
LOGÍSTICA MARÍTIMA Y TERRESTRE DE UNA EMPRESA SALMONERA EN CHILE MEDIANTE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

DIEGO DELLE DONNE *

GUILLERMO DURÁN ** ***

GUIDO FUENTES ****

JAVIER MARENCO *

JUAN IGNACIO VILLASANTE **

ANDRÉS WEINTRAUB **

Resumen

La industria salmonera es uno de los principales sectores de exportación de Chile. En la etapa de engorda en agua salada, los peces son cultivados en grandes jaulas flotantes agrupadas en *centros de cultivo* a lo largo de toda la Décima Región del sur de Chile. Al momento de la cosecha, cuando alcanzan un peso y volumen de venta, los peces deben ser transportados en barcos hasta los denominados *centros de acopio*, ubicados cerca de las plantas de matanza. Llegados al centro de acopio los peces son depositados en grandes jaulas en espera a ser enviados a las *plantas de matanza*. En estas plantas se sacrifican y limpian los peces que luego son enviados hacia las *plantas de proceso* mediante transporte terrestre. Uno de los principales desafíos de las empresas salmoneras con este tipo de cadena de proceso es la planificación global de la logística marítima y terrestre, combinada con la planificación del inventario en las jaulas en los centros de acopio y de las líneas faenas en las plantas de matanza. En este trabajo estudiamos este problema y presentamos algoritmos para su resolución. El problema es dividido en dos etapas: la

*Departamento de Computación, FCEN, UBA, Argentina e Instituto de Ciencias, Universidad Nacional de General Sarmiento, Argentina

**Departamento de Ingeniería Industrial, FCFM, Universidad de Chile, Chile.

***Instituto de Cálculo y Departamento de Matemática, FCEN, UBA, Argentina y CONICET, Argentina

****Empresas AquaChile, Chile

logística marítima y planificación de las plantas de matanza por un lado, y la logística terrestre por otro. Para la primera etapa presentamos un modelo de programación lineal entera mixta y un algoritmo heurístico y argumentamos el por qué del uso de la heurística en el caso práctico. La segunda etapa se resuelve heurísticamente mediante un algoritmo goloso. Detallamos los métodos implementados y presentamos resultados obtenidos en la aplicación de los mismos a problemas reales en una de las principales empresas salmoneras de Chile.

Keywords: Salmonicultura, Programación Entera, Heurísticas, Cadena de procesos.

1. Introducción

Los salmones son especies exóticas en Chile. Fueron introducidos al país entre 1850 y 1920. En 1921 los primeros salmones Coho fueron traídos y hasta 1973 diversos estudios e investigación fueron desarrollados por el instituto de fomento pesquero (IFOP) para ver el comportamiento y crecimiento de los salmones en Chile. Entre 1978 y 1980 nacieron las primeras compañías privadas dedicadas exclusivamente al cultivo de salmones y ya en 1985 había 36 centros de cultivo operando en Chile con una producción total que excedía las 1200 toneladas anuales. En 1990 las primeras ovas de salmón Coho fueron cultivadas permitiendo tener todo el ciclo de producción en el país. Este hecho fue el punto de despegue de la salmonicultura a gran escala en Chile. Para el año 2006 la producción chilena había alcanzado las 647.000 toneladas, llegando al segundo lugar de la producción mundial de salmones. En el año 2007 el virus ISA golpeó la industria, lo que generó una severa crisis afectando fuertemente los niveles productivos de la salmonicultura chilena. La industria se recuperó de la crisis del ISA y ya para el año 2014 la producción total había alcanzado las 955.000 toneladas de salmón (ver [21] para más detalles). Hoy en día la industria se enfrenta a problemas como el bloom de algas que han hecho disminuir la producción, sin embargo se espera que la producción total para el año 2016 sea mayor a las 700.000 toneladas.

La salmonicultura puede ser dividida en dos etapas principales, agua dulce y agua salada. En agua dulce los salmones son incubados y llevados a un tamaño cercano a los 200 gramos de peso para luego ser transportados a los *centros de cultivo* en agua salada. Al momento de la cosecha, cuando alcanzan un peso y volumen de venta, los peces deben ser transportados en barcos hasta los denominados *centros de acopio*, ubicados cerca de las plantas de matanza.

Llegados al centro de acopio los peces son depositados en grandes jaulas en espera a ser enviados a las *plantas de matanza*. En estas plantas se sacrifican y limpian los peces que luego son enviados hacia las *plantas de proceso* mediante transporte terrestre.

Los centros de cultivo están ubicados entre fiordos, islotes y bahías en zonas remotas de la costa del sur de Chile, lugares que en general tienen muy difícil acceso, por lo que el transporte hacia y desde los centros de cultivo en la mayoría de los casos se realiza en barco. Uno de los principales desafíos de la industria es la planificación de la logística y la cadena de proceso general. Esta es una tarea difícil porque tiene muchos eslabones, los cuales están sujetos a gran variabilidad. AquaChile es la compañía salmonera más grande de Chile, su producción en el año 2013 fue de alrededor de 102.000 toneladas brutas de cosecha [1]. El presente trabajo busca resolver el problema de la planificación de la logística marítima, de las faenas en las plantas de matanza y de la logística terrestre en la cadena de procesos de la empresa.

La literatura en acuicultura es extensa y ha sido estudiada por varios autores. Trabajos en áreas de recursos naturales relacionadas, como la agricultura y las pesquerías, han ayudado al desarrollo de esta área. Bjørndal et al. [3] hacen una revisión de la investigación de operaciones en el campo de la acuicultura. Los enfoques más estudiados son dos: el primero corresponde a modelos biológicos y el segundo corresponde a modelos económicos. Los modelos biológicos describen cómo se relacionan los sistemas de producción con el medio ambiente. Estos modelos abordan problemas como el de factores ambientales y crecimiento [6], las condiciones de cultivo de los peces [4], la relación entre alimentación y enfermedades [10] y el *trade-off* entre crecimiento y mortalidad [19]. Los modelos económicos relacionan los modelos biológicos con los precios de mercado, inventario, requerimientos de capital, restricciones de recursos, etc.

Bjørndal [2] desarrolla un modelo para describir las condiciones óptimas de cosecha para peces de acuicultura. Gran parte de la investigación desarrollada en esta área corresponde a modelos de crecimiento, alimentación y tiempo de cosecha. Otros trabajos en esta línea desarrollan modelos bioeconómicos para el crecimiento de los peces en función de la alimentación [9] y aplican programación dinámica en el proceso de crecimiento de camarones cultivados en granjas, para la toma de decisiones relacionadas con inventario, periodos de cultivo y momento de cosecha [17, 18].

Entre las aplicaciones recientes de investigación de operaciones en acuicultura, Cisternas et al. [12] presentan un modelo de optimización para planificar el mantenimiento y cambio de las mallas de los centros de cultivo. En cuanto a la cadena de producción, Bravo et al. [5] desarrollan dos modelos de pro-

gramación lineal entera mixta, uno para la fase de agua dulce y otro para la fase de agua salada, donde el primero tiene por objetivo satisfacer la demanda por peces que tienen los centros de cultivo en agua salada al mínimo costo y el segundo tiene por objetivo la planificación de las cosechas y siembras en los centros de cultivo. Existen trabajos de ruteo relacionados a la industria, como el de Romero et al. [20], que trata de la planificación del despacho de alimentos en barcos y inventario en los centros de cultivo. Sin embargo, no pareciera haber trabajos relacionados al transporte de peces y a la planificación del proceso de las plantas de matanza. Ya en un espectro más amplio, Christiansen et al. [11] realizan una revisión del campo de ruteo y programación de barcos, enfatizando las diferencias entre transporte terrestre y marítimo. Fagerholt y Lindstad [13] presentan un desarrollo para un problema de multiproductos y múltiples puertos, y Bronmo et al. [8] proponen una heurística multipartida para la programación de barcos. En el área más aplicada, Bronmo et al. [7] presentan un problema de planificación de barcos vagabundos. Los barcos vagabundos son barcos que venden su capacidad de carga que no tienen comprometida o contratada en mercados spot, por lo que no tienen una programación de itinerarios de viajes previamente definida. Esta debe ser planificada al momento de vender la capacidad restante de los barcos.

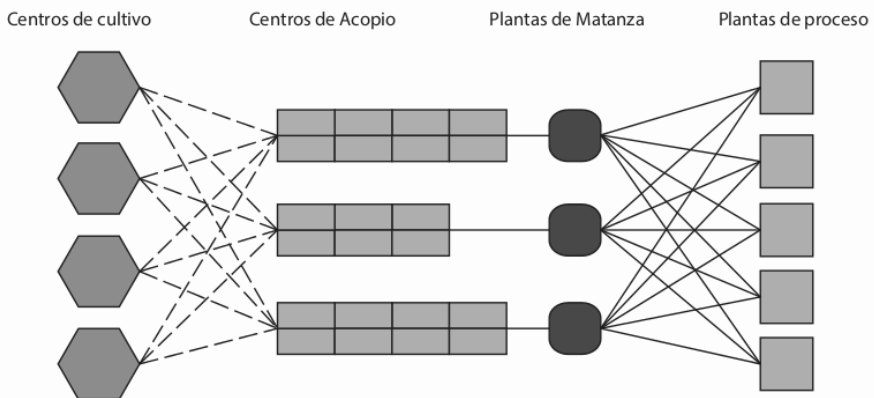
2. Descripción del problema

AquaChile posee una gran cantidad de centros de cultivo, tres centros de acopio, tres plantas de matanza y cinco plantas de proceso. La cadena de proceso se inicia en los centros de cultivo desde donde los peces a cosechar son transportados en barco hacia los centros de acopio. Luego de reposar en dichos centros, los peces se faenan en las plantas de matanza para luego ser transportados por tierra en camiones refrigerados hasta las plantas de proceso, las cuales representan el final de la cadena. La Figura 1 muestra un diagrama de la cadena de proceso.

En AquaChile, cada semana se confecciona un programa de demandas a partir de los requerimientos del área comercial. Este programa establece las cantidades de peces de cada centro de cultivo que se deben procesar en cada planta de proceso cada día de la semana. El programa especifica también las cantidades requeridas por especie, pero no especifica la planta de matanza que debe utilizarse para cada cosecha. De esta manera, la empresa debe planificar en conjunto la logística marítima, el manejo del inventario en los centros de acopio, los lotes de faena en las plantas de matanza y la logística terrestre

hacia las plantas de proceso, con el fin de satisfacer el programa de demandas de cada semana. Estas decisiones deben tener en cuenta los costos y tiempos de navegación, las capacidades de los barcos, las capacidades en jaulas de los centros de acopio, las capacidades de faena y horarios de funcionamiento de las plantas de matanza y los costos y tiempos de viaje terrestres entre las plantas de matanza y las de proceso. El objetivo principal de la empresa es satisfacer en tiempo y forma el programa de demanda de cada semana, tratando de hacerlo al menor costo posible. Hasta el momento de comenzar este trabajo, esta planificación solía ser realizada manualmente por el planificador de la cadena en una simple planilla de cálculo.

Figura 1: Cadena de proceso de AquaChile. Línea punteada: transporte marítimo.



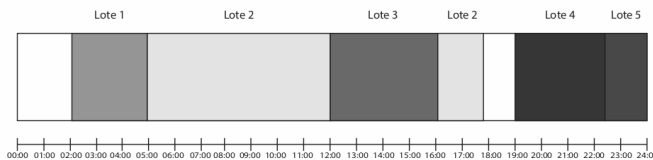
2.1. Características de la cadena de proceso

A continuación definimos algunos detalles de los diferentes aspectos y etapas de la cadena de proceso de AquaChile:

- **Centros de cultivo:** Los centros de cultivo consisten en un número de jaulas localizadas entre fiordos, islotes y bahías protegidas. En estos lugares es donde los salmones son engordados para luego poder ser cosechados.
- **Wellboats:** Los *wellboats* son barcos especialmente diseñados para el transporte de peces vivos. Hay varios tipos y tamaños. Tienen tuberías y bombas especiales para succionar los peces hacia y desde los estanques.

- **Centros de Acopio:** Los centros de acopio disponen de jaulas que sirven para mantener un inventario vivo de salmones para las plantas de matanza. Cada centro de acopio está ubicado al lado de una planta de matanza y se conecta a la misma por medio de tuberías a través de las cuales se envían los peces para las faenas.
- **Especies:** AquaChile tiene tres especies distintas de salmón: Coho, Salar y Trucha. Después de cada viaje los peces deben reposar en las jaulas del centro de acopio entre 16 y 24 horas (según la especie) antes de ser faenados en las plantas de matanza para reducir el estrés del viaje y poder tener una mejor calidad de producto.
- **Plantas de matanza:** En las plantas de matanza es donde se sacrifica, eviscera y limpia a los salmones. Estas están conectadas a los centros de acopio vía grandes tuberías por las cuales los salmones son succionados para ser faenados en la planta. La Figura 2 muestra un diagrama ejemplificando la utilización a lo largo del día de la línea de faena en una planta de matanza. Cada *lote* representa una cantidad de salmón a faenar que será luego enviado a una determinada planta de proceso. Es importante notar que dos lotes de salmón distintos no pueden ser faenados al mismo tiempo y que un lote puede ser faenado en distintos momentos, siempre y cuando cumpla con la fecha de llegada a la planta de proceso que lo demanda. Las plantas de matanza tienen horarios de trabajo determinados que deben ser respetados.

Figura 2: Faena de diferentes lotes de salmón en planta de matanza



- **Camiones:** Luego de ser faenados, los peces son transportados en camiones refrigerados hasta las plantas de proceso. AquaChile posee un contrato con una compañía de transporte para el traslado de los peces. En la sección 4 describimos en mayor detalle los aspectos relacionados al problema de la planificación del transporte terrestre.
- **Plantas de proceso:** En las plantas de proceso se elaboran y empaquetan los productos finales y representan el fin de la cadena de proceso. Estas plantas tienen horarios de trabajo determinados y los camiones

solo pueden descargar los peces, provenientes de las plantas de matanza, durante dichos horarios. Si un camión llega a la planta fuera de estos horarios deberá esperar a que comience el siguiente turno para poder descargar los peces. Algunas plantas de proceso comparten su locación con una planta de matanza, con lo cual en estos casos no se requiere el transporte en camión de los peces.

- **Programa de las plantas de proceso:** Las plantas de proceso demandan peces todos los días. Estas demandas son incluidas en un programa semanal el cual especifica la fecha en que tienen que llegar los salmones a las plantas de proceso, la especie de salmón, el número de unidades, el peso unitario promedio y desde qué centro de cultivo tienen que ser cosechados.

La planificación conjunta de la logística marítima, del manejo del inventario en los centros de acopio, de los lotes de faena en las plantas de matanza y de la logística terrestre hacia las plantas de proceso es un problema de difícil resolución debido a la gran cantidad de decisiones y consideraciones que deben tomarse en cuenta y es especialmente difícil realizarla a mano en una planilla de cálculo. Esta planificación debe ser realizada al menos una vez a la semana y cada vez que haya cambios en las condiciones del problema. En algunos casos debe ser planificada dos y hasta tres veces en un mismo día dados los diferentes factores que afectan a la cadena de proceso, especialmente las condiciones climáticas.

Para una empresa salmonera como AquaChile, una buena planificación de la cadena de proceso es muy importante porque asegura un buen suministro de salmón a las plantas de proceso y disminuye los costos de transporte marítimo y terrestre. Claramente, apoyar la toma de decisiones con herramientas computacionales basadas en algoritmos de optimización para la planificación diaria sería una gran ventaja para las operaciones de AquaChile, reforzando así su competitividad estratégica en la industria.

En este trabajo presentamos algoritmos para resolver el problema planteado dividiéndolo en dos etapas: la logística marítima y planificación de las plantas de matanza por un lado y la logística terrestre por otro. Para la primera etapa presentamos, en la sección 3, un modelo de programación lineal entera mixta y un algoritmo heurístico y argumentamos el por qué del uso de la heurística en el caso práctico. Para la segunda etapa proponemos, en la sección 4, una heurística de tipo *golosa* para resolver el problema de la logística terrestre.

3. Logística marítima y planificación de faenas

La primera parte del problema corresponde a la planificación de la logística marítima, combinada con la planificación de la ocupación de las jaulas de los centros de acopio y la coordinación de los procesos de faena en las plantas de matanza. Vale notar que como resultado de esta etapa se obtienen además los viajes por tierra que deben realizarse mediante camiones para el transporte de los peces desde las plantas de matanza hasta las plantas de proceso. En esta etapa no se realiza una optimización sobre la logística terrestre, quedando este aspecto por resolver en una segunda etapa (la cual se detalla en la sección 5). La planificación de la logística marítima debe ser realizada semanalmente por el programador y corresponde a tomar una serie de decisiones que determinarán, por ejemplo, en qué barcos se transportarán los salmones desde los centros de cultivo hacia los centros de acopio. Estas decisiones no son simples y deben resolver el problema optimizando el funcionamiento de toda la cadena de proceso de AquaChile y aprovechando de la mejor manera posible los viajes de los barcos. Las decisiones a considerar durante la planificación de la logística marítima involucran los siguientes aspectos:

- **Transporte marítimo:** Qué barco utilizar para transportar cada orden desde los centros de cultivo hasta los centros de acopio, cuánto volumen llevar, qué especie y cuándo zarpar.
- **Selección de centro de acopio y jaula:** A qué centro de acopio llevar los peces y en qué jaula de dicho centro descargarlos.
- **Programación de las faenas:** Cuándo faenar cada lote de peces para poder cumplir con la demanda de las plantas de proceso en tiempo y forma respetando las restricciones de capacidad de las plantas de matanza.

Las decisiones anteriores están condicionadas por una serie de restricciones que deben ser tomadas en cuenta a la hora de planificar. Los centros de acopio tienen un número determinado de jaulas, las cuales tienen capacidades establecidas. Se debe respetar los horarios de funcionamiento y capacidad de faena de las plantas de matanza. Se tiene que mantener la trazabilidad de los peces, por lo que no se puede descargar peces en una jaula de un centro de acopio que esté previamente ocupada y no se puede cargar peces de distintas jaulas en un mismo estanque de un wellboat (no se pueden mezclar). Por último se deben respetar las fechas de las demandas de las plantas de proceso, es decir, llegar con los peces a las plantas de proceso en el día en que fueron requeridos.

3.1. Modelo de programación lineal entera mixta

En esta sección presentamos el modelo de programación lineal entera mixta desarrollado para la resolución del problema. Se modela el tiempo por medio de períodos discretos de igual duración, siendo la duración un parámetro del modelo. Para simplificar el modelo, asumimos que todos los barcos están disponibles desde el inicio del horizonte de planificación, ya que cualquier otro caso es fácilmente modelable y no agrega valor al modelo desarrollado. En la tabla 1 se describen los parámetros del problema utilizados. El modelo desarrollado hace uso de las siguientes variables de decisión:

- $x_{bact}^I \in \{0, 1\}$: 1 si el barco $b \in B$ comienza un viaje de *ida* desde $a \in A$ hacia $c \in C$ en el período $t \in T$. 0 en caso contrario.
- $x_{bcate}^V \in \{0, 1\}$: 1 si el barco $b \in B$ comienza un viaje de *vuelta* desde $a \in A$ hacia $c \in C$ en el período $t \in T$, transportando peces de la especie $e \in E$. 0 en caso contrario.
- $x_{bat}^S \in \{0, 1\}$: 1 si el barco $b \in B$ se queda detenido en $a \in A$ en el período $t \in T$. 0 en caso contrario.
- $w_{bcatej} \in \mathbb{R}_+$: cantidad de toneladas de la especie $e \in E$ que lleva el barco $b \in B$ desde $c \in C$ hasta la jaula $j \in J(a)$ de $a \in A$, empezando el viaje en $t \in T$.
- $s_{ajcet} \in \mathbb{R}_+$: cantidad de toneladas de la especie $e \in E$ del cultivo $c \in C$ en la jaula $j \in J(a)$ del acopio $a \in A$ en $t \in T$ disponibles para faena (es decir, ya reposados).
- $s_{ajcet}^R \in \mathbb{R}_+$: cantidad de toneladas de la especie $e \in E$ del cultivo $c \in C$ que se descargan en la jaula $j \in J(a)$ del acopio $a \in A$ en el período $t \in T$ (estos peces pasarán al inventario real de la jaula cuando termine su período de reposo).
- $y_{ajcet} \in \{0, 1\}$: 1 si la jaula $j \in J(a)$ del acopio $a \in A$ está ocupada con peces de especie $e \in E$ del cultivo c en $t \in T$ (ya sea con peces en reposo o disponibles para faena). 0 en caso contrario.
- $f_{ajcept} \in \mathbb{R}_+$: toneladas de peces de especie $e \in E$ del cultivo $c \in C$ que se faenan de la jaula $j \in J(a)$ del acopio a , comenzando el proceso en $t \in T$, para ser enviados a p .

Parámetro	Descripción
A	Conjunto de centros de acopio.
$J(a)$	Conjunto jaulas del centro de acopio $a \in A$.
B	Conjunto de barcos.
C	Conjunto de centros de cultivo.
D	Conjunto de días (consecutivos) de la planificación.
E	Conjunto de especies.
P	Conjunto de plantas secundarias.
$T \subset \mathbb{N}$	Conjunto de períodos de la planificación ($T = \{1, \dots, T \}$).
$dia(t)$	Indica a qué día $d \in D$ pertenece el período $t \in T$.
$dem(c, p, d, e)$	Toneladas de salmón demandadas por la planta $p \in P$ del centro de cultivo $c \in C$ para el día $d \in D$ de la especie $e \in E$.
$cap(b)$	Capacidad de carga de peces del barco $b \in B$.
$costo_m(b, a, c)$	Costo de transporte marítimo para el barco $b \in B$ entre el acopio $a \in A$ y el cultivo $c \in C$.
$costo_t(a, p)$	Costo de transporte terrestre entre el acopio $a \in A$ y la planta de proceso $p \in P$.
$t_m(a, c)$	Tiempo de navegación entre $a \in A$ y $c \in C$.
$t_t(a, p)$	Tiempo de viaje por tierra entre el acopio $a \in A$ y la planta de proceso $p \in P$.
$t_r(e)$	Tiempo mínimo de reposo en acopio para la especie $e \in E$.
$cap_j(a, j)$	Capacidad de la jaula j del centro de acopio $a \in A$.
$capp(a)$	Capacidad de proceso de la planta de matanza asociada al centro de acopio $a \in A$.
$ini(b)$	Centro de acopio inicial para el barco $b \in B$. Es el centro de acopio del cual el barco parte la navegación.
$s^I(a, j, c, e)$	Inventario inicial de salmones del centro de cultivo $c \in C$ y especie $e \in E$ en la jaula j del centro de acopio $a \in A$.

Tabla 1: Parámetros utilizados por el modelo de programación lineal entera mixta.

Con estas definiciones, el modelo de programación lineal entera mixta desarrollado queda como:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } & \sum_{b \in B} \sum_{a \in A} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \left(\text{costo}_m(b, a, c) \left(x_{bact}^I + \sum_{e \in E} x_{bcate}^V \right) \right) + \\ & \sum_{a \in A} \sum_{j \in J(a)} \sum_{c \in C} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \text{costo}_t(a, p) \cdot f_{ajcept} \end{aligned}$$

sujeito a las siguientes restricciones:

- $\forall (b, a) \in B \times A$ y $t = 1$

$$\sum_{c \in C} x_{bact}^I + x_{bat}^S = \delta_a \tag{1}$$

donde $\delta_a = 1$ si $a = ai(b)$ y $\delta_a = 0$ si no.

- $\forall (b, a, t) \in B \times A \times T, t > 1,$

$$\sum_{\substack{c \in C \\ t > t_m(a,c)}} \sum_{e \in E} x_{bca(t-t_m(a,c))e}^V + x_{ba(t-1)}^S = \sum_{c \in C} x_{bact}^I + x_{bat}^S \tag{2}$$

- $\forall (b, c, t) \in B \times C \times T,$

$$\sum_{\substack{a \in A \\ t > t_m(a,c)}} x_{bac(t-t_m(a,c))}^I = \sum_{a \in A} \sum_{e \in E} x_{bcate}^V \tag{3}$$

- $\forall (b, c, a, t, e) \in B \times C \times A \times T \times E,$

$$\sum_{j \in J(a)} w_{bcatej} \leq x_{bcate}^V \cdot \text{cap}(b) \tag{4}$$

- $\forall (a, t) \in A \times T, j \in J(a),$

$$\sum_{b \in B} \sum_{\substack{c \in C \\ t > t_m(a,c)}} \sum_{e \in E} w_{bca(t-t_m(a,c))ej} \leq \text{cap}j(a, j) \cdot \left(1 - \sum_{c \in C} \sum_{e \in E} y_{ajcet} \right) \tag{5}$$

- $\forall (a, c, e) \in A \times C \times E, j \in J(a),$

$$s_{ajce1} + \sum_{p \in P} f_{ajcep1} = s^I(a, j, c, e) \tag{6}$$

- $\forall (a, c, e, t) \in A \times C \times E \times T, j \in J(a),$

$$\sum_{b \in B} w_{bca(t-t_m(a,c))ej} = s_{ajcet}^R \tag{7}$$

- $\forall (a, c, e, t) \in A \times C \times E \times T, j \in J(a),$

$$s_{ajce(t-1)} + s_{ajce(t-t_r(e))}^R = s_{ajcet} + \sum_{p \in P} f_{ajcept} \tag{8}$$

$$\blacksquare \forall(a, c, e, t) \in A \times C \times E \times T, j \in J(a),$$

$$s_{ajcet} + \sum_{t-t_r(e) < t' < t} s_{ajcet'}^R \leq \text{cap}j(a, j) \cdot y_{ajcet} \quad (9)$$

$$\blacksquare \forall(a, t) \in A \times T, j \in J(a),$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{e \in E} y_{ajcet} \leq 1 \quad (10)$$

$$\blacksquare \forall(a, t) \in A \times T,$$

$$\sum_{j \in J(a)} \sum_{c \in C} \sum_{e \in E} \sum_{p \in P} f_{ajcept} \leq \text{capp}(a) \quad (11)$$

$$\blacksquare \forall(c, p, d, e) \in C \times P \times D \times E,$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{j \in J(a)} \sum_{\substack{t \in T \\ \text{dia}(t+t_i(a,p))=d}} f_{ajcept} \geq \text{dem}(c, p, d, e) \quad (12)$$

Las restricciones (1), (2) y (3) aseguran que los viajes realizados por los barcos sigan un flujo factible. La restricción (4) asegura que la carga de un barco no exceda su capacidad y la restricción (5) asegura que las descargas en una jaula no excedan la capacidad de la misma. Esta última impide además la descarga de peces en una jaula si la misma no está vacía. La restricción (6) registra el inventario inicial para el primer período y la restricción (7) registra el inventario de peces en reposo en una jaula (i.e, para el período en que un barco realiza su descarga en tal jaula). La restricción (8) calcula el inventario de peces de una jaula en un período dado en función del inventario en el período anterior y de la cantidad de peces faenados en este período (y eventualmente de los peces que terminan su reposo en tal período). La restricción (9) asegura que si el inventario de una jaula en un período es positivo, entonces la variable que indica si la jaula tiene peces debe ser igual a 1. Por su parte, la restricción (10) impide que en una jaula existan peces de distinta especie y/o centro de cultivo (por requisito de trazabilidad). Finalmente, las restricciones (11) impiden que se exceda la capacidad de faenado de la planta y las restricciones (12) aseguran que los lotes de faena satisfagan las demandas de las plantas de proceso en tiempo y forma.

Si bien el tamaño de los bloques para la discretización del tiempo puede hacerse tan pequeño como se quiera, los tiempos de resolución del modelo en instancias reales fueron prohibitivos para la utilización de bloques más pequeños que 1 hora. Así, las soluciones halladas, aun siendo soluciones óptimas para el modelo, no representan en general soluciones buenas en la práctica. De hecho, en una experimentación preliminar pudimos verificar que las soluciones

halladas por la heurística (detallada en la siguiente sección) resultaban muchas veces mejores soluciones que las soluciones óptimas del modelo (debido principalmente al tamaño del bloque de discretización). Por este motivo, se decidió profundizar el desarrollo en el método heurístico para poder así resolver el problema real acorde a las necesidades de la empresa.

3.2. Heurística para la logística marítima y planificación de faenas

Presentamos en esta sección una heurística que sigue principalmente un esquema *goloso*, con algunas particularidades (que detallaremos en la sección 3.2.2) que buscan evadir los clásicos problemas de este tipo de esquemas (por ejemplo, relacionados a la obtención de óptimos locales). La heurística desarrollada se divide en dos etapas. La primera busca utilizar el inventario inicial (es decir, remanente de la semana anterior) para satisfacer la mayor cantidad de demanda que pueda. La segunda etapa se encarga de planificar los viajes de barco necesarios para traer peces para las demandas que no han podido satisfacerse mediante el inventario inicial.

Ambas etapas contemplan también la planificación completa de la línea de faena en las plantas de matanza, indicando los tiempos de inicio y fin de cada lote a faenar. La segunda etapa contempla también el uso de las jaulas en los centros de acopio y define qué jaulas se utilizarán para la descarga de los peces de los viajes que se planifiquen. Lo que busca la heurística es en primer lugar satisfacer la mayor cantidad de peces demandados por las plantas de proceso y en segundo lugar minimizar los costos operacionales (es decir, de navegación y de transporte terrestre).

Una solución provista por la heurística se compone básicamente de una serie de *actividades*, como por ejemplo los viajes de los barcos, la descarga de peces en una jaula, la faena de un lote de peces, etc. Durante la ejecución de la heurística, la solución se va construyendo gradualmente agregando actividades a la misma. Es importante aclarar que el orden en que se van agregando las actividades a la solución puede no respetar el orden cronológico de las actividades mismas.

Por ejemplo, en un momento de la ejecución puede planificarse un lote de faena para el día 4 a las 16:00 hs y más adelante puede planificarse otro lote a faenar para el día 4 a las 10:00 hs (aun en una misma planta de matanza). Obviamente, en tal caso la heurística se asegura que la faena de las 10:00 hs no interfiera con ninguna otra faena ya planificada para dicha planta (por ejemplo, deberá terminar antes de las 16:00 hs). Algo similar puede ocurrir con el uso de las jaulas. Por ejemplo, puede planificarse que un barco descargue

peces en una jaula el día 5 a las 10:00 hs, y más adelante en la ejecución puede planificarse que otro barco descargue peces en esta misma jaula el día 3 a las 14:30 hs. En tal caso, la heurística se asegura que esta última descarga sea completamente faenada antes de las 10:00 hs del día 5, momento en el cual la jaula debería estar ya vacía para la descarga de peces en ella.

3.2.1. Algoritmo General

El primer objetivo de la heurística desarrollada consiste en satisfacer parte de la demanda semanal con el inventario que se tiene en los centros de acopio al inicio de la programación. Para ello se planifican con este inventario los lotes de faena necesarios con el objetivo de satisfacer la mayor cantidad de demanda posible. Una vez utilizado todo el inventario inicial, se busca satisfacer todas las demandas que no pudieron ser satisfechas con inventario, para las cuales será necesario el uso de los barcos para transportar los peces desde los centros de cultivo hacia los centros de acopio.

Con tal objetivo, se confeccionan los itinerarios de viaje para los barcos disponibles. Un *viaje* se compone de un *trayecto de ida* desde un centro de acopio hasta uno de cultivo y un *trayecto de vuelta* desde este último hasta un centro de acopio (que puede ser el mismo que el origen del viaje o no). En el trayecto de ida el barco viaja vacío y en el de vuelta transporta los peces cosechados en el centro de cultivo. El *itinerario* de un barco se compone de un conjunto de viajes consecutivos indicando para cada viaje los días y horarios de inicio y fin (contemplando los tiempos de viaje, y de carga y descarga de peces).

Al momento de agregar un viaje al itinerario de un barco, el algoritmo toma también las siguientes decisiones respecto a los peces que se traerán en tal viaje:

- Se decide qué cantidad de peces se transportará y en qué jaula del centro de acopio se los depositará. Para ello debe asegurarse que la jaula esté vacía en el momento en que el barco arriba al acopio.
- Se determina qué demandas se cubrirán (total o parcialmente) con los peces traídos. Se define también si una cantidad de estos peces quedarán como remanente de inventario al final de la semana.
- Se define en qué momento (o momentos) se realizará la faena de los peces traídos, teniendo en cuenta no exceder la capacidad de matanza de la planta. Eventualmente, si ya se tenía planificada otra descarga de peces en la misma jaula para una fecha futura, el algoritmo debe asegurarse

también que la jaula quede vacía para ese momento (es decir, que la carga traída se faene por completo antes de esa fecha).

En cada iteración del algoritmo, se agrega un nuevo viaje al itinerario de algún barco junto con todas las actividades mencionadas más arriba, relacionadas con los peces transportados. El Algoritmo 1 detalla el proceso general de asignación de inventario inicial (Fase I) y planificación de viajes (Fase II).

Algoritmo 1: Algoritmo general

- 1: FASE I: *Asignación del inventario inicial*
 - 2: $J_s \leftarrow$ conjunto de jaulas con salmones al inicio del programa semanal
 - 3: **para cada** $j \in J_s$, en orden creciente según cantidad de peces de j
hacer
 - 4: **para cada** demanda d compatible con j , en orden temporal **hacer**
 - 5: **si** se puede faenar de j para d **entonces**
 - 6: Asignar peces de j para cubrir demanda d
 - 7: Actualizar demanda restante de d y stock en la jaula j
 - 8: **fin si**
 - 9: **fin para**
 - 10: **fin para**

 - 11: FASE II: *Planificación de viajes para satisfacer demandas restantes*
 - 12: **para cada** demanda restante d **hacer**
 - 13: *viajes* $\leftarrow \emptyset$
 - 14: **para** cada barco b , acopio a **hacer**
 - 15: $v \leftarrow$ confeccionar viaje y faenas para (b, a, d) [ver detalle en el texto]
 - 16: Si se obtuvo un viaje v y faenas asociadas, agregar v a *viajes*.
 - 17: **fin para**
 - 18: Elegir el “mejor” viaje (y faenas asociadas) del conjunto *viajes* y agregarlo al itinerario del barco correspondiente.
 - 19: **fin para**
-

Entre las líneas 2 y 10 el algoritmo asigna el stock inicial. En la línea 2 se selecciona el conjunto de jaulas J_s que contienen salmones al inicio de la programación (es decir., el inventario inicial). Recordemos que para que un barco descargue salmones en un centro de acopio, éste debe poseer suficientes jaulas vacías disponibles. Es por esto que las jaulas de J_s son recorridas en orden creciente según la cantidad de peces que tenga (línea 3), con el objetivo de vaciar las jaulas lo antes posible, liberándolas para posibles futuras descargas de peces.

En la línea 4, se recorre el conjunto de demandas en busca de demandas que puedan ser satisfechas con inventario inicial.

Decimos que los peces de una jaula son *compatibles* con una demanda si cumplen con los requerimientos de ésta (es decir., centro de cultivo y especie requerida).

Se prioriza satisfacer primero las demandas de los primeros días de la semana, ya que para el resto de los días pueden utilizarse los barcos (notemos que para las demandas de los primeros días puede no haber tiempo suficiente para ir a buscar los peces a los centros de cultivo requeridos).

Por tanto, en la línea 4 se ordenan las demandas por fecha, desde la más temprana a la más tardía.

En el caso de que dos demandas tengan la misma fecha, para minimizar costos de transporte, se eligen las demandas asociadas a la planta de proceso más cercanas al centro de acopio del cual se asignan los peces.

Para cubrir una demanda con inventario inicial asociado a una jaula, la planta de matanza correspondiente al centro de acopio de la jaula al cual pertenecen los peces debe tener capacidad de faena y además deben ser capaces de llegar a la planta de proceso respectiva en la fecha establecida por la demanda.

Si se quiere cubrir la demanda d con peces asociados a la jaula j (línea 6), el algoritmo debe verificar que la planta de matanza del acopio de j sea capaz de faenar la cantidad a cubrir de la demanda d a tiempo (línea 5).

Entre las líneas 12 y 19 la heurística planifica los viajes marítimos y las faenas asociadas a los peces traídos en los mismos. El algoritmo itera por cada demanda que no haya sido satisfecha aún (línea 12).

Al igual que para el inventario inicial, esta lista de demandas se recorre en orden creciente según las fechas de las mismas, pero en este caso, si dos demandas coinciden en su fecha se elige primero la demanda que requiera mayor cantidad de peces. Dada una demanda d , en las líneas 13 a 17 se intenta seleccionar el mejor viaje posible para satisfacer dicha demanda.

Para ello, se debe seleccionar un barco con el cual transportar los peces requeridos por d y un centro de acopio en el cual depositarlos para su matanza futura.

Con tal objetivo, se prueban todas las combinaciones de barcos b y acopios a (línea 13) y para cada una de ellas se confecciona un viaje (b, a, d) y se planifican todas las actividades relacionadas con los peces que se transportan en el mismo, como se explicó anteriormente.

Es así que la confección del viaje v en la línea 15 no es un proceso trivial y eventualmente podría no ser factible (por ejemplo, si el acopio en cuestión no posee jaulas disponibles donde depositar los peces o bien si la planta de matanza está ya saturada en su capacidad). Si la cantidad de peces traída (es

decir., la capacidad del barco) supera la cantidad requerida por d , el excedente de peces se utilizará para cubrir demandas futuras que requieran estos peces y para ello se planificarán también nuevos lotes de faena correspondientes a estas otras demandas. Finalmente, en la línea 18 se elige el “mejor” viaje del conjunto de viajes confeccionados y se lo agrega al itinerario del barco correspondiente. Al dejar en firme este viaje se registran en la solución las siguientes modificaciones:

- Se agenda la llegada de los peces a la jaula correspondiente.
- Se programan las faenas de los peces para los momentos que se hayan determinado y se registra el momento en que la jaula queda vacía, si es el caso.
- Se actualizan las demandas que serán satisfechas (total o parcialmente) con los peces traídos en el viaje, es decir, se resta de cada una de éstas, las cantidades cubiertas por los lotes a faenar registrados.

Para determinar cuál es el “mejor” viaje (línea 18), se utilizaron dos criterios. El primero selecciona el viaje que utilice lo mejor posible la capacidad del barco. Por ejemplo, un viaje que transporta 120 toneladas de peces en un barco de capacidad 130 toneladas será mejor que otro que transporta 120 toneladas en un barco de capacidad 180 toneladas, pues el primero utiliza un 92,3% de su capacidad mientras que el segundo sólo un 66,7%.

El segundo prioriza el viaje que tenga el menor costo operacional. Este costo incluye los costos de viaje del barco en los trayectos de ida y vuelta y un estimado de los costos de transporte por tierra desde la planta de matanza hasta la planta de proceso final. El algoritmo itera con los dos criterios y selecciona la mejor solución global.

3.2.2. El algoritmo general y diferentes puntos de partida

Es evidente que los algoritmos desarrollados utilizan un esquema *goloso* para construir las soluciones al problema y es sabido que en este tipo de algoritmos se toman decisiones basadas en un criterio de optimalidad local, sin medir muchas veces el impacto que éstas tendrán en las decisiones que se tomarán a futuro, durante la ejecución. En particular, en la segunda etapa del Algoritmo 1, la planificación de un viaje para una determinada demanda d tiene un fuerte impacto también en demandas compatibles con d , ya que usualmente la carga transportada en un barco suele alcanzar para satisfacer varias demandas del programa. Es así, que los primeros viajes planificados en este algoritmo, imponen considerables decisiones a futuro.

Para mitigar los efectos adversos de los algoritmos de tipo *goloso*, es común combinar esta técnica con alguna técnica de mejora gradual de las soluciones obtenidas (es decir, búsqueda local) como por ejemplo las metaheurísticas GRASP [14] y *Tabú Search* [15, 16], entre otras. Lamentablemente, desarrollar un procedimiento de búsqueda local para el problema tratado en este trabajo no pareciera ser una tarea sencilla, pues hay muchos factores a considerar. Por ejemplo si se quiere hacer un intercambio de barco para dos soluciones, se deben verificar muchas cosas, tales como los horarios de llegada, las capacidades de los barcos, las capacidades de faena de las plantas de matanza y horarios en que serán faenados los lotes, y las capacidades de las jaulas en los centros de acopio.

Como resultado, en la mayoría de los casos, el intercambio resulta infactible. Por este motivo, omitimos la utilización de técnicas dependientes de una búsqueda local, como las mencionadas más arriba. Por otro lado, mediante una breve experimentación preliminar, pudimos ver que las soluciones obtenidas al variar arbitrariamente los primeros viajes planificados se diferencian en gran medida.

Con el objetivo de cubrir todas las alternativas para los primeros viajes, presentamos en el Algoritmo 2 un procedimiento similar al Algoritmo 1 pero en el cual la segunda etapa se ejecuta varias veces fijando en cada caso un viaje arbitrario para el primer viaje planificado.

Éste es el algoritmo desarrollado finalmente para AquaChile.

Algoritmo 2: Algoritmo general con iteraciones en la Fase II

- 1: $solucion_base \leftarrow$ solución (incompleta) de la Fase I del Algoritmo 1
 - 2: $S \leftarrow \emptyset$
 - 3: $D_1 \leftarrow$ Demandas del primer día del programa
 - 4: **para cada** barco b , acopio a y demanda $d \in D_1$ **hacer**
 - 5: $sol \leftarrow solucion_base$
 - 6: $v \leftarrow$ confeccionar viaje para (b, a, d) en sol
 - 7: **si** se obtuvo un viaje v **entonces**
 - 8: Agregar v al itinerario correspondiente en sol
 - 9: Completar sol con la Fase II del Algoritmo 1
 - 10: Si se obtuvo una solución, agregarla a S
 - 11: **fin si**
 - 12: **fin para**
 - 13: Elegir la mejor solución de S y devolverla (si $S = \emptyset$, terminar sin solución).
-

4. Programación de la logística terrestre

La segunda etapa de la cadena de procesos de AquaChile corresponde al transporte de los lotes de peces faenados por las plantas de matanza hacia las plantas de proceso. Los peces son cargados en contenedores debidamente refrigerados y estos contenedores son transportados en camiones hacia las plantas de proceso. Semanalmente el planificador recibe el programa de faenas de las plantas de matanza, el cual le indica las cantidades de peces que deben ser transportadas desde las plantas de matanza hacia las plantas de proceso. En base al programa, él debe decidir con qué contenedores va a transportar los peces desde las distintas plantas. AquaChile posee dos tipos de contenedores para mover lotes de peces:

- **Bins:** Los bins son contenedores individuales. En cada bin se puede cargar alrededor de 450 Kg de pescado con hielo. Cada camión cargado puede llevar hasta 28 bins (alrededor de 12,6 toneladas). Al ser individuales, los bins permiten el transporte de varios lotes diferentes en un sólo camión, lo que flexibiliza el transporte.
- **Estanques:** Los estanques corresponden a un sólo gran contenedor. Cada uno puede cargar alrededor de 18 toneladas de pescado con hielo. La ventaja de los estanques es que se puede transportar más cantidades de pescado que en bins por viaje, pero sólo pueden llevar pescado de un lote en particular (los lotes no se pueden mezclar).

Para la programación existen varios factores y restricciones que condicionan la asignación de contenedores. Cada contenedor debe ser cargado con hielo antes de ser cargado con peces para asegurar un buen transporte y que los peces lleguen en buenas condiciones a la planta de proceso. Algunas de las plantas de matanza sólo pueden cargar peces en estanques y algunas plantas de proceso sólo pueden recibir los peces en bins. También se deben considerar los tiempos de traslado entre las plantas y el tiempo que toma cargar el hielo en los estanques para calcular si es que un estanque puede llegar a tiempo para un determinado proceso. Este cálculo del tiempo sólo afecta a los estanques porque estos son limitados. Con los bins no es necesario porque las plantas de matanza siempre tienen bins disponibles y son cargados con hielo en la misma planta.

Para trasladar los contenedores de un lugar a otro, AquaChile posee un contrato con una empresa de transporte externa que se encarga de proveer los

camiones a las plantas de matanza de acuerdo a la planificación de contenedores de AquaChile. Las plantas de matanza siempre tienen bins a disposición, por lo que los camiones sólo deben presentarse en la planta a la hora establecida por el planificador de AquaChile.

En el caso de los estanques, los camiones deben pasar a buscarlos vacíos por donde sea que estén, llevarlos a las plantas de matanza y luego transportarlos cargados a las plantas de proceso.

Por ejemplo, si se necesita trasladar tres estanques desde una planta de matanza hacia una planta de proceso y en la planta de matanza no se dispone de estanques, los camiones deberán buscar los estanques vacíos, llevarlos a la planta de matanza, esperar a que sean cargados y transportarlos a las plantas de proceso correspondientes.

La asignación de los camiones a las tareas es realizada independientemente por la empresa de transporte, la cual se encarga de decidir qué camiones utilizar para cada tarea.

AquaChile paga simplemente una tarifa por viaje realizado entre plantas de matanza y plantas de proceso. La tarea del planificador de AquaChile es programar la asignación de contenedores a los lotes de peces faenados tomando en cuenta las restricciones anteriormente señaladas, garantizando que todos los peces sean transportados a destino y minimizando los costos de transporte (por ejemplo, aprovechando de la mejor manera posible los estanques para disminuir la cantidad de viajes de camiones).

4.1. Heurística de asignación de contenedores

El problema de asignación de contenedores no es una tarea fácil para ser realizada manualmente. En algunas semanas del año el programador debe asignar más de 200 contenedores a las distintas faenas de las plantas de matanza. Este proceso es altamente demandante y le lleva más de un día en completarlo, generalmente durante el fin de semana. Para ayudarlo con la planificación, se desarrolló una heurística golosa que asigna contenedores a las distintas faenas de la semana disminuyendo los costos de transporte.

La heurística se encarga de asignar contenedores a cada uno de los lotes faenados en las plantas de matanza. Para cada lote verifica qué tipo de contenedor puede ser asignado y cuántos contenedores de ese tipo deberían ser asignados. Debido a que la cantidad de estanques que posee la empresa es limitada, es necesario un correcto uso de ellos para poder hacer una buena planificación y evitar que las plantas que no pueden utilizar bins se queden sin estanques disponibles. Para eso, la heurística crea *itinerarios* para cada uno de los estanques, donde guarda todos sus movimientos y mantiene actualiza-

da la posición final de cada estanque y la hora a la que estará nuevamente disponible. En el Algoritmo 3 se muestra en detalle el funcionamiento de la heurística.

Algoritmo 3: Planificación de contenedores

```

1: para  $t \in$  Días hacer
2:    $L \leftarrow$  Conjunto de lotes a transportar en el día  $t$ 
3:   para lote  $l \in L$  hacer
4:     mientras  $l > 0$  hacer
5:       si Hay contenedores compatibles con  $l$  entonces
6:         si  $l >$  camión cargado con bins entonces
7:           Asignar estanque disponible más cercano  $e$ 
8:           Actualizar cantidad remanente de  $l$ 
9:           Actualizar itinerario de  $e$ 
10:        si no
11:          Asignar Bins
12:          Actualizar cantidad remanente de  $l$ 
13:        fin si
14:      si no
15:        Moverse a próximo  $l$ 
16:      fin si
17:    fin mientras
18:  fin para
19: fin para

```

Teniendo en cuenta que algunas plantas de matanza sólo pueden cargar en estanque y que la empresa cuenta con un número limitado de ellos, la heurística privilegia los lotes asociados a estas plantas de manera que no les vaya a faltar estanque al momento de la carga. Por esta razón los lotes son ordenados primero por prioridad de estanque y luego por distancia (desde la planta de matanza a la de proceso) en orden decreciente (línea 3). Estos criterios se basan en los utilizados por el programador. Como la compañía de transporte cobra por viaje en base a las distancias entre las plantas de matanza y plantas de proceso, se intenta minimizar los costos de transporte priorizando el uso de estanque para el traslado de lotes que tengan que viajar mayores distancias por sobre el resto. De esa manera se intenta garantizar que por lo menos los viajes más largos (es decir, los más caros) sean la menor cantidad posible y minimizando así el costo de transporte (los estanques son más eficientes, porque pueden cargar más peces que los bins).

La heurística busca asignar el contenedor más conveniente a cada lote de

peces. Esto depende de la cantidad de peces del lote que quede por transportar y de la cantidad de contenedores disponibles para ese entonces. En la línea 5 se verifica si hay algún contenedor compatible para el lote l . Si no hay, el remanente de l no puede ser transportado y se continúa con el siguiente lote. Por otro lado, si hay contenedores compatibles el algoritmo verifica la cantidad de peces del lote l que queda por ser asignada. Si la cantidad es mayor que la capacidad de un camión cargado con bins (línea 6), carga los peces en el estanque disponible más cercano (línea 7). Si no hay estanque disponible o la cantidad remanente de peces del lote l no supera la capacidad de un camión cargado con bins, asigna el lote a bins. Con esto se busca no desaprovechar un estanque para poca cantidad de peces. Es decir, si el remanente de l no supera la capacidad de un camión con bins, entonces es asignado a bins para no desaprovechar el estanque (al cual le sobraría capacidad de carga y podría ser utilizado para otro lote más grande).

Al asignar un estanque a un lote se actualiza el itinerario del estanque (línea 9) para registrar el recorrido del estanque y las horas en las que llega a sus destinos. A partir de esta información, se calcula si los estanques estarán disponibles para transportar determinados lotes futuros, tomando en cuenta los tiempos de viaje hacia las plantas de matanza y de carga de hielo.

Finalmente, se calculan los costos en base a las tarifas cobradas por la empresa de transporte. Es importante mencionar que si bien el algoritmo intenta disminuir los costos de contrato con la compañía que provee los camiones, esta última se ve también beneficiada por las decisiones que toma la heurística en sus operaciones. En la práctica, cada estanque es transportado la mayor parte del tiempo por el mismo camión. Esto se traduce en que la heurística al programar los contenedores y priorizar la asignación de los estanques más cercanos, estará programando gran parte de la flota de camiones. Implicará entonces que la empresa de transporte facture menos, pero sus asignaciones serán más eficientes y reducirá sus costos operacionales.

5. Resultados

Las dos aplicaciones desarrolladas fueron puestas a prueba en AquaChile y al día de la fecha son utilizadas como herramientas de apoyo en la programación de las actividades diarias de la empresa o bien de simulación de escenarios para apoyar la toma de decisiones gerenciales. Presentamos en esta sección un análisis de la puesta en práctica de las herramientas implementadas en AquaChile.

5.1. Logística marítima y planificación de faenas

Entre diciembre de 2014 y marzo de 2015 se realizó la puesta en práctica de la herramienta de planificación marítima y de faenas. Durante estos meses, se utilizó la herramienta en paralelo con la planificación manual con el objetivo de analizar y comparar las soluciones para medir las diferencias en eficiencia y determinar aspectos que el software pudiera no estar tomando en cuenta. Luego de varias pruebas y ajustes, se logró finalmente que las soluciones entregadas por la herramienta cumplan los requerimientos prácticos de la empresa. El software funcionó sin fallas y cumplió con las expectativas de los usuarios y la gerencia, quienes estimaron que las soluciones entregadas por la herramienta son de muy buena calidad para el proceso de la empresa.

Durante los primeros meses luego de la puesta en marcha definitiva, la planificación se realizó semanalmente con la nueva herramienta, aunque luego los cambios durante la semana eran implementados manualmente sobre la marcha en el día a día en terreno. Además de esta baja en la producción, la industria se vio fuertemente afectada por el *bloom de algas* de principios del año 2016, el cuál generó la muerte de alrededor de 43.000 toneladas de salmones en el sur de Chile. Todo esto se tradujo en una baja importante en las cantidades de peces transportados, una mayor capacidad relativa en los centros de acopio, barcos, plantas de matanza y proceso, lo cual por su parte simplificó mucho el problema de planificación al punto de poder resolverlo sin necesidad del uso de la herramienta, acaso utilizando recursos en exceso. Con todo esto, durante el año 2015 solo cerca de 20 semanas fueron planificadas íntegramente con la herramienta desarrollada. De todas maneras, la gerencia de la empresa sigue teniendo en cuenta los potenciales beneficios de la herramienta desarrollada y espera en un futuro reactivar en mayor medida su utilización.

Si bien los cambios de las condiciones en la industria redujeron la utilización de la herramienta para la planificación semanal, ésta es actualmente utilizada para la simulación de escenarios. Las simulaciones permiten evaluar las posibles planificaciones ante eventuales cambios en los recursos disponibles (barcos, acopios, plantas, etc.) y considerar de esta manera cambios de gran impacto en la empresa. Un ejemplo claro de esto es la estrategia de la empresa con respecto a los barcos. AquaChile negocia contratos para el arriendo de barcos por períodos de tiempo fijo, los cuales se negocian dependiendo de los planes de cosecha que se tienen para la temporada. Durante el segundo trimestre del 2015, los contratos de dos de sus cuatro barcos estaban a punto de expirar y la empresa debía decidir si renovarlos, cambiarlos por otros, o ampliar o reducir la flota actual. En particular, la empresa tenía dos opciones: quedarse con los dos barcos de 85 toneladas o cambiarlos por uno sólo de 130 toneladas.

La toma de esta decisión debía tener en cuenta muchas consideraciones, tales como la demanda de peces que iba a tener la empresa para ese trimestre, qué tan alejados estaban los centros de cultivo a cosechar, la disponibilidad de centros de acopio y plantas de matanza, etc. Frente a tal importante decisión, se utilizó la herramienta desarrollada para realizar simulaciones en distintos escenarios y evaluar los costos de las planificaciones provistas con el fin de elegir la flota más conveniente. Como resultado pudo observarse que si bien el contrato de dos barcos de 85 toneladas era más caro que el de un barco de 130, el primero permitía desarrollar planificaciones más económicas que el segundo dejando así una mayor rentabilidad final a la empresa. Es así que luego de muchas simulaciones, se tomó la decisión de mantener los dos barcos de 85 toneladas.

5.2. Logística Terrestre

El software de planificación de contenedores ha tenido un alto impacto en la logística terrestre de AquaChile y la empresa se ha visto considerablemente mejorada mediante el uso de la herramienta, tanto de forma cuantitativa como cualitativa. La herramienta desarrollada fue puesta en marcha en diciembre del año 2014 y se continúa utilizando hasta la fecha. El programador utiliza la heurística para planificar los estanques utilizados cada semana; los cambios menores son modificados manualmente y los mayores son introducidos a la aplicación para la reprogramación automática de la planificación.

Para cuantificar el desempeño del software, se corrieron simultáneamente a mano y con la aplicación cuatro semanas de un mismo mes y se compararon los resultados obtenidos. La tabla 2 muestra los costos incurridos por la planificación manual y por la planificación con la heurística, y la diferencia entre ambas. Se muestran además los valores promedio teniendo en cuenta las cuatro semanas. Se puede verificar que en las cuatro semanas de la muestra, el software entregó resultados significativamente mejores que la programación manual. En promedio, la planificación con el software es cerca de un 9% más eficiente que la manual, implicando ahorros de alrededor de US\$ 5500 semanales.

SEMANA	COSTO (US\$)		TONELADAS		COSTO (US\$/TON)		DIFERENCIA	
	MAN	HEUR	MAN	HEUR	MAN	HEUR	US\$	%
1	50.957	45.194	1.269	1.269	39,86	35,62	5.403	10,65 %
2	54.806	49.634	1.363	1.363	40,21	36,41	5.172	9,44 %
3	72.828	65.388	2.036	2.036	35,77	32,12	7.440	10,22 %
4	70.604	66.918	2.117	2.117	33,35	31,61	3.687	5,22 %
PROMEDIO	62.298	56.783	1.696	1.696	37,30	33,94	5.425	8,88 %

Tabla 2: Comparación entre las planificaciones manuales y las automáticas.

En cuanto a los beneficios cualitativos que la herramienta ha aportado a la empresa, es preciso mencionar la considerable disminución en el tiempo requerido por el programador para realizar la planificación. Manualmente, debía dedicar un día completo o a veces más para planificar la semana. Hoy en día, mediante el uso de la herramienta, la planificación se realiza en alrededor de una hora y media. Esto permite destinar el resto del tiempo a evaluar la calidad de las soluciones y probar distintas alternativas y potenciales escenarios, cotejando así posibilidades de inversión para el mejoramiento de la empresa. Otro factor importante a considerar es la información detallada que entrega la aplicación. Anteriormente el programador tenía una vaga idea de los horarios de llegada y salida de los camiones y de los estanques que se utilizarían durante la semana. Actualmente el software entrega el detalle completo de las soluciones, informando de los itinerarios de todos los estanques, especificando orígenes, destinos, horarios y cantidades de peces a cargar. Además de esto, cada planificación queda guardada en la base de datos de la empresa, las que pueden ser copiadas para correr semanas similares y ser reanalizadas para eventuales mejoras en el funcionamiento de la logística de AquaChile.

6. Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo e implementación de herramientas de optimización para resolver el problema de planificación de la logística marítima, faenas en plantas de matanza y logística terrestre de una de las principales empresas salmoneras de Chile.

Una de las grandes dificultades de la planificación de la cadena de proceso de AquaChile es la gran variabilidad de sus componentes (demandas, inventarios, transporte, etc). Esta se debe principalmente a los constantes cambios de las condiciones climáticas del sur de Chile, los que obligan a replanificar los programas de la empresa, en muchos casos, varias veces a la semana. Para poder abordar esta variabilidad, las herramientas fueron desarrolladas de modo tal que cualquier cambio en la cadena de proceso de la empresa pudiera ser replanificado en cortos periodos de tiempo y de manera sencilla. Se prefirió desarrollar un enfoque determinístico por sobre uno estocástico, debido a que este último no habría podido resolver el problema real de planificación semanal de la empresa.

Tanto para la planificación de la logística marítima y faenas en plantas de matanza, como para la planificación de la logística terrestre se utilizaron enfoques de resolución heurísticos, obteniendo resultados de muy buena calidad.

Si bien el problema de la logística marítima se intentó resolver mediante un enfoque de programación lineal entera mixta, las soluciones entregadas eran de peor calidad que las proporcionadas por la heurística, debido al tamaño de los bloques de tiempo del modelo.

La implementación y uso de las herramientas desarrolladas ha tenido un gran impacto en las operaciones de AquaChile. El software de la logística marítima ha demostrado entregar buenas soluciones a la hora de realizar las planificaciones semanales y ha permitido a la empresa poder simular escenarios para poder elegir las flotas de barco más adecuadas para los periodos futuros. El software de la logística terrestre ha permitido planificar los viajes con mejoras que rondan el 9% con respecto a la planificación manual, y los tiempos de planificación han disminuido considerablemente, desde más de un día de planificación a un par de horas.

Es importante destacar también que el exitoso desarrollo del proyecto se debe en gran medida al trabajo conjunto y coordinado entre el grupo de académicos, gerencia y todo el personal de la empresa. El buen entendimiento entre las partes, la facilidad de acceder a la información y correcta organización del trabajo fueron claves para un buen desarrollo.

Como trabajo futuro se propone resolver el problema de la logística marítima y la planificación de faenas en las plantas de matanza con un método mixto, el cuál combine la actual heurística con un modelo de programación lineal. Consideramos que un método de estas características podría mejorar aún más las soluciones que se obtienen actualmente.

Agradecimientos: A la empresa AquaChile por toda su colaboración y apoyo económico para la concreción de este proyecto. Este trabajo contó también con el soporte económico del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ICM:P-05-004-F, CONICYT: FBO816). Guillermo Durán fue parcialmente financiado por los subsidios FONDECyT 1140787, UBACyT 20020130100808BA (Argentina) y ANPCyT PICT 2012-1324 (Argentina). Andrés Weintraub recibió soporte económico de FONDECyT 1120318.

Referencias

- [1] AquaChile. Sitio web: <http://www.aquachile.com>.
- [2] T. Bjørndal. Optimal harvesting of farmed fish. *Marine Resource Economics*, páginas 139–159, 1988.

- [3] T. Bjørndal, D.E. Lane, y A. Weintraub. Operational research models and the management of fisheries and aquaculture: a review. *European Journal of Operational Research*, 156(3):533–540, 2004.
- [4] B. Björnsson. Effects of stocking density on growth rate of halibut (*hipoglossus hippoglossus* l.) reared in large circular tanks for three years. *Aquaculture*, 123(3):259 – 270, 1994.
- [5] F. Bravo, G. Durán, A. Lucena, J. Marengo, D. Morán, y A. Weintraub. Mathematical models for optimizing production chain planning in salmon farming. *International Transactions in Operational Research*, 20(5):731–766, 2013.
- [6] J.R. Brett. 10 - environmental factors and growth. In D.J. Randall W.S. Hoar y J.R. Brett, editors, *Bioenergetics and Growth*, volume 8 of *Fish Physiology*, páginas 599 – 675. Academic Press, 1979.
- [7] G. Brønmo, M. Christiansen, y B. Nygreen. Ship routing and scheduling with flexible cargo sizes. *The Journal of the Operational Research Society*, 58(9):1167–1177, 2007.
- [8] G. Brønmo, M. Christiansen, K. Fagerholt, y B. Nygreen. A multi-start local search heuristic for ship scheduling—a computational study. *Computers & Operations Research*, 34(3):900–917, 2007.
- [9] O.J. Cacho, U. Hatch, y H. Kinnucan. Bioeconomic analysis of fish growth: effects of dietary protein and ration size. *Aquaculture*, 88(3):223 – 238, 1990.
- [10] C.Y. Cho y D.P. Bureau. Development of bioenergetic models and the fish-prfeq software to estimate production, feeding ration and waste output in aquaculture. *Aquatic Living Resources*, 11(04):199–210, 1998.
- [11] Marielle Christiansen, Kjetil Fagerholt, Bjørn Nygreen, y David Ronen. Chapter 4 maritime transportation. In C. Barnhart y G. Laporte, editors, *Transportation*, volume 14 of *Handbooks in Operations Research and Management Science*, páginas 189 – 284. Elsevier, 2007.
- [12] F. Cisternas, D. Delle Donne, G. Durán, C. Polgatz, y A. Weintraub. Optimizing salmon farm cage net management using integer programming. *Journal of the Operational Research Society*, 64(5):735–747, 2013.
- [13] K. Fagerholt y H. Lindstad. Turborouter: An interactive optimisation-based decision support system for ship routing and scheduling. *Maritime Economics & Logistics*, 9(3):214–233, 2007.

- [14] T.A. Feo y M.G. Resende. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization*, 6:109–134, 1995.
- [15] F. Glover. Tabu search - part 1. *ORSA Journal on Computing*, 1(3):190–206, 1989.
- [16] F. Glover. Tabu search - part 2. *ORSA Journal on Computing*, 2(1):4–32, 1990.
- [17] P. Leung, E. Hochman, K. Wanitprapha, Y.C. Shang, y J. Wang. Optimal harvest schedule for maricultured shrimp: a stochastic sequential decision model. 1989.
- [18] PingSun Leung y Yung C. Shang. Modeling prawn production management system: A dynamic markov decision approach. *Agricultural Systems*, 29(1):5 – 20, 1989.
- [19] M. Mangel y J. Stamps. Trade-offs between growth and mortality and the maintenance of individual variation in growth. *Evolutionary Ecology Research*, 3(5), 2001.
- [20] G. Romero, G. Durán, J. Marenco, y A. Weintraub. An approach for efficient ship routing. *International Transactions in Operational Research*, 20(6):767–794, 2013.
- [21] SalmonChile. Sitio web: <http://www.salmonchile.cl>.