



**Universidad
de los Andes**

Facultad de Ingeniería
y Ciencias Aplicadas

SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS PARA LA
EVALUACIÓN DE POLÍTICAS FÍSICAS Y OPERATIVAS DE
GESTIÓN DEL FLUJO TERRESTRE DE CONTENEDORES EN
EL PUERTO DE ARICA.

ANDRÉS FELIPE LILLO CABRERA

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PROFESOR GUÍA: ROSA G. GONZÁLEZ RAMÍREZ
PROFESOR CO-GUÍA: LUIS M. ASCENCIO CARREÑO

SANTIAGO, JULIO DE 2026

Dedicatoria

«Las personas mayores nunca comprenden nada por sí solas, y es agotador para los niños tener que darles una y otra vez explicaciones.»

Antoine de Saint-Exupéry, *El Principito*

A quienes me recuerdan volver a mirar el mundo con ojos abiertos, más curiosos y menos entrenados: porque no es lo que ignoramos lo que más nos confunde, sino aquello que damos por sabido y resulta no ser así; y porque lo verdaderamente importante casi nunca es lo más complejo, sino lo más simple que, de tanto creerlo conocido, habíamos dejado de ver.

Resumen

El Puerto de Arica es la principal salida al océano Pacífico del comercio de tránsito boliviano y el puerto más septentrional de Chile. Ese rol genera un flujo intenso de camiones que, en la operación actual, esperan mayoritariamente dentro del radio urbano: la ciudad opera, en la práctica, como patio de espera del puerto. Esto produce externalidades sobre su entorno, marcadas por la congestión urbana persistente, los viajes de retorno en vacío y las emisiones de CO₂ asociadas. Si bien la literatura ha estudiado por separado los antepuertos reguladores y la consolidación de viajes mediante doble operación (*backhauling*), existe una brecha en evaluar de forma conjunta, sobre un mismo sistema y con datos reales, su efecto sobre la congestión y sobre las emisiones.

El objetivo de esta tesis es evaluar, mediante simulación de eventos discretos, dos políticas para ese sistema. La primera es el uso obligatorio del antepuerto ZEAP como regulador del flujo: los camiones esperan dentro del recinto y no en la ciudad. La segunda es la doble operación de la exportación boliviana: el camión retira su contenedor de importación en la misma visita al terminal, en lugar de salir a esperarlo a un estacionamiento urbano, y elimina así el desplazamiento en vacío y sus emisiones. Para evaluarlas se construyeron cuatro modelos organizados como un diseño factorial de dos por dos: BASE (operación actual), ZEAP (antepuerto regulador), DOBLECITA (doble operación) y COMBINADO (ambas políticas).

La metodología incluyó la calibración y validación de los modelos con la demanda observada el año 2022 y la comparación de las configuraciones mediante intervalos de confianza pareados sobre el mismo conjunto de semillas. El nivel crítico de adopción de la doble operación se determinó mediante un procedimiento de búsqueda del punto de quiebre, definido como la fracción mínima de camiones que adopta la conducta para lograr una reducción significativa de la congestión. La reducción de kilómetros en vacío se tradujo en emisiones de CO₂ evitadas, estimadas con factores de emisión publicados dependientes del estado de carga del vehículo.

Los resultados muestran que el antepuerto regulador reduce la cantidad promedio de camiones en el radio urbano en torno a un 82 % respecto de la operación actual (de unos 400 a 71 camiones), operando sin saturación. La doble operación, por sí sola, requiere una adopción cercana al 28 % de los camiones de exportación boliviana para descongestionar la ciudad de forma significativa; sin embargo, al combinarse con el antepuerto, ese nivel crítico baja a un 20 %, lo que evidencia una interacción favorable entre ambas políticas: el antepuerto reduce el nivel de adopción que la doble operación necesita para producir un efecto significativo, de modo que resultan complementarias y no sustitutas. En el plano ambiental, la doble operación elimina cientos de desplazamientos urbanos

en vacío por horizonte de medición y, con ellos, del orden de 4,55 toneladas de CO₂ en el modelo DOBLECITA y de 3,27 toneladas en el modelo COMBINADO.

Finalmente, este estudio construye y valida una herramienta de simulación que cuantifica el efecto individual y conjunto de ambas políticas sobre la congestión y sobre las emisiones, y recomienda implementar el antepuerto regulador junto con incentivos a la doble operación. Los resultados aportan evidencia útil para una gestión del corredor a la vez más descongestionada y más sostenible, y sientan las bases para futuras investigaciones.

Abstract

The Port of Arica is the main Pacific gateway for Bolivian transit trade and the northernmost port in Chile. That role generates an intense truck flow that, under the current operation, waits mostly within the city: in practice, the city serves as the port's waiting yard. This produces externalities on its surroundings, marked by persistent urban congestion, empty return trips and their associated CO₂ emissions. Although the literature has studied regulating dry-ports and trip consolidation through double operation (*backhauling*) separately, there is a gap in jointly evaluating, on a single system and with real data, their effect on congestion and on emissions.

The objective of this thesis is to evaluate, through discrete-event simulation, two policies for this system. The first is the mandatory use of the ZEAP dry-port as a flow regulator: trucks wait inside the facility instead of in the city. The second is the double operation of Bolivian exports: the truck picks up its import container in the same terminal visit, instead of leaving to wait at an urban parking lot, thus eliminating the empty trip and its emissions. To evaluate them, four models were built as a two-by-two factorial design: BASE (current operation), ZEAP (regulating dry-port), DOBLECITA (double operation) and COMBINADO (both policies).

The methodology included the calibration and validation of the models with the demand observed in 2022 and the comparison of the configurations using paired confidence intervals over a common set of seeds. The critical adoption level of the double operation was determined through a breakpoint search procedure, defined as the minimum fraction of trucks adopting the behavior to achieve a significant reduction in congestion. The reduction of empty kilometers was translated into avoided CO₂ emissions, estimated with published load-dependent emission factors.

The results show that the regulating dry-port reduces the average number of trucks within the city by around 82 % relative to the current operation (from about 400 to 71 trucks), running without saturation. The double operation, on its own, requires an adoption of about 28 % of the Bolivian export trucks to significantly decongest the city; however, when combined with the dry-port, that critical level drops to about 20 %, revealing a favorable interaction between both policies: the dry-port lowers the adoption level the double operation requires to produce a significant effect, making them complementary rather than substitutes. Environmentally, the double operation eliminates hundreds of empty urban movements per measurement horizon and, with them, on the order of 4.55 tonnes of CO₂ in the DOBLECITA model and 3.27 tonnes in the COMBINADO model.

Finally, this study builds and validates a simulation tool that quantifies the individual

and joint effect of both policies on congestion and on emissions, and recommends implementing the regulating dry-port together with incentives for the double operation. The results provide useful evidence for a corridor management that is at once less congested and more sustainable, and lay the groundwork for future research.

Agradecimientos

Agradezco el apoyo del proyecto Fondecyt N° 1250854, que hizo posible el desarrollo de esta investigación. A mis profesores guía, Rosa G. González Ramírez y Luis M. Ascencio Carreño, les expreso mi sincero agradecimiento por su orientación, dedicación y confianza a lo largo de todo el proceso; sus consejos fueron fundamentales tanto para la realización de este trabajo como para mi formación académica y profesional.

Agradezco también al profesor Karol Suchan y a Enzzo Ayala por su apoyo en el procesamiento de los datos, en particular mediante la «máquina del tiempo» que desarrollaron para reconstruir la información histórica utilizada en este estudio.

Agradezco de manera especial al profesor Marcel Favereau, cuyo apoyo fue fundamental en la validación del modelo, y a quien debo además la paciencia y la generosidad con que me explicó los aspectos propios de su especialidad.

A Terminal Puerto Arica (TPA) y a la Empresa Portuaria Arica (EPA) les agradezco haber facilitado los datos operacionales sin los cuales no habría sido posible calibrar y validar el modelo de simulación que sustenta esta tesis.

Quiero dedicar un agradecimiento muy especial a los operarios del Puerto de Arica y, en particular, a Luis Barraza. Durante mi visita a Arica me abrió las puertas del terminal y, más allá de cualquier dato, me regaló su tiempo y su memoria, con un cariño y un detalle que ninguna base de datos podría capturar. Me contó la historia del terminal, pero también mucho más: me habló de la historia de Chile, de cómo es la vida en el norte, de los desafíos que han enfrentado las personas de esta zona y, sobre todo, de la resiliencia con que han salido adelante una y otra vez. Esas conversaciones me dejaron una lección que trasciende este trabajo: que para entender un sistema hay que entender primero de dónde viene su gente, que cada problema tiene una historia humana detrás y que nada de eso puede, ni debe, reducirse a un número o a la salida de un código. Gracias a Luis comprendí que detrás de cada cifra de esta tesis hay personas, y esa mirada le dio sentido, contexto y alma a todo el trabajo. Es algo que llevaré conmigo mucho más allá de esta tesis.

Finalmente, agradezco de manera muy especial a mi familia y a quienes me acompañaron durante el programa de Magíster, por su apoyo constante y su aliento en cada etapa de este proceso.

Índice general

Dedicatoria	III
Resumen	IV
Abstract	VI
Agradecimientos	VIII
1. Introducción	1
1.1. Contexto y Motivación	3
1.2. Descripción del Problema	5
1.3. Preguntas de Investigación	6
1.4. Hipótesis	7
1.5. Objetivos	9
1.5.1. Objetivo General	9
1.5.2. Objetivos Específicos	10
1.6. Alcances y Limitaciones	11
1.7. Estructura del Informe	14
2. Revisión Bibliográfica	15
2.1. Introducción a la Revisión Bibliográfica	15
2.2. Contexto logístico-portuario del caso de estudio: Puerto de Arica	16
2.2.1. El Puerto de Arica: gestión público-privada y rol en el Corredor Bioceánico	16
2.2.2. El régimen boliviano de libre tránsito y el sistema terrestre Arica- Bolivia	19
2.2.3. Estructura nodal del sistema logístico terrestre-portuario	21
2.3. Fundamentos conceptuales de la logística portuaria y terrestre	23
2.3.1. Flujos de importación y exportación en terminales de contenedores	23
2.3.2. Antepuertos, patios extraportuarios y nodos de apoyo terrestre .	23
2.3.3. Viajes en vacío, doble operación y emisiones en el transporte te- rrestre de contenedores	25

2.4.	Simulación de eventos discretos en sistemas logísticos portuarios	27
2.4.1.	Fundamentos de la simulación de eventos discretos	27
2.4.2.	Indicadores de desempeño en simulación portuaria	28
2.4.3.	Análisis estadístico del input en modelos de simulación	29
2.4.4.	Simulación como herramienta de evaluación de políticas operativas	30
2.5.	Estado del arte en simulación portuaria y logística terrestre	30
2.5.1.	Aplicaciones de SED en terminales portuarios	30
2.5.2.	Simulación de <i>gates</i> , patios y congestión terrestre	31
2.5.3.	Literatura sobre backhauling, antepuertos y buffers logísticos . .	32
2.5.4.	Síntesis comparativa de la literatura	33
2.6.	Brecha investigativa y aporte de la tesis	36
2.6.1.	Limitaciones de la literatura existente	36
2.6.2.	Brecha específica para el caso Arica-Bolivia	36
2.6.3.	Contribución de esta investigación	37
3.	Metodología	39
3.1.	Análisis de datos y parámetros de entrada	40
3.1.1.	Fuentes de datos y depuración	40
3.1.2.	Demanda inducida por naves como motor del modelo	41
3.1.3.	Distribución del tiempo entre llegadas de naves	42
3.1.4.	Modelación temporal de la demanda inducida	43
3.1.5.	Generación computacional del calendario de naves	44
3.1.6.	Reproducibilidad y réplicas independientes	46
3.1.7.	Recalibración de interarribos y distribución de cargas con datos Antares 2022	47
3.1.8.	Clasificación de variables de entrada	51
3.2.	Modelación conceptual del sistema	51
3.2.1.	Entidades, flujos, nodos y recursos	51
3.3.	Construcción del modelo de la operación actual	53
3.4.	Calibración del modelo	54
3.4.1.	Justificación de distribuciones por nodo principal	56
3.5.	Verificación del modelo	57
3.6.	Validación contra la operación real	58
3.6.1.	Nivel 1: validación de la demanda agregada total	59
3.6.2.	Nivel 2: validación por línea logística mediante intervalos de Welch	61
3.6.3.	Nivel 3: validación del <i>dwell time</i> en el ZEAP (camión)	63

3.6.4.	Alcance de la validación	64
3.7.	Parámetros de ejecución comunes a los modelos	64
3.7.1.	Determinación del warm-up	65
3.7.2.	Determinación del número de réplicas	67
3.7.3.	Calendario de demanda	68
3.8.	Escenarios de simulación y evaluación de políticas	69
3.8.1.	Los cuatro modelos de simulación	70
3.8.2.	Mecanismo de doble operación (DOBLECITA) y nivel de adopción	71
3.8.3.	Métricas de desempeño	72
3.8.4.	Comparación estadística y nivel crítico de adopción	74
3.9.	Supuestos y limitaciones del modelo	76
3.10.	Síntesis metodológica	79
4.	Resultados	81
4.1.	Modelo BASE: línea base y validación	82
4.1.1.	Caracterización del sistema actual	83
4.1.2.	Dinámica de flujos y cuellos de botella	83
4.1.3.	Línea base de los indicadores del estudio	84
4.2.	Modelo ZEAP: el antepuerto regulador	86
4.2.1.	Efecto sobre la congestión urbana	87
4.2.2.	Dimensionamiento y utilización del antepuerto	88
4.3.	Modelo DOBLECITA	92
4.3.1.	Búsqueda direccional del nivel de adopción	93
4.3.2.	Desplazamientos urbanos en vacío evitados	95
4.3.3.	Kilómetros y emisiones de CO2 evitados	98
4.4.	Modelo COMBINADO	99
4.4.1.	Búsqueda direccional del nivel de adopción	99
4.4.2.	Desplazamientos urbanos en vacío evitados	102
4.4.3.	Kilómetros y emisiones de CO2 evitados	102
4.4.4.	Término de interacción a nivel común de adopción	103
4.4.5.	Sensibilidad del nivel crítico al umbral de relevancia	105
4.5.	Síntesis comparativa	105
5.	Conclusiones	107
5.1.	Cumplimiento de los objetivos	107
5.2.	Contraste de las hipótesis	108
5.3.	Aportes teóricos	110

5.4. Implicancias prácticas	111
5.5. Investigación futura	112
Nomenclatura	114
Anexos	125
A. Caracterización empírica de los interarribos por nodo	125
B. Propuesta física del antepuerto ZEAP	127

Índice de figuras

2.1.	Vista satelital del Terminal Puerto Arica, emplazado en el borde costero de la ciudad. Fuente: imagen satelital, Google Earth.	17
2.2.	Modelo de gestión público-privada del Puerto de Arica. La Empresa Portuaria Arica (EPA), autoridad portuaria estatal, posee y regula la infraestructura portuaria y administra la ZEAP; Terminal Puerto Arica (TPA), concesionario privado, opera la transferencia de carga y la programación de camiones bajo concesión.	18
2.3.	El Corredor Bioceánico Central y el rol del Puerto de Arica como nodo terminal en el Pacífico. La carga de tránsito boliviano cruza la frontera por el paso Chungará-Tambo Quemado y accede al puerto a través del sistema terrestre estudiado en esta tesis. El corredor es más extenso que lo representado; el esquema muestra solo los nodos y tramos relevantes para este estudio.	19
2.4.	Ejes territoriales del sistema terrestre Arica-Bolivia. Arriba: ruta de acceso entre el Terminal Puerto Arica (Acceso Norte) y la ZEAP, en el Valle de Lluta al norte de la ciudad. Abajo: ruta carretera entre el Puerto de Arica y el paso fronterizo Chungará-Tambo Quemado, de aproximadamente 203 km. Fuente: elaboración propia sobre imágenes de Google Earth y Google Maps.	20
2.5.	Los siete nodos funcionales del sistema logístico terrestre-portuario de Arica y el flujo entre ellos.	21
2.6.	Vista aérea de patios y depósitos extraportuarios de contenedores en el área urbana de Arica, donde se acumulan contenedores y camiones a la espera de operación. Fuente: Empresa Portuaria Arica (EPA).	22

2.7.	Mecanismo de la doble operación. Sin doble operación, el camión de exportación, tras dejar su carga, sale del terminal a esperar su contenedor de importación en un estacionamiento de la ciudad y vuelve a entrar a retirarlo, un trayecto urbano en vacío puerto-ciudad-puerto. Con doble operación, el mismo camión espera dentro del recinto (PORT PARKING) y retira la importación en la misma visita, eliminando ese desplazamiento urbano en vacío. El viaje de larga distancia Bolivia-Puerto se realiza con carga en ambos casos.	26
3.1.	Cadena de generación de la demanda inducida por naves: cada recalada se clasifica por intensidad, recibe un vector empírico de carga por flujo y activa camiones en ventanas temporales referidas a la ETA/ETD, induciendo finalmente las llegadas a los nodos del sistema.	41
3.2.	Diagnóstico del proceso de llegada de naves en 2022 (n=189 recaladas). Panel izquierdo: histograma de interarribos entre recaladas frente al ajuste Exponencial de media 1,93 d (= 46,34 h); el test KS rechaza la Exponencial ($D = 0,24$, $p < 0,001$), en parte por la resolución diaria del dato. Panel derecho: distribución del número de recaladas por semana frente a Poisson; el test chi-cuadrado semanal rechaza HPP ($\chi^2 = 33,9$, gl= 5, $p < 0,001$), pero con <i>subdispersión</i> (varianza semanal menor que la media): las recaladas son más regulares que las de un proceso de Poisson. El modelo adopta HPP con escala 46,34 horas como aproximación de primer orden, documentando esta limitación.	49
3.3.	Representación simplificada de los principales nodos del sistema logístico modelado y sus flujos.	52
3.4.	Serie reconstruida en Python de toneladas transferidas en el Puerto de Arica entre 2005 y 2024. La serie se utiliza para estimar la tendencia reciente 2022–2024 y proyectar una referencia agregada para 2025. Fuente: elaboración propia a partir de la figura institucional proporcionada por Terminal Puerto Arica (TPA) para esta tesis.	59
3.5.	Comparación gráfica de medias mensuales simuladas (con IC 95 % de Welch) versus observadas (con IC 95 % sobre 12 meses 2022) por línea logística. Las barras de error verdes corresponden a la simulación ($n = 50$) y las barras de error azules a la realidad ($m = 12$). En todos los flujos los intervalos se solapan, confirmando que no se rechaza $H_0 : \mu_{\text{sim}} = \mu_{\text{real}}$ a nivel 0,05.	62
3.6.	Determinación del warm-up por el método gráfico de Welch	66

3.7.	Calendario ejemplar de recaladas de la demanda calibrada (2022). El panel superior muestra la ubicación temporal de las ETA; el panel inferior resume la acumulación de arribos. Las zonas sombreadas en gris corresponden al <i>warm-up</i> (días 0-20) y al <i>cool-down</i> (días 48-68); la franja central sin sombrear es el horizonte de análisis (días 20-48). Las líneas punteadas marcan el inicio y el fin del horizonte de análisis y el fin de las llegadas (día 68), a partir del cual la franja en rojo claro representa el vaciado sin nuevas recaladas.	68
3.8.	Los cuatro modelos de simulación como un diseño 2×2 : el eje horizontal representa el uso obligatorio del antepuerto ZEAP como regulador del flujo de camiones y el eje vertical la adopción de la doble operación (DOBLECITA). BASE es la línea base; COMBINADO reúne ambas políticas.	71
3.9.	Procedimiento direccional (<i>coarse-to-fine</i>) de búsqueda del nivel crítico de adopción (<i>breakpoint</i>). A partir de la referencia $BH = 0\%$ ($n = 50$) se fija el umbral $T = -10\% \times ARICA(BH = 0\%)$. Cada nivel se tamiza primero con un piloto de 5 réplicas sobre la grilla gruesa; el tramo del candidato se refina con pasos de 1 pp, también con piloto, y el nivel que cruza el umbral se confirma con 50 réplicas evaluando $IC_{95}^{alto} < T$, y un chequeo de minimalidad re-evalúa con las mismas 50 réplicas el nivel inmediatamente inferior, verificando que no cumple: ambos bordes del <i>breakpoint</i> quedan así medidos con la muestra completa y no solo con el piloto. El <i>breakpoint</i> BH^* es el primer nivel que satisface el criterio. DOBLECITA recorre la grilla de adopción en sentido descendente y COMBINADO en sentido ascendente.	76
4.1.	Camiones en ARICA día a día en el modelo BASE (operación actual): promedio entre réplicas con su banda inter-réplica. El sistema sostiene de forma permanente del orden de 400 camiones en el radio urbano.	83
4.2.	Modelo BASE: camiones totales en el sistema a lo largo del horizonte (media inter-réplica y banda $\pm$ una desviación estándar). En la ventana de análisis el sistema sostiene del orden de 845 camiones.	85
4.3.	Modelo BASE: ocupación del antepuerto ZEAP a lo largo del horizonte (media inter-réplica). El recinto se usa de forma marginal (~ 106 calzos, 16 % de su capacidad actual), reflejando que la espera ocurre en la ciudad y no en el antepuerto.	86

4.4.	Modelo BASE: distribución de los viajes urbanos en vacío de camiones EXPO_BO por réplica (ventana de 28 días). La media es de 1.265 viajes (16,45 t de CO ₂); es el referente sobre el cual la doble operación mide los desplazamientos evitados (H4).	86
4.5.	Comparación pareada BASE vs. ZEAP: cada línea es una réplica; todas caen de ciudad llena a ciudad regulada. La línea roja es el promedio (399,7 → 70,9, -82,3 %).	87
4.6.	Distribución de los camiones en ARICA entre réplicas, BASE frente a ZEAP. El antepuerto desplaza por completo la distribución hacia valores bajos, sin solapamiento entre ambas configuraciones.	88
4.7.	Ocupación media diaria del antepuerto ZEAP_PARKING con intervalo de confianza al 95 % entre las 30 réplicas, comparando el modelo BASE (verde) y el modelo ZEAP (azul) sobre el mismo eje. En BASE el antepuerto se usa de forma marginal (~ 100 calzos); como regulador obligatorio absorbe el flujo y se estabiliza en torno a ~ 630 calzos, sin acercarse a la capacidad $C^* = 1,500$. Las zonas sombreadas corresponden al <i>warm-up</i> y al <i>cool-down</i>	89
4.8.	Utilización del antepuerto: en la operación actual (BASE) el recinto se usa de forma marginal, mientras que como regulador obligatorio (ZEAP) absorbe el flujo (ocupación máxima media por réplica del 57,3 %, sin saturación) dentro de la capacidad de $C^* = 1,500$ calzos.	92
4.9.	Reducción pareada de camiones en ARICA por nivel de adopción en DOBLECITA, con su intervalo de confianza pareado al 95 % (semillas comunes). Los niveles de tamizaje se midieron con el piloto de $n = 5$ réplicas y los niveles en torno al <i>breakpoint</i> con $n = 50$, lo que explica la distinta amplitud de los intervalos. El <i>breakpoint</i> (BH= 28 %) es el primer nivel en que el extremo superior del intervalo queda por debajo del umbral del -10 % (-40,0 camiones); en los niveles previos la media ya cruza el umbral pero el intervalo no.	94
4.10.	Comparación pareada de los camiones en ARICA sin doble operación (BH= 0 %) y al nivel crítico (BH= 28 %) en DOBLECITA, sobre las mismas semillas.	95
4.11.	Desplazamientos urbanos en vacío evitados por la doble operación en el modelo DOBLECITA. Cada doble operación equivale a una importación retirada en la misma visita al terminal, es decir, a un trayecto puerto-ciudad-puerto en vacío suprimido.	97

4.12. <i>Dwell time</i> del contenedor de importación boliviana (IMPO_BO) sin doble operación (BH= 0 %) y al nivel crítico (BH= 28 %) en DOBLECITA, estimado por la ley de Little. La doble operación adelanta el retiro y reduce el <i>dwell time</i> de importación de 9,2 a 8,3 días (−9,8 %).	97
4.13. <i>Dwell time</i> del contenedor de exportación boliviana (EXPO_BO) sin doble operación y al nivel crítico en DOBLECITA. A diferencia de la importación, el <i>dwell time</i> de exportación se mantiene ($\approx 4,0$ días): la doble operación actúa sobre el retiro de la importación de retorno, no sobre la exportación.	98
4.14. Reducción pareada de camiones en ARICA por nivel de adopción en COMBINADO, con su intervalo de confianza pareado al 95 %. Los niveles de tamizaje se midieron con el piloto de $n = 5$ réplicas y los niveles en torno al <i>breakpoint</i> con $n = 50$, lo que explica la distinta amplitud de los intervalos. El <i>breakpoint</i> significativo se alcanza en BH= 20 % (primer nivel con el extremo superior del intervalo bajo el umbral del −10 %), frente al 28 % del modelo sin antepuerto (Figura 4.9).	101
4.15. Comparación pareada de los camiones en ARICA sin doble operación (BH= 0 %) y al nivel crítico (BH= 20 %) en COMBINADO, sobre las mismas semillas.	101
4.16. Kilómetros en vacío y emisiones de CO ₂ evitados por la doble operación, al nivel crítico de adopción de cada modelo (DOBLECITA BH= 28 % y COMBINADO BH= 20 %). El ahorro es proporcional al número de dobles operaciones completadas.	103
A.1. Histogramas de interarribos observados en <i>ZEAP_GATE_IN</i> , <i>ZEAP_GATE_OUT</i> , <i>GATE_IN_NORTE</i> y <i>GATE_OUT_NORTE</i> durante 2022 (bdAntares). La fuerte concentración en valores bajos y las colas derechas extensas muestran que las llegadas a los nodos son altamente variables, lo que justifica el uso de distribuciones acotadas y perfiles empíricos en el modelo.	126
B.1. Propuesta de intervenciones físicas sobre el antepuerto ZEAP para habilitar $C^* = 1,500$ calzos: aumento de capacidad por zonas (amarilla 650, roja 350, naranja 500) y reconfiguración de puertas (dos entradas y dos salidas más pista exclusiva de ingreso). Elaboración propia sobre imagen del recinto.	128

Índice de cuadros

2.1. Comparación de la literatura más cercana según nivel de sistema, objeto regulado, método, problema abordado y emisiones.	35
3.1. Ejemplo de calendario de naves generado con la semilla $S = 1001$ (primeras doce recaladas de un total de 45 en el horizonte). La ETA y el ETD se expresan en días desde el inicio del horizonte; la clase de intensidad (LOW/MID/HIGH) se asigna según la carga total de la recalada y determina la estadía en puerto. Las cargas por línea logística se muestrean de las distribuciones calibradas sobre bdAntares 2022 (Tabla 3.3). Otra semilla produce un calendario distinto en número de recaladas, ETA/ETD y cargas, manteniendo la misma estructura probabilística.	46
3.2. Estadísticos de recalibración de los interarribos de naves con datos de bdAntares 2022 . El coeficiente de variación de los interarribos positivos (0,541) es inferior al valor teórico 1,0 del proceso de Poisson homogéneo, lo que indica que las recaladas son más regulares que las de un proceso de Poisson.	48
3.3. Distribución seleccionada para la carga de cada línea logística, calibrada sobre bdAntares 2022 . Para la Binomial Negativa se reportan los parámetros r (número de éxitos) y p (probabilidad de éxito).	50
3.4. Camino nominal de cada línea logística por los nodos del sistema. Los flujos EXPO_BO e IMPO_BO corresponden a los tramos de ida y de retorno de un mismo camión boliviano: entrega la exportación, espera en la ciudad y regresa con la importación; la doble operación busca encadenar ambos tramos dentro del recinto portuario y evitar la espera urbana. . .	53

3.5.	Estadísticos descriptivos de los interarribos observados en 2022 por nodo (minutos). CV = desviación estándar / media. La desviación estándar supera ampliamente a la media en ZEAP (CV > 2,8), evidenciando una alta concentración de interarribos cortos coexistiendo con colas derechas muy extensas, patrón incompatible con las familias de distribución habituales de renovación.	55
3.6.	Contraste agregado por flujo entre la media simulada sobre $n = 50$ réplicas independientes (semillas 1001–1050) y el promedio mensual equivalente a 28 días observado en 2022, con la parametrización recalibrada (interarribo 46,34 horas, distribución Binomial Negativa por línea logística y mezcla empírica de clases de nave LOW/MID/HIGH). La diferencia entre 2022 y la proyección 2025 es de solo 8,4 %, por lo que 2022 resulta metodológicamente aceptable como base de calibración. El contraste estadístico por flujo, con desviaciones e intervalos de Welch al 95 %, se presenta en la Tabla 3.7.	60
3.7.	Intervalos de confianza de Welch al 95 % para la diferencia de medias mensuales simuladas ($n = 50$) versus reales ($m = 12$) por flujo logístico, en contenedores equivalentes a 28 días. En todos los casos el IC contiene el cero: no se rechaza la hipótesis de igualdad de medias.	62
3.8.	Número de recaladas por fase del experimento, resumido sobre las 30 semillas comunes (1001–1030): media, desviación estándar, varianza e intervalo de confianza al 95 % de la media. El número de recaladas no es fijo, emerge del proceso de llegadas y varía de una semilla a otra. Las llegadas se generan entre los días 0 y 68; a partir del día 68 la simulación entra en vaciado sin nuevas recaladas, durante 10 a 40 días según el modelo.	69
4.1.	Línea base de los indicadores del estudio (modelo BASE, ventana de 28 días, $n = 50$). Referente para la comparación con los modelos ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO.	84
4.2.	Ocupación del antepuerto ZEAP_PARKING a $C^* = 1,500$ calzos ($n = 30$ réplicas), expresada en % de la capacidad. Las métricas se calculan por réplica sobre los <i>snapshots</i> intradiarios de la ventana de análisis; ninguna réplica alcanza la saturación.	88
4.3.	Throughput por flujo, BASE frente a ZEAP, en comparación pareada por semilla ($n = 50$ réplicas de semillas comunes, ventana de análisis de 28 días). El criterio de equivalencia es que el intervalo de confianza pareado de la diferencia contenga el cero.	90

4.4.	Sensibilidad a la frecuencia de recaladas: camiones en ARICA y saturación del antepuerto por escala de demanda. Comparación pareada BASE-ZEAP con $n = 30$ réplicas de semillas comunes (1001-1030) por combinación.	91
4.5.	Confirmación del nivel de adopción de la doble operación en DOBLECITA (semillas comunes; $n = 50$ en los niveles de confirmación). Diferencia pareada en camiones en ARICA respecto de BH= 0 % (399,7); significativo si $IC_{hi} < -40,0$	93
4.6.	Desplazamientos urbanos en vacío evitados por la doble operación (= dobles operaciones realizadas) en DOBLECITA, en la ventana de medición. Valores reales de la simulación, 50 réplicas de semillas comunes.	96
4.7.	Kilómetros en vacío y emisiones de CO ₂ evitados por la doble operación en DOBLECITA. Tasas: 20 km en vacío y 13 kg CO ₂ por doble operación ($f_{vacío} = 0,65$ kg/km). Valores reales de la simulación, 50 réplicas.	99
4.8.	Confirmación del nivel de adopción de la doble operación en COMBINADO (semillas comunes; $n = 50$ en los niveles de confirmación). Diferencia pareada en camiones en ARICA respecto de BH= 0 % (70,9); significativo si $IC_{hi} < -7,1$	99
4.9.	Desplazamientos urbanos en vacío evitados por la doble operación en COMBINADO. Valores reales de la simulación, 50 réplicas de semillas comunes.	102
4.10.	Kilómetros en vacío y emisiones de CO ₂ evitados por la doble operación en COMBINADO. Tasas: 20 km y 13 kg CO ₂ por doble operación. Valores reales, 50 réplicas.	103
4.11.	Celdas del diseño 2×2 a nivel común de adopción (BH= 20 %): camiones promedio en ARICA, $n = 50$ réplicas de semillas comunes (1001-1050).	104
4.12.	Síntesis de los cuatro modelos (semillas 1001-1050; $n = 50$ en BASE y ZEAP, y $n = 50$ en los niveles de confirmación del breakpoint (piloto $n = 5$ en el tamizaje)).	105
5.1.	Contraste formal de las hipótesis de investigación.	110

Capítulo 1

Introducción

El transporte marítimo constituye el principal pilar del comercio internacional, movilizand o alrededor del 80 % del volumen mundial de mercancías (Hoffmann J. and Asariotis, R. and Youssef F., 2021). Para Chile, país con una extensa fachada costera y fuertemente dependiente de sus accesos portuarios, esta modalidad adquiere un carácter estratégico: más del 90 % de su comercio exterior se canaliza a través de sus puertos (Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIREC-TEMAR), 2022). En la macrozona norte esta dependencia es aún más crítica, pues el comercio de tránsito internacional, en particular el de origen y destino boliviano, somete a los puertos y a sus accesos terrestres a una presión que excede el recinto portuario y se proyecta sobre las ciudades.

El Puerto de Arica cumple un rol esencial dentro del *Corredor Bioceánico Central*, actuando como principal vía de acceso al océano Pacífico para el comercio exterior de Bolivia y como nodo articulador del intercambio con el sur de Brasil (Meléndez, 2013; Rodrigue, 2020). A la vez, su operación se encuentra normativamente definida por el *Tratado de Paz, Amistad y Comercio de 1904*, que garantiza a Bolivia el libre tránsito de sus mercancías a través de territorio y puertos chilenos (Gobiernos de Chile y Bolivia, 1904). Esta singular condición internacional otorga al puerto una importancia geopolítica, pero también impone un conjunto de desafíos operativos y de coordinación territorial que exceden el recinto portuario.

En los últimos años, el sistema logístico terrestre que conecta la frontera boliviana y chilena con el Puerto de Arica ha experimentado un crecimiento sostenido en el número de camiones que transitan diariamente por la ciudad. Según el *Plan Estratégico 2022–*

2026 de la Empresa Portuaria Arica (EPA) (Empresa Portuaria Arica, 2022), uno de los principales desafíos para la sostenibilidad portuaria consiste en “minimizar las externalidades del tráfico de carga sobre la ciudad y su entorno” mediante una gestión intermodal eficiente y un control más coordinado de los flujos terrestres. Este fenómeno se agrava por la localización de múltiples patios logísticos y centros de transferencia extraportuarios dentro del área urbana (y no en zonas periféricas o rurales), lo que contribuye a una alta concentración de vehículos pesados en los accesos principales de Arica.

En este contexto, la Zona de Extensión de Actividad Portuaria (ZEAP) emerge como una infraestructura clave para la regulación de flujos y la gestión logística del puerto. De acuerdo con el *Manual de Operaciones y Tarifas de la ZEAP* (Empresa Portuaria Arica, 2024), este recinto, administrado por la Empresa Portuaria Arica, se ubica en el Valle de Lluta, a 11 km del puerto, con una superficie de 21,4 hectáreas, subdividida en antepuerto, zona de respaldo y patio de tierra. Su función principal es recibir, programar y ordenar el flujo de camiones hacia el terminal, integrando operaciones de control documental, estacionamiento, pesaje y almacenamiento temporal (Empresa Portuaria Arica, 2023).

Sin embargo, pese a su potencial operativo, la ZEAP funciona actualmente como un espacio principalmente pasivo, limitado al control de documentos y al ordenamiento básico del ingreso, sin cumplir plenamente su rol de amortiguador dinámico del flujo vehicular. A este uso limitado se suma un cambio en su función original: aunque la ZEAP se concibió como un patio para el almacenamiento de contenedores, hoy opera sobre todo como zona de espera y ordenamiento de camiones, un giro impulsado por el crecimiento del flujo terrestre boliviano. El *Plan Maestro de Infraestructura Portuaria 2025* reconoce que esta situación genera una carga significativa sobre la trama urbana de Arica, donde los camiones deben transitar por ejes como Azola, Capitán Ávalos y 21 de Mayo para acceder a los patios extraportuarios privados y al propio terminal, incrementando los riesgos viales, los tiempos de desplazamiento y la congestión en sectores residenciales y turísticos de la ciudad (Empresa Portuaria Arica, 2025).

La presente investigación desarrolla un modelo de simulación de eventos discretos del sistema logístico terrestre del Puerto de Arica que permite evaluar, sin intervenir el sistema real, el efecto de políticas operativas y físicas sobre tres externalidades del corredor:

la congestión urbana de camiones, los viajes en vacío de los camiones y las emisiones de CO₂ del transporte terrestre. El sistema se representa como una red integrada de nodos interdependientes (frontera, ZEAP, accesos urbanos y terminal portuario) y de múltiples flujos de contenedores de origen y destino boliviano y chileno. Sobre este modelo se evalúan dos intervenciones: el uso de la ZEAP como regulador obligatorio del flujo y la doble operación de camiones (*backhauling* DOBLECITA) (Islam & Olsen, 2014; Caballini, Sacone & Saeednia, 2016; Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020; Yu, Feng, He & Liu, 2024). Para cada una se mide cuánto baja los camiones que esperan en la ciudad, los viajes en vacío, los viajes totales y las emisiones de CO₂, y si su combinación reduce el nivel de adopción que la doble operación requiere para producir un efecto significativo.

Para ello se construyen y ponen a prueba cuatro modelos de simulación. La operación actual del sistema constituye la línea base (modelo BASE) y se compara con tres escenarios de mejora contruidos a partir de esas dos intervenciones, evaluadas por separado y en conjunto: el antepuerto como regulador obligatorio del flujo (modelo ZEAP), la doble operación de camiones (modelo DOBLECITA) y ambas políticas combinadas (modelo COMBINADO). Estos cuatro modelos conforman un diseño factorial 2×2 cuyo propósito es comprobar si cada política, y su combinación, efectivamente reducen la congestión urbana de camiones y las emisiones de CO₂, aislando el efecto individual de cada una y su interacción. Todos los escenarios comparten la misma demanda calibrada con datos de 2022, de modo que las diferencias en la congestión urbana se atribuyen exclusivamente a las políticas evaluadas y no a variaciones de la demanda. Con ello, la tesis aporta una herramienta de evaluación que apoya una gestión más coordinada del corredor, orientada a reducir las externalidades del transporte pesado sobre la ciudad, a disminuir las emisiones de CO₂ del transporte terrestre y a activar el rol regulador de la ZEAP.

1.1. Contexto y Motivación

El desempeño de un puerto depende en gran medida de su conexión terrestre. Mover los camiones con fluidez, coordinar el terminal con su zona de influencia (*hinterland*) y acotar los tiempos de espera son factores clave para la cadena de suministro (Notte-

boom, 2004; Notteboom & Rodrigue, 2005; Rodrigue, 2020). Cuando el acceso terrestre es ineficiente o muy variable, se forman cuellos de botella que reducen la capacidad real del puerto y encarecen la logística para todos los actores (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2017; Pérez-Salas, 2020).

El Puerto de Arica es un buen caso para estudiar este problema. Gran parte de su carga es comercio exterior boliviano, que entra y sale por el corredor que une el altiplano con la costa a través del paso Chungará-Tambo Quemado. Ese corredor encadena varios nodos: la frontera, la Zona de Extensión de Actividad Portuaria (ZEAP), los patios extraportuarios y los accesos al terminal (Meléndez, 2013; Empresa Portuaria Arica, 2022). A la carga boliviana se suman los contenedores chilenos de importación y exportación y los movimientos de contenedores vacíos, y todos comparten las mismas rutas, en particular la Ruta 11-CH y los accesos urbanos al puerto.

El problema central es dónde ocurre la espera: dentro de la ciudad y no en el recinto portuario. Otros puertos han abordado la misma situación con simulación, proponiendo patios de camiones como zona de amortiguación entre el puerto y la ciudad (Yıldırım, Aydın & Gökkuş, 2022; Benedecti, Durski Silva & Alves da Costa, 2026).

Frente a este problema, esta tesis evalúa dos intervenciones. La primera es el uso de la ZEAP como regulador del flujo. Construida originalmente como un patio de almacenamiento de contenedores, la alta demanda del corredor la ha convertido en la práctica en zona de espera de camiones; por su ubicación es el único nodo que puede interceptarlos antes de que entren a la ciudad y ordenar su acceso al terminal, el rol de amortiguador que la literatura asigna a los antepuertos (Empresa Portuaria Arica, 2024; Yıldırım, Aydın & Gökkuş, 2022; Benedecti, Durski Silva & Alves da Costa, 2026; Benedecti, Durski Silva & da Costa, 2025). Hoy ese rol no se ejerce plenamente y la espera se reparte por la ciudad (Empresa Portuaria Arica, 2022; Empresa Portuaria Arica, 2025). La segunda intervención es la doble operación (*backhauling*): en una misma visita al terminal, un camión deja su contenedor de exportación y retira uno de importación, evitando el viaje en vacío que haría al salir a la ciudad a esperar su carga de retorno. La literatura de *drayage* respalda su potencial, con reducciones de viajes en vacío de hasta un 33,79% al emparejar importación y exportación en terminales reales (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Saccone, 2020). Al ser una medida de coordinación operativa, se aplica sin inversión física mayor (Caballini, Saccone & Saeednia, 2016; Islam & Olsen,

2014; Yu, Feng, He & Liu, 2024), con el beneficio de menos kilómetros recorridos y menores emisiones de CO₂ (Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez & Voß, 2017; Bustos-Coral & Costa, 2022).

Ambas atacan partes distintas del problema: la ZEAP cambia dónde esperan los camiones y la doble operación reduce cuántos viajes se hacen. El objetivo es medir el efecto de cada una y, sobre todo, de ambas combinadas, sobre la congestión urbana, los viajes en vacío y las emisiones de CO₂, bajo la hipótesis de que ordenar el flujo con el antepuerto facilita coordinar la carga de retorno y potencia la doble operación. La evaluación se realiza mediante simulación de eventos discretos, idónea para un sistema con demanda estocástica, flujos heterogéneos y recursos de capacidad finita cuya interacción dinámica difícilmente se captura de forma analítica; con réplicas independientes permite comparar las políticas con respaldo estadístico (Banks, Carson II, Nelson & Nicol, 2005; Law, 2015; Dragović, Tzannatos & Park, 2017).

1.2. Descripción del Problema

El problema es concreto: una gran cantidad de camiones circula por el tejido urbano de Arica y se estaciona de manera informal en la ciudad. Como los patios extraportuarios están en el radio urbano, los camiones se acumulan, estacionan y circulan por calles que también usan los habitantes, lo que genera congestión, presión sobre la infraestructura vial y conflictos con la actividad cotidiana de la población (Empresa Portuaria Arica, 2022; Terminal Puerto Arica, 2022; MundoMaritimo, 2016; Empresa Portuaria Arica, 2025). A esto se suma una externalidad ambiental: una parte de esos camiones realiza viajes en vacío, kilómetros improductivos que consumen combustible y emiten CO₂ sin mover carga.

Estas externalidades están documentadas tanto en reportes del sistema portuario como en la prensa regional. La congestión asociada al flujo de camiones bolivianos se ha vuelto crítica: en junio de 2026 el Puerto de Arica alcanzó un 120 % de ocupación, en buena parte por la baja disponibilidad de camiones para retirar la carga (BioBioChile, 2026). En el eje internacional, la Fundación Terram reporta que más de la mitad de los accidentes con vehículos de carga peligrosa en el altiplano de Arica y Parinacota ocurrieron en los últimos dos años, sobre la Ruta 11-CH por la que transita la mayoría

de los camiones de origen boliviano (Fundación Terram, 2026); esta situación llevó al diputado por la región a exigir en el Congreso una mayor fiscalización del daño provocado por estos vehículos (Vilas Radio, 2026). A ello se suma la contaminación de áreas protegidas como el Parque Nacional Lauca y el lago Chungará por residuos y desechos dejados en la ruta, que la Corporación Nacional Forestal ha debido remover en operativos de limpieza (Corporación Nacional Forestal (CONAF), 2024). En conjunto, estos antecedentes muestran que el flujo de camiones asociado al comercio boliviano genera externalidades urbanas, viales y ambientales ya visibles para la comunidad regional, lo que motiva el análisis de políticas que ordenen y reduzcan ese flujo.

El problema de investigación de esta tesis consiste en analizar el comportamiento de este sistema y evaluar cómo las dos políticas descritas, por separado y en conjunto, modifican su desempeño en la congestión urbana, los viajes en vacío y las emisiones de CO₂ del transporte terrestre.

1.3. Preguntas de Investigación

A partir del problema identificado, la investigación se orienta a responder las siguientes preguntas:

- **PI1. Caracterización del sistema actual.**

¿Cómo se comporta el sistema logístico terrestre que conecta la frontera boliviana con el Puerto de Arica bajo los patrones de demanda observados en el año 2022, considerando la interacción entre frontera, ZEAP, accesos y terminal portuario?

- **PI2. Dinámica de flujos y cuellos de botella.**

¿Cómo interactúan los distintos flujos de contenedores (importación y exportación, llenos y vacíos, de origen boliviano y chileno) con los recursos del sistema, y cómo explica esa interacción la formación de congestión en la ciudad de Arica y en los accesos al terminal?

- **PI3. Rol operativo de la ZEAP.**

¿Qué impacto tiene el uso de la ZEAP como nodo de regulación del flujo de camiones sobre la cantidad de vehículos que circulan dentro de la ciudad de Arica?

- **PI4. Efecto de la doble operación y su nivel de adopción.**

¿Existe un nivel mínimo de adopción de la doble operación por parte de los camiones de exportación boliviana (EXPO_BO) a partir del cual la congestión urbana se reduce de forma relevante? ¿Y cómo cambia ese nivel cuando la doble operación se combina con el antepuerto ZEAP?

- **PI5. Comparación entre los modelos operativos.**

¿Cómo se comparan los cuatro modelos (BASE, ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO) en términos de congestión urbana y de uso del antepuerto?

- **PI6. Reducción de kilómetros en vacío y emisiones.**

¿Cuánto reduce la doble operación los kilómetros recorridos en vacío dentro del área urbana de Arica (el desplazamiento puerto-ciudad-puerto que el camión hace para esperar su carga de retorno fuera del terminal) y las emisiones de CO₂ asociadas, en los modelos DOBLECITA y COMBINADO?

1.4. Hipótesis

Las hipótesis de esta investigación postulan el efecto cuantificable de las políticas operativas y físicas evaluadas sobre la congestión urbana asociada al Puerto de Arica. Cada hipótesis se formula con un umbral numérico verificable; el origen de cada umbral se declara al cierre de esta sección y su contraste empírico se desarrolla en los Capítulos 4 y 5.

- **H1. Regulación del flujo mediante ZEAP.**

El uso de la ZEAP como nodo de regulación obligatorio del flujo de camiones reduce la cantidad promedio de camiones en el radio urbano de Arica en **al menos un 60 %** respecto del escenario base de operación actual.

- **H2. Efecto del backhauling sobre la congestión urbana.**

Existe un nivel mínimo de adopción de la doble operación (DOBLECITA) por parte de los camiones EXPO_BO, denominado *nivel crítico de adopción*, a partir del cual la cantidad promedio de camiones en el radio urbano de Arica se reduce en **al menos un 10 %** respecto de la operación sin doble operación (BH= 0 %).

- **H3. Interacción entre antepuerto y backhauling.**

El nivel crítico de adopción de la doble operación es menor cuando se implementa junto con el antepuerto ZEAP (modelo COMBINADO) que cuando se implementa sobre la operación actual (modelo DOBLECITA), con una diferencia de **al menos 2 puntos porcentuales** en la proporción de camiones EXPO_BO que adoptan la doble operación.

- **H4. Reducción de kilómetros en vacío en el área urbana.**

La doble operación reduce los desplazamientos en vacío que los camiones EXPO_BO realizan dentro del área urbana de Arica (el trayecto puerto-ciudad-puerto que hacen para esperar su carga de retorno fuera del terminal) en **al menos un 10 %** respecto del escenario sin doble operación, a su nivel crítico de adopción, en los modelos DOBLECITA y COMBINADO; la magnitud de la reducción crece con el nivel de adopción.

- **H5. Reducción de emisiones del transporte terrestre.**

La reducción de kilómetros en vacío que genera la doble operación se traduce en una reducción de las emisiones de CO₂ del transporte terrestre en la misma proporción (**al menos un 10 %**) respecto del escenario sin doble operación, a su nivel crítico de adopción, en ambos modelos (DOBLECITA y COMBINADO). Como las emisiones se calculan con un factor de emisión fijo por kilómetro, esta hipótesis no es independiente de H4: si una se cumple, la otra se cumple en el mismo porcentaje. Se mantiene como hipótesis propia porque su aporte es distinto: cuantificar cuántas toneladas de CO₂ se evitan.

Origen de los umbrales numéricos

Los tres umbrales responden a criterios distintos. El del **60 %** (H1) se fijó deliberadamente exigente: dado que la política intercepta la totalidad del flujo y relocaliza la espera fuera de la ciudad, se exige que la reducción supere con holgura la mayoría del indicador para calificar el resultado como un cambio de régimen operativo y no como una mejora marginal. El listón queda además muy por encima de las magnitudes de efecto que reporta la literatura de infraestructuras de amortiguación: un patio de camiones en el hinterland reduce el tiempo de ciclo en un 15,7 % y un 18,4 % según (Benedecti,

Durski Silva & Alves da Costa, 2026), y el emparejamiento de viajes reduce hasta un 33,79 % de la circulación en vacío según (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020). El umbral del **10 %** (H2, H4 y H5) es un criterio de relevancia práctica habitual en la evaluación de políticas operativas, conservador frente a la evidencia empírica de la literatura de *backhauling*: (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020) reporta reducciones de viajes de camión en vacío de hasta un 33,79 % mediante el emparejamiento de contenedores de importación y exportación en terminales con sistema de citas. El umbral de **2 puntos porcentuales** (H3) corresponde al doble de la resolución de la grilla con que se busca el nivel crítico de adopción (pasos de 1 pp), de modo que una diferencia igual o mayor no puede atribuirse a la discretización del barrido. El puerto no cuenta con estándares normativos para estas magnitudes; los umbrales son criterios del diseño experimental, y la sensibilidad de los niveles críticos al umbral del 10 % se examina en el Capítulo 4 (Sección 4.4.5).

El nivel de adopción que evalúan H2 y H3 se trata como variable de política y no como parámetro observado, siguiendo a (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020), que modelan la cuota de doble operación como factor de diseño con niveles del 20 % y del 95 % de los camiones en terminales con sistema de citas, y muestran que el beneficio alcanzable depende de la proporción de embarcadores dispuestos a compartir camión. Los niveles críticos estimados en esta tesis caen en el extremo bajo de ese rango, esto es, en adopción alcanzable sin modificaciones físicas del sistema.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Objetivo General (OG).

Desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos del sistema logístico-portuario de Arica que permita evaluar mejoras operativas y físicas en el flujo terrestre de camiones, sin intervenir el sistema real.

1.5.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos se organizan como una secuencia metodológica que permite caracterizar el sistema actual, construir el modelo de simulación y evaluar distintas configuraciones operativas del corredor logístico.

- **OE1. Caracterizar el sistema y construir los parámetros de entrada.**

Analizar los datos operacionales del año 2022 para describir la demanda y los flujos del sistema, y ajustar y validar las distribuciones estadísticas que alimentan el modelo de simulación.

- **OE2. Construir y calibrar el modelo de simulación base.**

Desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos que represente la configuración actual del sistema logístico-portuario de Arica (modelo BASE), incorporando los parámetros y distribuciones obtenidos del análisis de entrada.

- **OE3. Validar el modelo base contra datos observados.**

Contrastar los resultados del modelo BASE con los indicadores operativos del sistema real de 2022 para verificar su capacidad de representar el comportamiento del sistema.

- **OE4. Evaluar y comparar los cuatro modelos de simulación.**

Comparar los modelos BASE, ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO en términos de congestión urbana y utilización del antepuerto, e identificar el nivel crítico de adopción de la doble operación mediante análisis estadístico de intervalos de confianza.

- **OE5. Cuantificar la reducción de kilómetros en vacío y de emisiones.**

Estimar, para los modelos con doble operación (DOBLECITA y COMBINADO), la reducción de kilómetros recorridos en vacío en el área urbana y de emisiones de CO₂ asociadas, a partir de los resultados de la simulación y de factores de emisión publicados.

- **OE6. Proponer lineamientos de mejora para la gestión del sistema logístico terrestre.**

Formular orientaciones operativas para mejorar la coordinación de los flujos terrestres del corredor Bolivia-Arica, considerando el rol regulador de la ZEAP y la implementación de la doble operación.

1.6. Alcances y Limitaciones

El alcance de esta investigación se centra en el análisis del sistema de transporte terrestre de contenedores asociado al Puerto de Arica, considerando de manera integrada:

- Los seis flujos logísticos modelados: los cinco flujos contenerizados (EXPO_BO, IMPO_BO, EXPO_CL, IMPO_CL, MTY) y el flujo DUMMY, que representa camiones de granel sólido, cisterna y otras cargas no contenerizadas. Estos últimos no son el objeto central del análisis, pero se incluyen porque comparten recursos del sistema (portones, zonas de estacionamiento) y condicionan la utilización real de la infraestructura portuaria.
- Los siete nodos terrestres modelados: el paso fronterizo Chungará-Tambo Quemado, el nodo de espera urbana (ARICA), los tres subnodos del antepuerto (ZEAP_GATE_IN, ZEAP_PARKING, ZEAP_GATE_OUT), los accesos al terminal (portones norte y sur) y el terminal portuario.
- La dinámica operativa del sistema bajo el escenario de demanda histórica 2022, calibrado con los registros de los sistemas ANTARES y ZEAP del terminal.

El análisis se enfoca en variables operativas de desempeño: utilización del antepuerto ZEAP, formación de colas, cantidad de camiones presentes simultáneamente en el radio urbano, viajes de retorno en vacío evitados, kilómetros de transporte reducidos y emisiones de CO₂ asociadas. Las políticas evaluadas comprenden intervenciones operativas (ruteo obligatorio por el antepuerto, esquema de doble operación de camiones) e intervenciones físicas (dimensionamiento de la capacidad de estacionamiento en ZEAP). Quedan fuera del alcance del estudio:

- Las operaciones marítimas de estiba y desestiba, así como los procesos aduaneros y de fiscalización, que se modelan de forma agregada.

- La evaluación económica de las políticas propuestas (costos de implementación, inversiones en infraestructura o sistemas de información).
- El análisis de externalidades sociales o de seguridad vial asociadas al tráfico de camiones. Las externalidades ambientales se consideran únicamente mediante la estimación de las emisiones de CO₂ evitadas por la reducción de kilómetros en vacío, calculada con factores de emisión publicados (Capítulo 3); no se realiza un inventario ambiental completo.

Limitaciones

Las siguientes limitaciones se declaran explícitamente para delimitar la interpretación de los resultados.

- Calidad de los datos de origen.** El modelo se calibra con datos del año 2022 (sistemas ANTARES y ZEAP). Los registros de la ZEAP presentan datos incompletos o inconsistentes en el horario nocturno (00:00–06:00), lo que limitó la calibración de los parámetros de permanencia. El modelo calcula dos tiempos de permanencia del contenedor (*dwell time*) según la dirección de la carga: el dwell time de exportación (desde que el contenedor de exportación se deposita en el patio hasta el zarpe de su nave) y el dwell time de importación (desde que la nave descarga el contenedor hasta que el camión boliviano lo retira). Ambas son métricas de salida emergentes del modelo; sin embargo, los registros históricos de permanencia presentan inconsistencias en la definición de eventos de entrada y salida entre fuentes, lo que impidió validar directamente cualquiera de las dos contra datos reales.
- Cobertura de la validación.** La validación del modelo base (BASE) se realizó a nivel de throughput mensual: los cinco flujos contenerizados superan el criterio de Welch al 95 %. El flujo DUMMY (granel, cisterna, cargas especiales) no cuenta con registros desagregados que permitan el mismo criterio; su calibración es indirecta mediante una tasa constante ajustada a la operación observada. En consecuencia, la utilización de recursos compartidos (portones, estacionamientos) puede estar subestimada o sobreestimada en la fracción correspondiente a cargas no contenerizadas.

- c) **Datos anuales para simular un mes promedio, sin estacionalidad.** El modelo simula 28 días de un mes típico, pero los parámetros de demanda fueron estimados con los registros del año completo 2022. La calibración absorbe la variación estacional y la condensa en un único escenario promedio anual. El modelo no reproduce períodos de alta o baja demanda, ciclos agrícolas ni fluctuaciones estacionales del comercio boliviano. Los resultados pueden subestimar la severidad de la congestión en períodos pico.
- d) **Brecha temporal entre calibración y operación.** Los parámetros del modelo corresponden a 2022; el sistema que se busca representar opera en 2025. Cambios en volúmenes de demanda, composición de la flota, procedimientos operativos del terminal o infraestructura del antepuerto ocurridos en el período intermedio no están incorporados. A la fecha de elaboración no se disponía de datos más recientes para una recalibración. Los resultados deben interpretarse como estimaciones bajo condiciones similares a las de 2022, no como predicciones del estado operativo actual.
- e) **Desfase entre la operación modelada y la operación de los datos.** La lógica operativa implementada representa el funcionamiento más reciente del terminal (operación continua 24 horas), mientras que los datos de calibración y validación corresponden a 2021–2022, cuando la operación era distinta. La validación contrasta entonces el modelo contra un sistema que operaba bajo reglas diferentes a las simuladas; sus resultados deben leerse como validación de mecanismo y orden de magnitud, no como reproducción exacta de la serie histórica.
- f) **Estimación de emisiones basada en factores publicados.** La reducción de emisiones de CO₂ se estima a partir de los viajes de retorno en vacío y los kilómetros recorridos por el modelo, aplicando factores de emisión publicados (EMEP-EEA/COPERT y literatura) diferenciados solo en dos estados de carga (vacío y cargado). No se midieron emisiones de la flota real del corredor Arica-Bolivia ni se consideran el tipo de motor, la pendiente, la velocidad o la antigüedad del vehículo; los valores de CO₂ deben interpretarse como una estimación de orden de magnitud del beneficio ambiental, no como un inventario de emisiones.

- g) **Muestreo independiente de la demanda por línea logística.** La carga de cada nave se genera muestreando, de forma independiente, una distribución por línea logística ajustada a 2022. Este enfoque captura la variabilidad propia de cada flujo mediante distribuciones sobredispersas, pero no modela explícitamente la correlación entre los flujos de una misma recalada (por ejemplo, que una nave de mayor tamaño tienda a mover más carga en todas las líneas). El efecto de esta simplificación sobre los indicadores agregados se considera menor.

1.7. Estructura del Informe

El informe se organiza en cinco capítulos y los anexos:

- **Capítulo 1, Introducción:** el problema, el contexto del corredor Arica-Bolivia y las preguntas de investigación, las hipótesis y los objetivos del estudio.
- **Capítulo 2, Revisión bibliográfica:** la literatura sobre logística portuaria y terrestre, antepuertos y doble operación, y sobre simulación de eventos discretos, junto con la brecha que aborda esta tesis.
- **Capítulo 3, Metodología:** la construcción del modelo de simulación, su calibración y validación con datos de 2022, y el diseño experimental con que se comparan los cuatro modelos.
- **Capítulo 4, Resultados:** los modelos BASE, ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO y su síntesis comparativa.
- **Capítulo 5, Conclusiones:** el cumplimiento de los objetivos, el contraste de las hipótesis, los aportes del trabajo y las líneas de investigación futura.
- **Anexos:** material complementario del estudio.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Introducción a la Revisión Bibliográfica

La presente revisión bibliográfica establece las bases conceptuales, operativas y analíticas necesarias para comprender el sistema logístico terrestre asociado al Puerto de Arica y para situar la contribución de esta investigación dentro de la literatura especializada. Su propósito es doble. En primer lugar, busca desarrollar el marco conceptual requerido para interpretar la relación entre terminal portuario, corredor terrestre, flujos de camiones y nodos logísticos de apoyo. En segundo lugar, busca identificar el estado del arte en simulación portuaria y logística terrestre, con el fin de delimitar la brecha que motiva esta tesis.

La revisión parte del caso de estudio específico y avanza hacia los marcos conceptuales y metodológicos que sustentan la investigación. La Sección 2.2 describe el contexto logístico-portuario del Puerto de Arica, su rol dentro del Corredor Bioceánico Central y la configuración del sistema terrestre Bolivia-Arica. La Sección 2.3 desarrolla los fundamentos conceptuales de la logística portuaria y terrestre: la noción de puerto como nodo de articulación marítimo-terrestre, la estructura de un terminal de contenedores y el rol de infraestructuras de apoyo como antepuertos. La Sección 2.4 aborda la simulación de eventos discretos como herramienta analítica para sistemas logísticos portuarios complejos, con énfasis en el análisis de input, los indicadores de desempeño y la comparación estadística de escenarios. La Sección 2.5 presenta el estado del arte en simulación portuaria y logística terrestre. Finalmente, la Sección 2.6 sintetiza las

brechas identificadas y explicita la contribución de esta investigación.

2.2. Contexto logístico-portuario del caso de estudio: Puerto de Arica

2.2.1. El Puerto de Arica: gestión público-privada y rol en el Corredor Bioceánico

El Puerto de Arica opera bajo un modelo de gestión público-privado, esquema característico del proceso de modernización portuaria chilena. En este modelo participan dos entidades con funciones diferenciadas. Por una parte, la Empresa Portuaria Arica (EPA) actúa como autoridad portuaria estatal, encargada de la administración, desarrollo y conservación de la infraestructura portuaria y de recintos asociados, como la Zona de Extensión de Actividad Portuaria (ZEAP), en conformidad con la Ley 19.542 (Congreso Nacional de Chile, 1997). Por otra parte, Terminal Puerto Arica (TPA) opera como concesionario privado responsable de la explotación y operación de los servicios de transferencia de carga, incluyendo la programación de camiones y la gestión diaria de las operaciones (Terminal Puerto Arica, 2022). El terminal se emplaza en el borde costero urbano de la ciudad de Arica (Figura 2.1), una localización que vincula directamente la operación portuaria con el espacio urbano.

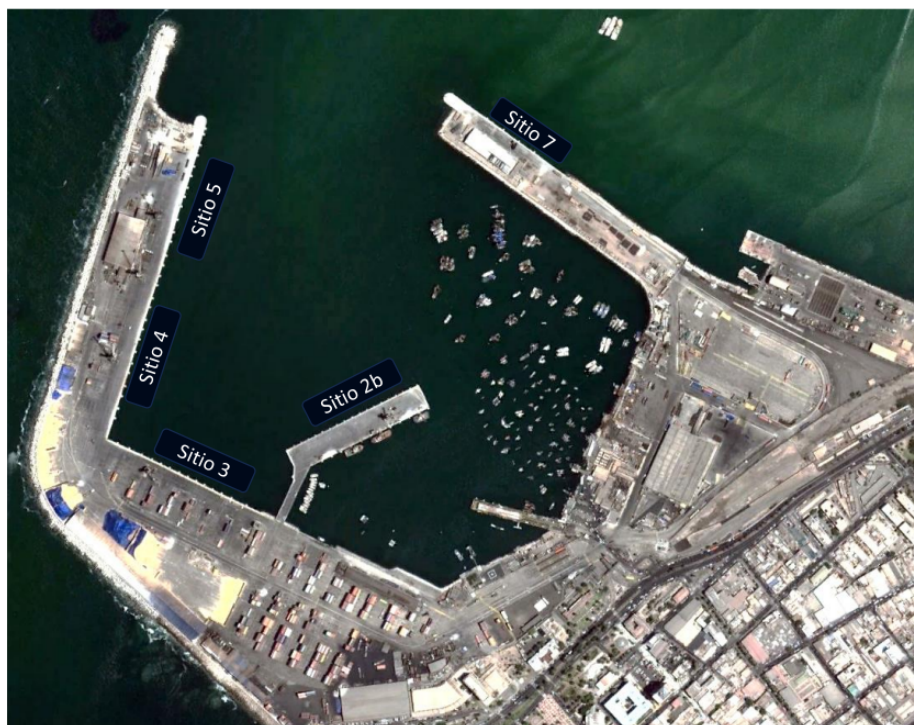


Figura 2.1: Vista satelital del Terminal Puerto Arica, emplazado en el borde costero de la ciudad. Fuente: imagen satelital, Google Earth.

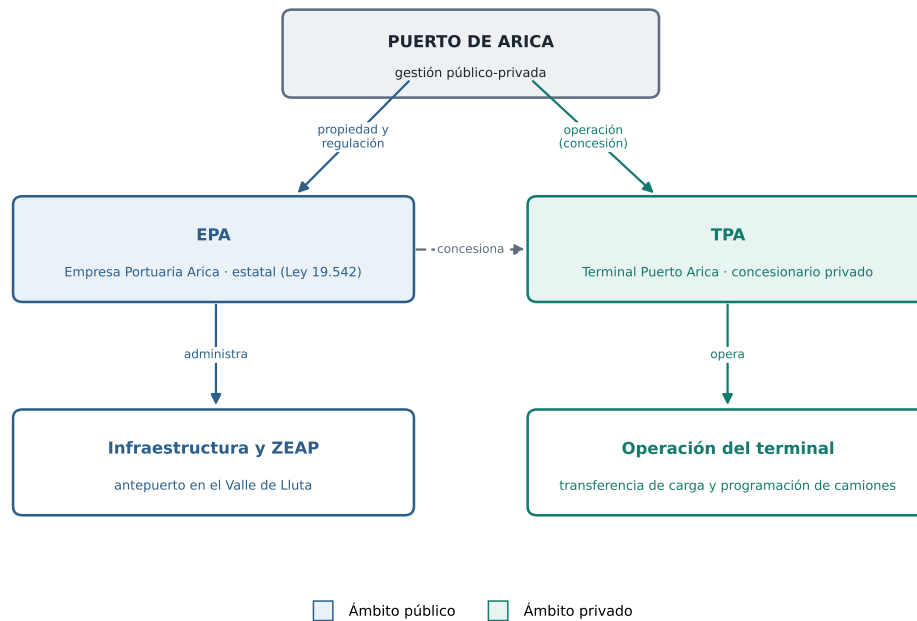


Figura 2.2: Modelo de gestión público-privada del Puerto de Arica. La Empresa Portuaria Arica (EPA), autoridad portuaria estatal, posee y regula la infraestructura portuaria y administra la ZEAP; Terminal Puerto Arica (TPA), concesionario privado, opera la transferencia de carga y la programación de camiones bajo concesión.

Este esquema institucional es relevante para la presente investigación porque la configuración y coordinación del sistema terrestre no dependen de un único actor. La operación del corredor involucra decisiones descentralizadas, intereses diferenciados y una estructura institucional que separa propiedad, regulación y operación (Figura 2.2).

El Puerto de Arica es el nodo terminal en el Pacífico del Corredor Bioceánico Central, que canaliza el comercio de tránsito boliviano hacia la costa a través del paso Chugará-Tambo Quemado (Figura 2.3). Lo relevante para esta investigación es que la carga boliviana representa una proporción mayoritaria de los movimientos del puerto (Terminal Puerto Arica, 2022; Meléndez, 2013) y que ese tránsito tiende a crecer con el tiempo (Empresa Portuaria Arica, 2022), lo que proyecta a Arica como un puerto cada vez más importante y hace más urgente resolver la eficiencia de su sistema terrestre.

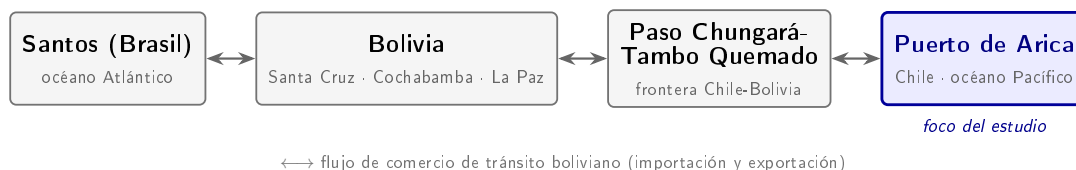


Figura 2.3: El Corredor Bioceánico Central y el rol del Puerto de Arica como nodo terminal en el Pacífico. La carga de tránsito boliviano cruza la frontera por el paso Chungará-Tambo Quemado y accede al puerto a través del sistema terrestre estudiado en esta tesis. El corredor es más extenso que lo representado; el esquema muestra solo los nodos y tramos relevantes para este estudio.

2.2.2. El régimen boliviano de libre tránsito y el sistema terrestre Arica-Bolivia

El funcionamiento del sistema logístico asociado al Puerto de Arica está condicionado por el Tratado de Paz, Amistad y Comercio de 1904, que garantiza a Bolivia el libre tránsito de mercancías por territorio y puertos chilenos (Gobiernos de Chile y Bolivia, 1904). Este marco jurídico otorga al comercio boliviano características particulares dentro de la operación portuaria y terrestre, incluyendo regímenes preferenciales de almacenamiento y circulación (Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2017).

Desde una perspectiva logística, este régimen introduce patrones operativos distintos a los observables en flujos puramente domésticos o en terminales donde toda la carga responde a una misma institucionalidad nacional. La permanencia prolongada de ciertos contenedores, la necesidad de coordinación binacional y la relevancia de la frontera como nodo operativo hacen que el sistema Arica-Bolivia presente una configuración singular dentro del contexto portuario chileno.

El sistema terrestre asociado al Puerto de Arica articula una secuencia de nodos y tramos que conectan el altiplano boliviano con el terminal portuario. Entre estos componentes destacan la frontera Chungará-Tambo Quemado, la ZEAP ubicada en el Valle de Lluta, los patios extraportuarios localizados en el área urbana de Arica, los accesos al terminal y el propio patio portuario. A ellos se suman los tramos carreteros nacionales e internacionales y las decisiones operativas de los actores que gestionan los flujos de

importación, exportación y reposicionamiento de contenedores. La Figura 2.4 ilustra los dos ejes territoriales principales de este sistema: el acceso entre el terminal y la ZEAP, ubicada en el Valle de Lluta al norte de la ciudad, y la ruta carretera de aproximadamente 203 km que conecta el puerto con el paso fronterizo Chungará-Tambo Quemado.



Figura 2.4: Ejes territoriales del sistema terrestre Arica-Bolivia. Arriba: ruta de acceso entre el Terminal Puerto Arica (Acceso Norte) y la ZEAP, en el Valle de Lluta al norte de la ciudad. Abajo: ruta carretera entre el Puerto de Arica y el paso fronterizo Chungará-Tambo Quemado, de aproximadamente 203 km. Fuente: elaboración propia sobre imágenes de Google Earth y Google Maps.

Esta estructura convierte al sistema en una red logística terrestre compleja, donde el desempeño del terminal depende en gran medida del comportamiento de nodos externos al recinto portuario. La existencia de patios urbanos, la presión del tránsito pesado sobre la ciudad y el uso parcial de la ZEAP como nodo regulador refuerzan la necesidad de analizar el corredor como un sistema integrado, que excede la operación interna del terminal.

2.2.3. Estructura nodal del sistema logístico terrestre-portuario

Con el fin de representar el sistema logístico terrestre asociado al Puerto de Arica, se adopta una descomposición en siete nodos funcionales. Esta representación constituye una abstracción conceptual-territorial que captura las principales transformaciones del flujo de camiones y contenedores. La descomposición operativa del modelo de simulación, con sus capacidades, tiempos de servicio y reglas de ruteo específicas, se presenta en el Capítulo 3.

Los nodos considerados son: *Bolivia*, *Chile*, *ZEAP*, *Depósitos Urbanos de Contenedores*, *Estacionamientos Urbanos de Camiones*, *Arica* y *Puerto*. Cada uno representa un dominio operativo en el cual ocurren procesos específicos como generación de demanda, tránsito, espera, almacenamiento o transferencia.

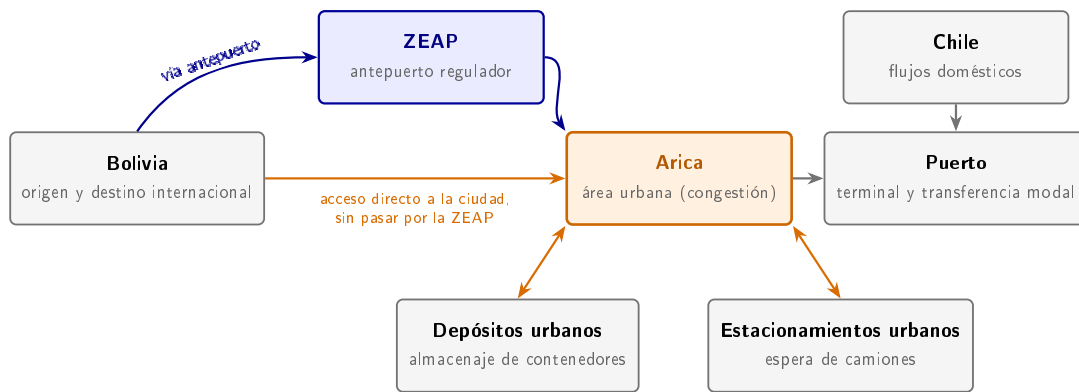


Figura 2.5: Los siete nodos funcionales del sistema logístico terrestre-portuario de Arica y el flujo entre ellos.

- **Bolivia:** origen y destino principal de los flujos internacionales de carga, donde se genera una parte significativa de la demanda del sistema.
- **Chile:** tramo carretero nacional que conecta el sistema portuario con otras zonas del país, representando flujos domésticos y tránsito interregional.
- **ZEAP:** zona de extensión de actividad portuaria que actúa como nodo intermedio de regulación, permitiendo desacoplar la llegada de camiones respecto de la capacidad del terminal.

- **Depósitos Urbanos de Contenedores:** recintos destinados al almacenamiento, consolidación y gestión de contenedores dentro del área urbana.
- **Estacionamientos Urbanos de Camiones:** espacios de espera utilizados por camiones sin asignación inmediata de operación, reflejando la falta de coordinación temporal entre flujos.
- **Arica:** área urbana que actúa como espacio de tránsito y acumulación de camiones, donde se manifiestan externalidades como congestión y uso de infraestructura vial.
- **Puerto:** nodo central donde se realiza la transferencia modal entre transporte terrestre y marítimo, incluyendo procesos de acceso, operación en patio y atención a naves.

El esquema es una representación funcional, no geográfica, del sistema: muestra sus componentes y cómo se conectan. Sobre esta base se construye el modelo de simulación de eventos discretos con que se analiza dónde se acumulan los camiones y cómo se forma la congestión.

Los depósitos y patios extraportuarios donde se almacenan contenedores y esperan los camiones se distribuyen en el área urbana de Arica. La Figura 2.6 muestra una vista aérea de estos recintos, donde se observa la acumulación de contenedores y de camiones a la espera de operación, evidencia visual del rol de la ciudad como espacio de espera del sistema portuario.

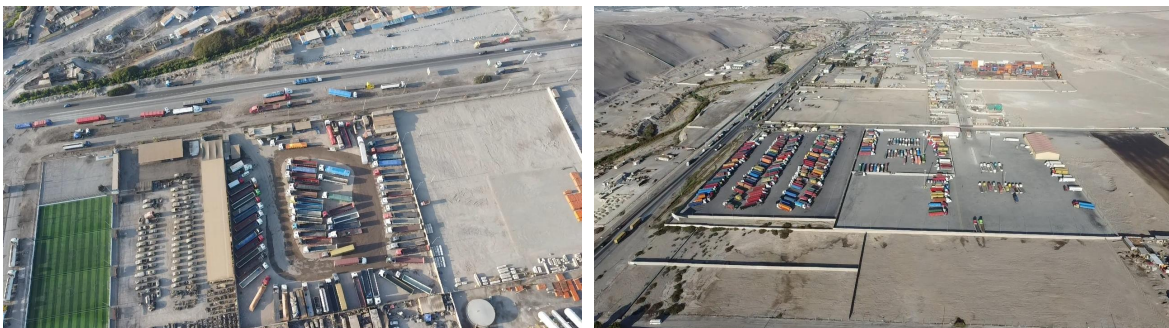


Figura 2.6: Vista aérea de patios y depósitos extraportuarios de contenedores en el área urbana de Arica, donde se acumulan contenedores y camiones a la espera de operación. Fuente: Empresa Portuaria Arica (EPA).

2.3. Fundamentos conceptuales de la logística portuaria y terrestre

2.3.1. Flujos de importación y exportación en terminales de contenedores

En los terminales de contenedores se distinguen tres tipos principales de flujos logísticos: los *flujos de importación*, los *flujos de exportación* y los flujos de *transbordo*. Los dos primeros describen el intercambio de contenedores entre el transporte marítimo y el sistema terrestre, mientras que el transbordo corresponde a la transferencia de contenedores entre naves sin interacción con el hinterland. Dado que la presente investigación se centra en el sistema logístico terrestre asociado al Puerto de Arica, el análisis se enfoca exclusivamente en los flujos de importación y exportación.

- El **flujo de importación** corresponde al movimiento de contenedores desde la nave hacia el sistema terrestre. Los contenedores son descargados en el muelle, trasladados al patio de almacenamiento y posteriormente retirados por camión u otro medio de transporte terrestre.
- El **flujo de exportación** corresponde al movimiento de contenedores desde el sistema terrestre hacia la nave. En este caso, los contenedores ingresan al terminal a través del *gate*, son almacenados temporalmente en el patio y posteriormente trasladados al muelle para su embarque.

Ambos flujos coexisten dentro de la misma infraestructura portuaria y utilizan de manera compartida los subsistemas del terminal, particularmente el patio y los accesos terrestres. El sistema moviliza principalmente contenedores secos (*Dry*) y, en menor proporción, contenedores vacíos (*MTY*) destinados a reposicionamiento; los volúmenes se expresan en unidades equivalentes de veinte pies (TEU) (Rodrigue, 2020).

2.3.2. Antepuertos, patios extraportuarios y nodos de apoyo terrestre

La creciente intensificación de los flujos de carga en los puertos ha generado un aumento significativo en el tráfico de camiones en su hinterland, lo que frecuentemente se tra-

duce en congestión en los accesos al terminal, mayores tiempos de espera y pérdida de eficiencia operativa (Benedecti, Durski Silva & da Costa, 2025). Estas problemáticas se originan, en parte, por desajustes entre las tasas de llegada de camiones y la capacidad de atención del terminal, así como por la limitada infraestructura de apoyo en el sistema terrestre.

En este contexto, distintas infraestructuras extraportuarias han sido implementadas con el objetivo de mejorar la articulación entre el puerto y su hinterland. Entre ellas, destacan los antepuertos, patios extraportuarios y, de manera particular, las zonas de estacionamiento de camiones, las cuales cumplen un rol específico en la gestión del flujo vehicular.

Las instalaciones de estacionamiento de camiones pueden ser conceptualizadas como zonas de buffer dentro del sistema logístico terrestre. Su función principal es desacoplar la llegada de vehículos respecto de la capacidad instantánea de atención del terminal, evitando la acumulación de camiones en los accesos portuarios o en la red vial circundante.

Sin la existencia de este tipo de infraestructura, los camiones tienden a formar colas en los accesos al terminal o a estacionarse en vías cercanas, especialmente durante periodos de alta demanda. Esto genera tiempos de espera elevados, operaciones impredecibles y externalidades negativas sobre el entorno urbano y la seguridad vial.

Desde una perspectiva operativa, la introducción de zonas de estacionamiento permite regular las tasas de llegada de camiones mediante mecanismos como ventanas de atención o sistemas de citación, facilitando una mejor sincronización entre la llegada de vehículos y la disponibilidad de recursos en el terminal. Este desacople contribuye a reducir la longitud de las colas, mejorar los tiempos de ciclo y aumentar la fluidez del sistema logístico.

Evidencia basada en simulación indica que la implementación de zonas de estacionamiento de camiones puede reducir los tiempos totales de ciclo del orden de un 15 % a 18 %, junto con disminuir la longitud de colas y mejorar la fluidez operativa del hinterland, al absorber vehículos en espera y regular su ingreso al terminal (Benedecti, Durski Silva & Alves da Costa, 2026; Benedecti, Durski Silva & da Costa, 2025; Yıldırım, Aydın & Gökkuş, 2022).

En consecuencia, los patios de estacionamiento de camiones pueden ser interpretados

como nodos de regulación de flujo dentro del sistema portuario ampliado, cuya función es la gestión temporal de las unidades de transporte, no la manipulación de carga, contribuyendo a la estabilidad operativa del conjunto puerto-hinterland.

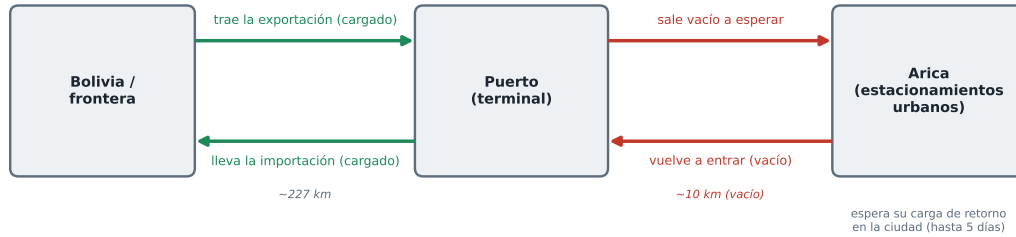
2.3.3. Viajes en vacío, doble operación y emisiones en el transporte terrestre de contenedores

El transporte terrestre de contenedores se caracteriza por una proporción elevada de viajes improductivos: tras entregar o retirar un contenedor, el camión recorre el trayecto de retorno en vacío (*deadheading*). En corredores de comercio desbalanceado, donde los flujos de importación y exportación no coinciden en volumen ni en tiempo, este reposicionamiento en vacío constituye una ineficiencia estructural que aumenta los kilómetros recorridos, los costos del transportista y la presión sobre la infraestructura vial (Islam & Olsen, 2014; Caballini, Saccone & Saeednia, 2016). Cada kilómetro recorrido en vacío consume combustible y emite CO₂ pese a no transportar carga, de modo que el viaje en vacío es también una externalidad ambiental. En un corredor con alto flujo de camiones, la suma de estos trayectos improductivos concentra un volumen de emisiones evitable mediante una mejor coordinación de los flujos. En el corredor Arica-Bolivia, el desbalance entre importación y exportación hace que el camión que entrega una exportación boliviana (EXPO.BO) deba esperar para emparejarse con un contenedor de importación de retorno; mientras espera, ocupa la ciudad y realiza desplazamientos en vacío entre el puerto y los estacionamientos urbanos.

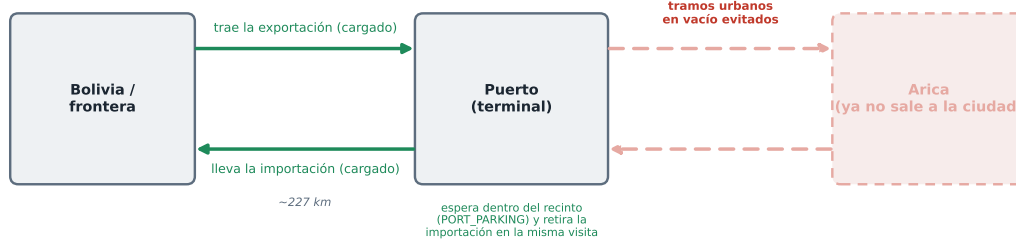
La estrategia más estudiada para reducir estos viajes en vacío es la doble operación, también denominada *backhauling*, *street turn* o *double move*: un mismo camión encadena un viaje de exportación y uno de importación en un mismo ciclo, evitando el retorno en vacío y un nuevo ingreso desde el origen (Caballini, Saccone & Saeednia, 2016; Yu, Feng, He & Liu, 2024) (Figura 2.7). La literatura de *drayage* ha demostrado su potencial: Caballini et al. (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Saccone, 2020) reportan reducciones de viajes en vacío de hasta un 33,79 % al emparejar contenedores de importación y exportación en terminales reales, y Bustos-Coral y Costa (Bustos-Coral & Costa, 2022) muestran que el ruteo conjunto de flota heterogénea con distintas configuraciones de carga es aplicable a cualquier terminal de contenedores. Se trata de medidas

de coordinación operativa, no de infraestructura.

Sin doble operación (operación actual): el camión sale a esperar su carga a la ciudad



Con doble operación: espera dentro del terminal y elimina los tramos urbanos en vacío



El viaje de larga distancia Bolivia-Puerto se realiza con carga en ambos casos; la doble operación solo elimina el desplazamiento urbano en vacío (puerto-ciudad-puerto).

— viaje con carga — tramo urbano en vacío — tramo urbano evitado por la doble operación

Figura 2.7: Mecanismo de la doble operación. Sin doble operación, el camión de exportación, tras dejar su carga, sale del terminal a esperar su contenedor de importación en un estacionamiento de la ciudad y vuelve a entrar a retirarlo, un trayecto urbano en vacío puerto-ciudad-puerto. Con doble operación, el mismo camión espera dentro del recinto (PORT PARKING) y retira la importación en la misma visita, eliminando ese desplazamiento urbano en vacío. El viaje de larga distancia Bolivia-Puerto se realiza con carga en ambos casos.

La reducción de viajes en vacío tiene un efecto directo sobre las externalidades ambientales del transporte: menos kilómetros recorridos implican menor consumo de combustible y menores emisiones de gases de efecto invernadero. Esta relación ha sido abordada explícitamente en el ámbito portuario por Schulte et al. (Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez & Voß, 2017), quienes proponen un esquema de citas con colaboración para reducir las emisiones de los camiones vacíos asociados a la operación de terminales, cuantificando el CO₂ evitado. La doble operación, al eliminar el desplazamiento urbano en vacío, se inscribe en esta misma línea de mitigación.

Para cuantificar las emisiones evitadas se requiere un factor que traduzca los kilómetros recorridos en CO_2 . La literatura de transporte de carga ha mostrado que ese factor depende fuertemente del estado de carga del vehículo: un camión cargado consume más combustible y emite más por kilómetro que uno vacío. Demir, Bektaş y Laporte (Demir, Bektaş & Laporte, 2011) comparan los principales modelos de emisión para transporte de carga por carretera y evidencian la sensibilidad de las emisiones a la carga, la velocidad y la pendiente. En esta tesis, la estimación del CO_2 evitado por la doble operación se apoya en factores de emisión publicados diferenciados por estado de carga (vacío y cargado), cuya aplicación se detalla en el Capítulo 3.

2.4. Simulación de eventos discretos en sistemas logísticos portuarios

2.4.1. Fundamentos de la simulación de eventos discretos

La simulación de eventos discretos (SED) es un enfoque de modelación que representa la evolución de un sistema a través de cambios de estado que ocurren en instantes discretos en el tiempo, asociados a la ocurrencia de eventos (Law, 2015, sec. 1.3, p. 6). En este marco, el sistema permanece inalterado entre eventos consecutivos y su dinámica se describe mediante la secuencia temporal de dichos cambios de estado.

Su uso se justifica porque la mayoría de los sistemas reales son demasiado complejos para evaluarse de forma analítica y deben estudiarse mediante simulación (Law, 2015, p. 1), condición que en los sistemas logístico-portuarios, con colas, recursos de capacidad finita y procesos asincrónicos, se cumple con particular intensidad.

Desde una perspectiva estructural, los modelos de SED se construyen a partir de los siguientes elementos fundamentales (Law, 2015, sec. 1.3.2, p. 9):

- **Entidades**, que representan los objetos dinámicos del sistema y que pueden poseer atributos que condicionan su comportamiento.
- **Recursos**, que corresponden a capacidades limitadas que prestan servicio a las entidades y cuya disponibilidad condiciona la operación del sistema.

- **Estado del sistema**, definido como el conjunto mínimo de variables necesarias para describir completamente la situación del sistema en un instante dado.
- **Eventos**, entendidos como puntos en el tiempo en los cuales el estado del sistema cambia como resultado de la ocurrencia de alguna acción, como llegadas, inicios o términos de servicio.
- **Lógica de control**, que define las reglas de interacción entre entidades y recursos, así como los mecanismos de priorización, asignación y secuenciamiento.

La SED representa la incertidumbre de los tiempos entre eventos, los tiempos de servicio y las decisiones operativas, y permite evaluar cambios en la operación sin intervenir el sistema real, aislando el efecto de cada política sobre los indicadores de desempeño (Law, 2015, sec. 4.3). Para estimar indicadores en régimen estacionario se descarta el transitorio inicial mediante un período de calentamiento (*warm-up*) determinado empíricamente (Law, 2015, sec. 9.5.1).

El modelo de esta tesis se implementa en SimPy, una biblioteca de simulación de eventos discretos de código abierto para Python basada en procesos: cada camión es un proceso que solicita y libera recursos de capacidad finita (portones, estacionamientos), y toda la lógica de ruteo y de doble operación queda expresada en código versionable y reproducible.

2.4.2. Indicadores de desempeño en simulación portuaria

La evaluación del modelo se basa en estimar medidas de desempeño a partir de la trayectoria del sistema simulado, que Law agrupa en promedios sobre entidades y promedios sobre el tiempo (Law, 2015, cap. 1). Los indicadores de esta investigación, instancias de esos estimadores aplicadas al sistema terrestre (Law, 2015, ap. 1B), son:

- **Camiones en una zona** (ciudad de Arica, antepuerto ZEAP): número medio de entidades en el subsistema. Es el indicador principal de congestión urbana.
- **Longitud de cola** en los accesos: número medio de camiones en espera.
- **Utilización de recursos** (portones, estacionamiento de la ZEAP): fracción media de ocupación.

- **Dwell time del contenedor:** tiempo de permanencia, de importación y de exportación.
- **Desplazamientos urbanos en vacío evitados** por la doble operación (sustenta H4).
- **Kilómetros recorridos** (totales y en vacío) y **emisiones de CO₂ evitadas**, estimadas con un factor de emisión dependiente del estado de carga del vehículo (Demir, Bektaş & Laporte, 2011; Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez & Voß, 2017) (sustenta H5).

La formulación matemática de todos estos indicadores se detalla en el Capítulo 3.

2.4.3. Análisis estadístico del input en modelos de simulación

La construcción de un modelo de simulación requiere representar la variabilidad de los procesos reales mediante modelos probabilísticos, etapa denominada *input analysis* que condiciona directamente la validez del output (Law, 2015). Siguiendo a Law, comprende tres actividades: formular familias de distribuciones candidatas, estimar sus parámetros a partir de datos empíricos y evaluar el ajuste mediante pruebas de bondad de ajuste como las de Kolmogorov-Smirnov y chi-cuadrado (Law, 2015, cap. 6). Los procesos de llegada tipo Poisson homogéneo, relevantes para los interarribos de naves, se tratan en la sección 6.12.1 de Law (Law, 2015, sec. 6.12.1).

En sistemas logístico-portuarios, las llegadas observadas son inducidas por procesos de nivel superior, como la programación de naves y la generación de contenedores, y no completamente exógenas. Por ello, el input se aborda en dos niveles: la caracterización de las tasas de llegada a los nodos y la modelación de la demanda inducida por las recaladas, que constituye la causa estructural de los flujos de camiones. Law advierte que este tipo de situaciones requiere modelar explícitamente el proceso generador subyacente, en lugar de ajustar distribuciones marginales de forma aislada, ya que estas pueden no capturar la estructura temporal y causal del sistema (Law, 2015). La parametrización concreta de las distribuciones se presenta en el Capítulo 3.

2.4.4. Simulación como herramienta de evaluación de políticas operativas

Una de las principales fortalezas de la simulación de eventos discretos es evaluar configuraciones operativas alternativas sin intervenir el sistema real, comparando escenarios y aislando el efecto de cada política sobre los indicadores de desempeño (Law, 2015, cap. 10). Como los resultados son realizaciones de un proceso estocástico, la comparación entre escenarios requiere intervalos de confianza para la diferencia de medias, más que la simple diferencia de promedios observados (Law, 2015, cap. 10).

La elección del estadístico depende del diseño. Cuando los escenarios se ejecutan con muestras independientes, Law recomienda el intervalo de dos muestras con la aproximación de Welch-Satterthwaite para los grados de libertad (Law, 2015, sec. 10.2.2); cuando se ejecutan con las mismas semillas (números aleatorios comunes, CRN), las observaciones quedan apareadas réplica a réplica y corresponde el intervalo pareado (*paired-t*), más potente porque elimina la varianza entre semillas (Law, 2015, sec. 10.2.1). En esta investigación, el intervalo de Welch se emplea para validar la demanda contra los datos de 2022, y el intervalo pareado para comparar los modelos BASE, ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO, que comparten semillas; con ese mismo criterio pareado se identifica el nivel crítico de adopción de la doble operación. Las fórmulas y su aplicación se detallan en el Capítulo 3.

2.5. Estado del arte en simulación portuaria y logística terrestre

2.5.1. Aplicaciones de SED en terminales portuarios

La simulación de eventos discretos ha sido ampliamente utilizada para analizar operaciones dentro de terminales de contenedores. Diversos estudios la han aplicado al diseño de patios, a la evaluación de capacidad de *gates*, a la gestión de colas, a la programación de equipos y a la comparación entre configuraciones operativas (Cartenì & De Luca, 2012; Fajar, Sarno & Fauzan, 2018; Pulido-Rojano, García & Valencia, 2022). En estos trabajos, el terminal suele modelarse como un sistema con recursos finitos y flujos he-

terogéneos, donde la interacción entre llegadas, atención y almacenamiento determina el desempeño global.

Cartenì y De Luca (Cartenì & De Luca, 2012), por ejemplo, muestran que la simulación es útil para comparar configuraciones tácticas y estratégicas de terminales, utilizando indicadores como tiempos de espera, utilización de recursos y niveles de congestión. Otros trabajos, como los de Fajar et al. (Fajar, Sarno & Fauzan, 2018), emplean modelos de simulación para contrastar distintos enfoques analíticos sobre flujos portuarios, mientras que Pulido-Rojano et al. (Pulido-Rojano, García & Valencia, 2022) analizan la respuesta del terminal frente a cambios operativos específicos.

En conjunto, esta línea de literatura confirma que la SED es una herramienta consolidada para estudiar subsistemas internos del terminal. Sin embargo, en muchos casos el foco permanece concentrado en el recinto portuario y no se extiende a la red terrestre que lo conecta con su hinterland.

2.5.2. Simulación de *gates*, patios y congestión terrestre

Una segunda línea de investigación se concentra en la interacción entre el terminal y sus accesos terrestres, especialmente en la gestión de *gates*, patios de apoyo y congestión vehicular. En estos estudios, la simulación se utiliza para analizar cómo la variabilidad en las llegadas de camiones y la capacidad limitada de los puntos de atención afectan el desempeño del sistema (Neagoe, Hvolby, Taskhiri & Turner, 2021; Rusgiyarto, Sjafruddin, Frazila & Suprayogi, 2017).

Neagoe et al. (Neagoe, Hvolby, Taskhiri & Turner, 2021) evalúan iniciativas orientadas a reducir congestión en entornos portuarios, utilizando comparaciones entre escenarios con reglas operativas distintas. Rusgiyarto et al. (Rusgiyarto, Sjafruddin, Frazila & Suprayogi, 2017), por su parte, emplean simulación para estudiar configuraciones de patios externos y flujos de camiones, mostrando que la localización y gestión de nodos de apoyo pueden modificar de manera importante la presión sobre el terminal.

Estos trabajos amplían el foco desde el terminal hacia su interfaz terrestre, pero frecuentemente mantienen el análisis dentro de un entorno portuario relativamente acotado. En muchos casos, la red terrestre más extensa, la frontera o el carácter transfronterizo del corredor no forman parte explícita del sistema modelado.

2.5.3. Literatura sobre backhauling, antepuertos y buffers logísticos

La literatura sobre coordinación de flujos terrestres y reducción de viajes vacíos ha abordado con particular interés estrategias de *backhauling* o doble operación, así como el uso de nodos intermedios de apoyo, tales como *dry ports*, antepuertos y buffers logísticos (Caballini, Sacone & Saeednia, 2016; Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020; Roso & Lumsden, 2009; Nguyen & Notteboom, 2019).

En el caso del *backhauling*, los estudios se han orientado principalmente a demostrar que la coordinación entre movimientos de importación y exportación permite reducir desplazamientos improductivos y mejorar la eficiencia global del sistema vehicular. Caballini y colaboradores (Caballini, Sacone & Saeednia, 2016; Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020) analizan este tipo de estrategias en sistemas portuarios, destacando el potencial de una mejor asignación de camiones y contenedores. Caballini et al. (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020) emparejan contenedores de importación y exportación en terminales con sistema de citas y reportan reducciones de viajes en vacío de hasta un 33,79 %; modelan la cuota de doble operación, esto es la proporción de camiones que realiza el ciclo doble, como factor de diseño con niveles del 20 % y del 95 %, y muestran que el beneficio alcanzable depende de la proporción de embarcadores dispuestos a compartir camión. El nivel de adopción es, por tanto, una variable de política y no un parámetro del terminal. Una línea más reciente vincula explícitamente la reducción de viajes en vacío con la disminución de emisiones: Schulte et al. (Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez & Voß, 2017) cuantifican el CO₂ evitado mediante sistemas de citas con colaboración a nivel de terminal, y Bustos-Coral y Costa (Bustos-Coral & Costa, 2022) optimizan el ruteo de flota heterogénea reduciendo los desplazamientos improductivos. Estos enfoques, sin embargo, operan a escala de terminal o de ruteo de flota, sin integrarse con un antepuerto regulador sobre un corredor transfronterizo.

Por otra parte, la literatura sobre *dry ports* y nodos terrestres intermedios ha subrayado la importancia de estas infraestructuras como extensiones operativas del puerto hacia el hinterland (Roso & Lumsden, 2009; Nguyen & Notteboom, 2019; Caballini, Ghiara & Gommellini, 2025). Estos nodos pueden contribuir a redistribuir carga, desacoplar procesos y reducir presión sobre el recinto portuario. No obstante, buena parte de esta

literatura tiene un carácter conceptual, estratégico o normativo, y no siempre desarrolla modelos operativos detallados sobre la dinámica concreta de camiones, colas y reglas de acceso.

2.5.4. Síntesis comparativa de la literatura

La Tabla 2.1 compara los estudios más cercanos a esta investigación. El eje que mejor la distingue es el objeto que regula el nodo intermedio: mientras la literatura de *dry ports* y patios extraportuarios gestiona el almacenamiento y la consolidación de contenedores, esta tesis modela un antepuerto que regula el flujo y la espera de camiones. La comparación deja fuera la literatura metodológica de simulación (p. ej. Law (Law, 2015)), que constituye el sustento de método y no un caso comparable.

Dos hallazgos emergen. Primero, los tres elementos que articula esta tesis existen en la literatura. La simulación de un antepuerto o patio de estacionamiento que regula el flujo de camiones para descongestionar la interfaz puerto-ciudad constituye, de hecho, el antecedente más cercano: ha sido abordada para dimensionar la capacidad de un patio de camiones en un puerto urbano (Yıldırım, Aydın & Gökkuş, 2022) y para evaluar el impacto de una instalación de estacionamiento sobre la congestión del *hinterland* (Benedecti, Durski Silva & Alves da Costa, 2026; Benedecti, Durski Silva & da Costa, 2025), además de los sistemas de citas y *pre-gates* a nivel de terminal (Pereira, Lopes, Martins, Macedo & Teixeira, 2024; Neagoe, Hvolby, Taskhiri & Turner, 2021; Bett, Ali, Gheith & Eltawil, 2024). Por su parte, los *dry ports* sobre el corredor están bien estudiados, pero orientados a contenedores (Roso & Lumsden, 2009; Nguyen & Notteboom, 2019; Caballini, Ghiara & Gommellini, 2025; Yıldırım, 2023), y la doble operación se ha abordado casi siempre mediante optimización (Caballini, Sacone & Saeednia, 2016; Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020; Yu, Feng, He & Liu, 2024; Islam & Olsen, 2014).

Segundo, ningún trabajo integra los tres elementos en un mismo modelo ni examina su interacción. Frente al antecedente más cercano (Yıldırım, Aydın & Gökkuş, 2022; Benedecti, Durski Silva & Alves da Costa, 2026), esta investigación se distingue en cuatro aspectos: (i) modela el antepuerto sobre un corredor terrestre transfronterizo (frontera Chile-Bolivia), y no un único puerto urbano; (ii) evalúa el antepuerto como una política regulatoria comparada estadísticamente, con y sin regulación obligatoria, más

allá del dimensionamiento de capacidad; (iii) examina la interacción entre el antepuerto y la doble operación, esto es, si la presencia del antepuerto reduce el nivel de adopción de la doble operación a partir del cual esta constituye una mejora significativa; y (iv) cuantifica, como co-beneficio, la reducción de viajes en vacío y de emisiones de CO₂ asociada a la doble operación, una dimensión ausente en la literatura de antepuertos centrada en la congestión (Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez & Voß, 2017; Bustos-Coral & Costa, 2022). Esa integración y esa interacción, sintetizadas en la última fila de la tabla, constituyen el aporte de esta investigación.

Cuadro 2.1: Comparación de la literatura más cercana según nivel de sistema, objeto regulado, método, problema abordado y emisiones.

Referencia	Nivel de sistema				Objeto regulado		Método			Problema abordado			
	Term.	Antep.	Corr.	Front.	Cam.	Cont.	Opt.	SED	Conc.	Cong.	Regul.	Doble	Emis.
<i>Instalaciones y flujo de camiones: pre-gate, citas, estacionamiento, doble operación</i>													
Pereira et al. (Pereira, Lopes, Martins, Macedo & Teixeira, 2024)	✓	✓			✓			✓		✓			
Neagoe et al. (Neagoe, Hvolby, Taskhiri & Turner, 2021)	✓		✓		✓			✓		✓			
Yıldırım et al. (Yıldırım, Aydın & Gökkuş, 2022)		✓			✓			✓		✓	✓		
Benedecti et al. (Benedecti, Durski Silva & Alves da Costa, 2026)		✓	✓		✓			✓		✓	✓		
Bett et al. (Bett, Ali, Gheith & Eltawil, 2024)	✓				✓		✓	✓		✓	✓	✓	
Caballini et al. (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020)	✓		✓		✓		✓			✓	✓	✓	
Schulte et al. (Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez & Voß, 2017)	✓				✓		✓			✓	✓	✓	✓
Bustos-Coral & Costa (Bustos-Coral & Costa, 2022)			✓		✓		✓					✓	✓
Benedecti et al. (Benedecti, Durski Silva & da Costa, 2025)		✓			✓				✓	✓	✓		
Caballini et al. (Caballini, Sacone & Saeednia, 2016)			✓		✓		✓			✓		✓	
Yu et al. (Yu, Feng, He & Liu, 2024)			✓		✓		✓			✓		✓	
Islam & Olsen (Islam & Olsen, 2014)			✓		✓				✓	✓		✓	
<i>Nodos intermedios de contenedores: dry ports y patios extraportuarios</i>													
Rusgiyarto et al. (Rusgiyarto, Sjafruddin, Frazila & Suprayogi, 2017)		✓	✓			✓		✓		✓	✓		
Yıldırım (Yıldırım, 2023)		✓	✓			✓		✓		✓	✓		
Caballini et al. (Caballini, Ghiara & Gommellini, 2025)		✓	✓			✓			✓	✓	✓		
Roso & Lumsden (Roso & Lumsden, 2009)		✓	✓			✓			✓	✓	✓		
Nguyen & Notteboom (Nguyen & Notteboom, 2019)		✓	✓			✓			✓	✓			
Notteboom & Rodrigue (Notteboom & Rodrigue, 2004)		✓	✓			✓			✓				
<i>Simulación de eventos discretos de operaciones internas del terminal</i>													
Carteni & De Luca (Carteni & De Luca, 2012)	✓					✓		✓		✓			
Fajar et al. (Fajar, Sarno & Fauzan, 2018)	✓					✓		✓					
Pulido-Rojano et al. (Pulido-Rojano, García & Valencia, 2022)	✓					✓		✓					
López-González et al. (López-González, Medina-León, González-Angeles, Mendoza-Muñoz & Gil-Samaniego-Ramos, 2020)	✓					✓		✓					
Este estudio	✓	✓	✓	✓	✓			✓		✓	✓	✓	✓

Fuente: elaboración propia a partir de la lectura directa de los estudios; las referencias completas figuran en la Bibliografía.

Categorías: **Nivel de sistema**, Term.: terminal interno; Antep.: antepuerto / nodo intermedio; Corr.: corredor terrestre / *hinterland*; Front.: frontera. **Objeto regulado**, Cam.: camiones; Cont.: contenedores. **Método**, Opt.: optimización; SED: simulación de eventos discretos; Conc.: conceptual / proceso / empírico. **Problema abordado**, Cong.: congestión / espera; Regul.: regulación de flujo; Doble: doble operación / *backhauling*; Emis.: emisiones / impacto ambiental.

2.6. Brecha investigativa y aporte de la tesis

2.6.1. Limitaciones de la literatura existente

La literatura en simulación portuaria presenta una focalización predominante en subsistemas internos del terminal, tales como patio, muelle o *gates*, modelados de manera aislada. Esta aproximación omite la dinámica del sistema terrestre que alimenta y evacua el puerto, donde se originan y propagan fenómenos de congestión y descoordinación. Por otra parte, los estudios sobre *hinterland*, *dry ports* y antepuertos se desarrollan mayoritariamente a nivel conceptual o estratégico, sin modelar explícitamente la operación de camiones, la formación de colas, los tiempos de servicio ni las reglas de acceso que determinan el comportamiento del sistema en la práctica.

Asimismo, la literatura sobre *backhauling* aborda la reducción de viajes vacíos desde una perspectiva de eficiencia vehicular, sin incorporar su interacción con nodos físicos específicos ni su efecto sobre la dinámica de acumulación y regulación de flujo en sistemas portuarios extendidos.

Por último, los pocos estudios que vinculan explícitamente la reducción de viajes en vacío con las emisiones lo hacen a nivel de terminal o de ruteo de flota, sin integrarlo con un antepuerto regulador sobre un corredor transfronterizo (Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez & Voß, 2017; Bustos-Coral & Costa, 2022).

En consecuencia, la literatura existente no ofrece modelos que integren, en un mismo marco operacional, los distintos nodos del sistema terrestre-portuario ni sus interdependencias dinámicas.

2.6.2. Brecha específica para el caso Arica-Bolivia

En el corredor Arica-Bolivia, esta limitación es particularmente evidente. No existen modelos que representen de manera integrada el sistema logístico terrestre-portuario, incorporando simultáneamente frontera, nodos de regulación, infraestructura urbana de apoyo y terminal portuario.

En particular, no se encuentra en la literatura una modelación explícita de la ZEAP como nodo de control de flujo, ni un análisis de su impacto sobre la acumulación de camiones, la congestión urbana o los tiempos de ciclo del sistema.

Tampoco se identifican estudios que analicen la interacción entre políticas de coordinación de flujos, como la doble operación de camiones, y la existencia de nodos intermedios de espera dentro de un sistema transfronterizo.

Esta ausencia de modelación integrada limita la capacidad de evaluar políticas operativas en el sistema logístico asociado al Puerto de Arica.

Dado que la contribución central de esta investigación es un efecto de *interacción* entre dos políticas, conviene situarla también en la literatura de diseño experimental para simulación. Los diseños factoriales 2^k son el instrumento estándar para aislar efectos principales e interacciones en experimentos de simulación (Law, 2015, cap. 12), con desarrollos específicos para el diseño y análisis de experimentos simulados (Kleijnen, 2015; Montgomery, 2017); las guías prácticas del área recomiendan, además, estimar los términos de interacción con réplicas pareadas mediante números aleatorios comunes (Sanchez, Sanchez & Wan, 2020). En la literatura de política de transporte, la combinación de medidas se estudia bajo el concepto de *policy packaging*: paquetes de políticas cuyas componentes se facilitan mutuamente, de modo que el paquete logra efectos que ninguna componente alcanzaría aislada o los logra a un costo de implementación menor (Givoni, Macmillen, Banister & Feitelson, 2013). Esta tesis adopta ambas perspectivas: organiza sus cuatro modelos como un diseño factorial 2×2 con semillas comunes y evalúa la combinación antepuerto-doble operación como un paquete cuya interacción se estima formalmente en el Capítulo 4.

2.6.3. Contribución de esta investigación

Esta investigación aborda esta brecha mediante el desarrollo de un modelo de simulación de eventos discretos del sistema logístico terrestre asociado al Puerto de Arica, calibrado con datos operacionales del año 2022.

La contribución del estudio se estructura en cinco elementos específicos.

Primero, se construye un modelo que representa explícitamente el sistema terrestre-portuario como una red de nodos interdependientes, incluyendo frontera, ZEAP, infraestructura urbana de apoyo, área urbana de Arica y terminal portuario.

Segundo, se modela la ZEAP como un nodo de regulación de flujo, permitiendo evaluar su impacto sobre la acumulación de camiones y la utilización del sistema, en lugar de tratarla como infraestructura pasiva.

Tercero, se incorpora la doble operación de camiones como una política operativa dentro del modelo, analizando su efecto sobre la reducción de viajes improductivos y su interacción con la estructura nodal del sistema.

Cuarto, se evalúan las configuraciones operativas mediante indicadores cuantitativos y comparación estadística de escenarios, permitiendo determinar si las diferencias observadas en desempeño son significativas.

Quinto, se cuantifica el co-beneficio ambiental de la doble operación, estimando la reducción de kilómetros recorridos en vacío en el área urbana y de emisiones de CO₂ mediante factores de emisión dependientes del estado de carga, e integrando así el eje de congestión con el eje ambiental.

En conjunto, la investigación propone una representación operacional integrada del sistema logístico terrestre-portuario de Arica, orientada a la evaluación de políticas de gestión de flujo en un contexto transfronterizo.

Capítulo 3

Metodología

Este capítulo presenta la metodología utilizada para construir, calibrar y validar el modelo de simulación de eventos discretos del sistema logístico terrestre asociado al Puerto de Arica, el antepuerto y el corredor hacia Bolivia. La estructura sigue el enfoque recomendado por (Law, 2015) y separa de forma explícita cuatro niveles de análisis: construcción de inputs, modelación del sistema, implementación y chequeo del modelo, y contraste del output con la realidad.

La demanda inducida por naves constituye el motor principal de la simulación. Por ello, la exposición se organiza desde lo más específico hacia lo más integrador. Primero se construyen los insumos particulares que alimentan el modelo: distribuciones de carga por línea logística, frecuencia de recaladas, reglas temporales de activación y clasificación de variables de entrada. Luego esos insumos se traducen en entidades, flujos, nodos y recursos del sistema, y sobre esa base se presenta la implementación computacional. Solo después de fijar esa estructura se abordan la verificación, la calibración y la validación, para finalmente justificar el *warm-up*, el número de réplicas y el calendario experimental.

La secuencia metodológica aplicada es la siguiente:

- a) Análisis de datos y parámetros de entrada.
- b) Modelación conceptual del sistema.
- c) Construcción del modelo de la operación actual.
- d) Verificación del modelo.

- e) Calibración del modelo.
- f) Validación contra la operación real.
- g) Escenarios de simulación y evaluación de políticas.

En consecuencia, el capítulo se organiza como una cadena causal: primero se define qué información empírica entra al modelo y cómo se formaliza; después se muestra cómo esa información se convierte en una red operacional simulable; y finalmente se evalúa si esa red implementada reproduce, con el nivel de precisión alcanzable en esta tesis, los patrones observados del sistema real.

3.1. Análisis de datos y parámetros de entrada

Esta primera parte fija los elementos más particulares del modelo. El objetivo es dejar claramente establecidos los datos de base, la forma en que se transforma la información observada en demanda por nave y las reglas temporales que convierten esa demanda estructural en generación de camiones dentro del horizonte simulado.

3.1.1. Fuentes de datos y depuración

La fuente principal corresponde a la base **bdAntares**, que contiene registros de eventos asociados al movimiento de camiones y contenedores en el corredor logístico. Estos registros incorporan *timestamps* por evento, permitiendo reconstruir trayectorias, tiempos de espera, tiempos de servicio y secuencias de paso entre nodos.

De forma complementaria, se dispuso de datos de ocupación de ZEAP para 2025. Por corresponder a un período distinto del utilizado en la calibración y no ser homologables en su nivel de desagregación, estos registros se emplearon únicamente como referencia cualitativa durante la construcción del modelo, para orientar la representación de la acumulación y liberación de flujo en el acceso al terminal; no forman parte de los contrastes de validación de la Sección 3.6.2 ni se reportan como tales.

Para los nodos principales del sistema se utilizan, además, los *timestamps* operacionales **IngresoAntepuerto**, **SalidaAntepuertoAPuerto**, **GateInTerminal** y **GateOutTerminal**. Estos hitos permiten construir perfiles de llegadas observadas y tiempos entre etapas para los nodos modelados como *ZEAP_GATE_IN*, *ZEAP_GATE_OUT*, *GATE_IN_NORTE*

y *GATE_OUT_NORTE*, dejando explícito que se trata de proxies operacionales de los puntos de control del modelo.

La depuración de datos considera:

- corrección de inconsistencias temporales;
- eliminación de registros incompletos y duplicados;
- filtrado de outliers operacionales bajo criterios de factibilidad logística;
- homologación de formatos de fecha, identificadores y códigos de evento.

El resultado es una base depurada y trazable para la estimación de parámetros de entrada y la evaluación del desempeño del modelo.

3.1.2. Demanda inducida por naves como motor del modelo

La demanda terrestre se representa como demanda inducida por recalada. Cada nave genera requerimientos de movimiento que deben ejecutarse mediante transporte terrestre, por lo que el calendario de naves y su programa operativo constituyen la causa estructural del flujo de camiones. La Figura 3.1 resume esta cadena, desde el calendario de recaladas hasta las llegadas de camiones inducidas en los nodos; las subsecciones siguientes detallan cada etapa.

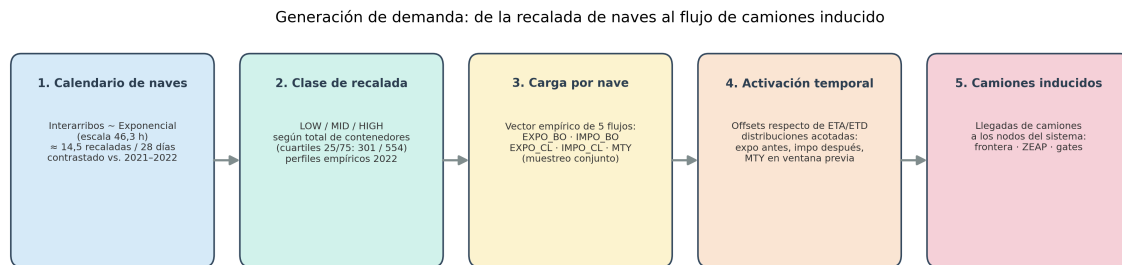


Figura 3.1: Cadena de generación de la demanda inducida por naves: cada recalada se clasifica por intensidad, recibe un vector empírico de carga por flujo y activa camiones en ventanas temporales referidas a la ETA/ETD, induciendo finalmente las llegadas a los nodos del sistema.

El motor de demanda se construye a partir de los registros de **bdAntares** de 2022 mediante el siguiente procedimiento:

- a) agregación, para cada recalada de 2022, del total de contenedores movilizados por línea logística;
- b) depuración de recaladas mal catalogadas, principalmente naves de granel o carga general registradas como operación contenerizada;
- c) clasificación de los movimientos en las cinco líneas logísticas *EXPO_BO*, *IMPO_BO*, *EXPO_CL*, *IMPO_CL* y *MTY*;
- d) ajuste, para cada línea logística, de una distribución de probabilidad al número de contenedores por recalada (Sección 3.1.7).

La parametrización no utiliza un factor de transformación entre TEU y camiones: la carga muestreada para cada nave constituye directamente el número de movimientos que luego se traducen en camiones. Cada nave simulada genera su carga muestreando, de forma independiente por línea logística, la distribución ajustada a 2022, de modo que dos naves nunca presentan exactamente la misma carga. Esta etapa fija la intensidad estructural del sistema antes del ajuste de las dinámicas locales en frontera, ZEAP y gates: primero se determina el flujo terrestre inducido por cada nave y luego se calibra su manifestación en los nodos observados del sistema.

3.1.3. Distribución del tiempo entre llegadas de naves

Para el **tiempo entre llegadas de naves** se adopta una **distribución exponencial** (proceso de Poisson homogéneo), forma estándar para procesos de renovación de arribos (Law, 2015). La forma se seleccionó contrastando cuatro familias candidatas (exponencial, gamma, Weibull y lognormal) sobre la planificación naviera 2021 (Martínez Gundermann & Valenzuela Lanás, 2022), y el **parámetro se recalibró con los datos de recaladas 2022** de **bdAntares**, fijando el valor definitivo en **46,34 horas** ($\approx 14,5$ recaladas por cada 28 días; véase Sección 3.1.7). Un diagnóstico riguroso sobre los datos 2022 muestra que el supuesto de homogeneidad es una **aproximación de primer orden**: la prueba χ^2 semanal rechaza el proceso de Poisson estrictamente homogéneo, limitación que se documenta de forma explícita en esa misma sección.

En la simulación, estos interarribos se muestrean y se acumulan sobre un horizonte con llegadas de 68 días: 20 de *warm-up*, 28 de análisis y 20 de *cool-down*. A continuación, la corrida se prolonga sin nuevas recaladas para observar el vaciado del sistema. De este modo, el número de naves observado en cada corrida emerge directamente del proceso generador. Estas fases temporales (warm-up, horizonte analizado, cool-down y vaciado) se detallan en la Sección 3.7.

3.1.4. Modelación temporal de la demanda inducida

Una vez definida la carga por nave, la activación temporal de camiones se modela respecto de los hitos operacionales de cada recalada, principalmente la llegada estimada de la nave (ETA) y, para los retiros posteriores a descarga, su salida estimada (ETD). En términos generales, el modelo usa offsets temporales del tipo

$$\Delta t = t_{\text{camión}} - \tau_{\text{nave}},$$

donde τ_{nave} corresponde a la ETA o a la ETD según el flujo considerado.

La generación se representa mediante distribuciones acotadas alrededor de esos hitos (beta reescalada sesgada o triangular, según disponibilidad de información), y no mediante una tasa única y constante para todo el horizonte. Para las exportaciones, los camiones se activan antes de la ETA dentro de ventanas acotadas, de modo que la mayor densidad de arribos se concentra algunos días previos a la nave, pero sin permitir adelantos extremos fuera del rango operacional definido. Para las importaciones chilenas, los retiros se activan después de la ETA usando una lógica análoga. En el caso de *IMPO_BO*, la lógica operacional es aún más restrictiva: la asignación y el llamado al camión se coordinan en función del proceso posterior a la descarga, por lo que su activación efectiva queda referida a la ETD y a los tiempos de disponibilidad de la carga. Finalmente, los movimientos *MTY* se concentran en una ventana previa a la ETA, también acotada, para asegurar que los contenedores vacíos lleguen al terminal antes de la atención de la nave.

Esta estructura temporal no proviene de una estimación estadística directa sobre microdatos completos de despacho camión por camión, porque esa trazabilidad no está disponible de forma homogénea para todos los flujos. Por ello, la forma y posición de

estas distribuciones acotadas se definieron por juicio experto, buscando representar un patrón operacional plausible: acumulación previa de exportaciones antes del arribo de la nave, retiro posterior de importaciones una vez disponible la carga y concentración de vacíos dentro de la ventana previa de preparación del embarque. Estas distribuciones fueron además contrastadas durante la visita a TPA realizada en el marco de esta tesis y validadas cualitativamente por operadores del puerto y por el área de Excelencia Operacional. En consecuencia, el modelo incorpora heterogeneidad temporal por flujo y por recalada, pero reconoce explícitamente que esta capa de detalle responde a una formalización operacional experta que luego debe ser validada indirectamente a través de los perfiles de llegada emergentes en los nodos observados del sistema.

3.1.5. Generación computacional del calendario de naves

Una vez definidas las distribuciones de carga por línea logística (Sección 3.1.7), la frecuencia esperada de recaladas (14,50 naves en 28 días) y la distribución de interarribos (Exponencial con escala 46,34 horas, recalibrada con datos 2022; véase Sección 3.1.7), el calendario se genera mediante un algoritmo reproducible que opera en los siguientes pasos:

- a) **Inicialización de semilla:** Se especifica una semilla de números aleatorios S (p. ej., $S = 1001, 1002, \dots, 1050$ para los experimentos comparativos). Esta semilla fija completamente el comportamiento del generador aleatorio, de modo que dos corridas con la misma semilla producen idéntico calendario de naves.
- b) **Generación de interarribos:** Se muestrean tiempos entre llegadas desde la distribución Exponencial(46,34 horas):

$$\Delta t_1, \Delta t_2, \dots \sim \text{Exp}(46,34 \text{ horas})$$

Esta secuencia de tiempos entre naves es aleatoria estadísticamente, pero completamente determinada por la semilla inicial.

- c) **Cálculo de ETA acumuladas:** Se construye la serie de llegadas estimadas como

sumas acumuladas:

$$ETA_1 = \Delta t_1 \quad (3.1)$$

$$ETA_2 = ETA_1 + \Delta t_2 \quad (3.2)$$

$$\vdots \quad (3.3)$$

El muestreo se mantiene mientras la siguiente ETA permanezca dentro del horizonte con llegadas del experimento (20 días de *warm-up* + 28 días de análisis + 20 días de *cool-down*). Cuando una nueva ETA excede el día 68, el algoritmo detiene la generación de recaladas. Luego la simulación continúa entre 10 y 40 días adicionales sin nuevas naves (según el modelo) para observar el vaciado del sistema. En consecuencia, el número de recaladas por corrida emerge del propio proceso y puede variar entre réplicas.

- d) **Muestreo de carga por recalada:** La nave genera su carga muestreando, de forma independiente por línea logística, la distribución ajustada a 2022 (Sección 3.1.7), lo que define los movimientos *EXPO_BO*, *IMPO_BO*, *EXPO_CL*, *IMPO_CL* y *MTY* de la recalada.
- e) **Restricción operacional de puerto:** Las ETA representan el instante de arribo programado a rada, pero la atención efectiva se encuentra restringida por una única posición de servicio para naves. Por ello, si una recalada arriba cuando el puerto aún está ocupado, su inicio real de atención y su ETD efectivo se desplazan por cola. Esta distinción es operacionalmente relevante porque *IMPO_BO* se asigna y llama a retiro usando el zarpe efectivo de la nave y no un ETD fijado *ex ante*.

A modo de ilustración, la Tabla 3.1 muestra las primeras doce recaladas de un calendario generado con la semilla $S = 1001$. Cada fila corresponde a una nave ($N = 1, 2, \dots, n$), con su ETA y ETD en días desde el inicio del horizonte, su clase de intensidad y la carga muestreada de forma independiente para cada línea logística. El ETD resulta de sumar la estadía en puerto a la ETA (24, 36 y 48 horas para las clases LOW, MID y HIGH) y se desplaza por cola cuando la única posición de servicio está ocupada. La

columna final reporta el total de contenedores inducidos por la recalada, que el modelo traduce luego en llegadas de camiones a los nodos del sistema.

N	ETA (d)	ETD (d)	Clase	EXPO_BO	IMPO_BO	EXPO_CL	IMPO_CL	MTY	Total
1	1,21	3,21	HIGH	55	341	47	29	234	706
2	1,25	4,71	MID	81	156	33	29	116	415
3	1,57	6,21	MID	67	134	65	20	165	451
4	3,38	7,71	MID	98	102	7	11	174	392
5	4,28	9,71	HIGH	15	281	88	42	85	511
6	4,52	11,71	HIGH	90	336	56	23	131	636
7	8,60	12,71	LOW	28	165	9	8	19	229
8	9,01	14,21	MID	51	163	75	26	77	392
9	9,23	15,71	MID	122	155	11	26	19	333
10	10,28	17,21	MID	86	138	60	20	167	471
11	10,58	18,71	MID	57	162	16	26	113	374
12	14,48	20,71	HIGH	148	108	29	35	240	560
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$n = 45$	66,44	68,21	MID	51	223	44	24	11	353

Cuadro 3.1: Ejemplo de calendario de naves generado con la semilla $S = 1001$ (primeras doce recaladas de un total de 45 en el horizonte). La ETA y el ETD se expresan en días desde el inicio del horizonte; la clase de intensidad (LOW/MID/HIGH) se asigna según la carga total de la recalada y determina la estadía en puerto. Las cargas por línea logística se muestrean de las distribuciones calibradas sobre **bdAntares 2022** (Tabla 3.3). Otra semilla produce un calendario distinto en número de recaladas, ETA/ETD y cargas, manteniendo la misma estructura probabilística.

3.1.6. Reproducibilidad y réplicas independientes

La generación del calendario mediante una semilla hace que el proceso sea **completamente reproducible**: cualquier persona con la misma semilla regenera idéntico calendario. El estudio emplea **50 semillas comunes (1001–1050)** para la validación y los experimentos comparativos entre modelos, y las primeras **30 (1001–1030)** para la determinación del *warm-up*, suficientes para el método gráfico de Welch (Law, 2015, pp. 514–515), para los intervalos de confianza y para la comparación entre modelos. Cada semilla produce un calendario diferente en número de recaladas, ETA específicas

y cargas muestreadas; lo que se mantiene estable es la estructura probabilística subyacente: misma distribución de interarribos y mismas distribuciones de carga por línea logística. Según Law (2014, Sec. 9.4.1), este enfoque de réplicas independientes es la forma estándar para construir intervalos de confianza sobre métricas de desempeño: cada semilla genera una realización estadísticamente independiente del proceso generador, y el promedio de varias réplicas produce estimadores insesgados de menor varianza que una sola corrida larga.

Adicionalmente, al mantener las mismas semillas en todos los modelos comparados (BASE, ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO, con sus niveles de adopción de la doble operación), se aplica el principio de *Common Random Numbers* (CRN) de Law (2014, Sec. 11.2). CRN reduce la varianza del estimador de diferencia entre modelos, permitiendo una comparación más precisa de alternativas operacionales bajo condiciones estocásticas equivalentes (mismo generador aleatorio, distintos parámetros operacionales).

3.1.7. Recalibración de interarribos y distribución de cargas con datos Antares 2022

El análisis de los registros históricos de recaladas en **bdAntares** para el año 2022 permitió recalibrar el generador de naves sobre una base empírica directa del mismo año modelado. Se identificaron 189 recaladas válidas en 2022, construyendo la serie completa de tiempos entre llegadas consecutivas. La media de interarribos resultó 46,34 horas con desviación estándar 34,24 horas. El coeficiente de variación calculado sobre los 157 interarribos estrictamente positivos fue $CV_{\text{pos}} = 0,541$, valor considerablemente inferior al teórico 1,0 del proceso de Poisson homogéneo (HPP). Los 31 interarribos iguales a cero (de un total de 188) corresponden a fechas con más de una recalada registrada en el mismo día y son artefactos de resolución diaria en la columna ETA, no llegadas simultáneas reales. La Tabla 3.2 resume estos estadísticos.

Estadístico	Valor
Recaladas válidas 2022	189
Interarribos consecutivos	188
Interarribos iguales a cero (artefactos de resolución diaria)	31
Interarribos estrictamente positivos	157
Media de interarribos	46,34 h
Desviación estándar	34,24 h
Coefficiente de variación (positivos)	0,541
Coefficiente de variación teórico (HPP)	1,000
Escala Exponencial adoptada	46,34 h
Frecuencia media equivalente	$\approx 14,5$ recaladas / 28 días

Cuadro 3.2: Estadísticos de recalibración de los interarribos de naves con datos de **bdAntares** 2022. El coeficiente de variación de los interarribos positivos (0,541) es inferior al valor teórico 1,0 del proceso de Poisson homogéneo, lo que indica que las recaladas son más regulares que las de un proceso de Poisson.

Diagnóstico de HPP. Para examinar la validez del supuesto de proceso de Poisson homogéneo sobre las recaladas 2022 se realizaron dos contrastes complementarios:

- **Chi-cuadrado semanal:** las 189 recaladas se agruparon en 52 semanas y se contrastó la frecuencia semanal observada contra la distribución de Poisson con media $\hat{\lambda} = 3,63$ naves/semana. El estadístico obtenido fue $\chi^2 = 33,9$ con 5 grados de libertad ($p = 0,000$), rechazando la hipótesis de HPP en la escala semanal: la varianza semanal es menor que la media (subdispersión), es decir, las recaladas son más regulares que las de un proceso de Poisson.
- **KS sobre interarribos continuos:** se ajustaron tres distribuciones candidatas (Exponencial, Weibull, Gamma) y se evaluó la bondad de ajuste mediante el test de Kolmogorov-Smirnov. Ninguna fue aceptada: Exponencial ($D = 0,2393$, $p < 0,001$), Weibull ($D = 0,2063$, $p < 0,001$), Gamma ($D = 0,2247$, $p < 0,001$).

Estos resultados confirman que el proceso real de llegada de naves exhibe subdispersión semanal (varianza menor que la media) y un CV de interarribos inferior a 1,0; es decir,

las recaladas son más regulares que las de un proceso de Poisson. La Figura 3.2 resume el diagnóstico completo.

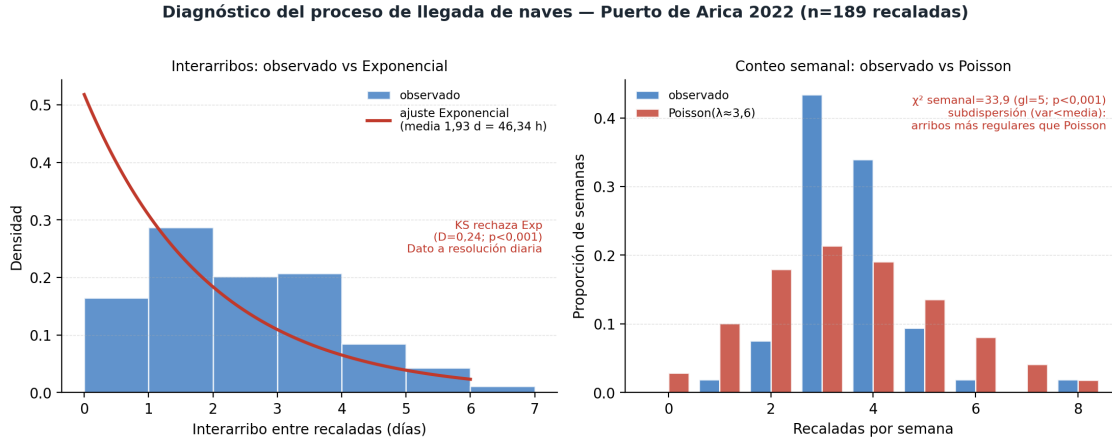


Figura 3.2: Diagnóstico del proceso de llegada de naves en 2022 ($n=189$ recaladas). Panel izquierdo: histograma de interarribos entre recaladas frente al ajuste Exponencial de media 1,93 d (= 46,34 h); el test KS rechaza la Exponencial ($D = 0,24$, $p < 0,001$), en parte por la resolución diaria del dato. Panel derecho: distribución del número de recaladas por semana frente a Poisson; el test chi-cuadrado semanal rechaza HPP ($\chi^2 = 33,9$, $gl=5$, $p < 0,001$), pero con *subdispersión* (varianza semanal menor que la media): las recaladas son más regulares que las de un proceso de Poisson. El modelo adopta HPP con escala 46,34 horas como aproximación de primer orden, documentando esta limitación.

Supuesto adoptado y limitación documentada. A pesar del rechazo estadístico, el modelo mantiene el supuesto de proceso exponencial homogéneo por razones de parsimonia y disponibilidad de datos. Como las recaladas reales son más regulares que las de un proceso de Poisson (subdispersión), la Exponencial homogénea introduce más variabilidad en las llegadas que la observada; en ese sentido es un supuesto conservador, ya que tiende a generar agrupamientos de naves más marcados que los reales y, con ellos, picos de congestión no inferiores a los del proceso verdadero. Capturar esa regularidad requeriría un proceso de renovación de menor variabilidad (por ejemplo, interarribos Erlang o Gamma con forma mayor que uno) o un calendario basado en itinerarios de línea, calibrado con una serie de varios años y resolución intradiaria, información no disponible de forma homogénea en esta tesis. El parámetro definitivo $1/\lambda = 46,34$ horas

captura la frecuencia media anual de 2022 y queda documentado como aproximación de primer orden, sujeta a recalibración cuando se disponga de una serie temporal más amplia.

Distribución de cargas por línea logística. Además del interarribo, la recalibración abarcó la distribución de cargas de cada línea logística. Para cada flujo se analizó la distribución del número de contenedores por recalada usando **bdAntares** 2022, evaluando Poisson versus Binomial Negativa (NegBin) mediante:

- **Criterio de selección:** si la varianza observada supera la media, la sobredispersión sugiere NegBin; si no, Poisson es la opción más parsimoniosa.
- **Test chi-cuadrado discreto:** se agruparon observaciones en bins con frecuencia esperada ≥ 5 y se contrastó contra la distribución candidata.
- **Test KS discreto:** se evaluó la bondad de ajuste sobre la PMF empírica.

La Tabla 3.3 resume las distribuciones seleccionadas y sus parámetros. En todas las líneas la varianza observada superó a la media, por lo que se seleccionó la Binomial Negativa, contrastada mediante los tests de chi-cuadrado y Kolmogorov-Smirnov.

Línea logística	Modelo	Media (cont./recalada)	Parámetros
EXPO_BO	Binomial Negativa	74,9	$r = 1,80, p = 0,023$
IMPO_BO	Binomial Negativa	205,9	$r = 7,08, p = 0,033$
EXPO_CL	Binomial Negativa	35,9	$r = 2,14, p = 0,056$
IMPO_CL	Binomial Negativa	20,7	$r = 4,27, p = 0,171$
MTY	Binomial Negativa	97,0	$r = 1,63, p = 0,017$

Cuadro 3.3: Distribución seleccionada para la carga de cada línea logística, calibrada sobre **bdAntares** 2022. Para la Binomial Negativa se reportan los parámetros r (número de éxitos) y p (probabilidad de éxito).

Con estos modelos de carga calibrados y el interarribo recalibrado a 46,34 horas, el generador de demanda por nave queda completamente parametrizado sobre datos 2022. La validación de esta parametrización se presenta en la Sección 3.6.2.

3.1.8. Clasificación de variables de entrada

Las variables de entrada se organizan en tres niveles:

- **Generación estructural:** calendario de naves, ETA/ETD y demanda por recalada.
- **Manifestación observable:** llegadas y ocupaciones en nodos observados (frontera, ZEAP, gates).
- **Parámetros operacionales:** tiempos de servicio, capacidades, reglas de ruteo y permanencias.

3.2. Modelación conceptual del sistema

Una vez contruidos los inputs, el siguiente paso es definir cómo esos parámetros se manifiestan dentro del sistema: la estructura que conecta entidades, flujos, nodos y recursos para convertir la demanda inducida por las recaladas en un proceso logístico terrestre completo.

3.2.1. Entidades, flujos, nodos y recursos

El modelo representa las entidades camión, contenedor y nave, y considera cinco líneas logísticas principales: EXPO_BO, IMPO_BO, EXPO_CL, IMPO_CL y MTY.

Cada flujo compite por capacidad en nodos compartidos, por lo que la dinámica emergente depende de la interacción entre demanda inducida y restricciones operacionales. Además de los cinco flujos contenerizados, el modelo incorpora el flujo DUMMY, que representa los camiones de carga no contenerizada (granel sólido, cisterna y otras cargas especiales) que también operan en el corredor. Aunque no son el objeto del análisis, comparten recursos del sistema (frontera, ZEAP, tramo urbano y accesos) y, por tanto, condicionan la presión operacional y la utilización real de la infraestructura.

Estos flujos circulan sobre una red de nodos que incluye la frontera, la ZEAP, los estacionamientos y depósitos urbanos, los accesos del terminal (Gate-In y Gate-Out, norte y sur), el patio portuario y los nodos de origen y destino, cuya estructura general y relaciones funcionales se resumen en la Figura 3.3.

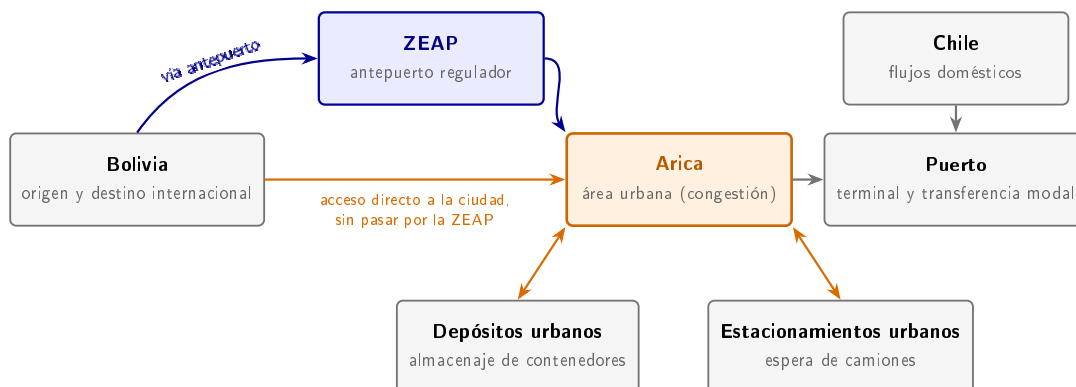


Figura 3.3: Representación simplificada de los principales nodos del sistema logístico modelado y sus flujos.

Cada línea logística sigue un camino nominal por esa red de nodos, que define la secuencia de accesos, colas y recursos que atraviesa un camión desde que ingresa al sistema hasta que sale. La Tabla 3.4 detalla ese recorrido para cada flujo. La distinción entre acceso Norte y Sur del terminal refleja la regla operacional de gates: las cargas que llegan desde la ZEAP o desde Chile ingresan por el Norte, mientras que los retiros de importación y los movimientos internos usan el Sur.

Línea logística	Camino nominal (secuencia de nodos)
EXPO_BO	Bolivia → frontera → ZEAP → Gate-In Norte → puerto (<i>port ops</i>) → Gate-Out Sur → estacionamiento urbano o Arica (espera del contenedor de importación)
IMPO_BO	Estacionamiento urbano o Arica (espera) → Gate-In Sur → puerto (<i>port ops</i> , retira la importación) → Gate-Out Norte → frontera → Bolivia
EXPO_CL	Chile → Gate-In Norte → puerto (<i>port ops</i> , deja el contenedor en patio de exportación) → Gate-Out Sur → Chile
IMPO_CL	Chile → Gate-In Sur → puerto (<i>port ops</i> , retira el contenedor) → Gate-Out Norte → depósito urbano (Patios Y) → Chile
MTY	Depósito urbano (Patios Y) → Gate-In Sur → puerto (<i>port ops</i> , deposita el vacío en patio de exportación) → retorno al depósito

Cuadro 3.4: Camino nominal de cada línea logística por los nodos del sistema. Los flujos EXPO_BO e IMPO_BO corresponden a los tramos de ida y de retorno de un mismo camión boliviano: entrega la exportación, espera en la ciudad y regresa con la importación; la doble operación busca encadenar ambos tramos dentro del recinto portuario y evitar la espera urbana.

3.3. Construcción del modelo de la operación actual

Definida la lógica conceptual, el siguiente paso metodológico es traducirla a un modelo de simulación ejecutable que reproduzca la **operación actual** del sistema logístico-portuario de Arica. Este modelo constituye la línea base (BASE) sobre la que luego se evalúan las intervenciones. La implementación se realiza en SimPy y se instrumenta para dejar trazabilidad suficiente de eventos y métricas, requisito de la verificación, la calibración y la validación posteriores.

La arquitectura del modelo separa cuatro componentes:

- Generación de entidades y demanda inducida por naves;

- Lógica de rutas y decisiones operacionales de los camiones;
- Nodos con colas, recursos de capacidad finita y tiempos de proceso;
- Instrumentación para la trazabilidad de eventos y el cálculo de métricas.

En el modelo base, la ZEAP opera de forma parcial y la espera de los camiones se concentra en el radio urbano, reproduciendo la situación actual descrita en el Capítulo 1. Los camiones del flujo DUMMY se integran en esta misma arquitectura, compartiendo nodos y recursos con los flujos contenerizados, sin alterar la definición estructural de la demanda inducida por naves. Esta estructura modular permite, más adelante, activar las políticas evaluadas (ruteo obligatorio por la ZEAP y doble operación; Sección 3.8) mediante ajustes localizados, sin perder la coherencia global del sistema.

3.4. Calibración del modelo

Calibrar es ajustar los parámetros del modelo para que sus salidas reproduzcan patrones observados en los nodos más importantes.

Construido el modelo, la metodología ajusta empíricamente sus parámetros sobre los nodos principales antes de verificar la implementación y de validar contra datos reales. La secuencia es, por tanto, construcción, calibración, verificación y validación: primero se ajustan los parámetros de entrada a la evidencia 2022 (calibración), luego se comprueba que la lógica programada sea correcta (verificación) y finalmente se evalúa el desempeño del modelo frente al sistema real (validación).

Los nodos principales de calibración son frontera Bolivia-Chile, ZEAP y puertas del terminal. La calibración considera:

- intensidad y perfil temporal de llegadas por hora;
- reglas temporales de activación de camiones y uso de rutas;
- consistencia operativa de permanencias agregadas y uso de nodos intermedios.

En los nodos ZEAP y gates del terminal, la evidencia observada se utiliza principalmente para calibrar el proceso de llegadas y los tiempos agregados entre hitos operacionales. El análisis de 2022 muestra que los interarribos observados presentan alta variabilidad y

colas largas. La Tabla 3.5 resume la media, desviación estándar y coeficiente de variación por nodo: en todos los casos el CV supera 1 y en los hitos de ZEAP supera 2,8, lo que refleja distribuciones fuertemente asimétricas cuya desviación estándar es mayor que la propia media. Además, al evaluar cuatro familias candidatas usuales de renovación (log-normal, gamma, Weibull y exponencial), ninguna fue aceptada simultáneamente bajo KS y chi-cuadrado en ninguno de los nodos; los histogramas por nodo que evidencian esta forma se incluyen en la Figura A.1 del Anexo A.

Nodo	n	Media (min)	Desv. est. (min)	CV
ZEAP_GATE_IN	21 233	16,37	46,17	2,82
ZEAP_GATE_OUT	20 597	13,45	46,02	3,42
GATE_IN_NORTE	69 368	4,32	6,56	1,52
GATE_OUT_NORTE	61 431	5,02	7,46	1,49

Cuadro 3.5: Estadísticos descriptivos de los interarribos observados en 2022 por nodo (minutos). CV = desviación estándar / media. La desviación estándar supera ampliamente a la media en ZEAP ($CV > 2,8$), evidenciando una alta concentración de interarribos cortos coexistiendo con colas derechas muy extensas, patrón incompatible con las familias de distribución habituales de renovación.

Esta variabilidad tiene dos consecuencias directas para la tesis. Primero, justifica representar el input con distribuciones acotadas y perfiles empíricos por nodo, y no con una única distribución de renovación de escala única. Segundo, anticipa una limitación del alcance de la validación (Sección 3.6): la simulación reproduce el nivel medio de las llegadas, pero no la fuerte dispersión intradiaria observada en estos nodos, en particular en la ZEAP, lo que queda documentado como brecha para trabajo futuro.

La misma base permite observar tiempos agregados entre hitos operacionales, pero no identifica de forma directa el tiempo atómico de atención de cada recurso individual del modelo. En consecuencia, los tiempos de atención de los nodos *SERVICE* no se estiman desde **bdAntares** ni se utilizan como eje de validación empírica de esta tesis. En el modelo, estos tiempos se representan mediante distribuciones acotadas (triangular o beta reescalada) definidas por criterio operacional y juicio experto, mientras que la validación cuantitativa se concentra en los perfiles de llegadas que el sistema genera en los nodos observables.

3.4.1. Justificación de distribuciones por nodo principal

La selección de distribuciones en esta tesis responde a un criterio operativo y estadístico común: usar funciones con soporte finito y estrictamente positivo para evitar tiempos no físicos (por ejemplo, atenciones negativas) y respetar ventanas reales de operación. Por esta razón no se utilizan normales truncadas como distribución base de tiempos en el modelo.

En la generación de camiones asociada a cada recalada se distingue según la evidencia disponible. Para el flujo de exportación boliviana (*EXPO_BO*), el adelanto del camión respecto de la ETA de la nave (días antes = $ETA - \text{fecha de cruce de frontera}$) se **calibra directamente sobre los datos reales 2022**: se ajusta una distribución **Gamma** ($k = 2,78$, escala = 2,78 d, media $\approx 7,8$ d, piso 0,5 d) sobre ~ 29.500 registros de $ETA - \text{FechaFrontera}$, de modo que este *offset* es un ajuste empírico directo, no un supuesto experto. Para los flujos sin microdato de adelanto por camión, la forma adoptada es **triangular acotada** o **beta reescalada sesgada a la derecha**, parametrizada por criterio operacional: concentra probabilidad en la zona factible (los camiones no deben llegar demasiado cerca de la ETA, por riesgo de no ser atendidos, ni fuera de la ventana operativa) sin permitir extremos inviables, en línea con la recomendación de (Law, 2015, sec. 6.11) para situaciones con datos limitados.

Para los nodos principales del sistema, el criterio queda resumido así:

- **Generación EXPO_BO**: el adelanto respecto de la ETA se muestrea de una **Gamma calibrada con datos 2022** ($ETA - \text{fecha de frontera}$), no de un supuesto experto.
- **Generación EXPO_CL e IMPO_CL**: offsets **triangulares** acotados por criterio operacional ante la falta de microdato por camión (*EXPO_CL*: $[1, 5]$ d antes de la ETA, moda 3; *IMPO_CL*: $[0, 10]$ d después de la ETA, moda 3).
- **Traslado ZEAP $\rightarrow$ Gate-In Norte**: beta reescalada en un intervalo de minutos mínimo-máximo, de modo de reflejar variabilidad de tráfico con límites físicos de recorrido.
- **Nodos de servicio principales** (frontera, gates, ZEAP gate-in/out, port-ops): beta reescalada con soporte $[0, t_{\max}]$, calibrada con media y dispersión operacio-

nales, asegurando no negatividad y control de colas.

- **Llamado IMPO posterior a ETD:** distribución triangular acotada para el desfase de llamado, porque existe un rango operativo bien definido y una moda clara observada por criterio experto.

En los nodos donde no existe microdato suficiente para estimación directa, se adoptan **distribuciones típicas de simulación de operaciones** (triangular o beta reescalada) parametrizadas mediante juicio experto y consistencia con capacidad/tiempos del proceso, siguiendo la recomendación de (Law, 2015, sec. 6.11) para situaciones sin datos suficientes. Este supuesto fue discutido y contrastado durante la visita técnica a TPA y con el equipo operativo, por lo que se considera una formalización plausible mientras no se disponga de trazabilidad atómica completa por recurso.

Se recalca que la calibración no es validación. De acuerdo con (Law, 2015) (Secc. 5.1), en calibración se ajustan parámetros del modelo para reproducir características particulares del sistema; en validación se evalúa si el desempeño global del modelo ya calibrado corresponde adecuadamente a los datos del sistema real. Esta distinción metodológica resulta crítica para evitar sobreajuste y para mantener trazabilidad entre los supuestos estructurales y el contraste empírico.

3.5. Verificación del modelo

Siguiendo a (Law, 2015), la verificación responde a la pregunta de si el modelo fue implementado correctamente.

En la secuencia del capítulo, esta etapa aparece después de construir y calibrar el modelo, porque su objetivo es comprobar que la lógica programada representa correctamente la estructura conceptual definida en las secciones anteriores, y no ajustar el modelo a la realidad.

La verificación se realiza mediante:

- revisión de consistencia de estados y transiciones por entidad;
- pruebas de trazabilidad de eventos por camión;
- chequeos de conservación de flujos y balances por nodo;

- pruebas de sensibilidad básicas para detectar comportamientos no plausibles.

Esta etapa ocurre antes de la validación contra datos reales. El *warm-up* de arranque, su justificación empírica y su duración definitiva se detallan en la Sección 3.7.

3.6. Validación contra la operación real

En línea con (Law, 2015), la validación se realiza sobre el output total del modelo, más que por la inspección visual de una variable aislada.

Metodológicamente, esta es la etapa en que la cadena construida en las secciones previas se pone a prueba. La pregunta ahora es si la salida integrada del sistema simulado reproduce los patrones observables más relevantes del sistema real.

La validación se organiza en tres niveles de exigencia creciente, en línea con el principio de (Law, 2015) de contrastar el output integrado del modelo y no una variable aislada:

- Nivel 1, demanda agregada total:** el volumen total de camiones generado debe reproducir el orden de magnitud observado en 2022, contrastando el total movilizado, el error porcentual medio por flujo (MAPE) y una prueba χ^2 sobre la distribución de la demanda entre líneas logísticas.
- Nivel 2, demanda por línea logística:** cada uno de los cinco flujos se contrasta por separado mediante intervalos de confianza de Welch para la diferencia de medias mensuales.
- Nivel 3, tiempo en el antepuerto** (*dwell time* en el ZEAP (camión)): el tiempo que el camión de exportación boliviana permanece en la zona de la ZEAP, contrastado contra los registros reales de 2022 mediante un intervalo de confianza de Welch.

La métrica central de validación es el **volumen de camiones** y no la forma intradiaria de las llegadas: el modelo genera demanda continua alrededor de los hitos navieros, mientras que la operación real concentra actividad en la franja 08:00–18:00, de modo que la concentración diaria exacta no se adopta como criterio de aceptación. Además, dado el tamaño muestral de **bdAntares**, las pruebas de hipótesis tienden a rechazar igualdad exacta frente a diferencias pequeñas; por ello la interpretación se concentra

en la magnitud de las brechas, conforme a (Law, 2015) (Secc. 5.6). La tesis no dispone de tiempos de atención observados por recurso individual, de modo que la validación se formula sobre patrones agregados de demanda en los nodos observables y no sobre tiempos de servicio atómicos.

3.6.1. Nivel 1: validación de la demanda agregada total

El primer nivel verifica si el modelo reproduce el orden de magnitud total de carga movilizada por el terminal en un horizonte equivalente de 28 días. Según el dato institucional entregado por Terminal Puerto Arica (TPA) para esta tesis, el terminal movilizó 144 248 TEU en 2022, equivalentes a 12 020,7 TEU mensuales. Para contextualizar el escenario 2025 se reconstruyó en Python la serie histórica de toneladas transferidas (Figura 3.4): el total pasa de 2 765 456 toneladas en 2022 a 2 917 981 en 2024 (crecimiento compuesto $\approx 2,72\%$ anual), lo que proyecta 156 344,8 TEU para 2025 (13 028.7 TEU/mes). La diferencia entre ambas referencias mensuales es de solo 8,4 %, por lo que usar 2022 como base de calibración para un escenario 2025 es metodológicamente aceptable como aproximación de primer orden.

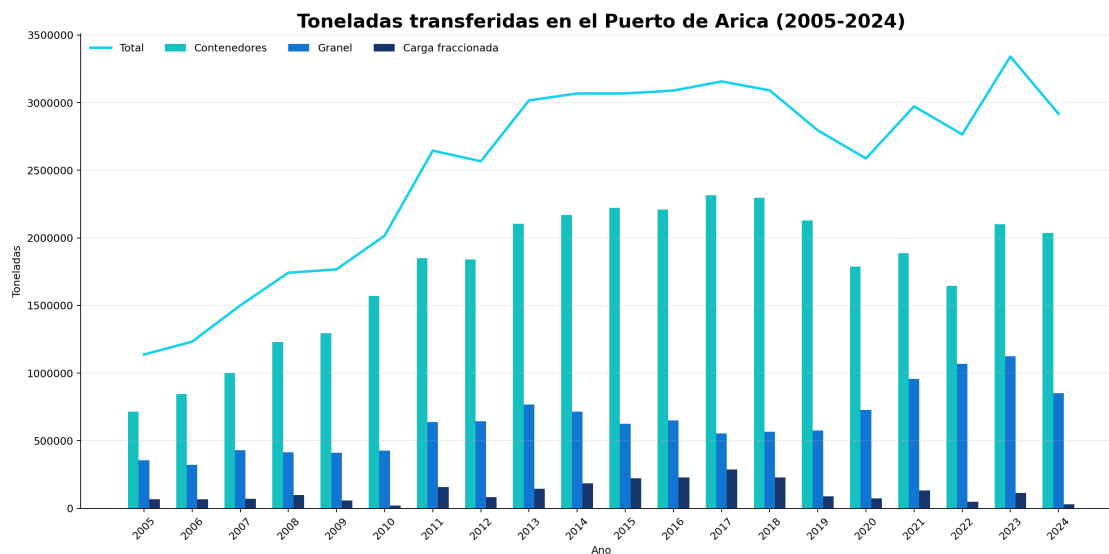


Figura 3.4: Serie reconstruida en Python de toneladas transferidas en el Puerto de Arica entre 2005 y 2024. La serie se utiliza para estimar la tendencia reciente 2022–2024 y proyectar una referencia agregada para 2025. Fuente: elaboración propia a partir de la figura institucional proporcionada por Terminal Puerto Arica (TPA) para esta tesis.

Flujo	Obs. 2022 eq. 28d	Sim. media ($n = 50$)	Razón sim/obs
EXPO_BO	1338,9	1266	0,95
IMPO_BO	2909,6	2819	0,97
EXPO_CL	436,5	447	1,02
IMPO_CL	237,7	232	0,97
MTY	1430,4	1391	0,97

Cuadro 3.6: Contraste agregado por flujo entre la media simulada sobre $n = 50$ réplicas independientes (semillas 1001–1050) y el promedio mensual equivalente a 28 días observado en 2022, con la parametrización recalibrada (interarribo 46,34 horas, distribución Binomial Negativa por línea logística y mezcla empírica de clases de nave LOW/MID/HIGH). La diferencia entre 2022 y la proyección 2025 es de solo 8,4 %, por lo que 2022 resulta metodológicamente aceptable como base de calibración. El contraste estadístico por flujo, con desviaciones e intervalos de Welch al 95 %, se presenta en la Tabla 3.7.

El resultado muestra que, tras la recalibración, la parametrización reproduce el orden de magnitud observado con razones sim/obs entre 0,95 y 1,02. El ajuste agregado se sintetiza en tres estadísticos: (i) el total simulado, 6 155 camiones equivalentes a 28 días, frente al observado de 6 353, diferencia que no resulta significativa bajo una prueba de Welch sobre el total ($t = -0,73$; no se rechaza H_0); (ii) el error porcentual absoluto medio entre flujos, MAPE = 3,3 %; y (iii) una prueba χ^2 de bondad de ajuste sobre la distribución mensual de la demanda entre las cinco líneas logísticas, $\chi^2 = 2,2 < 9,49$ (gl = 4, $\alpha = 0,05$), que no permite rechazar la igualdad de la composición por flujo. En particular, *EXPO_CL* pasa de una razón de 0,71 en la parametrización inicial a 1,02 tras la recalibración, confirmando que la brecha previa era consecuencia del desfase entre el interarribo 2021 (38,22 horas) y la frecuencia real de 2022 (46,34 horas). La validación estadística desagregada por flujo se presenta en el Nivel 2 (Sección 3.6.2).

3.6.2. Nivel 2: validación por línea logística mediante intervalos de Welch

Para formalizar la comparación entre la demanda simulada y la observada, se aplica el procedimiento de intervalos de confianza para la diferencia de medias de dos muestras independientes descrito en (Law, 2015) (Secc. 5.6.2). Sea μ_1 la media mensual simulada (en contenedores equivalentes a 28 días) y μ_2 la media mensual observada en 2022; la hipótesis nula es $H_0 : \mu_1 = \mu_2$.

Diseño del experimento. Se generaron $n = 50$ réplicas independientes del generador de demanda (semillas 1001–1050) usando el mismo proceso naviero del modelo: interarribos Exponencial(46,34 horas), mezcla empírica de clases de nave (LOW/MID/HIGH) y muestreo de la carga de cada línea logística desde las distribuciones Binomial Negativa calibradas sobre 2022. Cada réplica entrega una realización del volumen mensual por flujo equivalente a 28 días. Del lado real se dispone de $m = 12$ observaciones mensuales normalizadas a 28 días (datos 2022 de **bdAntares**): el volumen de cada mes se reescala por el factor $28/d_m$, con d_m el número de días de ese mes, de modo que los doce meses quedan expresados en la misma ventana de 28 días de la simulación. El estimador de la diferencia es $\hat{\Delta} = \bar{X}_{\text{sim}} - \bar{X}_{\text{real}}$ con error estándar

$$\widehat{SE}(\hat{\Delta}) = \sqrt{\frac{S_{\text{sim}}^2}{n} + \frac{S_{\text{real}}^2}{m}},$$

y grados de libertad de Welch-Satterthwaite:

$$\hat{\nu} = \frac{\left(\frac{S_{\text{sim}}^2}{n} + \frac{S_{\text{real}}^2}{m}\right)^2}{\frac{(S_{\text{sim}}^2/n)^2}{n-1} + \frac{(S_{\text{real}}^2/m)^2}{m-1}}.$$

El intervalo de confianza al 95 % es $\hat{\Delta} \pm t_{\hat{\nu}, 0,025} \cdot \widehat{SE}(\hat{\Delta})$.

Resultados. La Tabla 3.7 resume los resultados por flujo. En los cinco casos, el IC 95 % contiene el cero, por lo que no se rechaza H_0 a nivel 0,05. La Figura 3.5 muestra gráficamente las medias y los intervalos.

Flujo	$\bar{X}_{sim}$	S_{sim}	$\bar{X}_{real}$	S_{real}	IC 95 % inf	IC 95 % sup	Decisión
EXPO_BO	1266	347	1339	191	-223	78	No rechaza H_0
IMPO_BO	2819	718	2910	398	-404	222	No rechaza H_0
EXPO_CL	447	108	437	86	-50	72	No rechaza H_0
IMPO_CL	232	67	238	45	-39	27	No rechaza H_0
MTY	1391	404	1430	487	-363	284	No rechaza H_0

Cuadro 3.7: Intervalos de confianza de Welch al 95 % para la diferencia de medias mensuales simuladas ($n = 50$) versus reales ($m = 12$) por flujo logístico, en contenedores equivalentes a 28 días. En todos los casos el IC contiene el cero: no se rechaza la hipótesis de igualdad de medias.

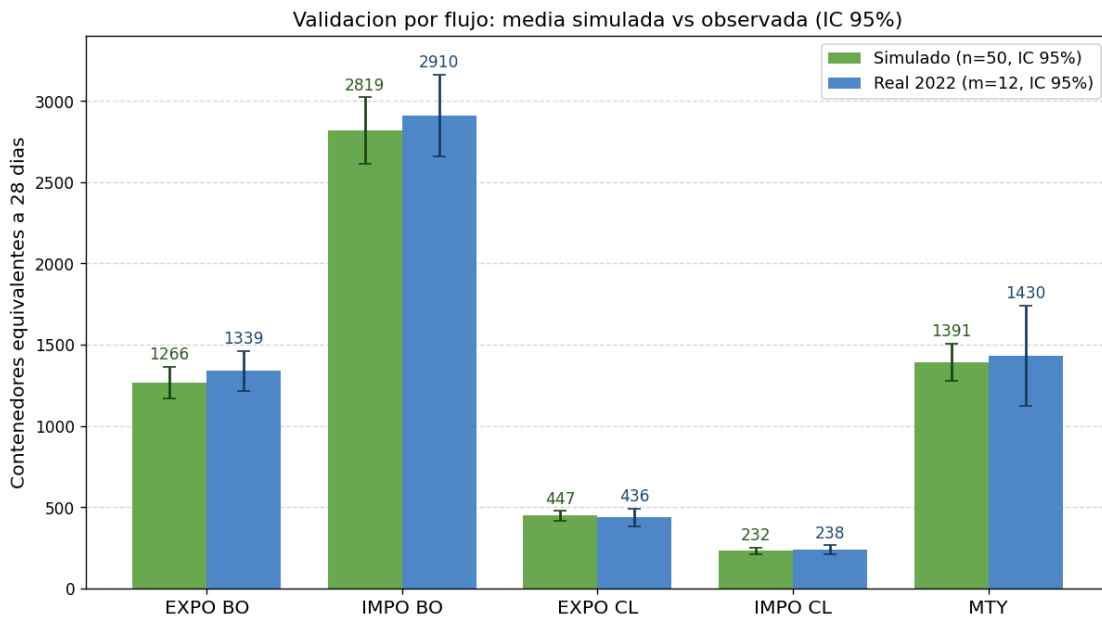


Figura 3.5: Comparación gráfica de medias mensuales simuladas (con IC 95 % de Welch) versus observadas (con IC 95 % sobre 12 meses 2022) por línea logística. Las barras de error verdes corresponden a la simulación ($n = 50$) y las barras de error azules a la realidad ($m = 12$). En todos los flujos los intervalos se solapan, confirmando que no se rechaza $H_0 : \mu_{sim} = \mu_{real}$ a nivel 0,05.

La lectura metodológica de estos resultados es la siguiente. Primero, las ratios $\bar{X}_{sim}/\bar{X}_{real}$ están en el rango 0,95–1,02, con *EXPO.CL* levemente por sobre la unidad (1,02) y los demás flujos con una subestimación leve (0,95–0,97). Segundo, el IC de Welch no rechaza la hipótesis de igualdad de medias en ninguno de los cinco flujos, lo que constituye evidencia estadística de que la parametrización recalibrada reproduce la demanda mensual

observada en 2022 dentro del margen de variabilidad esperado. Tercero, la variabilidad del simulador (S_{sim}) es mayor que la variabilidad de los datos reales (S_{real}) en cuatro de los cinco flujos (la excepción es MTY, con $S_{\text{sim}} = 404$ frente a $S_{\text{real}} = 487$), lo cual es esperable: las 12 observaciones reales son un promedio anual que comprime la varianza natural del proceso, mientras que las 30 réplicas del generador capturan la variabilidad intrínseca del proceso estocástico.

3.6.3. Nivel 3: validación del *dwell time* en el ZEAP (camión)

El tercer nivel contrasta el tiempo que el camión de exportación boliviana permanece en la zona del antepuerto (*dwell time* en el ZEAP (camión)), definido como el intervalo entre su salida y su entrada por las puertas de la ZEAP, $t(\text{ZEAP_GATE_OUT}) - t(\text{ZEAP_GATE_IN})$. Esta es la métrica de permanencia central del flujo que origina la congestión urbana (EXPO_BO) y la única para la que **bdAntares** entrega trazabilidad de entrada y salida suficiente: $n = 5\,454$ registros de 2022, con media 26,59 h y un ajuste Gamma ($k = 2$, $\theta = 13,30$ h).

Se aplica el mismo procedimiento de intervalos de Welch del Nivel 2, ahora sobre $\zeta = \mu_{\text{real}} - \mu_{\text{sim}}$, tomando como muestra simulada el *dwell time* de cada camión EXPO_BO de las $n = 50$ réplicas. El resultado valida la permanencia: la media simulada es 26,81 h frente a 26,59 h real ($\hat{\zeta} = -0,22$ h), con un intervalo de confianza al 95 % de $[-0,73, +0,28]$ h que contiene el cero ($t = -0,86$, $\hat{\nu} \approx 2\,626$, $p = 0,39$); no se rechaza $H_0 : \mu_{\text{real}} = \mu_{\text{sim}}$ al 5 %. La forma de la distribución también se reproduce de manera razonable: los percentiles altos quedan muy próximos (p75 simulado 36,1 h frente a 36,6 h real; p95 simulado 63,4 h frente a 66,2 h real), con desviaciones leves en la parte baja: la mediana simulada sobreestima (22,5 h frente a 21,0 h real) y el p25 subestima (13,0 h frente a 15,5 h real). Así, este contraste valida el tiempo de permanencia del flujo dominante; la extensión del contraste al tiempo de rotación completo (*truck turnaround time*, TTT) de los cinco flujos, que requiere una trazabilidad atómica aún no disponible, queda como trabajo futuro.

3.6.4. Alcance de la validación

En síntesis, el modelo alcanza una **validación sustantiva de la demanda y del tiempo de permanencia**: reproduce el volumen agregado total (Nivel 1: total no significativo bajo Welch, MAPE 3,3 %, χ^2 de composición no significativo) y los volúmenes mensuales por línea logística (Nivel 2: IC de Welch, 5/5 flujos no rechazan H_0 al 95 %), valida el tiempo en el antepuerto del flujo dominante (Nivel 3: *dwell time* en el ZEAP (camión), IC de Welch que contiene el cero), y captura el comportamiento global de la demanda en los gates del terminal. Las brechas remanentes (la extensión del contraste al TTT completo de los cinco flujos; la dispersión intradiaria de ZEAP; y la modulación horaria explícita 08:00–18:00) quedan identificadas y priorizadas para iteraciones futuras. Coherentemente con (Law, 2015), los tiempos de atención siguen siendo parámetros operacionales no observados, cuya aceptación depende de la capacidad del modelo completo para reproducir outputs observables y no de una estimación directa desde la base. La calibración de los parámetros de entrada y los tres niveles de contraste se apoyan en el mismo período, el año 2022, de modo que lo verificado es la **consistencia interna** del modelo respecto de los datos con los que fue construido, y no su capacidad predictiva sobre un período independiente. No se dispuso de una serie de un año distinto con el mismo nivel de desagregación por línea logística, por lo que no fue posible realizar una validación fuera de muestra (*out-of-sample*), que es el contraste que permitiría atribuir al modelo capacidad de pronóstico. Esta distinción condiciona la lectura de los resultados en el sentido ya declarado: el modelo compara mecanismos y órdenes de magnitud entre configuraciones operativas, y no genera proyecciones de demanda ni pronósticos de desempeño futuro. La validación temporal independiente, sobre un año no utilizado en la calibración, queda planteada como trabajo futuro.

3.7. Parámetros de ejecución comunes a los modelos

Antes de definir los escenarios de política se fijan los parámetros de ejecución comunes a los cuatro modelos: el *warm-up* que descarta el transitorio de arranque, el número de réplicas que sostiene los intervalos de confianza y el calendario de demanda único sobre el

que se ejecutan todos los experimentos. Por construirse y validarse sobre el modelo base, estos parámetros aplican por igual a BASE, ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO.

3.7.1. Determinación del warm-up

Como el sistema arranca vacío, las primeras observaciones están sesgadas por el transitorio inicial y deben descartarse antes de medir. La longitud del *warm-up* se determina con el **método gráfico de Welch** (Law, 2015, sec. 9.5.1), aplicado sobre la métrica clave del estudio, la cantidad de camiones en ARICA, mediante el siguiente procedimiento:

- a) Se ejecutan $n = 30$ réplicas independientes (semillas 1001–1030) y se registra la métrica diaria desde el día 0.
- b) Se promedia la métrica entre réplicas y se suaviza con una media móvil centrada de ventana $w = 5$ días.
- c) Se identifica el día en que la curva suavizada deja de tener tendencia y oscila en torno a una media estable.

La Figura 3.6 muestra el resultado: la métrica crece durante el arranque y se aplanan hacia el **día 18**. Como criterio conservador se adopta un **warm-up de 20 días**, agregando un margen de seguridad sobre el punto de estabilización. Con ello, todas las métricas se calculan sobre el horizonte de análisis (días 20-48), ya en régimen y no en el transitorio de arranque.

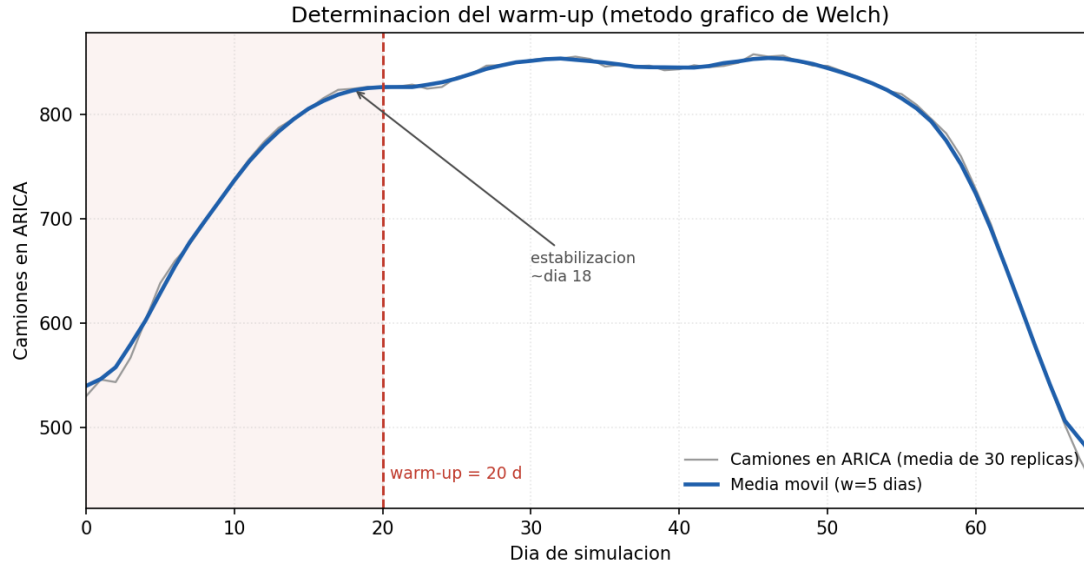


Figura 3.6: Determinación del warm-up por el método gráfico de Welch (Law, 2015, sec. 9.5.1): camiones en ARICA promediados sobre $n = 30$ réplicas (línea gris) y su media móvil de ventana $w = 5$ días (línea azul). La curva suavizada completa el transitorio inicial de llenado y se estabiliza hacia el día 18; se adopta un warm-up de 20 días por margen conservador.

El horizonte completo de cada corrida se compone de cuatro fases: **warm-up** de 20 días (descartado), **análisis** de 28 días (la ventana de medición), **cool-down** de 20 días y un **drenaje** final sin nuevas recaladas. El cool-down y el drenaje cumplen propósitos distintos. Durante el cool-down las recaladas continúan, pues el horizonte de llegadas abarca las tres primeras fases, pero esta fase **no se incluye en la medición**: su función es que la ventana de análisis (días 20-48) quede en el interior del horizonte de llegadas, alimentada de forma continua antes y después, evitando un efecto de borde por cese de arribos, y que los camiones iniciados dentro de la ventana dispongan de tiempo para completar su ciclo sin ser censurados. El drenaje, en cambio, no genera nuevas llegadas y permite vaciar el sistema hasta cero camiones activos, garantizando que las métricas basadas en ciclos completos no queden truncadas. La duración del drenaje depende del modelo: 10 días en BASE y de hasta 40 días en los modelos con antepuerto obligatorio o doble operación (ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO), cuyos ciclos son más largos. En todos los casos se verifica que el conteo de camiones activos llegue a cero en todas

las réplicas antes del fin de la corrida.

3.7.2. Determinación del número de réplicas

La validación y los experimentos comparativos entre modelos se ejecutan con $n = 50$ réplicas independientes por configuración (semillas comunes 1001–1050); la determinación del *warm-up* se realiza sobre las primeras 30 semillas (1001–1030). La caracterización de la ocupación del antepuerto que se reporta en el Capítulo 4 se obtiene sobre el conjunto de $n = 30$ réplicas, por tratarse de una descripción del uso del recinto y no de un contraste de hipótesis. En la formulación de (Law, 2015) (Secc. 9.4.1), una *réplica independiente* es una corrida que utiliza números aleatorios distintos a los de cada otra, con contadores estadísticos reiniciados y las mismas condiciones iniciales, lo que garantiza que las observaciones inter-réplica sean variables aleatorias IID y habilita la construcción del intervalo de confianza t de la ecuación (9.1) de esa misma referencia. Cada semilla especifica el punto de inicio de un *stream* de números aleatorios no solapado; (Law, 2015) (Secc. 7.2) describe este mecanismo como la forma estándar de obtener subsecuencias independientes a partir de un generador congruencial lineal. Cincuenta réplicas entregan intervalos de confianza suficientemente estrechos tanto para los contrastes de validación (Niveles 1–3) como para la comparación pareada entre modelos, con un costo computacional acotado. Al mantener las mismas semillas a través de todos los escenarios comparados se aplica además el principio de *Common Random Numbers* (CRN) de (Law, 2015) (Secc. 11.2), que reduce la varianza del estimador de la diferencia entre configuraciones y permite comparaciones más precisas entre alternativas.

La comparación entre el modelo base y el antepuerto (Hipótesis 1) se ejecuta con **50 réplicas de semillas comunes (1001–1050)**, y la búsqueda del nivel crítico de adopción de la doble operación recorre cada nivel con un piloto de 5 réplicas para tamizar y 50 réplicas de confirmación en los niveles críticos. Al compartir todas las configuraciones las mismas semillas, se preserva el principio de números aleatorios comunes (CRN) y la comparación entre alternativas resulta más precisa.

3.7.3. Calendario de demanda

La demanda calibrada del año 2022 se documenta mediante un calendario ejemplar exportado desde una corrida del modelo BASE. En la corrida utilizada para esta sección, el horizonte con llegadas contiene 35 recaladas distribuidas en tres fases: 10 en el *warm-up*, 15 en el horizonte analizado y 10 en el *cool-down*, coherente con la frecuencia media calibrada de $\approx 14,5$ recaladas en la ventana de análisis de 28 días.

La Figura 3.7 muestra la ubicación temporal de las ETA y la acumulación de arribos de esa corrida. Las recaladas se distribuyen de forma no uniforme a lo largo de las tres fases con llegadas, coherente con el muestreo de interarribos exponenciales. La línea del día 68 marca el fin de las recaladas; desde ese punto hasta el día 78 la corrida entra en una etapa de vaciado sin nuevas naves. La Tabla 3.8 resume la composición del calendario por fase.

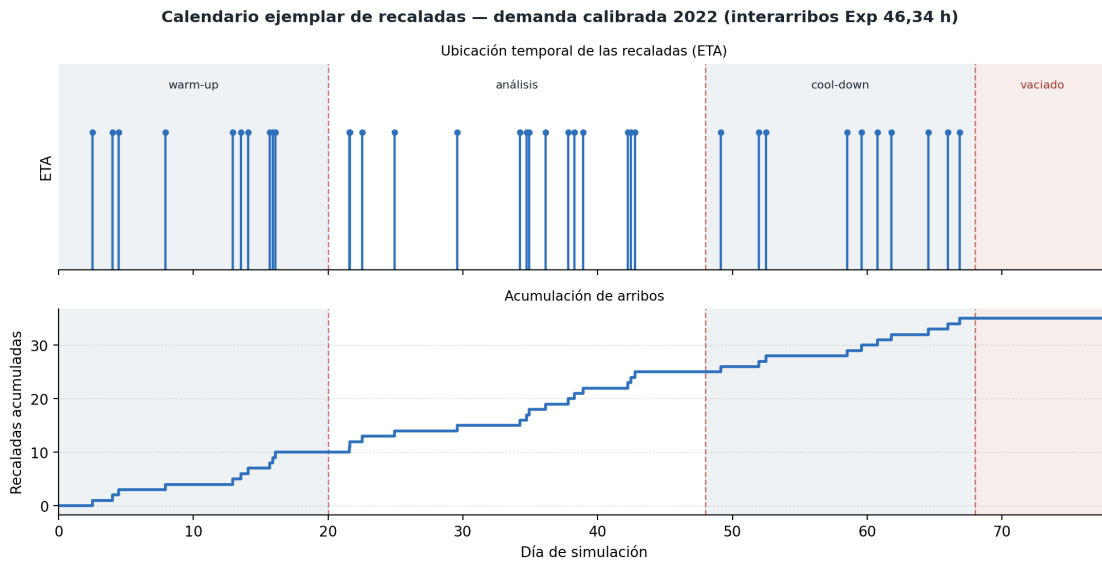


Figura 3.7: Calendario ejemplar de recaladas de la demanda calibrada (2022). El panel superior muestra la ubicación temporal de las ETA; el panel inferior resume la acumulación de arribos. Las zonas sombreadas en gris corresponden al *warm-up* (días 0-20) y al *cool-down* (días 48-68); la franja central sin sombrear es el horizonte de análisis (días 20-48). Las líneas punteadas marcan el inicio y el fin del horizonte de análisis y el fin de las llegadas (día 68), a partir del cual la franja en rojo claro representa el vaciado sin nuevas recaladas.

Fase	Intervalo ETA (días)	Media	Desv. est.	Varianza	IC 95 %
Warm-up	[0,20)	10,60	3,23	10,46	[9,39; 11,81]
Horizonte analizado	[20,48)	14,93	3,50	12,27	[13,63; 16,24]
Cool-down	[48,68)	9,80	2,75	7,54	[8,77; 10,83]
Vaciado sin llegadas	[68,78)	0,00	0,00	0,00	[0,00; 0,00]
Total con llegadas	[0,68)	35,33	5,21	27,20	[33,39; 37,28]

Cuadro 3.8: Número de recaladas por fase del experimento, resumido sobre las 30 semillas comunes (1001–1030): media, desviación estándar, varianza e intervalo de confianza al 95 % de la media. El número de recaladas no es fijo, emerge del proceso de llegadas y varía de una semilla a otra. Las llegadas se generan entre los días 0 y 68; a partir del día 68 la simulación entra en vaciado sin nuevas recaladas, durante 10 a 40 días según el modelo.

Sobre este mismo conjunto de calendarios de demanda se ejecutan los cuatro modelos que se definen en la sección siguiente, con las 30 semillas comunes en los experimentos de validación y caracterización y con las 50 semillas en las comparaciones entre modelos. La única fuente de variación entre experimentos son las políticas operativas, uso obligatorio de la ZEAP como regulador y doble operación de camiones con su barrido de adopción BH %, manteniendo idénticos la demanda, los nodos y las semillas. Esta elección aísla el efecto de las políticas y habilita la comparación pareada que se describe más adelante.

3.8. Escenarios de simulación y evaluación de políticas

Con el modelo verificado, calibrado y validado parcialmente, se ejecuta el diseño experimental. Todos los experimentos comparten una única demanda calibrada (año 2022) y las mismas semillas, de modo que las diferencias observadas se atribuyen exclusivamente a las políticas evaluadas.

3.8.1. Los cuatro modelos de simulación

El diseño experimental se organiza en torno a cuatro modelos que comparten exactamente la misma estructura de demanda, los mismos nodos y las mismas semillas, y difieren únicamente en dos políticas operativas: el uso obligatorio del antepuerto ZEAP como regulador del flujo de camiones y la doble operación de camiones (DOBLECITA). Los cuatro modelos forman dos pares:

- **BASE** (línea base, *as-is*): reproduce la operación actual, en la que la ZEAP opera de forma parcial y los camiones esperan mayoritariamente en el radio urbano. Es el referente contra el cual se miden las intervenciones y concentra la externalidad de congestión urbana que el estudio busca reducir.
- **ZEAP**: convierte el antepuerto en un **regulador obligatorio** que actúa como *buffer* de todo el flujo: cada camión es interceptado y escalonado en la ZEAP antes de acceder al terminal, de modo que la espera, y con ella la cantidad de camiones presentes en Arica en todo momento, se traslada fuera del radio urbano. Su función es actuar sobre *dónde* se espera, reduciendo la congestión y las externalidades urbanas asociadas al flujo del puerto sin alterar el volumen transportado.
- **DOBLECITA**: añade la doble operación sobre la operación actual, sin regulación obligatoria por ZEAP. El camión de exportación boliviana retira su contenedor de importación de retorno en la misma visita al terminal, en lugar de salir a esperar a un estacionamiento de la ciudad y volver a entrar; con ello elimina el **desplazamiento urbano en vacío** (puerto-ciudad-puerto). Su función es actuar sobre *cuánto* se circula en vacío, reduciendo los kilómetros improductivos y las emisiones de CO₂ asociadas.
- **COMBINADO** (ZEAP + DOBLECITA): combina ambas políticas. El antepuerto ordena el sistema y traslada la espera fuera de la ciudad, mientras la doble operación acorta esa espera al consolidar exportación e importación en un mismo viaje. Su función es capturar la **interacción** entre las dos medidas: si disponer del antepuerto reduce el nivel de adopción de la doble operación necesario para descongestionar.

Esta estructura en dos pares, con y sin antepuerto obligatorio, con y sin doble operación, permite aislar el efecto individual de cada política (ZEAP frente a BASE; doble operación frente a su base) y, sobre todo, su **interacción**: si la presencia del antepuerto modifica el efecto de la doble operación. La Figura 3.8 organiza los cuatro modelos como un diseño factorial 2×2 .

Los cuatro modelos de simulación: antepuerto regulador $\times$ doble operación

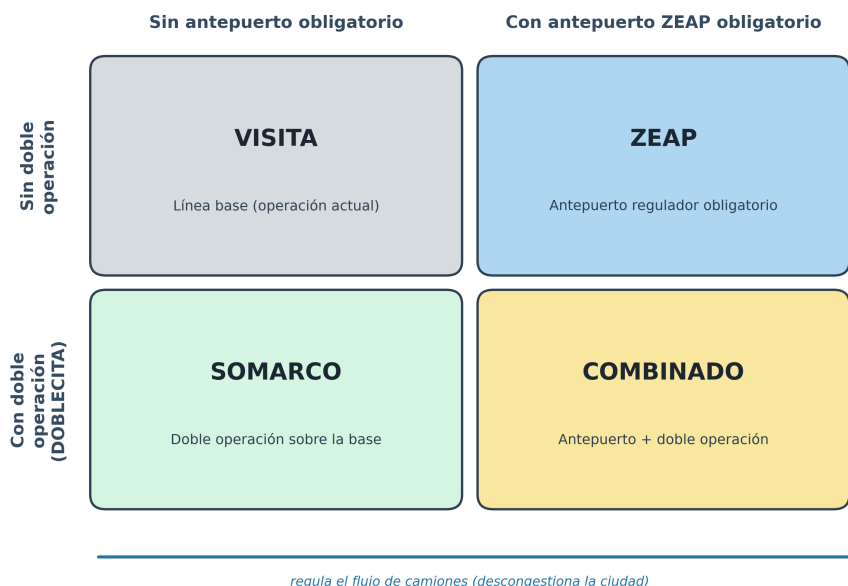


Figura 3.8: Los cuatro modelos de simulación como un diseño 2×2 : el eje horizontal representa el uso obligatorio del antepuerto ZEAP como regulador del flujo de camiones y el eje vertical la adopción de la doble operación (DOBLECITA). BASE es la línea base; COMBINADO reúne ambas políticas.

3.8.2. Mecanismo de doble operación (DOBLECITA) y nivel de adopción

La doble operación, denominada DOBLECITA, consiste en que un camión de exportación boliviana (EXPO_BO), tras entregar su contenedor, espere dentro del recinto (galpón de espera de capacidad finita, PORT PARKING) hasta un máximo de 8-12 h para retirar un contenedor de importación de retorno en la misma visita, en lugar de salir a esperar a un estacionamiento de la ciudad y volver a entrar (el *street turn* o *double move* de la literatura de *drayage* (Caballini, Sacone & Saeednia, 2016; Caballini,

Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020; Yu, Feng, He & Liu, 2024)). De este modo, cada doble operación no cambia el viaje de larga distancia, que se realiza con carga en ambos sentidos; lo que elimina es el **desplazamiento urbano en vacío**, el trayecto puerto-ciudad-puerto que el camión haría para esperar su carga de retorno fuera del terminal. El mecanismo se ilustra en la Figura 2.7.

La adopción de la conducta no es total: solo una fracción de los camiones EXPO_BO realiza la doble operación. Esa fracción, denotada $BH\%$ (*backhauling*), es el parámetro de barrido del experimento. Para cada modelo con doble operación (DOBLECITA y COMBINADO) se ejecuta una familia de configuraciones variando $BH\%$ y se compara cada una contra su propia base sin doble operación ($BH = 0\%$).

3.8.3. Métricas de desempeño

Los modelos se comparan mediante indicadores que son instancias de los estimadores clásicos de simulación de eventos discretos (Law, 2015, ap. 1B), aplicados a la estructura del corredor. Sea $L(t)$ el número de camiones presentes en un subsistema en el instante t , $Q(t)$ el número de camiones en cola y $B(t)$ una variable indicadora que vale 1 cuando un recurso está ocupado. Sobre el horizonte de medición T (los 28 días de análisis) se definen el número medio de camiones, la longitud media de cola y la utilización media de un recurso:

$$\hat{L}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T L(t) dt, \quad \hat{Q}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt, \quad \hat{u}(T) = \frac{1}{T} \int_0^T B(t) dt.$$

A partir de estos estimadores, los indicadores del estudio son:

- **Camiones en ARICA** (KPI principal): $\hat{L}(T)$ aplicado al radio urbano. Mide la presencia simultánea de camiones en la ciudad (espera y tránsito), como proxy de la presión del flujo portuario sobre el espacio urbano; no modela congestión vial en sentido estricto (velocidades ni demoras).
- **Utilización del antepuerto ZEAP**: $\hat{u}(T)$ del estacionamiento de la ZEAP respecto de su capacidad.
- **Colas en accesos y nodos críticos**: $\hat{Q}(T)$.

- **Tiempo de permanencia del contenedor** (*dwell time*), por dirección de carga: *dwell time* de exportación (depósito en patio → zarpe de la nave) y *dwell time* de importación (descarga → retiro por camión).

Para las hipótesis sobre la doble operación (H4 y H5) se incorporan, además, los siguientes indicadores, contruidos desde la trayectoria de cada camión registrada por el modelo:

- **Desplazamientos urbanos en vacío evitados**: número de dobles operaciones realizadas en cada nivel de adopción. Cada doble operación evita que un camión EXPO_BO salga del terminal a un estacionamiento de la ciudad para esperar su carga de retorno y vuelva a entrar, esto es, suprime un trayecto en vacío puerto-ciudad-puerto dentro del área urbana de Arica.
- **Kilómetros recorridos** (totales y en vacío): se obtienen cruzando los tramos recorridos por cada camión con las distancias entre nodos; su reducción respecto del escenario sin doble operación ($BH = 0\%$) cuantifica el transporte improductivo evitado.
- **Emisiones de CO₂ evitadas**: se estiman a partir de los kilómetros reducidos y un factor de emisión dependiente del estado de carga del vehículo, dado que un camión cargado emite más por kilómetro que uno vacío (Demir, Bektaş & Laporte, 2011). Formalmente,

$$\Delta CO_2 = \sum_{e \in \{\text{vacío}, \text{cargado}\}} \Delta k_e \cdot f_e,$$

donde Δk_e son los kilómetros reducidos en el estado de carga e respecto del escenario base y f_e el factor de emisión (kg CO₂/km) del estado e . Se adoptan factores publicados para camión pesado diesel: $f_{\text{vacío}} = 0,65$ y $f_{\text{cargado}} = 0,94$ kg CO₂/km (metodología COPERT del inventario EMEP-EEA (European Environment Agency, 2023)). La diferencia de aproximadamente un 44 % entre ambos estados es consistente con la evidencia empírica de medición en ruta: Frey et al. (Frey, Rouphail & Zhai, 2008) reportan un +44 % de CO₂ para el camión cargado respecto del vacío, y Wang et al. (Wang, Song, Zhai, Wu, Yin & Yu, 2021) confirman, con datos reales de campo, que las tasas de emisión de CO₂ crecen

de forma marcada con la carga del vehículo. Como la doble operación suprime kilómetros recorridos *en vacío* sin alterar los kilómetros con carga (la misma importación se entrega de todos modos), el ahorro de emisiones queda determinado por $f_{\text{vacío}}$.

El **nivel crítico de adopción** (*breakpoint*) se define en la subsección siguiente.

3.8.4. Comparación estadística y nivel crítico de adopción

Como todos los modelos y todos los niveles de adopción se ejecutan con las **mismas semillas** (números aleatorios comunes, CRN), las observaciones quedan apareadas réplica a réplica y la comparación se realiza mediante el intervalo de confianza *pareado* (*paired-t*) de la Sección 2.4.4 (Law, 2015, sec. 10.2.1, p. 560), más potente que el de muestras independientes porque elimina la varianza entre semillas. Definiendo la diferencia por réplica $D_j = Y_{1j} - Y_{2j}$ entre dos configuraciones, con media $\bar{D}$ y desviación S_D sobre n réplicas, el intervalo de confianza pareado al $1 - \alpha$ es

$$\bar{D} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \frac{S_D}{\sqrt{n}}.$$

El **nivel crítico de adopción** o *breakpoint* se define como el menor BH % para el cual el intervalo pareado al 95 % confirma una reducción de **al menos un 10 %** en camiones en ARICA respecto del mismo modelo sin doble operación (BH = 0 %); operativamente, el extremo superior del intervalo de la diferencia queda por debajo de -10% del valor base. El criterio se aplica de forma independiente a DOBLECITA y a COMBINADO, y la diferencia entre ambos *breakpoints* cuantifica la interacción antepuerto $\times$ doble operación (Hipótesis 3).

La búsqueda del *breakpoint* usa un procedimiento direccional eficiente con dos tamaños muestrales. La referencia sin doble operación (BH = 0 %) se estima con 50 réplicas de semillas comunes, pues interviene en todas las comparaciones pareadas. Cada nivel candidato se **tamiza** primero con un piloto de 5 réplicas; cuando el piloto cruza el umbral, ese nivel se **confirma** con 50 réplicas evaluando el criterio $IC_{hi} < -10\% \times \text{ARICA}(\text{BH} = 0\%)$. Finalmente, un **chequeo de minimalidad** verifica, también con 50 réplicas, que el nivel inmediatamente inferior no es significativo; esta re-evaluación protege contra pilotos atípicamente altos o bajos, pues un tamizaje de 5 réplicas puede

descartar o promover un nivel por azar. Así, el *breakpoint* es el primer nivel que cumple el criterio. Las réplicas completas se ejecutan solo en la referencia y en los niveles de confirmación, no en toda la grilla, lo que reduce sustancialmente el costo de cómputo. El procedimiento se aplica por separado a DOBLECITA (descendiendo desde niveles altos de adopción) y a COMBINADO (ascendiendo desde niveles bajos). La Figura 3.9 resume esta heurística de búsqueda *coarse-to-fine*.

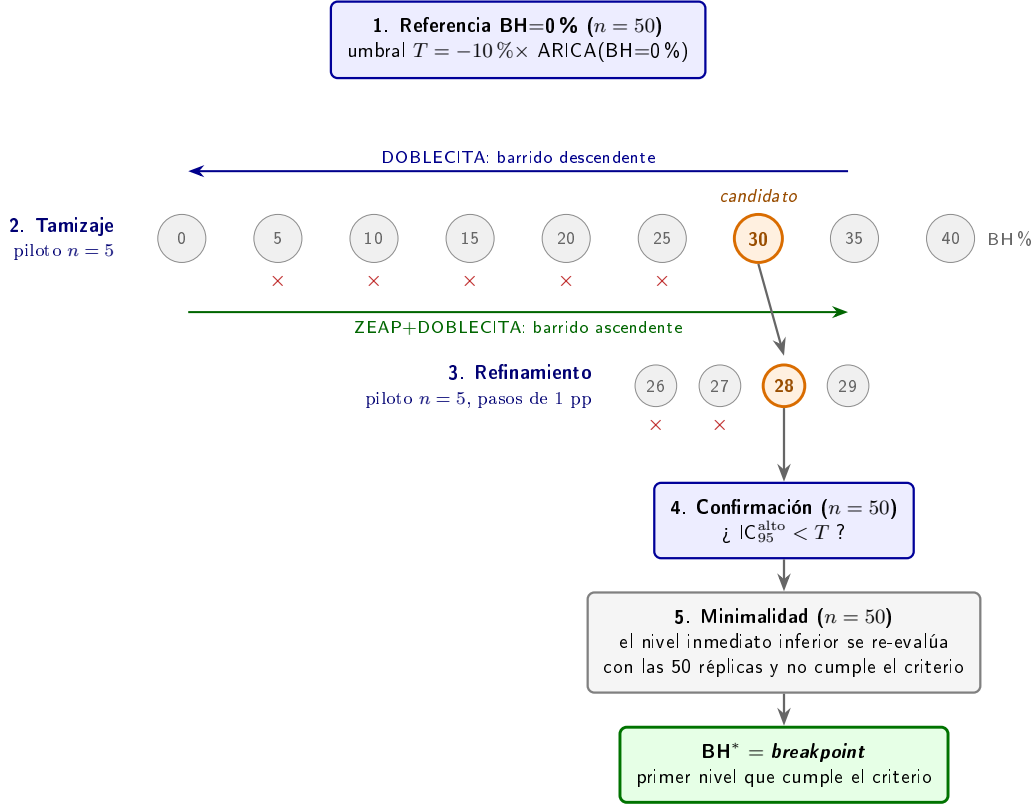


Figura 3.9: Procedimiento direccional (*coarse-to-fine*) de búsqueda del nivel crítico de adopción (*breakpoint*). A partir de la referencia $\text{BH} = 0 \%$ ($n = 50$) se fija el umbral $T = -10 \% \times \text{ARICA}(\text{BH} = 0 \%)$. Cada nivel se tamiza primero con un piloto de 5 réplicas sobre la grilla gruesa; el tramo del candidato se refina con pasos de 1 pp, también con piloto, y el nivel que cruza el umbral se confirma con 50 réplicas evaluando $\text{IC}_{95}^{\text{alto}} < T$, y un chequeo de minimalidad re-evalúa con las mismas 50 réplicas el nivel inmediatamente inferior, verificando que no cumple: ambos bordes del *breakpoint* quedan así medidos con la muestra completa y no solo con el piloto. El *breakpoint* BH^* es el primer nivel que satisface el criterio. DOBLECITA recorre la grilla de adopción en sentido descendente y COMBINADO en sentido ascendente.

3.9. Supuestos y limitaciones del modelo

Para mantener la trazabilidad metodológica, esta sección reúne los supuestos estructurales y las limitaciones propias del modelo, junto con su implicancia analítica. Las

limitaciones de alcance del estudio en su conjunto (calidad de los datos, ausencia de estacionalidad, brecha temporal 2022–2025, factores de emisión, entre otras) se declaran en la Sección 1.6 del Capítulo 1.

- **Número de naves estocástico:** la distribución de interarribos determina cuántas recaladas caen en el horizonte (esperanza $\approx 14,5$ naves en la ventana de 28 días), de modo que cada corrida puede quedar por encima o por debajo de ese valor. La comparación entre modelos se sostiene con números aleatorios comunes (CRN): todos enfrentan exactamente el mismo calendario de demanda en cada réplica.
- **Proceso de Poisson homogéneo como aproximación:** el diagnóstico sobre los datos 2022 muestra que el proceso real de recaladas no sigue un Poisson (la prueba χ^2 semanal lo rechaza por subdispersión: las recaladas son más regulares que las de un Poisson; véase Sección 3.1.7). El modelo adopta el supuesto exponencial homogéneo como aproximación de primer orden. Para verificar que esa simplificación no condiciona los resultados, se replicó el contraste de H1 con interarribos **Gamma** ($k = 3,417$, equivalente al coeficiente de variación 0,541 observado en 2022) manteniendo la misma media de 46,34 horas, con $n = 30$ réplicas de semillas comunes en BASE y ZEAP. Bajo ese proceso de llegadas la reducción pareada de camiones en el radio urbano alcanza un 85,0 % ($-434,6$ camiones; IC_{95 %} $[-477,5; -391,7]$), frente al 84,2 % que se obtiene con interarribos exponenciales sobre los mismos modelos y semillas: **la conclusión de H1 no depende del supuesto de homogeneidad**. El proceso Gamma sí eleva el nivel absoluto de congestión de la línea base (de 427,7 a 511,1 camiones), lo que resulta coherente con su menor variabilidad, ya que unas llegadas más regulares dejan menos ventanas prolongadas en que el sistema alcanza a drenarse; en esa dirección, el supuesto exponencial es conservador respecto del beneficio atribuido al antepuerto.
- **Tiempos de atención de nodos *SERVICE* no observados directamente:** la base disponible no entrega tiempos atómicos por recurso. Estos tiempos se parametrizan con distribuciones acotadas (triangular o beta reescalada) sustentadas en criterio operacional y en el levantamiento cualitativo de la visita técnica a TPA;

su razonabilidad se evalúa de forma indirecta, por el comportamiento agregado de colas y llegadas en los nodos observables.

- **Información limitada en nodos de soporte:** para varios nodos no principales no existe microdato histórico ni literatura local suficiente para una estimación econométrica robusta; en esos casos se adoptan supuestos operacionales consistentes con capacidad y secuencia de proceso. La confianza de los resultados es mayor en los nodos principales observables y menor en los nodos de soporte no observados.
- **Desfase entre datos históricos y lógica operativa simulada:** la calibración se apoya en datos 2021–2022, mientras que la lógica operacional representa el funcionamiento más reciente del sistema (operación de 24 horas). Por ello los resultados deben leerse como validación de mecanismo y orden de magnitud, no como reproducción exacta de una serie histórica post-2023.
- **Dinámica intradiaria no validada:** la validación se concentra en el volumen de demanda (Niveles 1–2) y en el tiempo de permanencia en el antepuerto (Nivel 3). La cadencia intradiaria de las llegadas, en particular la dispersión en la ZEAP y la concentración real en la franja 08:00–18:00, no se reproduce; esta brecha, junto con la extensión del contraste al tiempo de rotación completo (TTT) de los cinco flujos, queda priorizada para trabajo futuro.
- **Representación simplificada de la doble operación:** el mecanismo se modela en su forma esencial y con tres simplificaciones que conviene declarar. Primero, la adopción es **exógena y homogénea**: el nivel BH % se impone como parámetro y cada camión de exportación boliviana lo adopta con igual probabilidad, sin representar la decisión del transportista ni la heterogeneidad de costos, contratos o incentivos que la determinarían en la práctica. Segundo, el emparejamiento entre el contenedor de exportación que se deja y el de importación que se retira ocurre **sin restricciones de consignatario**, naviera ni tipo de equipo, cuando en la operación real esas restricciones limitan qué pares son factibles. Tercero, la espera del camión que realiza la doble operación se acota a una **ventana de 8 a 12 horas**, parametrizada con criterio operacional y no estimada desde microdato.

En conjunto, estas simplificaciones hacen que el nivel crítico de adopción deba leerse como un **umbral de referencia bajo condiciones favorables** de emparejamiento, y no como una meta operacional directamente exigible al sistema real.

3.10. Síntesis metodológica

La metodología desarrollada en este capítulo puede resumirse como una secuencia de cinco decisiones encadenadas. Primero, se construyeron los inputs estructurales del modelo a partir de evidencia empírica: las distribuciones de carga por línea logística obtenidas desde **bdAntares**, una frecuencia de recaladas calibrada con los registros 2022 de **bdAntares** y reglas temporales de activación definidas por lógica operacional y juicio experto. Segundo, esos inputs se tradujeron en una representación conceptual del sistema, especificando entidades, flujos, nodos, recursos y reglas de interacción capaces de convertir la demanda inducida por recaladas en trayectorias terrestres observables. Tercero, esa estructura se implementó en SimPy con instrumentación suficiente para revisar trazabilidad de eventos, balances de flujo y consistencia operacional.

Sobre esa base, la metodología avanzó desde el chequeo interno hacia el contraste externo. La verificación se concentró en responder si el modelo había sido correctamente implementado. La calibración ajustó la manifestación observable de la demanda en nodos como frontera, ZEAP y gates del terminal. Luego, la validación comparó el output integrado del modelo contra el sistema real en tres niveles de exigencia creciente: la demanda agregada total (Nivel 1: total no significativo bajo Welch, MAPE 3,3 %, χ^2 de composición no significativo), la demanda por línea logística (Nivel 2: intervalos de Welch que no rechazan la igualdad de medias en los cinco flujos) y el tiempo en el antepuerto del flujo dominante (Nivel 3: *dwell time* en el ZEAP (camión), IC de Welch que contiene el cero). El criterio central fue el volumen de camiones y no la forma intradiaria de las llegadas, que el modelo no pretende reproducir literalmente. El resultado fue una validación sustantiva de la demanda y de la permanencia, con brechas acotadas y priorizadas: la dispersión intradiaria de ZEAP y la extensión del contraste al TTT completo de los cinco flujos.

Finalmente, el diseño experimental se apoya en esa base metodológica. Se definieron los

cuatro modelos comparados (BASE, ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO), las métricas de desempeño, encabezadas por la cantidad de camiones en Arica y complementadas por los indicadores de viajes en vacío evitados, kilómetros recorridos y emisiones de CO₂ que sustentan las hipótesis sobre la doble operación (H4 y H5), y el criterio de comparación pareada con el que se identifica el nivel crítico de adopción de la doble operación. Sobre una única demanda calibrada del año 2022, el *warm-up* se fijó en 20 días mediante el procedimiento de Welch; la comparación entre modelos usa 50 réplicas de semillas comunes (1001–1050) y la búsqueda del breakpoint un procedimiento direccional con piloto de 5 réplicas para tamizar y 50 réplicas de confirmación en los niveles críticos; y el calendario de demanda quedó documentado por fase del experimento. En conjunto, estas decisiones permiten que los experimentos posteriores se interpreten correctamente como resultados de una herramienta metodológicamente trazable, útil para el aprendizaje operacional, la comparación de políticas y futuras iteraciones de recalibración y revalidación, y no como pronósticos cerrados de un modelo plenamente validado.

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo presenta los resultados de los cuatro modelos de simulación: BASE (línea base), ZEAP (antepuerto regulador), DOBLECITA (doble operación sin antepuerto) y COMBINADO (antepuerto + doble operación). La exposición sigue el orden de las hipótesis: el efecto del antepuerto sobre la congestión urbana (H1), el nivel crítico de adopción de la doble operación (H2), la interacción entre ambas políticas (H3) y, finalmente, los viajes de retorno en vacío (H4) y las emisiones de CO₂ (H5) que evita la doble operación. Cada sección responde, además, una pregunta de investigación: la caracterización del sistema actual y la dinámica de flujos (PI1 y PI2) se abordan en el modelo BASE; el rol regulador de la ZEAP (PI3) en el modelo ZEAP; el nivel crítico de adopción de la doble operación (PI4) en los modelos DOBLECITA y COMBINADO; la comparación entre los cuatro modelos (PI5) en la síntesis comparativa; y la reducción de viajes en vacío y emisiones (PI6) en la sección dedicada a H4 y H5.

Todos los experimentos comparten una única demanda calibrada del año 2022 y el mismo conjunto de semillas (1001-1050): la comparación del antepuerto (BASE frente a ZEAP) usa 50 réplicas pareadas, mientras que la búsqueda del nivel crítico de adopción de la doble operación emplea un piloto de 5 réplicas por nivel y 50 réplicas en los niveles de confirmación. El horizonte analizado es de 28 días por corrida, con 20 días de *warm-up* previos que se descartan y un periodo de cierre posterior (20 días de *cool-down* con llegadas y un drenaje sin llegadas de 10 a 40 días según el modelo) hasta que el sistema termina de drenarse. Como todos los modelos comparten las semillas, las comparaciones entre configuraciones se realizan con el intervalo de confianza pareado (*paired-t*; (Law, 2015, sec. 10.2.1)); el intervalo de Welch de dos muestras se reserva para la validación

de la demanda contra los datos históricos.

4.1. Modelo BASE: línea base y validación

El modelo BASE reproduce la operación actual del Puerto de Arica, en la que la ZEAP opera de forma parcial y los camiones esperan mayoritariamente en el radio urbano. Constituye la línea base contra la cual se miden las intervenciones y el referente para la validación frente a los datos de 2022.

La validación del volumen movilizado se realiza por flujo logístico mediante intervalos de Welch al 95 % para la diferencia entre el throughput mensual simulado ($n = 50$) y el observado en 2022 ($m = 12$ meses); el criterio es que el cero pertenezca al intervalo. Los cinco flujos contenerizados (EXPO_BO, IMPO_BO, EXPO_CL, IMPO_CL y MTY) superan el criterio, confirmando que el modelo reproduce adecuadamente la dinámica de carga del sistema.

En cuanto a la congestión, el modelo base presenta en promedio **399,7** camiones simultáneos en ARICA a lo largo del horizonte analizado, con una banda inter-réplica amplia. Esta cifra caracteriza la magnitud del problema: la ciudad opera de forma permanente como área de espera del puerto. Al mismo tiempo, el antepuerto ZEAP se utiliza de forma marginal en este modelo: la infraestructura de regulación existe pero está prácticamente ociosa. La línea base de todos los indicadores del estudio se consolida en la Sección 4.1.3.

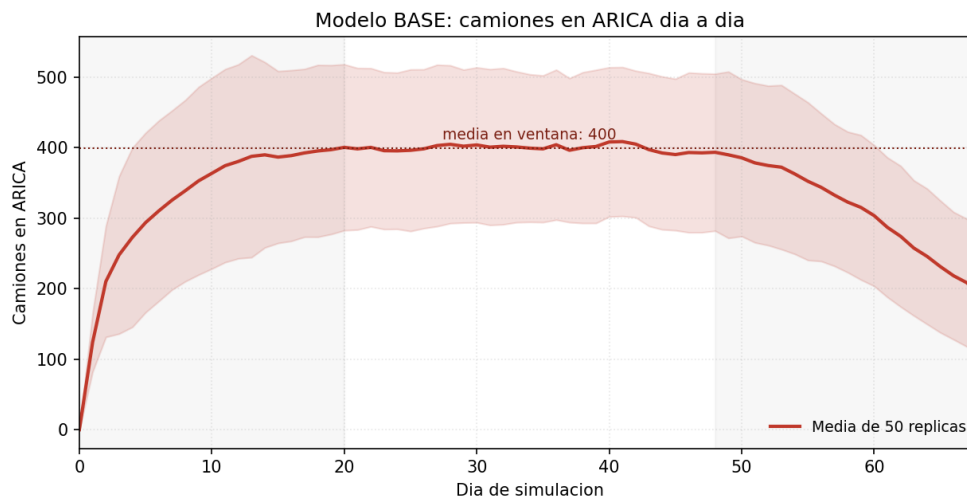


Figura 4.1: Camiones en ARICA día a día en el modelo BASE (operación actual): promedio entre réplicas con su banda inter-réplica. El sistema sostiene de forma permanente del orden de 400 camiones en el radio urbano.

4.1.1. Caracterización del sistema actual

Bajo la demanda observada en 2022, el corredor terrestre que une la frontera boliviana con el terminal opera de forma estable en su capacidad de proceso, los volúmenes movilizados por cada flujo se reproducen dentro de los intervalos de validación, pero presenta un desequilibrio en la distribución espacial de la espera. El recorrido previsto, frontera, escalonamiento en la ZEAP, accesos Gate-In y Gate-Out, y terminal, se cumple solo en parte: como la ZEAP se usa de forma marginal, la espera se concentra en el radio urbano en lugar de absorberse en el antepuerto, donde se acumulan en promedio 399,7 camiones simultáneos. En otras palabras, la saturación del sistema está en el lugar donde ocurre la espera y no en su capacidad de atención: la ciudad cumple, de facto, la función de patio retén del puerto.

4.1.2. Dinámica de flujos y cuellos de botella

Los cinco flujos contenerizados no contribuyen por igual a la congestión: el viaje redondo boliviano (EXPO_BO de exportación e IMPO_BO de importación) domina el movimiento y es, además, el de permanencia más prolongada, mientras que los flujos chilenos (EXPO_CL e IMPO_CL) entran y salen del sistema con rapidez. El contenedor

de importación boliviana (IMPO_BO) registra el mayor *dwell time* de todos los flujos (Sección 4.5), y es precisamente ese flujo el que mantiene a los camiones esperando en la ciudad: el cuello de botella es el tiempo de permanencia a la espera del retiro de la importación de retorno, y no la tasa de atención de los nodos. Cada camión que aguarda su contenedor ocupa el radio urbano durante días. Esta lectura es la que orienta las dos políticas evaluadas a continuación: la ZEAP traslada esa espera fuera de la ciudad, y la doble operación la acorta al consolidar la exportación y la importación en un mismo viaje.

4.1.3. Línea base de los indicadores del estudio

Para habilitar la comparación con los modelos de política (Secciones 4.2, 4.3 y 4.4), se reporta aquí el valor de referencia de cada indicador en el modelo BASE, medido sobre la ventana de análisis (28 días, $n = 50$ réplicas). La Tabla 4.1 los resume; las figuras siguientes muestran su evolución diaria y su dispersión entre réplicas. Estos valores son el referente contra el cual se cuantifica el efecto de cada política.

Cuadro 4.1: Línea base de los indicadores del estudio (modelo BASE, ventana de 28 días, $n = 50$). Referente para la comparación con los modelos ZEAP, DOBLECITA y COMBINADO.

Indicador (KPI)	Valor BASE
Camiones en ARICA (radio urbano)	399,7
Camiones totales en el sistema	845
Ocupación del antepuerto ZEAP	106 calzos (16 %)
Ocupación del galpón en puerto (PORT_PARKING)	0 (sin uso)
Viajes urbanos en vacío (EXPO_BO)	1.265
Emisiones de CO ₂ de viajes en vacío	16,45 t
Dwell time IMPO_BO (importación boliviana)	9,2 días
Dwell time EXPO_BO (exportación boliviana)	4,0 días

El *dwell time* de la importación boliviana (IMPO_BO) es el más alto del sistema (9,2

días en la línea base, frente a 4,0 días de la exportación EXPO.BO) y es el indicador que la doble operación acorta; el detalle por flujo se retoma en la síntesis comparativa (Sección 4.5). Tres lecturas de la línea base orientan las intervenciones: el antepuerto está ocioso (106 de 650 calzos) mientras la ciudad sostiene 399,7 camiones; los 1.265 viajes urbanos en vacío de los camiones EXPO_BO (equivalentes a 16,45 t de CO₂ por réplica) son el margen sobre el que actúa la doble operación; y el alto *dwel time* de la importación boliviana es la causa de fondo de la espera urbana.

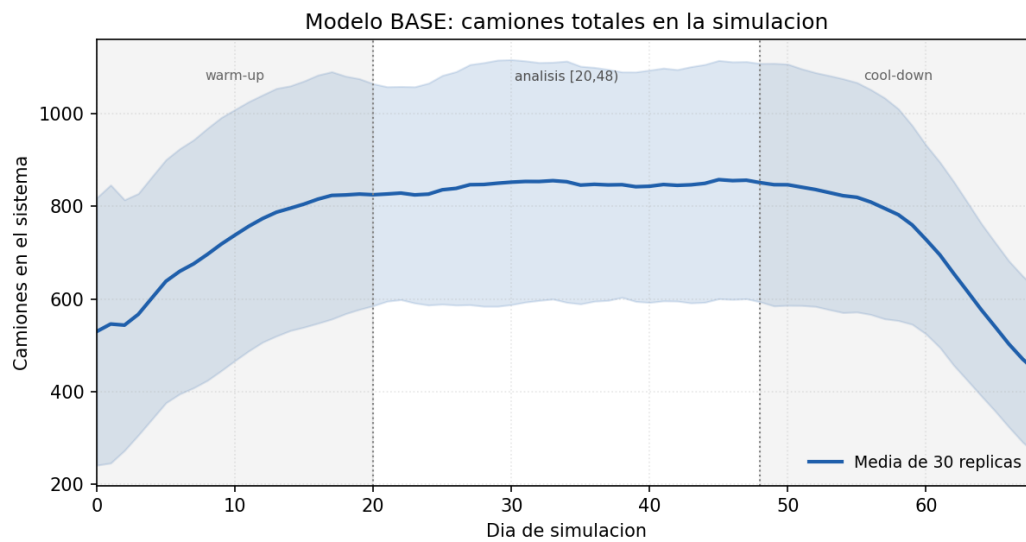


Figura 4.2: Modelo BASE: camiones totales en el sistema a lo largo del horizonte (media inter-réplica y banda $\pm$ una desviación estándar). En la ventana de análisis el sistema sostiene del orden de 845 camiones.

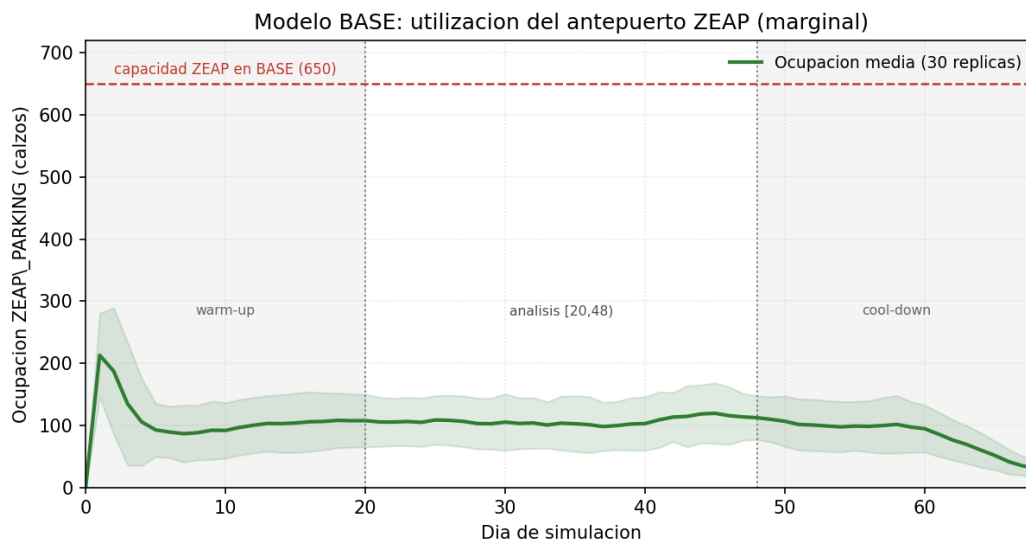


Figura 4.3: Modelo BASE: ocupación del antepuerto ZEAP a lo largo del horizonte (media inter-réplica). El recinto se usa de forma marginal (~ 106 calzos, 16 % de su capacidad actual), reflejando que la espera ocurre en la ciudad y no en el antepuerto.

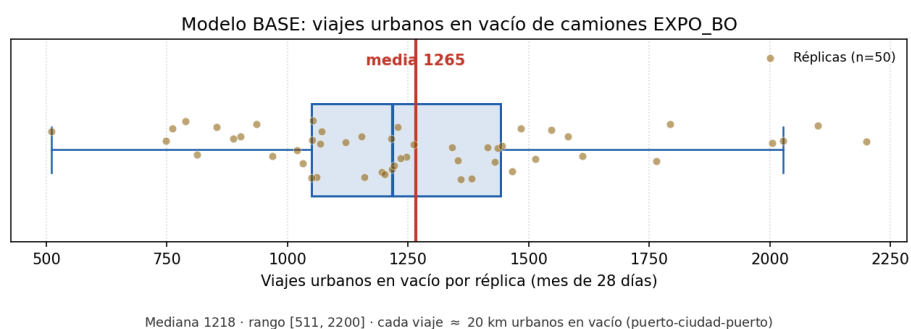


Figura 4.4: Modelo BASE: distribución de los viajes urbanos en vacío de camiones EXPO.BO por réplica (ventana de 28 días). La media es de 1.265 viajes (16,45 t de CO_2); es el referente sobre el cual la doble operación mide los desplazamientos evitados (H4).

4.2. Modelo ZEAP: el antepuerto regulador

El modelo ZEAP convierte el antepuerto en un regulador obligatorio: todo camión es interceptado y escalonado en la ZEAP antes de acceder al terminal, de modo que la espera se traslada fuera del radio urbano.

4.2.1. Efecto sobre la congestión urbana

Al comparar ZEAP con BASE bajo las mismas semillas, los camiones simultáneos en ARICA caen de 399,7 a 70,9 en promedio. El intervalo pareado al 95 % para la reducción es:

$$\bar{d} = 328,8 \text{ camiones}, \quad \text{IC}_{95\%} = [306,8, 350,8], \quad t = 30,0, \quad \text{gl} = 49, \quad p < 0,001.$$

La reducción relativa es del **82,3 %**, muy por encima del umbral del 60 % definido para la Hipótesis 1. Con ello se responde la pregunta PI3: el uso obligatorio de la ZEAP como nodo de regulación reduce de forma drástica la cantidad de camiones que circulan dentro de Arica. El intervalo de la diferencia está completamente por encima de cero, de modo que la reducción es estadísticamente significativa y se repite en todas las réplicas. La Figura 4.5 muestra que las simulaciones descienden sin excepción.

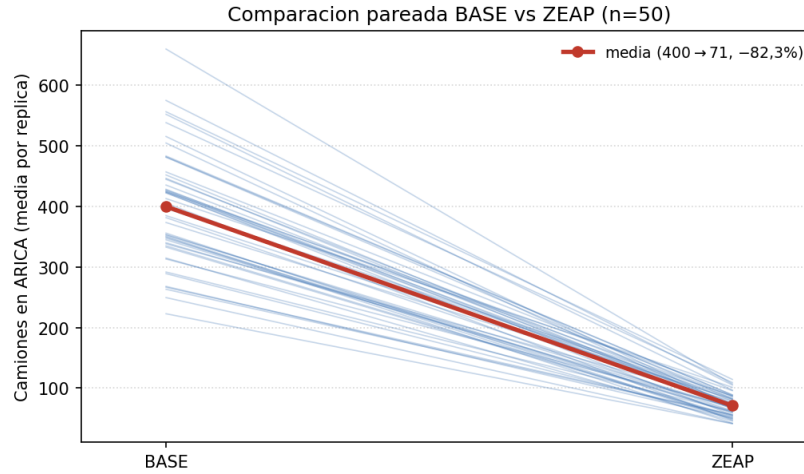


Figura 4.5: Comparación pareada BASE vs. ZEAP: cada línea es una réplica; todas caen de ciudad llena a ciudad regulada. La línea roja es el promedio ($399,7 \rightarrow 70,9$, $-82,3 \%$).

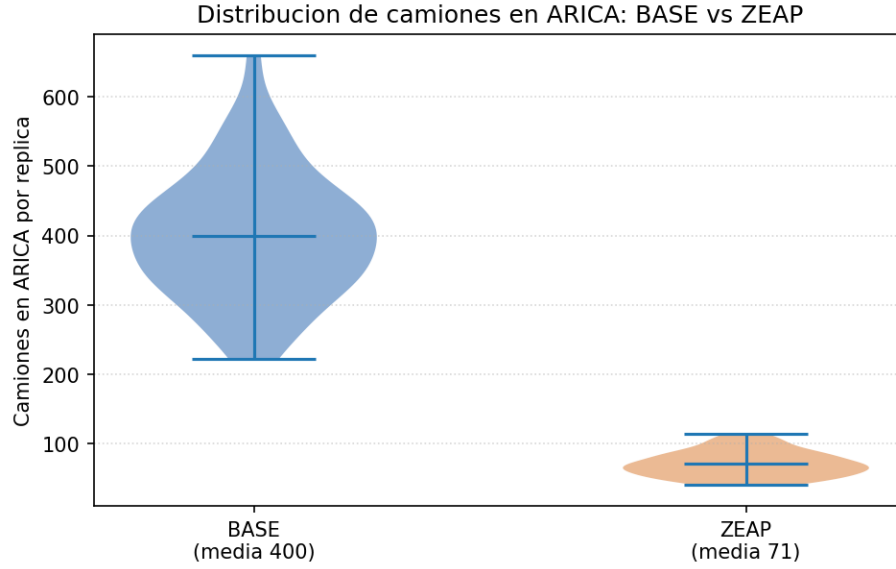


Figura 4.6: Distribución de los camiones en ARICA entre réplicas, BASE frente a ZEAP. El antepuerto desplaza por completo la distribución hacia valores bajos, sin solapamiento entre ambas configuraciones.

4.2.2. Dimensionamiento y utilización del antepuerto

El traslado de la espera a la ZEAP exige verificar que el antepuerto no se sature. Mediante una búsqueda en pasos de 50 calzos se identificó $C^* = 1,500$ calzos como la primera capacidad que elimina la saturación en la totalidad de las réplicas, absorbiendo incluso el peak de demanda de la peor réplica ($\approx 1,460$ calzos, un 97,3 %; Tabla 4.2). Con esa capacidad, las métricas de servicio del antepuerto son:

Cuadro 4.2: Ocupación del antepuerto ZEAP_PARKING a $C^* = 1,500$ calzos ($n = 30$ réplicas), expresada en % de la capacidad. Las métricas se calculan por réplica sobre los *snapshots* intradiarios de la ventana de análisis; ninguna réplica alcanza la saturación.

Métrica (% de C^*)	Media	Desv. est.	Varianza	IC 95 %	Mín	Máx
Ocupación media por réplica	42,1	11,5	133,1	[37,7; 46,4]	24,7	73,0
Ocupación máxima por réplica	57,3	16,4	268,6	[51,2; 63,4]	34,1	97,3
P95 de la ocupación máxima por réplica: 87,1 % · Réplicas saturadas ($\geq C^*$): 0 / 30						

La Figura 4.7 muestra la ocupación media diaria del antepuerto a lo largo del horizonte,

con el intervalo de confianza al 95 % entre las 30 réplicas, contrastando el modelo BASE con el modelo ZEAP. En la operación actual el recinto permanece prácticamente ocioso (~ 100 calzos), mientras que como regulador obligatorio absorbe el flujo y se estabiliza en torno a ~ 630 calzos de ocupación media diaria (un 42 % de C^*), holgadamente por debajo de la capacidad $C^* = 1,500$. (El valor de *pico* de la Tabla 4.2 es mayor porque corresponde al máximo intra-día por réplica, no a la media diaria entre réplicas.)

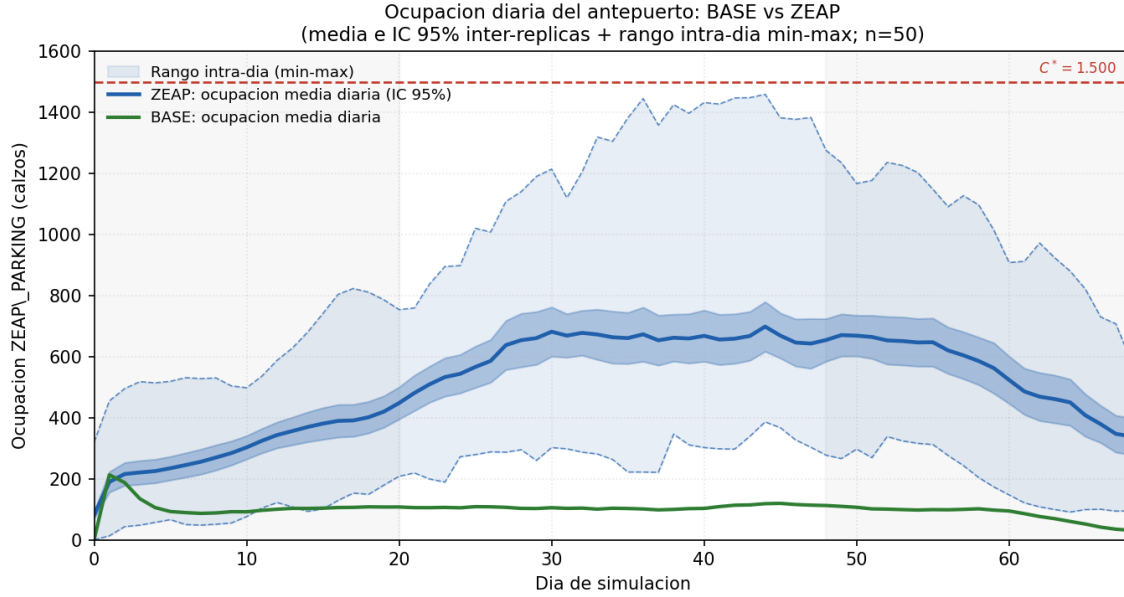


Figura 4.7: Ocupación media diaria del antepuerto ZEAP_PARKING con intervalo de confianza al 95 % entre las 30 réplicas, comparando el modelo BASE (verde) y el modelo ZEAP (azul) sobre el mismo eje. En BASE el antepuerto se usa de forma marginal (~ 100 calzos); como regulador obligatorio absorbe el flujo y se estabiliza en torno a ~ 630 calzos, sin acercarse a la capacidad $C^* = 1,500$. Las zonas sombreadas corresponden al *warm-up* y al *cool-down*.

El antepuerto opera con una ocupación media del 42 % y una ocupación máxima que promedia un 57,3 % por réplica, sin ninguna réplica saturada (0/30). Sin embargo, la peor réplica alcanza un 97,3 % de ocupación ($\approx 1,460$ calzos): ese pico de demanda es el que fija el dimensionamiento. Frente al uso marginal del recinto en la operación actual (BASE), el regulador pasa a absorber el flujo que antes congestionaba la ciudad sin que ello afecte la productividad del terminal (el throughput por flujo se mantiene estadísticamente equivalente al de BASE; Tabla 4.3). Esa equivalencia se verificó flujo por flujo

con comparación pareada por semilla (Tabla 4.3). En los cuatro flujos contenerizados las diferencias son despreciables frente a sus volúmenes, con intervalos que contienen el cero holgadamente. El único flujo con una diferencia puntual no trivial es el de contenedores vacíos (MTY), que registra 41 movimientos menos por réplica en ZEAP, un 3,0 % de su volumen; su intervalo también contiene el cero, aunque por un margen estrecho ($[-83,8; 1,6]$), de modo que la equivalencia no se rechaza pero tampoco puede afirmarse con la misma contundencia que en los demás flujos. La conclusión que sostiene el capítulo es, en consecuencia, que el antepuerto **no degrada la productividad del terminal**: reordena dónde esperan los camiones sin alterar el volumen que el puerto procesa.

Cuadro 4.3: Throughput por flujo, BASE frente a ZEAP, en comparación pareada por semilla ($n = 50$ réplicas de semillas comunes, ventana de análisis de 28 días). El criterio de equivalencia es que el intervalo de confianza pareado de la diferencia contenga el cero.

Flujo	BASE	ZEAP	Diferencia	IC _{95 %}	Equivalente
EXPO_BO	1,265	1,268	+2,6	$[-4,1; 9,3]$	sí
IMPO_BO	2,815	2,814	-1,1	$[-9,1; 7,0]$	sí
EXPO_CL	447	447	+0,0	$[-0,1; 0,1]$	sí
IMPO_CL	231	231	-0,3	$[-2,0; 1,4]$	sí
MTY	1,386	1,345	-41,1	$[-83,8; 1,6]$	sí

La robustez de este resultado frente al nivel de demanda se evaluó mediante un análisis de sensibilidad sobre la frecuencia de recaladas, siguiendo el procedimiento estándar de perturbación de un factor de entrada y evaluación del efecto sobre las medidas de desempeño descrito en (Law, 2015, cap. 12). Se replicaron los modelos BASE y ZEAP bajo tres escalas de la frecuencia de recaladas ($\times 0,9$, $\times 1,1$ y $\times 1,2$ respecto de la tasa observada en 2022, elegidas como variaciones moderadas en torno a esa tasa y no como proyecciones de demanda del puerto), con $n = 30$ réplicas de semillas comunes por combinación y comparación pareada (Tabla 4.4). La reducción de camiones en el radio urbano se mantiene entre un 84,1 % y un 85,7 % en las tres escalas, con intervalos que

en ningún caso se aproximan al cero: H1 no depende del nivel de demanda supuesto. El efecto incluso crece levemente cuando la demanda aumenta, lo que es coherente con el mecanismo, ya que un flujo mayor implica un mayor volumen de espera susceptible de ser trasladado fuera de la ciudad.

Cuadro 4.4: Sensibilidad a la frecuencia de recaladas: camiones en ARICA y saturación del antepuerto por escala de demanda. Comparación pareada BASE-ZEAP con $n = 30$ réplicas de semillas comunes (1001-1030) por combinación.

Escala	ARICA BASE	ARICA ZEAP	Diferencia (IC _{95%})	Reducción	Réplicas saturadas
$\times 0,9$	385,0	61,3	$-323,7 [-356,7; -290,8]$	$-84,1 \%$	0/30
$\times 1,1$	467,5	71,9	$-395,6 [-433,7; -357,5]$	$-84,6 \%$	1/30
$\times 1,2$	504,5	72,0	$-432,6 [-474,5; -390,6]$	$-85,7 \%$	1/30

El dimensionamiento, en cambio, sí resulta sensible. Bajo la demanda de 2022 y ante una caída del 10 % ninguna réplica satura el recinto: a $\times 0,9$ el peak más alto observado llega al 90,3 % de los 1.500 calzos. Al aumentar la demanda un 10 % o un 20 % aparece, en cada escala, una réplica que alcanza el 100 % de la capacidad (1/30), pese a que la ocupación máxima promedio se mantiene holgada (61,0 % y 65,6 % respectivamente) y la ocupación media no supera el 50,5 %. Que una réplica sature no es un detalle de ocupación: cuando el recinto se llena, los camiones que no logran ingresar hacen cola en el acceso, dentro de la ciudad, y vuelven a contar en el indicador de congestión. La afirmación que esta tesis sostiene es, por tanto, condicionada: $C^* = 1,500$ calzos es una capacidad suficiente para la demanda observada en 2022, y conserva holgura ante escenarios de menor actividad, pero pierde esa holgura frente a un crecimiento sostenido de la frecuencia de recaladas, donde los peaks extremos alcanzan el límite del recinto. Un aumento estructural de la demanda obligaría a revisar C^* , y esa revisión debe apoyarse en los peaks por réplica y no en la ocupación media, que incluso a $\times 1,2$ permanece en torno a la mitad de la capacidad.

C^* es un requerimiento *operacional* de capacidad, derivado del comportamiento del sistema simulado bajo la demanda de 2022. Su evaluación económica queda explícitamente fuera del alcance de esta tesis, según se declara en la Sección 1.6 del Capítulo 1: no se consideran el costo de habilitación de las zonas, la inversión en accesos, la operación y mantención del recinto ampliado ni la comparación con alternativas de gestión. La

cifra debe leerse, por tanto, como el dimensionamiento que el sistema requiere para no devolver camiones a la ciudad, y no como una recomendación de inversión evaluada. Esta capacidad es factible dentro del perímetro actual del antepuerto, sin requerir suelo adicional. La expansión a $C^* = 1,500$ calzos se compone de tres zonas habilitables del recinto, zona amarilla (650 calzos), zona roja (350) y zona naranja (500), y se complementa con una reconfiguración de accesos que pasa de una entrada y una salida actuales a dos entradas y dos salidas, más una pista exclusiva de ingreso a la ZEAP, para sostener el flujo redirigido sin generar cola en el portón. El detalle gráfico de estas intervenciones físicas, levantado sobre imagen del recinto, se incluye en el Anexo B (Figura B.1).

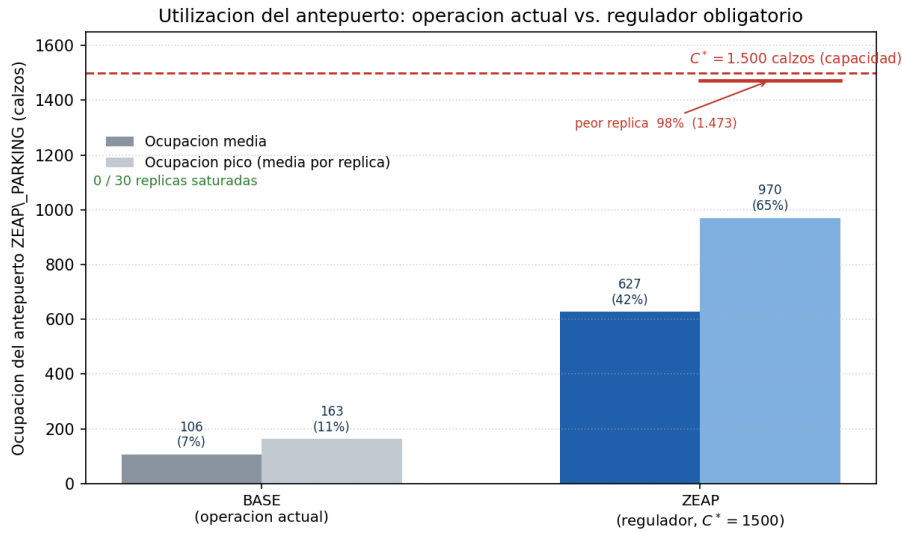


Figura 4.8: Utilización del antepuerto: en la operación actual (BASE) el recinto se usa de forma marginal, mientras que como regulador obligatorio (ZEAP) absorbe el flujo (ocupación máxima media por réplica del 57,3 %, sin saturación) dentro de la capacidad de $C^* = 1,500$ calzos.

4.3. Modelo DOBLECITA

El modelo DOBLECITA incorpora la doble operación sobre la operación actual (sin regulación obligatoria por ZEAP): una fracción BH % de los camiones de exportación boliviana (EXPO_BO), en lugar de salir del terminal a esperar su carga de retorno en la

ciudad, espera dentro del recinto y retira un contenedor de importación (IMPO_BO) en la misma visita. Sobre este modelo se evalúan tres hipótesis: el nivel crítico de adopción a partir del cual la doble operación descongestiona la ciudad (H2, pregunta PI4), los desplazamientos urbanos en vacío que evita (H4) y las emisiones de CO₂ asociadas (H5, pregunta PI6).

4.3.1. Búsqueda direccional del nivel de adopción

La búsqueda sigue el procedimiento direccional descrito en la metodología (Sección 3.8.4): la referencia sin doble operación se estima con $n = 50$ réplicas de semillas comunes, cada nivel candidato se tamiza con un piloto de $n = 5$ y los niveles de confirmación se elevan a $n = 50$. Con $ARICA(BH = 0\%) = 399,7$ camiones, el criterio exige que el extremo superior del intervalo pareado quede por debajo de $-40,0$ camiones (-10%).

Cuadro 4.5: Confirmación del nivel de adopción de la doble operación en DOBLECITA (semillas comunes; $n = 50$ en los niveles de confirmación). Diferencia pareada en camiones en ARICA respecto de $BH = 0\%$ (399,7); significativo si $IC_{hi} < -40,0$.

BH %	ARICA	$\bar{d}$	IC 95 %	red. %	sig.
0	399,7	-	-	-	base
25	359,7	-39,9	[-43,8; -36,1]	-10,0 %	no
26	357,9	-41,7	[-45,5; -38,0]	-10,4 %	no
27	355,8	-43,9	[-48,0; -39,8]	-11,0 %	no
28	353,7	-45,96	[-50,08; -41,84]	-11,5 %	sí

El *breakpoint* de DOBLECITA es **BH= 28%**: a ese nivel, los camiones en ARICA bajan de 399,7 a 353,7 ($-45,96$ camiones, $-11,5\%$), con un intervalo pareado al 95 % de $[-50,08, -41,84]$ enteramente por debajo del umbral. La *media* ya alcanza el 10 % desde $BH = 25\%$, pero el criterio, más exigente, requiere que también lo haga el extremo superior del intervalo, lo que ocurre recién en $BH = 28\%$. Sin antepuerto, la doble operación requiere por tanto que cerca de **un 28 %** de los camiones EXPO_BO adopte la conducta para descongestionar la ciudad de forma significativa. Este valor debe leerse como una estimación condicionada al diseño experimental: depende del umbral de relevancia adoptado (10 %), de la resolución de la grilla (1 pp) y del número de

réplicas, por lo que no constituye un punto de quiebre exacto de la operación real. La Sección 4.4.5 examina esta sensibilidad bajo umbrales alternativos.

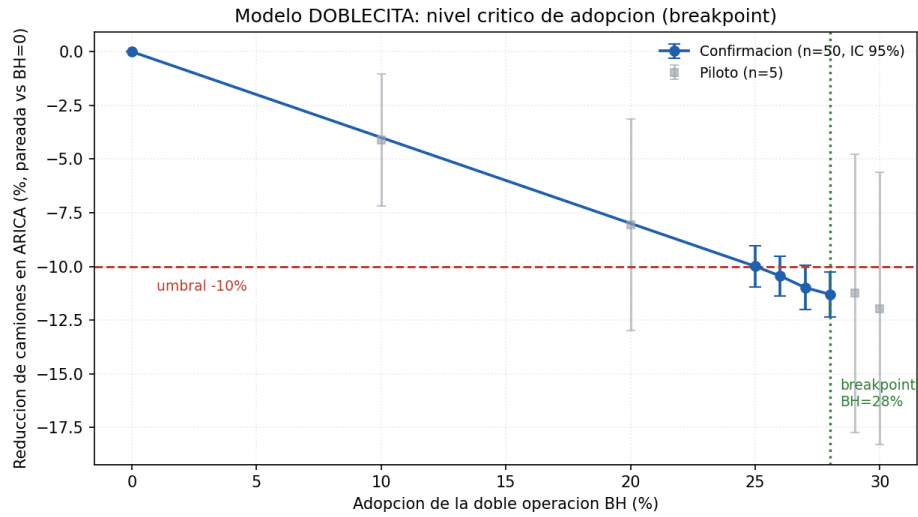


Figura 4.9: Reducción pareada de camiones en ARICA por nivel de adopción en DOBLECITA, con su intervalo de confianza pareado al 95 % (semillas comunes). Los niveles de tamizaje se midieron con el piloto de $n = 5$ réplicas y los niveles en torno al *breakpoint* con $n = 50$, lo que explica la distinta amplitud de los intervalos. El *breakpoint* (BH= 28 %) es el primer nivel en que el extremo superior del intervalo queda por debajo del umbral del -10% ($-40,0$ camiones); en los niveles previos la media ya cruza el umbral pero el intervalo no.

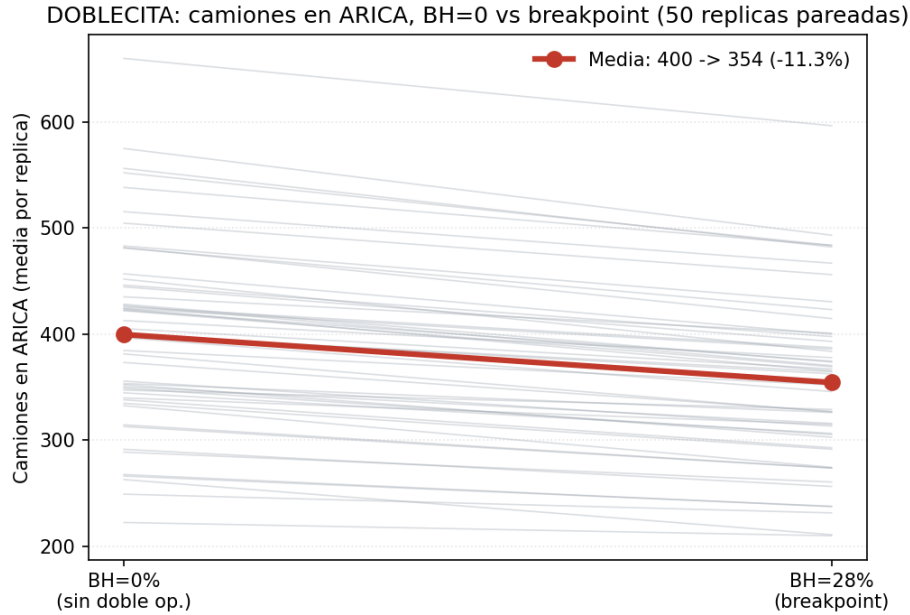


Figura 4.10: Comparación pareada de los camiones en ARICA sin doble operación (BH= 0 %) y al nivel crítico (BH= 28 %) en DOBLECITA, sobre las mismas semillas.

El mecanismo de esta reducción es la relocalización de la espera: el camión EXPO_BO que adopta la doble operación aguarda su carga de retorno dentro del terminal en lugar de hacerlo en la ciudad, de modo que su tiempo de permanencia deja de contarse en el radio urbano de Arica. La reducción de la congestión es por ello proporcional a la fracción de camiones que adopta la conducta y está acotada por la participación de los camiones EXPO_BO en el flujo, los únicos que pueden encadenar el retiro de la importación en la misma visita. El umbral del 10 % de H2 resulta así conservador frente a ese techo estructural y frente a la evidencia empírica de la literatura de *backhauling*: Caballini et al. (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020) reportan reducciones de circulación en vacío de hasta 33,79 % mediante el emparejamiento import-export (*double move*).

4.3.2. Desplazamientos urbanos en vacío evitados

La doble operación sostiene también el efecto ambiental del modelo. Cada camión EXPO_BO que adopta la conducta, en lugar de salir del terminal a esperar su carga de retorno en un estacionamiento de la ciudad y volver a entrar, espera dentro del recinto

(PORT_PARKING) y retira su contenedor de importación (IMPO_BO) en la misma visita. Con ello se elimina un desplazamiento en vacío dentro del área urbana de Arica: el trayecto puerto-ciudad-puerto, del orden de $10 + 10$ km. Los kilómetros con carga no cambian, porque la importación se entrega de todos modos y el camión regresa cargado a Bolivia con o sin doble operación.

Cada doble operación realizada equivale, por tanto, a un desplazamiento urbano en vacío evitado. Contabilizando las dobles operaciones por réplica en la ventana de medición, el modelo pasa de **cero** desplazamientos evitados sin doble operación (BH= 0 %, por construcción) a **350,0** desplazamientos urbanos en vacío evitados por réplica en su nivel crítico de adopción (BH= 28 %), como se resume en la Tabla 4.6.

Cuadro 4.6: Desplazamientos urbanos en vacío evitados por la doble operación (= dobles operaciones realizadas) en DOBLECITA, en la ventana de medición. Valores reales de la simulación, 50 réplicas de semillas comunes.

Nivel	Desplaz. urbanos en vacío evitados / réplica	IC 95 %
BH= 0 %	0	-
BH= 28 %	350,0	[320,2, 379,8]

Respecto del modelo BASE, que sostiene **1.265** viajes urbanos en vacío por réplica, la doble operación en su nivel crítico (BH= 28 %) los reduce a **915: 350** viajes urbanos en vacío menos por réplica, un **27,7 %**, proporción coherente con el nivel de adopción del 28 %. El efecto es directamente proporcional al nivel de adopción, tal como plantea H4: a mayor fracción de camiones EXPO_BO que adopta la doble operación, mayor es el número de desplazamientos urbanos en vacío que se suprimen.

Como subproducto, la doble operación acelera el retiro de la importación boliviana: el camión de exportación ya está disponible dentro del recinto para llevarse el contenedor, de modo que el *dwell time* de la importación IMPO_BO disminuye de 9,2 a 8,3 días (−9,8 %), mientras que el de exportación EXPO_BO se mantiene ($\approx 4,0$ días; Figuras 4.12, 4.13 y 4.11). Ambos se estiman mediante la ley de Little ($W = L/\lambda$: inventario medio del flujo sobre su tasa de movimiento). Son una **estimación del modelo y no una magnitud validada**: la validación del tiempo de permanencia alcanzó al tiempo en el antepuerto del flujo dominante (Nivel 3, *dwell time* en el ZEAP (camión)) y no al

dwell time del contenedor en el terminal, para el cual la base disponible no entrega registros homologables (Sección 3.9). Su valor está en la *dirección y el orden de magnitud* del cambio que induce la doble operación, no en el nivel absoluto de los días reportados. Con esa salvedad, esto conecta H4 con la mejora de servicio del terminal: el mismo mecanismo que elimina desplazamientos improductivos descongestiona el inventario de importación.

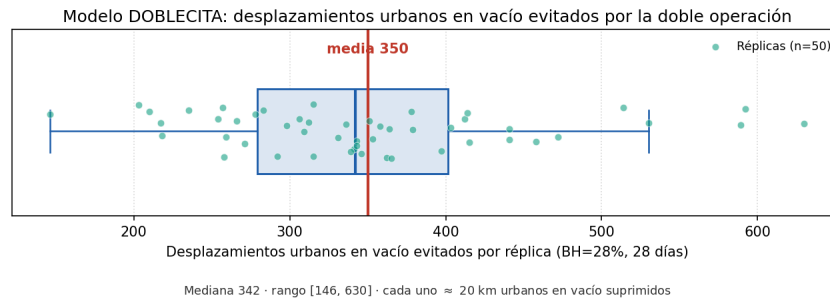


Figura 4.11: Desplazamientos urbanos en vacío evitados por la doble operación en el modelo DOBLECITA. Cada doble operación equivale a una importación retirada en la misma visita al terminal, es decir, a un trayecto puerto-ciudad-puerto en vacío suprimido.

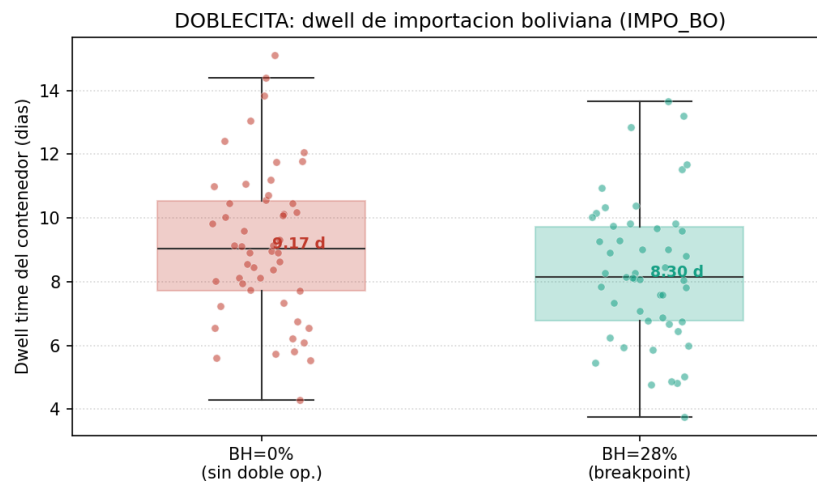


Figura 4.12: *Dwell time* del contenedor de importación boliviana (IMPO_BO) sin doble operación (BH= 0 %) y al nivel crítico (BH= 28 %) en DOBLECITA, estimado por la ley de Little. La doble operación adelanta el retiro y reduce el *dwell time* de importación de 9,2 a 8,3 días (−9,8 %).

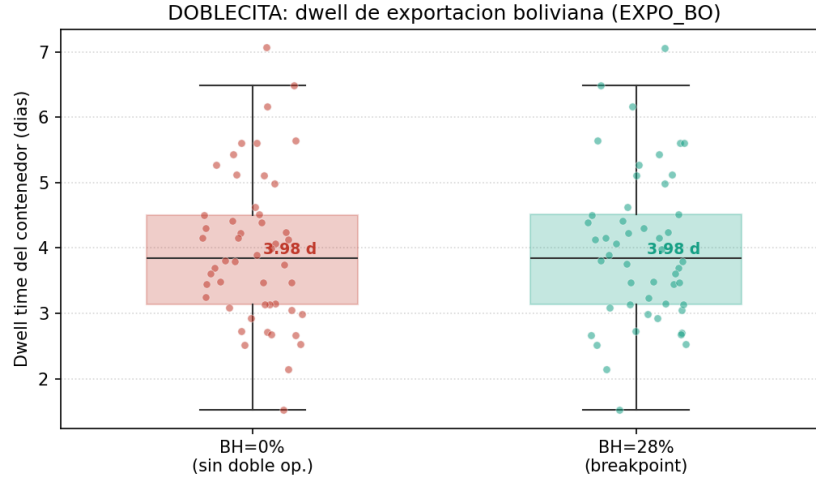


Figura 4.13: *Dwell time* del contenedor de exportación boliviana (EXPO_BO) sin doble operación y al nivel crítico en DOBLECITA. A diferencia de la importación, el *dwell time* de exportación se mantiene ($\approx 4,0$ días): la doble operación actúa sobre el retiro de la importación de retorno, no sobre la exportación.

4.3.3. Kilómetros y emisiones de CO₂ evitados

Cada desplazamiento urbano en vacío evitado suprime el trayecto puerto-ciudad-puerto, del orden de **20 km recorridos en vacío** por doble operación (10 km de ida y 10 km de vuelta). Los kilómetros con carga no varían: la importación se entrega de todos modos y el camión regresa cargado a Bolivia con o sin doble operación. Por ello el ahorro de emisiones proviene íntegramente de la supresión de kilometraje urbano en vacío y se calcula con el factor de emisión del estado vacío ($f_{\text{vacío}} = 0,65 \text{ kg CO}_2/\text{km}$; véase la fórmula $\Delta\text{CO}_2 = \sum_e \Delta k_e f_e$ y los factores en la Sección 3.8.3 del Capítulo 3). Cada doble operación evita así $20 \times 0,65 = 13 \text{ kg}$ de CO₂.

Aplicando estas tasas a los desplazamientos evitados de la Tabla 4.6, el modelo DOBLECITA en su nivel crítico (BH= 28 %) evita por réplica cerca de **7.000 km** recorridos en vacío y **4,55 toneladas de CO₂** (Tabla 4.7). Frente a las **16,45 t** de CO₂ que generan los viajes urbanos en vacío en el modelo BASE, esto equivale a bajarlas a **11,90 t** por réplica, un **27,7 %** menos. La reducción es estadísticamente robusta: su intervalo de confianza al 95 % no incluye el cero, ya que se deriva directamente del número de dobles operaciones, cuyo intervalo tampoco lo incluye.

Cuadro 4.7: Kilómetros en vacío y emisiones de CO₂ evitados por la doble operación en DOBLECITA. Tasas: 20 km en vacío y 13 kg CO₂ por doble operación ($f_{\text{vacío}} = 0,65 \text{ kg/km}$). Valores reales de la simulación, 50 réplicas.

Nivel	Km en vacío evitados / réplica	CO ₂ evitado / réplica (t)
BH= 28 %	7.000 [6.405, 7.595]	4,55 [4,16, 4,94]

En suma, en el modelo DOBLECITA la reducción de desplazamientos urbanos en vacío se traduce, en la misma proporción, en menos kilómetros recorridos en vacío dentro de la ciudad y en menores emisiones de CO₂ del transporte terrestre. El ahorro proviene de suprimir circulación urbana en vacío, sin alterar el transporte útil; es por tanto un beneficio limpio aunque de magnitud acotada, coherente con que la doble operación actúa sobre el último tramo urbano y no sobre el viaje de larga distancia.

4.4. Modelo COMBINADO

El modelo COMBINADO integra ambas intervenciones: el antepuerto ZEAP obligatorio ($C^* = 1,500$) y la doble operación. Constituye el escenario de operación propuesto. Se aplica la misma búsqueda direccional que en DOBLECITA. Como el antepuerto ya descongestiona la ciudad, la base de comparación es mucho menor: ARICA(BH = 0 %) = 70,9 camiones, por lo que el criterio exige $IC_{hi} < -7,1$ camiones (un 10 % de la base).

4.4.1. Búsqueda direccional del nivel de adopción

Cuadro 4.8: Confirmación del nivel de adopción de la doble operación en COMBINADO (semillas comunes; $n = 50$ en los niveles de confirmación). Diferencia pareada en camiones en ARICA respecto de BH= 0 % (70,9); significativo si $IC_{hi} < -7,1$.

BH %	ARICA	$\bar{d}$	IC 95 %	red. %	sig.
0	70,9	-	-	-	base
19	63,2	-7,71	[-8,67; -6,75]	-10,9 %	no
20	62,6	-8,27	[-9,24; -7,30]	-11,7 %	sí

El *breakpoint* de COMBINADO es **BH**= 20 %: a ese nivel los camiones en ARICA bajan de 70,9 a 62,6 (−8,27 camiones, −11,7 %), con un intervalo pareado al 95 % de $[-9,24, -7,30]$ por debajo del umbral; en BH= 19 % el extremo superior del intervalo (−6,75) aún no lo cruza. La comparación con DOBLECITA arroja el resultado central de esta tesis:

- Sin antepuerto (DOBLECITA), la doble operación se vuelve una mejora significativa recién al **28 %** de adopción.
- Con el antepuerto regulador (COMBINADO), el mismo efecto se alcanza a un nivel menor, de **20 %** de adopción.

La diferencia, de **8 puntos porcentuales** a favor de COMBINADO (28 % frente a 20 %), supera el umbral de 2 pp definido para la Hipótesis 3. El antepuerto descongestiona la ciudad por sí mismo (H1) y reduce el nivel de adopción a partir del cual la doble operación aporta, lo que hace viable una política que por sí sola exigiría tasas de adopción más altas. Esto completa la respuesta a PI4: el nivel crítico de adopción de la doble operación es del 28 % sobre la operación actual y baja al 20 % cuando se combina con el antepuerto regulador.

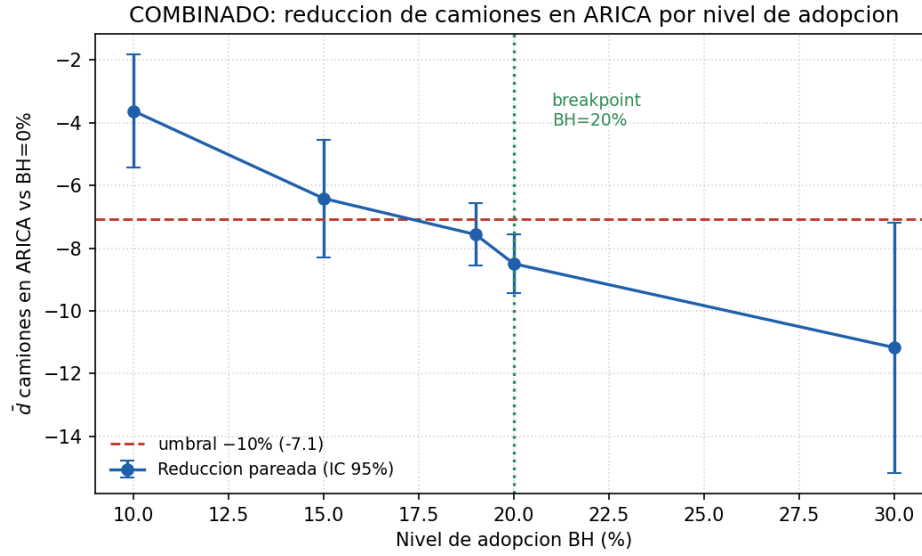


Figura 4.14: Reducción pareada de camiones en ARICA por nivel de adopción en COMBINADO, con su intervalo de confianza pareado al 95 %. Los niveles de tamizaje se midieron con el piloto de $n = 5$ réplicas y los niveles en torno al *breakpoint* con $n = 50$, lo que explica la distinta amplitud de los intervalos. El *breakpoint* significativo se alcanza en $BH = 20\%$ (primer nivel con el extremo superior del intervalo bajo el umbral del -10%), frente al 28% del modelo sin antepuerto (Figura 4.9).

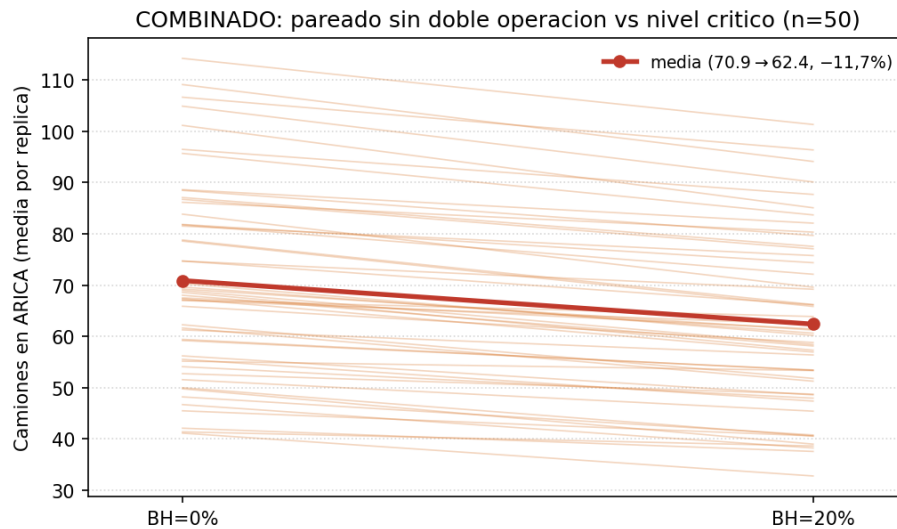


Figura 4.15: Comparación pareada de los camiones en ARICA sin doble operación ($BH = 0\%$) y al nivel crítico ($BH = 20\%$) en COMBINADO, sobre las mismas semillas.

4.4.2. Desplazamientos urbanos en vacío evitados

El mecanismo es el descrito en la Sección 4.3.2: cada doble operación suprime el trayecto urbano puerto-ciudad-puerto en vacío. A su nivel crítico (BH= 20 %), el modelo COMBINADO evita **251,8** desplazamientos urbanos en vacío por réplica (Tabla 4.9), un 19,9 % de los $\approx 1,268$ desplazamientos de su propio escenario sin doble operación (BH= 0 %), por sobre el umbral del 10 % de H4. La proporción evitada coincide, como en DOBLECITA, con el nivel de adopción: cada camión EXPO.BO adoptante suprime su propio desplazamiento en vacío, de modo que la fracción evitada replica la fracción que adopta la conducta (27,7 % al 28 % y 19,9 % al 20 %), sobre bases comparables de viajes en vacío (1,265 y $\approx 1,268$).

Cuadro 4.9: Desplazamientos urbanos en vacío evitados por la doble operación en COMBINADO. Valores reales de la simulación, 50 réplicas de semillas comunes.

Nivel	Desplaz. urbanos en vacío evitados / réplica	IC 95 %
BH= 0 %	0	-
BH= 20 %	251,8	[230,4, 273,2]

En conjunto, el escenario COMBINADO descongestiona la ciudad con una adopción menor (H3); como contraparte, al operar con menos camiones adoptantes, suprime menos desplazamientos en vacío que DOBLECITA a su propio nivel crítico (251,8 frente a 350,0). La comparación relevante es a igual adopción: a un mismo BH ambos modelos evitan esencialmente los mismos desplazamientos, y la ventaja del COMBINADO reside en que necesita menos adopción para descongestionar la ciudad, lo que refuerza su conveniencia como escenario recomendado.

4.4.3. Kilómetros y emisiones de CO2 evitados

Con la misma tasa por doble operación (20 km en vacío y 13 kg CO₂; $f_{\text{vacío}} = 0,65$ kg/km), el modelo COMBINADO a su nivel crítico (BH= 20 %) evita por réplica cerca de **5.035 km** en vacío y **3,27 toneladas de CO₂** (Tabla 4.10), por debajo de los 7,000 km y 4,55 t de DOBLECITA, en proporción directa a su menor nivel de adopción (20 % frente a 28 %). El ahorro proviene de suprimir circulación urbana en vacío, sin alterar

el transporte útil; es por tanto un beneficio limpio aunque de magnitud acotada.

Cuadro 4.10: Kilómetros en vacío y emisiones de CO₂ evitados por la doble operación en COMBINADO. Tasas: 20 km y 13 kg CO₂ por doble operación. Valores reales, 50 réplicas.

Nivel	Km en vacío evitados / réplica	CO ₂ evitado / réplica (t)
BH= 20 %	5.035 [4.606, 5.464]	3,27 [2,99, 3,55]

La Figura 4.16 compara DOBLECITA y COMBINADO en kilómetros en vacío y emisiones evitadas, cada uno a su nivel crítico de adopción.

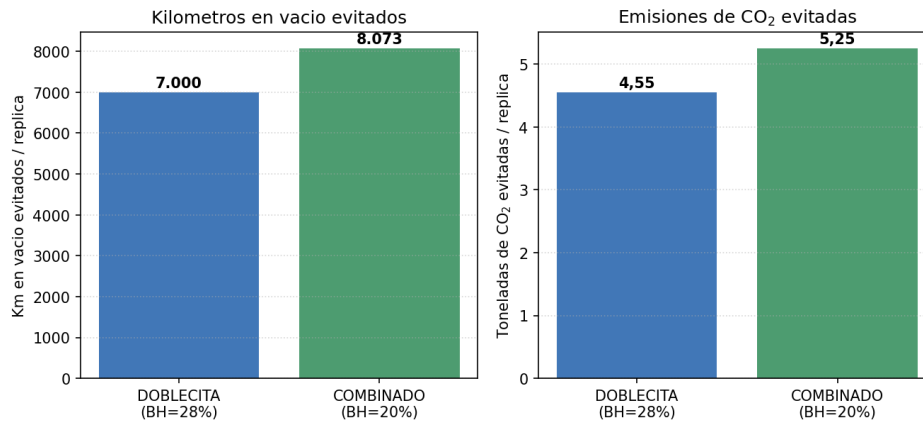


Figura 4.16: Kilómetros en vacío y emisiones de CO₂ evitados por la doble operación, al nivel crítico de adopción de cada modelo (DOBLECITA BH= 28 % y COMBINADO BH= 20 %). El ahorro es proporcional al número de dobles operaciones completadas.

4.4.4. Término de interacción a nivel común de adopción

Los niveles críticos de DOBLECITA (28 %) y COMBINADO (20 %) se estiman sobre líneas base distintas (399,7 y 70,9 camiones), por lo que su diferencia, aunque cuantifica la interacción en la dimensión de la adopción, no constituye por sí sola una estimación formal del término de interacción del diseño 2×2 . Para estimarlo se completó la celda faltante del diseño: el modelo DOBLECITA se ejecutó a un nivel común de adopción BH= 20 % con las mismas 50 semillas de los demás experimentos, de modo que las cuatro celdas del diseño quedan medidas con números aleatorios comunes (Tabla 4.11).

Cuadro 4.11: Celdas del diseño 2×2 a nivel común de adopción (BH= 20 %): camiones promedio en ARICA, $n = 50$ réplicas de semillas comunes (1001-1050).

	Sin doble operación	Con doble operación (20 %)
Sin antepuerto	BASE = 399,7	DOBLECITA = 368,5
Con antepuerto	ZEAP = 70,9	COMBINADO = 62,6

Con las cuatro celdas pareadas por semilla, el efecto de la doble operación a igual adopción (20 %) es de $-31,15$ camiones sin antepuerto ($IC_{95\%} [-34,34; -27,96]$; un $-7,79\%$ de BASE) y de $-8,27$ camiones con antepuerto ($IC_{95\%} [-9,24; -7,30]$; un $-11,67\%$ de ZEAP). El término de interacción aditivo, $I = (COMB_{20} - ZEAP) - (DOBLE_{20} - BASE)$, resulta $+22,88$ camiones con $IC_{95\%} [19,75; 26,02]$: positivo y estadísticamente significativo, lo que descarta formalmente la superaditividad en el indicador de congestión. Este resultado es esperable por saturación del indicador: una vez que el antepuerto descongestiona la ciudad, el margen absoluto sobre el que puede actuar la doble operación es menor. El signo de una interacción depende de la escala en que se mide la respuesta, por lo que el diseño experimental estándar recomienda examinar también la escala logarítmica cuando los efectos son proporcionales (Montgomery, 2017). En escala relativa, en cambio, el término logarítmico $I_{\log} = (\ln COMB_{20} - \ln ZEAP) - (\ln DOBLE_{20} - \ln BASE)$ resulta $-0,046$ con $IC_{95\%} [-0,061; -0,030]$: negativo y significativo, es decir, la reducción *porcentual* que produce la doble operación es mayor en presencia del antepuerto.

La lectura conjunta se observa en un mismo nivel de adopción: al 20 %, la doble operación por sí sola no alcanza el umbral de relevancia del 10 % ($-7,79\%$), mientras que sobre el sistema ordenado por el antepuerto sí lo supera ($-11,67\%$). La interacción favorable entre ambas políticas no consiste, por tanto, en que sus efectos absolutos se sumen o amplifiquen, sino en que el antepuerto *reduce el costo de adopción* de la política conductual: el mismo esfuerzo de adopción produce un efecto relativo mayor, y el nivel crítico cae del 28 % al 20 % (H3).

4.4.5. Sensibilidad del nivel crítico al umbral de relevancia

Los niveles críticos dependen del umbral de relevancia adoptado (10 %) y de la resolución de la grilla de búsqueda (1 pp), por lo que deben leerse como estimaciones condicionadas al diseño experimental. Para examinar esa dependencia se recalculó el nivel crítico bajo umbrales alternativos del 5 % y del 15 %, reutilizando los niveles ya simulados. Con umbral del 5 %, el nivel crítico de DOBLECITA baja al 25 % y el de COMBINADO al 15 % (este último estimado sobre el piloto de $n = 5$); con el umbral central del 10 % se obtienen el 28 % y el 20 %; y con un umbral del 15 % ninguno de los dos modelos alcanza significancia dentro de la grilla explorada. En los dos umbrales evaluables la brecha entre modelos se mantiene (10 y 8 puntos porcentuales, siempre a favor de COMBINADO): la conclusión de interacción favorable es robusta a la elección del umbral, aunque el valor puntual de cada nivel crítico no lo sea.

4.5. Síntesis comparativa

La Tabla 4.12 compara los cuatro modelos en congestión urbana, utilización del antepuerto y nivel crítico de adopción de la doble operación (PI5). La métrica de congestión (camiones en ARICA) no es directamente comparable entre pares con y sin antepuerto, porque cada par mide una configuración distinta del sistema; por ello se reporta junto al *breakpoint*, que es la métrica común de la doble operación.

Cuadro 4.12: Síntesis de los cuatro modelos (semillas 1001-1050; $n = 50$ en BASE y ZEAP, y $n = 50$ en los niveles de confirmación del breakpoint (piloto $n = 5$ en el tamizaje)).

Modelo	Configuración	ARICA (BH= 0)	Breakpoint
BASE	Operación actual	399,7	-
ZEAP	Antepuerto obligatorio $C^* = 1,500$	70,9	-
DOBLECITA	Doble operación sin antepuerto	399,7	BH= 28 %
COMBINADO	Antepuerto + doble operación	70,9	BH= 20 %

Respecto del tiempo de permanencia del contenedor (*dwell time*), la distinción por dirección de carga muestra un patrón asimétrico: el contenedor chileno entra y sale con

rapidez, mientras que el boliviano se demora especialmente en la importación. El *dwell time* de importación boliviana (IMPO_BO) es justamente el indicador que la doble operación mejora, al tener el camión ya disponible dentro del recinto para el retiro de retorno: el antepuerto por sí solo casi no altera ese *dwell time* (se mantiene en torno a 9,2 días), mientras que la doble operación sí lo acorta: baja a 8,3 días en DOBLECITA y a 8,5 días en COMBINADO, en ambos casos respecto de los 9,2 días de la línea base. La reducción es algo mayor en DOBLECITA, en línea con su mayor nivel de adopción. Finalmente, los desplazamientos urbanos en vacío evitados constituyen el indicador ambiental de la doble operación: cada camión EXPO_BO que adopta la conducta espera su carga de retorno dentro del terminal en lugar de salir a la ciudad, suprimiendo el trayecto urbano puerto-ciudad-puerto en vacío, de modo que la reducción es proporcional a la tasa de adopción. En el modelo DOBLECITA, a su nivel crítico (BH= 28 %), esto evita cerca de 350 desplazamientos urbanos en vacío por réplica, equivalentes a unos 7.000 km en vacío y 4,55 toneladas de CO₂ menos; en COMBINADO, a su nivel crítico (BH= 20 %), son cerca de 252 desplazamientos y 3,27 toneladas de CO₂, menos que en DOBLECITA en proporción directa a su menor nivel de adopción (Secciones 4.3 y 4.4).

Capítulo 5

Conclusiones

Esta investigación evaluó, mediante simulación de eventos discretos, dos políticas para la congestión terrestre del Puerto de Arica, la regulación obligatoria del flujo en el antepuerto ZEAP y la doble operación de camiones, junto con su combinación; el detalle de los resultados está en el Capítulo 4. Este capítulo cierra la tesis: revisa el cumplimiento de los objetivos (Sección 5.1), contrasta las cinco hipótesis contra sus umbrales (Sección 5.2), formula los aportes teóricos (Sección 5.3) y las implicancias prácticas para la gestión del corredor (Sección 5.4), y delimita las líneas de investigación futura (Sección 5.5).

5.1. Cumplimiento de los objetivos

El objetivo general, desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos del sistema logístico-portuario de Arica que permitiera evaluar mejoras operativas y físicas sin intervenir el sistema real, se alcanzó de manera íntegra: el modelo construido reproduce la operación observada, supera los criterios de validación definidos (Niveles 1–3) y sirvió de plataforma para contrastar las cuatro configuraciones. Su cumplimiento se sostiene en el avance sucesivo de los seis objetivos específicos, que se concibieron como una secuencia metodológica.

El primer objetivo específico (OE1) se cumplió al caracterizar la demanda y los flujos del sistema a partir de los registros de 2022 y al ajustar y validar las distribuciones estadísticas que alimentan el modelo. Sobre esa caracterización, el segundo objetivo (OE2) se concretó en la construcción del modelo BASE, que representa la configuración

actual del corredor con sus seis flujos y siete nodos. El tercer objetivo (OE3) verificó la fidelidad de ese modelo: la validación por flujo logístico, mediante intervalos de Welch al 95 % sobre el throughput mensual, confirmó que los cinco flujos contenerizados se reproducen dentro de los márgenes observados, lo que habilita el uso del modelo como línea base confiable.

El cuarto objetivo (OE4) constituye el núcleo del trabajo experimental: la comparación de los cuatro modelos en congestión urbana y utilización del antepuerto, y la identificación del nivel crítico de adopción de la doble operación mediante una búsqueda direccional respaldada por intervalos de confianza pareados sobre semillas comunes. De este análisis se obtuvieron tanto el efecto del antepuerto sobre la congestión como el breakpoint de adopción en ausencia y en presencia de la ZEAP. El quinto objetivo (OE5) cuantificó, para los modelos con doble operación, la reducción de kilómetros recorridos en vacío en el área urbana y de las emisiones de CO₂ asociadas, empleando factores de emisión publicados. Finalmente, el sexto objetivo (OE6) traduce la evidencia anterior en lineamientos operativos para la gestión del corredor, que se desarrollan en la Sección 5.4. La secuencia, por tanto, avanza desde la caracterización del sistema hasta una recomendación accionable, cerrando el ciclo planteado en los objetivos.

5.2. Contraste de las hipótesis

El contraste de cada hipótesis contra su umbral se resume en la Tabla 5.1 y se detalla a continuación.

H1 (regulación mediante ZEAP). El uso obligatorio del antepuerto como nodo de regulación reduce la cantidad promedio de camiones en el radio urbano de 399,7 a 70,9, un 82,3 %, por sobre el umbral del 60 % postulado. El intervalo de confianza pareado de la reducción se ubica íntegramente por encima de cero y la distribución del indicador entre réplicas no se solapa con la del modelo BASE, de modo que la hipótesis se verifica con significancia estadística. La hipótesis queda confirmada.

H2 (efecto del *backhauling*). Existe un nivel crítico de adopción de la doble operación a partir del cual la congestión urbana se reduce de forma significativa. Sin antepuerto (modelo DOBLECITA), ese nivel es del 28 % de los camiones EXPO.BO: a esa

adopción, los camiones en el radio urbano disminuyen un 11,5 % respecto de la operación sin doble operación, con el extremo superior del intervalo pareado por debajo del umbral del 10 %. La hipótesis queda confirmada.

H3 (interacción entre antepuerto y *backhauling*). El nivel crítico de adopción es menor cuando la doble operación se implementa junto con el antepuerto (modelo COMBINADO) que cuando opera sola (modelo DOBLECITA): desciende del 28 % al 20 %, una diferencia de 8 puntos porcentuales, por sobre los 2 pp postulados. La hipótesis queda confirmada en su criterio y constituye el resultado central de la tesis (Sección 5.3). En escala absoluta la combinación no iguala ni supera la suma de los efectos individuales, rinde menos que esa suma ($I = +22,9$; $IC_{95\%} [19,8; 26,0]$; Sección 4.4.4); la interacción favorable está en la escala relativa ($I_{\log} = -0,046$): el antepuerto reduce el nivel de adopción que la doble operación necesita para producir efecto.

H4 (reducción de kilómetros en vacío). La doble operación suprime el desplazamiento urbano en vacío puerto-ciudad-puerto que el camión EXPO_BO realiza para esperar su carga de retorno fuera del terminal, en proporción directa a su nivel de adopción. En el modelo DOBLECITA, a su nivel crítico, se evitan 350 desplazamientos por réplica, un 27,7 % respecto del escenario sin doble operación; en el modelo COMBINADO, 251,8 desplazamientos, un 19,9 % de su propia base. En ambos modelos la fracción evitada coincide con el nivel de adopción y supera el umbral del 10 %; la hipótesis queda confirmada.

H5 (reducción de emisiones). La supresión de kilómetros en vacío se traduce, en la misma proporción, en una reducción de las emisiones de CO₂ del transporte terrestre. A su nivel crítico se evitan 4,55 toneladas de CO₂ por réplica en DOBLECITA y 3,27 en COMBINADO, reducciones del 27,7 % y del 19,9 % respectivamente respecto del escenario sin doble operación, ambas por sobre el umbral del 10 %. La hipótesis queda confirmada.

En síntesis, las cinco hipótesis se confirman en la dirección y por sobre los umbrales postulados; ninguna fue refutada, como resume la Tabla 5.1.

Cuadro 5.1: Contraste formal de las hipótesis de investigación.

Hipótesis	Criterio	Resultado	Verif.
H1	$\geq 60\%$	82,3 %	Sí
H2	$\geq 10\%$	11,5 % a BH= 28 %	Sí
H3	≥ 2 pp	8 pp (28 % $\rightarrow$ 20 %)	Sí
H4	$\geq 10\%$	-27,7 % (DOBLE) y -19,9 % (COMB)	Sí
H5	$\geq 10\%$	-27,7 % / -19,9 % (4,55 y 3,27 t)	Sí

Nota sobre H5: como las emisiones se calculan con un factor de emisión fijo por kilómetro, H5 no es un contraste independiente de H4: su reducción porcentual es la misma. Su aporte propio está en la magnitud: las toneladas de CO₂ evitadas.

5.3. Aportes teóricos

El primer aporte es una relectura del problema de congestión. La caracterización del sistema (PI1 y PI2) muestra que el problema del corredor terrestre está en la distribución espacial de la espera y no en su capacidad de proceso: los volúmenes por flujo se reproducen dentro de los intervalos de validación y, aun así, la ciudad de Arica cumple, de facto, la función de patio retén del puerto. El cuello de botella es el tiempo de permanencia de los camiones a la espera del retiro de la importación boliviana (IMPO_BO), el flujo de mayor *dwell time* del sistema, y no la tasa de atención de los nodos. Reformular el problema de congestión como un problema de *dónde* y *por cuánto tiempo* se espera, más que de capacidad agregada, es lo que explica por qué ambas políticas resultan efectivas: una traslada la espera fuera de la ciudad (PI3) y la otra la acorta. El segundo aporte, y el central, es la *interacción favorable* entre las dos políticas en la dimensión del nivel de adopción (PI4): no se trata de una sinergia en el sentido estricto de superaditividad. En escala absoluta, la combinación no supera la suma de los efectos individuales, algo esperable por saturación del indicador: una vez que el antepuerto descongestiona la ciudad, el margen restante sobre el que puede actuar la doble operación es menor. Lo que la combinación sí modifica, de forma sustantiva, es el *costo de adopción* de la política conductual: la presencia del antepuerto reduce del 28 % al 20 % la fracción de camiones EXPO_BO que debe adoptar la doble operación para producir

una descongestión adicional estadísticamente significativa. El término de interacción del diseño 2×2 , estimado a un nivel común de adopción ($BH = 20\%$) con las mismas 50 semillas, confirma formalmente ambas lecturas: en escala absoluta, $I = +22,9$ camiones ($IC_{95\%} [19,8; 26,0]$), positivo y significativo, descarta la superaditividad; en escala relativa, $I_{\log} = -0,046$ ($IC_{95\%} [-0,061; -0,030]$), negativo y significativo, confirma que la reducción *relativa* de la doble operación es mayor en presencia del antepuerto (Sección 4.4.4). El antepuerto descongestiona la ciudad por sí mismo (H1) y, a la vez, vuelve más alcanzable a la doble operación, porque reduce el nivel de adopción a partir del cual esta empieza a descongestionarse (H3): una vez que el flujo se ordena en el antepuerto, basta con que una fracción menor de camiones adopte la doble operación para lograr un efecto relativo equivalente. Este hallazgo admite una lectura que trasciende el caso de Arica: cuando se combina una intervención de infraestructura o regulación con una medida que depende del cambio de conducta de los actores, la primera puede facilitar a la segunda, reduciendo cuánta adopción voluntaria se necesita para que produzca un efecto significativo.

5.4. Implicancias prácticas

De la comparación de los cuatro modelos (PI5) se desprende que la configuración recomendada es la COMBINADO: habilitar la ZEAP como regulador obligatorio con una capacidad de $C^* = 1,500$ calzos e incentivar la doble operación de los camiones de exportación boliviana. Bajo esta configuración basta con que cerca de un 20% de esos camiones adopte la conducta para obtener una descongestión adicional estadísticamente significativa, sin saturar el antepuerto en ninguna réplica de la búsqueda de capacidad: la ocupación máxima promedia un 57,3% por réplica y, en la peor, alcanza un 97,3% sin llegar a la saturación (Tabla 4.2 del Capítulo 4).

Una implicancia relevante para la gestión es que ambas políticas son de baja inversión física. La capacidad propuesta para el antepuerto es factible dentro del perímetro actual del recinto, mediante la habilitación de tres zonas internas y la reconfiguración de los accesos, sin requerir suelo adicional ni obras mayores. La doble operación, por su parte, es una medida esencialmente operativa y conductual: consolida la exportación y la importación en una misma visita al terminal y no exige infraestructura nueva. La

descongestión, por tanto, depende de un mejor uso de la infraestructura existente y de la coordinación del flujo, y no de una expansión de capacidad, lo que la hace viable en el corto plazo y con costos acotados.

La doble operación aporta, además, un beneficio ambiental directo y medible (PI6): al retirar la importación en la misma visita, elimina el desplazamiento urbano en vacío que el camión haría para esperar su carga de retorno fuera del recinto, sin reducir el transporte útil. En el modelo DOBLECITA, a su nivel crítico, esto evita del orden de 350 desplazamientos por réplica, equivalentes a unos 7.000 km en vacío y 4,55 toneladas de CO₂ por horizonte de medición; el escenario COMBINADO, a su nivel crítico, evita del orden de 252 desplazamientos y 3,27 toneladas de CO₂, menos que la doble operación sin antepuerto en proporción directa a su menor nivel de adopción (20 % frente a 28 %). Por tratarse de un ahorro que proviene exclusivamente de suprimir circulación urbana en vacío, es un beneficio limpio aunque de magnitud acotada: actúa sobre el último tramo urbano y no sobre el viaje de larga distancia, que se realiza con carga en ambos casos. Este resultado es coherente con la literatura de *backhauling* portuario, que vincula el emparejamiento importación-exportación con reducciones de circulación en vacío y de emisiones (Caballini, Gracia, Mar-Ortiz & Sacone, 2020; Schulte, Lalla-Ruiz, González-Ramírez & Voß, 2017).

En conjunto, estas conclusiones cumplen el propósito de la investigación: se construyó y validó un modelo de simulación del corredor bajo la demanda de 2022, se evaluó el efecto del antepuerto y de la doble operación sobre la congestión urbana, se determinó el nivel crítico de adopción de la doble operación y su disminución al combinarla con el antepuerto, y se cuantificó la reducción de kilómetros en vacío y de emisiones de CO₂. La recomendación operacional se entrega con respaldo estadístico, sobre semillas comunes y con intervalos de confianza pareados.

5.5. Investigación futura

El modelo desarrollado es una plataforma de simulación modular y extensible: su estructura de nodos, flujos y reglas de operación permite editar parámetros, agregar etapas o incorporar nuevas políticas con relativa facilidad para representar otras configuraciones del corredor. En la medida en que se disponga de más y mejores datos de la opera-

ción real del terminal y del antepuerto, el modelo puede afinarse en mayor detalle y converger hacia conclusiones cada vez más certeras sobre la situación actual.

Sobre esta base se abren las principales líneas de trabajo futuro, que surgen de las limitaciones declaradas en el Capítulo 1: recalibrar el modelo con demanda más reciente; incorporar una adopción heterogénea del *backhauling* entre los camiones y restricciones de disponibilidad de carga de retorno; añadir una evaluación económica de la habilitación del antepuerto y de los incentivos a la doble operación; y ampliar el inventario ambiental más allá del CO₂ del tramo urbano en vacío, incorporando otros contaminantes y los efectos locales sobre la ciudad. Cada una de estas extensiones puede implementarse sobre la arquitectura ya construida sin rehacerla, de manera que, más allá de los resultados específicos de esta tesis, la herramienta queda como una base reutilizable para evaluar futuras intervenciones sobre el sistema logístico-portuario de Arica u otros puertos de características similares.

Nomenclatura

Acrónimos y siglas

ANTARES Sistema de registro operacional del Terminal Puerto Arica (base **bdAntares**).

BH *Backhauling*: fracción de camiones EXPO_BO que adoptan la doble operación.

COPERT *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport*.

CRN *Common Random Numbers*, números aleatorios comunes.

CV Coeficiente de variación.

EMEP *European Monitoring and Evaluation Programme*.

EPA Empresa Portuaria Arica.

ETA *Estimated Time of Arrival*, tiempo estimado de arribo de una nave.

ETD *Estimated Time of Departure*, tiempo estimado de zarpe de una nave.

HPP *Homogeneous Poisson Process*, proceso de Poisson homogéneo.

IID Variables independientes e idénticamente distribuidas.

KPI *Key Performance Indicator*, indicador clave de desempeño.

KS Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

MAPE *Mean Absolute Percentage Error*, error porcentual absoluto medio.

NegBin Distribución Binomial Negativa.

NHPP Proceso de Poisson no homogéneo.

SED Simulación de eventos discretos.

SimPy Biblioteca de simulación de eventos discretos para el lenguaje Python.

TEU *Twenty-foot Equivalent Unit*, unidad equivalente a un contenedor de 20 pies.

Dwell time en el ZEAP (camión) Intervalo que un camión permanece en el antepuerto, entre sus puertas de entrada y salida. Distinto del *dwell time* del contenedor en el terminal.

TPA Terminal Puerto Arica.

TTT *Truck Turnaround Time*, tiempo de rotación del camión en el sistema, de su entrada a su salida.

ZEAP Zona de Extensión de Actividad Portuaria.

Modelos de simulación

BASE Modelo de la operación actual del sistema (línea base), en que la ZEAP opera de forma parcial y los camiones esperan mayoritariamente en el radio urbano.

ZEAP Modelo con el antepuerto ZEAP como regulador obligatorio del flujo: todo camión es interceptado y escalonado en la ZEAP antes de acceder al terminal.

DOBLECITA Modelo con doble operación (*backhauling*) sobre la operación actual: el camión de exportación boliviana retira su importación de retorno en la misma visita al terminal, en lugar de esperar en la ciudad.

COMBINADO Modelo que combina ambas políticas: antepuerto regulador ZEAP y doble operación (ZEAP + DOBLECITA).

Nodos del sistema modelado

Frontera (Chungará-Tambo Quemado) Complejo fronterizo donde se realizan los controles documentales y el cruce internacional.

ARICA Radio urbano de la ciudad, donde los camiones circulan y esperan en la operación actual; su ocupación define el indicador principal del estudio.

ZEAP: gate de entrada Puerta de ingreso al antepuerto, donde el camión es interceptado y registrado.

ZEAP: estacionamiento Área de calzos del antepuerto donde el camión espera su escalonamiento hacia el terminal.

ZEAP: gate de salida Puerta de salida del antepuerto hacia el terminal.

Accesos al terminal (gates) Puertas de entrada y salida del terminal portuario, donde se controlan documentos, cita y condiciones del camión y del contenedor.

Terminal portuario Patio y frentes de operación del terminal, pulmón entre las naves y el transporte terrestre.

Flujos logísticos

EXPO_BO Flujo de contenedores de exportación de origen boliviano que utilizan el Puerto de Arica como puerta de salida al Pacífico.

IMPO_BO Flujo de contenedores de importación de destino boliviano que arriban por el Puerto de Arica.

EXPO_CL Flujo de contenedores de exportación de origen chileno.

IMPO_CL Flujo de contenedores de importación de destino chileno.

MTY Flujo de contenedores vacíos (*empty*), destinados a la reposición de equipos.

DUMMY Flujo de carga no contenerizada (granel sólido, cisterna y cargas especiales).

Métricas e indicadores

Camiones en ARICA Indicador principal (KPI): número promedio de camiones presentes simultáneamente en el radio urbano de Arica. Es un proxy de la presión del

flujo portuario sobre la ciudad (presencia y espera urbana); no mide congestión vial en sentido estricto (velocidades o demoras).

Utilización de la ZEAP Ocupación del estacionamiento del antepuerto respecto de su capacidad.

Dwell time Tiempo de permanencia del contenedor, por dirección de carga: de exportación (depósito en patio a zarpe) y de importación (descarga a retiro).

Viajes urbanos en vacío Desplazamientos puerto-ciudad-puerto que realiza el camión EXPO_BO para esperar su carga de retorno fuera del terminal; la doble operación los evita.

Emisiones de CO₂ evitadas Reducción de CO₂ asociada a los kilómetros en vacío suprimidos por la doble operación.

Warm-up Período de calentamiento de la simulación (20 días) que se descarta antes de medir, para evitar el transitorio de arranque.

Distribuciones de entrada del modelo

Interarribos de naves Proceso de llegada de recaladas modelado como Exponencial de media 46,3 h (aproximación de Poisson homogéneo calibrada con datos 2022).

Cargas por nave Número de contenedores por flujo muestreado de distribuciones Binomial Negativa calibradas por clase de nave (LOW/MID/HIGH) sobre 2022.

Adelanto de camiones EXPO_BO Días entre el cruce de frontera y la ETA de la nave, muestreados de una distribución Gamma calibrada sobre los datos reales 2022.

Offsets de activación y tiempos de servicio Distribuciones acotadas (triangular o beta reescalada) de soporte finito y no negativo, definidas por criterio operacional para los flujos y nodos sin microdato directo.

Conceptos operacionales clave

Backhauling / Doble operación Esquema operativo en el que el camión de exportación, tras entregar su contenedor, retira uno de importación en la misma visita al terminal (*street turn* o *double move*), evitando el desplazamiento urbano en vacío que realizaría para esperar su carga de retorno fuera del recinto.

Buffer logístico Rol de un nodo (en particular, la ZEAP) como amortiguador dinámico que regula el flujo de camiones hacia el puerto mediante políticas de espera, liberación y priorización.

Congestión en gates Acumulación de camiones en los accesos al terminal (gate-in y gate-out) producto de capacidades limitadas, tiempos de procesamiento y patrones de llegada.

Patios urbanos Patios extraportuarios ubicados dentro del área urbana de Arica cuya operación contribuye a la concentración de camiones en la ciudad.

Hinterland Área de influencia terrestre del puerto; en esta tesis, el corredor Arica-La Paz y su entorno carretero asociado.

Foreland Red de puertos y servicios marítimos con los que el Puerto de Arica se conecta a través de las naves.

Referencias

- Banks, J., Carson II, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2005). *Discrete-Event System Simulation* (4 ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Benedecti, R. C., Durski Silva, V. M., & Alves da Costa, G. A. (2026). Reducing congestion in port hinterlands: an agent-based modeling case study of truck parking facility impacts. *Journal of Shipping and Trade*, 11(1), 3.
- Benedecti, R. C., Durski Silva, V. M., & da Costa, G. A. A. (2025). Enhancing logistics through the development of port infrastructure: the role of truck parking facilities. *Procedia Computer Science*, 274, 817–826.
- Bett, D. K., Ali, I., Gheith, M., & Eltawil, A. (2024). Simulation-based optimization of truck appointment systems in container terminals: A dual transactions approach with improved congestion factor representation. *Logistics*, 8(3), 80.
- BioBioChile (2026). Fuerte congestión en puerto de arica: alcanza el 120 % de ocupación a raíz de bloqueos en bolivia. BioBioChile. Nota de prensa, 23 de junio de 2026. Consultado en junio de 2026.
- Bustos-Coral, D. & Costa, A. M. (2022). Drayage routing with heterogeneous fleet, compatibility constraints, and truck load configurations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 168, 102922.
- Caballini, C., Ghiara, H., & Gommellini, G. (2025). From a distance to a process perspective: A method for assessing the feasibility of a port–dry port system. *Applied Sciences*, 15(21), 11715.
- Caballini, C., Gracia, M. D., Mar-Ortiz, J., & Sacone, S. (2020). A combined data mining-optimization approach to manage trucks operations in container terminals with the use of a TAS: Application to an Italian and a Mexican port. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 142, 102054.
- Caballini, C., Sacone, S., & Saeednia, M. (2016). Cooperation among truck carriers in seaport containerized transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 38–56.

- Cartenì, A. & De Luca, S. (2012). Tactical and strategic planning for container terminals: Simulation modelling practice and theory. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 21, 123–145.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2017). Logística y facilitación del comercio para la integración regional. Technical report, Naciones Unidas, Santiago de Chile.
- Congreso Nacional de Chile (1997). Ley n° 19.542: Moderniza el sector portuario estatal. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Publicada en el Diario Oficial el 19 de diciembre de 1997.
- Corporación Nacional Forestal (CONAF) (2024). Conaf arica retiró una tonelada de basura de la ruta 11ch. CONAF, Región de Arica y Parinacota. Sobre residuos y desechos biológicos dejados por conductores en la Ruta 11CH hacia el Parque Nacional Lauca. Consultado en junio de 2026.
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). A comparative analysis of several vehicle emission models for road freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(5), 347–357.
- Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR) (2022). Anuario estadístico marítimo 2022. Annual report, Gobierno de Chile.
- Dragović, B., Tzannatos, E., & Park, N. (2017). Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(1), 4–34.
- Empresa Portuaria Arica (2022). Plan estratégico 2022–2026. Technical report, Empresa Portuaria Arica (EPA), Arica, Chile. Documento oficial de planificación estratégica, define objetivos, políticas y sostenibilidad de la gestión portuaria.
- Empresa Portuaria Arica (2023). *Reglamento de Ingreso, Circulación y Estacionamiento de Camiones del Antepuerto Puerto Arica*. Arica, Chile: Empresa Portuaria Arica (EPA). Establece disposiciones de tránsito, control documental y normas de seguridad para el antepuerto ZEAP.

- Empresa Portuaria Arica (2024). *Manual de Operaciones y Tarifas de la Zona de Extensión de Actividad Portuaria (ZEAP)*. Arica, Chile: Empresa Portuaria Arica (EPA). Regula las operaciones, tarifas y normas de uso del recinto ZEAP, ubicado en el Valle de Lluta.
- Empresa Portuaria Arica (2025). Plan maestro de infraestructura portuaria 2025. Technical report, Empresa Portuaria Arica (EPA), Arica, Chile. Documento técnico de planificación de infraestructura, establece lineamientos de desarrollo del Puerto de Arica y su integración urbana.
- European Environment Agency (2023). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: 1.a.3.b.i-iv road transport. Technical report, European Environment Agency, Copenhagen. Metodología COPERT para factores de emisión del transporte por carretera.
- Fajar, A., Sarno, R., & Fauzan, A. C. (2018). Comparison of discrete event simulation and agent based simulation for evaluating the performance of port container terminal. In *2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, Yogyakarta, Indonesia. IEEE. Port Container Terminal case study using discrete-event and agent-based simulation.
- Frey, H. C., Roupail, N. M., & Zhai, H. (2008). Link-based emission factors for heavy-duty diesel trucks based on real-world data. *Transportation Research Record*, 2058(1), 23–32.
- Fundación Terram (2026). Un desastre poco visibilizado: más de la mitad de accidentes con vehículos con cargas peligrosas en el altiplano de arica y parinacota han sido en los últimos dos años. Fundación Terram. Nota de prensa basada en catastro de Fundación Aka Pacha. Consultado en junio de 2026.
- Givoni, M., Macmillen, J., Banister, D., & Feitelson, E. (2013). From policy measures to policy packages. *Transport Reviews*, 33(1), 1–20.
- Gobiernos de Chile y Bolivia (1904). Tratado de paz, amistad y comercio entre la república de Chile y la república de Bolivia. El texto puede consultarse en la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (ley N° 1734) y en archivos diplomáticos

de ambos países. Firmado en Santiago de Chile el 20 de octubre de 1904. Establece el régimen de libre tránsito para Bolivia a través de territorio chileno y puertos del Pacífico.

Hoffmann J. and Asariotis, R. and Youssef F. (2021). *Review of Maritime Transport 2021: United Nations Conference on Trade and Development*. Geneva: United Nations Publications. El informe es de 2021; consultado en 2023.

Islam, S. & Olsen, T. (2014). Truck-sharing challenges for hinterland trucking companies: A case of the empty container truck trips problem. *Business Process Management Journal*, 20(2), 290–334.

Kleijnen, J. P. C. (2015). *Design and Analysis of Simulation Experiments* (2 ed.). Cham: Springer.

Law, A. M. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5 ed.). McGraw-Hill.

López-González, A., Medina-León, S. V., González-Angeles, A., Mendoza-Muñoz, I., & Gil-Samaniego-Ramos, M. (2020). Assessment of a container terminal expansion using simulation. *DYNA*, 87(214), 129–138.

Martínez Gundermann, M. & Valenzuela Lanás, A. (2022). Planificación naviera ante eventos disruptivos. Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial, Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Santiago, Chile.

Meléndez, D. E. D. (2013). Complejo fronterizo chungara - tambo quemado: Como oportunidad de integración binacional Chile - Bolivia y Sudamericana. Master's thesis, Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Memoria para optar al título de Arquitecto.

Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9 ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

MundoMaritimo (2016). ZEAP de Arica recibió 35 % de los camiones estacionados en las calles y en el Valle de Lluta. MundoMaritimo. Nota de prensa, 8 de julio de 2016. Consultado el 11 de junio de 2026.

- Neagoe, M., Hvolby, H.-H., Taskhiri, M. S., & Turner, P. (2021). Using discrete-event simulation to compare congestion management initiatives at a port terminal. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 112, 102362.
- Nguyen, L. C. & Notteboom, T. (2019). The relations between dry port characteristics and regional port–hinterland settings: findings for a global sample of dry ports. *Maritime Economics & Logistics*, 21(3), 353–379.
- Notteboom, T. (2004). Container Shipping and Ports: An Overview. *Review of Network Economics*, 3(2), 86–106.
- Notteboom, T. E. & Rodrigue, J.-P. (2004). Inland terminals within north american and european supply chains. *Maritime Policy & Management*, 31(2), 165–183.
- Notteboom, T. E. & Rodrigue, J.-P. (2005). Port regionalization: towards a new phase in port development. *Maritime Policy & Management*, 32(3), 297–313.
- Pereira, R. G., Lopes, R. B., Martins, A., Macedo, B., & Teixeira, L. (2024). A simulation tool to forecast the behaviour of a new smart pre-gate at the sines container terminal. *Sustainability*, 17(1). Published online: 28 December 2024. The journal issue is for 2025.
- Pulido-Rojano, A., García, C., & Valencia, J. (2022). Evaluación de la eficiencia operativa en terminales portuarias mediante simulación discreta y análisis de escenarios. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 30(1), 145–159.
- Pérez-Salas, G. (2020). Integración logística y facilitación del comercio en América Latina y el Caribe. Technical report, CEPAL, Santiago de Chile.
- Rodrigue, J.-P. (2020). *The Geography of Transport Systems* (5 ed.). Routledge.
- Roso, V. & Lumsden, K. (2009). The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland. *Journal of Transport Geography*, 17(5), 338–345.
- Rusgiyarto, F., Sjafruddin, A., Frazila, R. B., & Suprayogi (2017). Discrete event simulation model for external yard choice of import container terminal in a port buffer area. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1855, (pp. 040014).

- Sanchez, S. M., Sanchez, P. J., & Wan, H. (2020). Work smarter, not harder: A tutorial on designing and conducting simulation experiments. In *Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference*, (pp. 1128–1142). IEEE.
- Schulte, F., Lalla-Ruiz, E., González-Ramírez, R. G., & Voß, S. (2017). Reducing port-related empty truck emissions: A mathematical approach for truck appointments with collaboration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 105, 195–212.
- Terminal Puerto Arica (2022). Reporte integrado 2022. Reporte anual de sostenibilidad, Terminal Puerto Arica. Publicado en Abril de 2023. El reporte cubre la gestión del año 2022.
- Vilas Radio (2026). Desastre en el altiplano: diputado exige fiscalizar daño de camiones bolivianos. Vilas Radio, Arica. Nota de prensa, 14 de enero de 2026. Consultado el 11 de junio de 2026.
- Wang, X., Song, G., Zhai, Z., Wu, Y., Yin, H., & Yu, L. (2021). Effects of vehicle load on emissions of heavy-duty diesel trucks: A study based on real-world data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 3877.
- Yıldırım, M. S. (2023). Quantifying the operational benefits of dry port integrated cooperation in port clusters: A microsimulation study. *Sustainability*, 15(6), 4990.
- Yıldırım, M. S., Aydın, M. M., & Gökkuş, Ü. (2022). Multimethod simulation approach for capacity design of a truck parking area in city ports. *Acta Scientiarum. Technology*, 44, e58110.
- Yu, X., Feng, Y., He, C., & Liu, C. (2024). Modeling and optimization of container drayage problem with empty container constraints across multiple inland depots. *Sustainability*, 16(12), 5090.

Apéndice A

Caracterización empírica de los interarribos por nodo

La Figura A.1 muestra los histogramas de los tiempos entre llegadas de camiones observados en 2022 en los cuatro nodos con trazabilidad directa (las dos puertas de la ZEAP y las dos puertas norte del terminal), contruidos a partir de **bdAntares** ($n = 172\,629$ interarribos). La forma común a los cuatro nodos, una fuerte concentración en valores bajos con colas derechas extensas, es la evidencia visual de la alta variabilidad resumida en la Tabla 3.5 del Capítulo 3, que justifica representar el input con distribuciones acotadas y perfiles empíricos por nodo.

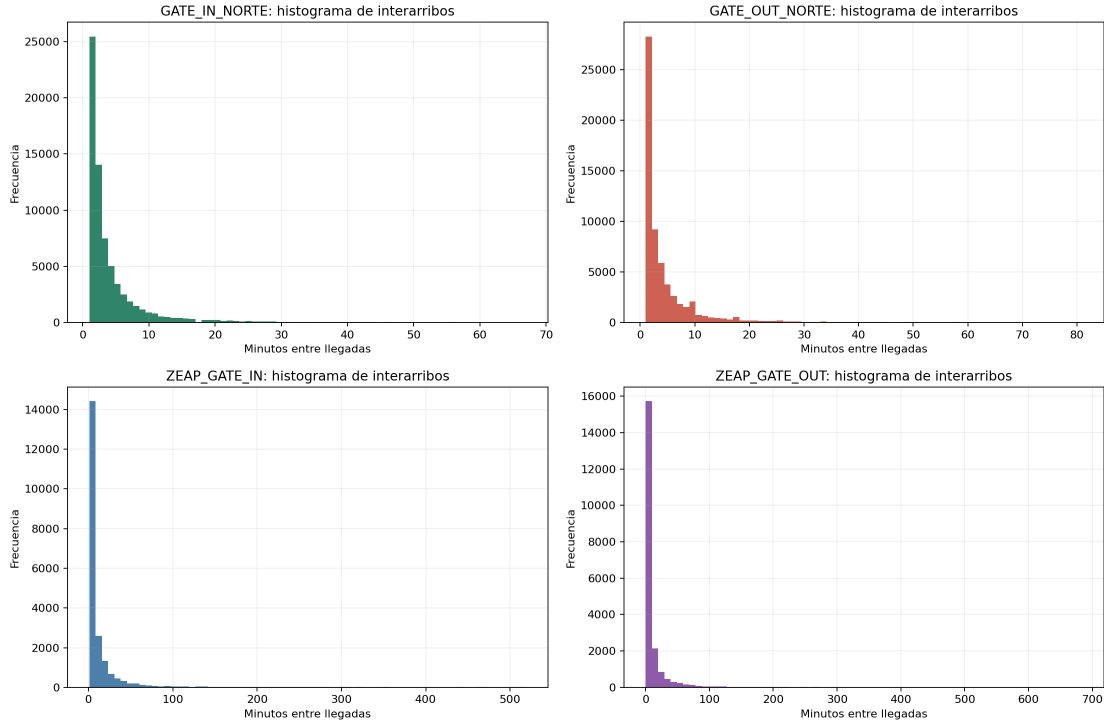


Figura A.1: Histogramas de interarribos observados en *ZEAP_GATE_IN*, *ZEAP_GATE_OUT*, *GATE_IN_NORTE* y *GATE_OUT_NORTE* durante 2022 (**bdAntares**). La fuerte concentración en valores bajos y las colas derechas extensas muestran que las llegadas a los nodos son altamente variables, lo que justifica el uso de distribuciones acotadas y perfiles empíricos en el modelo.

Apéndice B

Propuesta física del antepuerto ZEAP

La capacidad propuesta para el antepuerto regulador ($C^* = 1,500$ calzos) es factible dentro del perímetro actual del recinto. La Figura B.1 resume las dos intervenciones físicas que la habilitan, levantadas sobre imagen del antepuerto: el aumento de capacidad de calzos mediante tres zonas del recinto (zona amarilla, 650 calzos; zona roja, 350; zona naranja, 500, que suman los 1.500 calzos propuestos) y la reconfiguración de los accesos (de una entrada y una salida actuales a dos entradas y dos salidas, más una pista exclusiva de ingreso a la ZEAP). Ambas medidas se apoyan en la infraestructura existente, sin requerir suelo adicional.



Figura B.1: Propuesta de intervenciones físicas sobre el antepuerto ZEAP para habilitar $C^* = 1,500$ calzos: aumento de capacidad por zonas (amarilla 650, roja 350, naranja 500) y reconfiguración de puertas (dos entradas y dos salidas más pista exclusiva de ingreso). Elaboración propia sobre imagen del recinto.