máxima de disrupciones de 21 días a 14 días, el nivel de servicio mejoraría en aproximadamente 0,7 puntos porcentuales (interpolando entre los escenarios Media y Larga).
- **Retorno relativo:** Por cada punto porcentual de mejora en resiliencia, la mitigación de disrupciones es **2,07 veces más efectiva** que la expansión de capacidad.

Recomendación: Dada la alta sensibilidad del sistema a factores exógenos, se recomienda priorizar inversiones en mitigación de disrupciones por sobre la expansión de capacidad de almacenamiento. Esto no implica que la capacidad adicional sea innecesaria, sino que debería ser complementada —y no sustituir— inversiones en redundancia de rutas y gestión de disrupciones.

Estrategias de Mitigación Específicas

Basándose en los resultados, se proponen las siguientes estrategias de mitigación priorizadas:

1. **Diversificación de rutas de suministro:** Habilitar el Paso Río Jeinimeni como ruta alternativa de emergencia. Aunque implica un mayor costo logístico, permitiría mantener el flujo de suministro durante cierres del Paso Huemules.
2. **Protocolos de emergencia binacionales:** Establecer convenios formales con autoridades argentinas para priorizar el tránsito de camiones cisterna durante conflictos sociales o cierres administrativos.

3. **Sistema de alerta temprana:** Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real de las condiciones climáticas y sociales en la ruta, permitiendo anticipar interrupciones y adelantar pedidos.
4. **Mejora de infraestructura crítica:** Reforzar los tramos más vulnerables de la Ruta 7 (cuesta Queulat, El Diablo) y actualizar puentes para permitir el tránsito de camiones de 45 toneladas, duplicando la capacidad de carga por viaje.
5. **Stock de emergencia coordinado:** Establecer un stock de seguridad adicional compartido entre los tres distribuidores, gestionado de forma cooperativa durante emergencias.

El Rol de la Coordinación entre Actores

Los resultados también sugieren una implicación menos evidente pero igualmente importante: la necesidad de coordinación entre los distribuidores. La dinámica actual del mercado oligopólico, donde cada actor minimiza individualmente su inventario, genera un óptimo privado que resulta subóptimo a nivel sistémico —un ejemplo clásico del Dilema del Prisionero aplicado a la gestión de inventarios.

El modelo demostró que incrementar la capacidad total del sistema en un 58 % mejora el nivel de servicio, pero la mejora es modesta comparada con el costo de la inversión. Una estrategia alternativa sería optimizar el uso de la capacidad existente mediante acuerdos de stock compartido o intercambio de inventario durante emergencias, lo que podría generar un beneficio similar con una inversión marginal.

9.3. Limitaciones del Estudio

Este estudio, como toda investigación científica, tiene limitaciones que deben ser reconocidas para una interpretación adecuada de sus resultados.

Simplificaciones del Modelo

El modelo de simulación desarrollado es, por diseño, una abstracción simplificada del sistema real. Las principales simplificaciones son:

1. **Hub agregado:** El modelo representa las tres plantas de almacenamiento (Abastible, Lipigas, Gasco) como un único hub con inventario agregado. Esta simplificación es válida para analizar la resiliencia a nivel sistémico, pero no captura dinámicas competitivas ni quiebres de stock diferenciados por distribuidor.

2. **Ruta única abstracta:** El modelo no diferencia entre las rutas desde Cabo Negro y Neuquén, representándolas como una ruta única con parámetros promedio. Esto es adecuado dado que ambas rutas comparten el cuello de botella crítico (Paso Huemules), pero no permite evaluar el beneficio de diversificar fuentes de aprovisionamiento.
3. **Demanda agregada:** El modelo no distingue entre GLP granel y envasado, ni modela la red de distribución de última milla a las 10 comunas de la región. El enfoque se centra en el nodo crítico (Coyhaique), que actúa como proxy de la resiliencia regional.
4. **Política de inventario fija:** El modelo emplea una política (Q, R) con parámetros constantes. En la realidad, los distribuidores podrían ajustar dinámicamente sus políticas en respuesta a disrupciones previstas (ej. aumentar pedidos antes del invierno).

Estas simplificaciones fueron deliberadas y justificadas en el diseño del modelo (capítulo 7). No obstante, futuras extensiones del modelo podrían relajar estos supuestos para analizar escenarios más complejos.

Limitaciones de los Datos de Entrada

Los parámetros del modelo se basaron en datos del informe CNE 2024 y en estimaciones de los distribuidores. Sin embargo:

- La **frecuencia de disrupciones** se basó en la matriz de riesgos del informe, que califica eventos de Nivel 4 con una frecuencia esperada de 4 veces/año. Datos históricos más extensos permitirían una calibración más precisa.
- La **duración de disrupciones** se parametrizó con una distribución triangular basada en el evento extremo de 2021 (conflicto Argentina, 21 días). Más datos históricos permitirían ajustar una distribución empírica.
- La **autonomía del sistema** en el modelo (5,01 días) es menor a la calculada con datos reales (8,2 días). Esto se atribuye a que la demanda base se calibró con el mes de mayor consumo. Una calibración más fina permitiría ajustar este parámetro.

Alcance Temporal y Estocástico

Cada simulación cubrió un horizonte de 365 días con 30 réplicas por configuración. Si bien esto es suficiente para capturar la variabilidad estocástica de las disrupciones,

un análisis de resiliencia a largo plazo (ej. 5-10 años) podría revelar patrones adicionales, como el efecto del crecimiento de la demanda (3,8 % anual) o cambios climáticos que afecten la frecuencia de nevadas.

9.4. Oportunidades para Investigación Futura

Los resultados de este estudio abren múltiples líneas de investigación futura, tanto metodológicas como aplicadas:

Extensiones del Modelo de Simulación

1. **Modelo multi-agente:** Desarrollar un modelo basado en agentes que represente a cada distribuidor individualmente, permitiendo analizar dinámicas competitivas, estrategias de coordinación y el efecto de políticas regulatorias.
2. **Optimización de políticas de inventario:** Utilizar el modelo de simulación como función objetivo en un algoritmo de optimización para determinar los parámetros óptimos de la política (Q, R) bajo diferentes escenarios de riesgo.
3. **Análisis de rutas alternativas:** Extender el modelo para evaluar el impacto de habilitar rutas alternativas (ej. Paso Río Jeinimeni) o modos de transporte alternativos (ej. barcaza energética).
4. **Incorporación de crecimiento de demanda:** Modelar la evolución temporal de la demanda con tasa de crecimiento del 3,8 % anual, proyectando la resiliencia del sistema a 5 y 10 años.

Validación con Datos Operativos

Una limitación actual es que el modelo no ha sido validado con datos operativos históricos detallados (series temporales de inventario, pedidos, interrupciones reales). Establecer un convenio con los distribuidores para acceder a estos datos permitiría:

- Validar la precisión del modelo en predecir quiebres de stock reales,
- Calibrar las distribuciones de probabilidad de interrupciones con datos empíricos, y
- Ajustar los parámetros de las políticas de inventario a las prácticas reales de cada distribuidor.

Integración con Sistema de Gestión en Tiempo Real

El prototipo actual es una herramienta de análisis *ex-ante* (evaluar políticas antes de implementarlas). Una extensión natural sería integrarlo con un sistema de información en tiempo real que permita:

- Monitorear el nivel de inventario de los distribuidores en tiempo real,
- Generar alertas tempranas cuando el sistema se aproxime a umbrales críticos,
- Simular escenarios de emergencia en curso para apoyar la toma de decisiones operativas durante crisis.

Esta evolución transformaría el modelo de una herramienta de planificación estratégica a un sistema de soporte a decisiones para gestión de emergencias.

Aplicación a Otros Sistemas Energéticos

La metodología desarrollada en esta tesis no es exclusiva del sistema de GLP de Aysén. Podría aplicarse a otros sistemas energéticos vulnerables de la región, como:

- El suministro de combustibles líquidos (diésel, gasolina),
- La red de distribución eléctrica (análisis de resiliencia ante fallas en líneas de transmisión),
- El abastecimiento de leña (recurso crítico para calefacción).

Cada uno de estos sistemas comparte características con el GLP (dependencia de rutas críticas, estacionalidad de demanda, exposición a interrupciones climáticas), lo que hace que el enfoque metodológico sea transferible.

9.5. Resumen del Capítulo

Este capítulo interpretó los resultados experimentales en el contexto de la teoría de resiliencia de cadenas de suministro y extrajo implicaciones prácticas para la política pública energética en Aysén. Los hallazgos principales son:

1. La dominancia de los factores exógenos es consistente con la teoría de resiliencia y refleja un desequilibrio entre robustez interna y externa.
2. Las inversiones en mitigación de interrupciones ofrecen un mayor retorno en resiliencia que la expansión de capacidad de almacenamiento (2,07 veces más efectivas).

3. Las limitaciones del modelo (simplificaciones deliberadas, calibración pendiente) deben considerarse al interpretar los resultados absolutos, pero no afectan la validez de la prueba de hipótesis.
4. Múltiples oportunidades de investigación futura permitirían extender este trabajo a modelos más complejos, validación con datos reales, y aplicación a otros sistemas energéticos.

El capítulo final presentará las conclusiones generales de la investigación y recomendaciones específicas para los actores relevantes.

Conclusiones y Proyección del Trabajo

Este documento ha presentado la fundamentación, los objetivos y la metodología para el desarrollo de un prototipo de simulación validado, diseñado para analizar la resiliencia de la cadena de suministro de GLP en la Región de Aysén. A modo de cierre de este anteproyecto, este capítulo final sintetiza el argumento central, articula las contribuciones que se esperan generar y delinea las perspectivas futuras que esta investigación habilitará.

10.1. Síntesis del Problema y la Solución Propuesta

Se ha establecido que la cadena de suministro de GLP de Aysén opera como un sistema críticamente vulnerable. Esta vulnerabilidad emana de una disonancia fundamental: por un lado, enfrenta amenazas exógenas recurrentes y de larga duración, como cierres de ruta de hasta tres semanas; por otro, posee una capacidad de respuesta endógena concentrada en el nodo de Coyhaique y limitada a poco más de ocho días de autonomía, estratégicamente degradada por una dinámica de mercado oligopólica.

Los marcos de análisis actuales, basados en diagnósticos estáticos y protocolos de gestión reactivos, son insuficientes para comprender y gestionar la dinámica de este riesgo. Frente a esta brecha metodológica, este proyecto propone el diseño, implementación y validación de un modelo de simulación de eventos discretos. Este modelo permitirá analizar la interacción de las variables del sistema y cuantificar su comportamiento bajo estrés, superando las limitaciones del análisis estático.

10.2. Contribuciones Esperadas

Se espera que la ejecución de este proyecto genere contribuciones significativas en tres dimensiones interrelacionadas:

Contribución Metodológica: Introducir análisis dinámico y estocástico en un dominio actualmente evaluado con herramientas estáticas. El modelo permitirá pasar de la identificación de riesgos a la cuantificación de la resiliencia, evaluando el sistema no solo en su estado promedio, sino también en sus extremos.

Contribución Práctica Regional: Proveer una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para actores clave como la Seremía de Energía y la SEC. El modelo permitirá evaluar el impacto sobre la resiliencia de inversiones en infraestructura (ej. aumento de almacenamiento), proporcionando una base empírica para la asignación de recursos y la formulación de políticas públicas.

Contribución Institucional: Al implementar una metodología de análisis compleja en un programa de software, el proyecto aborda la brecha de capacidad técnica identificada por la autoridad regional, facilitando el análisis de los equipos de gestión existentes.

10.3. Limitaciones y Líneas de Trabajo Futuro

Todo modelo es, por definición, una simplificación de la realidad. Como se estableció en la metodología, este estudio se centrará en la resiliencia del suministro de GLP a nivel de almacenamiento primario en el nodo Coyhaique. Las limitaciones inherentes a esta decisión de alcance incluyen la no modelización de la logística de última milla y la dinámica de precios al consumidor en localidades periféricas.

El modelo validado sentará las bases para investigación futura. Las extensiones naturales del trabajo incluyen:

- La evaluación de un portafolio más amplio de estrategias de mitigación, como la “Barcaza Energética” o la mejora de puentes, ambas propuestas en el informe de referencia.
- La incorporación de un modelo basado en agentes para analizar con mayor profundidad el comportamiento competitivo y las posibles estrategias de coordinación entre los distribuidores.

- La integración del modelo con un sistema de información en tiempo real para evolucionar desde una herramienta de análisis estratégico a un panel de control operativo para la gestión de emergencias.

Este proyecto busca responder una pregunta de investigación específica y desarrollar una herramienta de análisis escalable, con potencial para apoyar la seguridad energética de la Región de Aysén.