



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

PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE LOS CAMBIOS DE MALLAS DE CULTIVO PARA UNA EMPRESA SALMONERA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

SEBASTIÁN CONCHA FLORES

PROFESOR GUÍA:

GUILLERMO ALFREDO DURÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

CRISTIAN CORTES CARRILLO

SANTIAGO DE CHILE

2015

Resumen ejecutivo

El objetivo principal de este trabajo es diseñar un sistema de planificación de cambios de mallas en la cadena productiva del salmón en la etapa de engorda de Agua de Mar. Este trabajo está especializado en las características de la empresa Salmones Multiexport S.A., dedicada al cultivo, procesamiento y comercialización de las especies salmón y trucha.

En el año 2007, Multiexport en conjunto con la Universidad de Chile desarrollaron un modelo de optimización lineal, con variables mixtas para mejorar la eficiencia en el manejo de las mallas, este modelo no pudo ser utilizado debido a que la aparición del virus ISA obligó a la empresa a modificar sus operaciones. En este trabajo se tomará como base el modelo desarrollado anteriormente, incorporando las modificaciones necesarias por los cambios operativos realizados.

La problemática que aborda este proyecto consiste en la planificación de los cambios de mallas para un total de 688 jaulas, dispersas en 39 centros de cultivo, tomando en cuenta que se tiene una flota reducida de barcos capaces de realizar estas labores. Se considera que la demanda de las jaulas por mallas es conocida y que se sabe la cantidad máxima de barcos que están disponibles para efectuar tareas de instalación, cambio y remoción de redes en un período específico.

En este trabajo se desarrolla una herramienta que resuelve este problema mediante un modelo de programación entera mixta, que representa el proceso productivo y sus variables críticas, en donde se incluyen aspectos relacionados con la gestión de la flota de barcos. Las soluciones del modelo permitirán apoyar y respaldar la toma de decisiones.

El modelo utilizado busca la minimización de costos vinculados a la planificación de los cambios de mallas. Como resultado, el modelo entrega los niveles óptimos de: compra inicial de redes requeridas para el proceso productivo, fechas de instalación, cambio y remoción de mallas y el tratamiento que se le aplicará a la red.

La herramienta se aplicó a los datos de la producción de la empresa para el año 2014, los resultados obtenidos logran crear una planificación factible de acuerdo al número de barcos disponibles, además se reducen los costos totales de cambios de redes en un 6,9% si es que se mantiene la forma de trabajo actual, y un 26,4% si es que se emplea el uso del lavado in situ, esto implica tener las condiciones de habitabilidad necesarias en los centros de cultivo para que empresas subcontratadas puedan efectuar el trabajo de lavado. Otro beneficio asociado es que los tiempos de planificación se ven reducidos de varias horas semanales a sólo 20 minutos semanales.

El uso del modelo apoya la toma de decisiones estratégicas de inversión en los ámbitos de compra de nuevos tipos de mallas, uso de nuevas pinturas antifouling y contratos con talleres de mantenimiento y barcos. Además permite informar a los dueños de los barcos cuándo y qué trabajos tendrán en el futuro, con lo que se espera que el problema actual de falta de disponibilidad de barcos en algunas semanas, dado que éstos se encuentran trabajando en otra empresa, se solucione.

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1 Historia	1
1.2 Producción	3
1.2.1 Producción mundial	3
1.2.2 Producción Chilena.....	4
1.3 Productores de salmón en Chile	7
1.4 Ciclo de vida del salmón en cautiverio	8
2. Multiexport	10
2.1 Historia Multiexport.....	10
2.2 Etapas del negocio.....	12
2.2.1 Agua dulce.....	12
2.2.2 Agua de Mar	12
2.2.3 División Valor Agregado	13
3. Descripción del problema	15
3.1 Cadena productiva	15
3.1.1 Agua Dulce	15
3.1.2 Agua de Mar	16
3.1.3 División de valor agregado	17
3.2 Descripción etapa engorda en agua de mar	18
3.2.1 Centros de cultivo	18
3.2.2 Jaulas	18
3.2.3 Mallas	19
3.2.4 Taller.....	20
3.2.5 Barcos	21
3.2.6 Factores de deterioro de las mallas.....	21
3.2.7 Medidas de prevención.....	22
4. Modelo MIP.....	25
4.1 Situación actual.....	25
4.2 Justificación del Modelo para la planificación de cambios de mallas en Acuicultura	29

5.	Modelo matemático para la planificación de los cambios de las mallas de cultivo	31
5.1	Descripción conceptual del modelo.....	31
5.2	Formulación del modelo matemático.....	34
6.	Instancia de evaluación	43
7.	Resultados.....	45
7.1	Comparación planificación expertos versus MM y MMP	45
8.	Análisis de Sensibilidad	53
8.1	Centro Único	53
8.2	Precios Tratamiento	54
8.3	Tipos de Tratamiento	55
8.4	Cantidad Barcos.....	56
8.5	Máxima cantidad de viajes	57
8.6	Tiempo de respuesta de Taller de Mantenimiento	58
8.7	Tiempo de permanencia en Agua	59
9.	Conclusiones	62
10.	Bibliografía.....	64
11.	Anexo	67
11.1	Fouling	67
11.2	Centros Multiexport	68
11.3	Solución gráfica.....	69

Índice de tablas

Tabla 1: Producción mundial de salmón atlántico, trucha y coho de cultivo.....	4
Tabla 2: Cosecha por recursos 2013.	6
Tabla 3: Exportaciones de Salmón Noviembre 2012-2013	6
Tabla 4: Concesiones Acuícolas otorgadas para cultivo de salmón.....	7
Tabla 5: Ranking exportaciones chilenas por empresa.....	8
Tabla 6: Número de Centros con operación.....	13
Tabla 7: Principales costos planificación de cambio de mallas	27
Tabla 8: Costo de mantención.....	45
Tabla 9: Costo de redes.	46
Tabla 10: Cantidad de redes sin tratamiento.....	47
Tabla 11: Pintura antifouling.....	48
Tabla 12: Lavado in situ.	48
Tabla 13: Costos tratamientos.....	49
Tabla 14: Costo barcos.	49
Tabla 15: MMP uso de barcos.....	50
Tabla 16: MM uso de barcos.	50
Tabla 17: Costos totales MMP.	51
Tabla 18: Costos totales MM.....	51
Tabla 19: Centro único.	53
Tabla 20: Variación del precio en el pintado de redes.....	54
Tabla 21: Variación del precio en el lavado in situ.	54
Tabla 22: Eliminar tratamientos.....	55
Tabla 23: Variación en el número de barcos y los tiempos de faena.	56
Tabla 24: Variación en el máximo número de viajes.	58
Tabla 25: Variación del tiempo de respuesta de talleres de mantenimiento.	58
Tabla 26: Variación tiempo de permanencia en agua.	60
Tabla 27: Centros Multiexport.	68

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Captura de salmón salvaje y producción de salmón cultivado	3
Ilustración 2: Salmon Atlántico.	4
Ilustración 3: Salmón Coho.	5
Ilustración 4: Trucha Arcoíris.....	5
Ilustración 5: Salmón Rey.	6
Ilustración 6: Desarrollo del salmón	8
Ilustración 7: Ciclo de vida del salmón en cautiverio	9
Ilustración 8: Ciclo del salmón de cultivo.....	17
Ilustración 9: Luz de malla.....	20
Ilustración 10: Biofouling en redes.	67
Ilustración 11: Comparación de mallas con y sin biofouling.	67
Ilustración 12: Solución gráfica.....	69

1. Introducción

1.1 Historia

El salmón no es una especie natural del mar chileno, por este motivo en 1905 se realiza la primera importación de ovas de salmón desde Hamburgo hacia la Quinta Región de Chile, esto da inicio a la acuicultura del Salmon en nuestro país. De estas ovas se obtuvieron 200.000 peces de los cuales 198.000 fueron repartidos en los ríos Aconcagua, Paine, Tinguiririca, Ligüemo, Maule, Cauken y Toltén. En 1916 se logra el primer desove de truchas y salmones en Lautaro. Los salmones introducidos lograron sobrevivir y reproducirse con lo cual se demostró que el país tiene las condiciones ambientales, geográficas y climáticas apropiadas para la crianza de salmones.

Mediante la firma de un convenio de cooperación entre los gobiernos de Japón y Chile se inició el “Programa de Introducción del Salmón del Pacífico en Chile” en 1969, el cual estaba enfocado en la XI y XII región y presentó modestos resultados. Este programa se considera la base del auge acuícola de la década del 80.

En 1979, Mares Australes en conjunto con la empresa Japonesa Nichiro Chile, comienzan el cultivo de salmones Pacífico a través de balsas en la Región de Los Lagos, esto da inicio a que el sector privado comience a liderar la producción salmonícola.

Nueve empresas comenzaron a producir entre 1983 y 1984, y dado los buenos resultados mostrados por los estudios de factibilidad económica, en 1986 se solicitan la autorización de 26 nuevos centros, en este mismo año se superaron las 2.100 toneladas anuales de producción y se crearon las primeras asociaciones gremiales para representar a las principales empresas productoras y proveedoras de la industria salmonicultura del país.

En la década de 1990 se iniciaron exitosamente reproducciones de salmón Coho, desarrollo científico que permitió el despegue de la industria. En 1998 la industria vivió uno de sus momentos más complicados debido a la crisis asiática, que hizo caer los precios internacionales del producto, lo cual provocó una sobreproducción a nivel mundial.

El año 2000 existían aproximadamente 400 centros de cultivos de agua de mar y 185 pisciculturas de agua dulce. Entre 1985 y 2005 la industria salmonera en Chile

pasó de ser un sector secundario en la economía a convertirse en el principal alimento de exportación del país.

En 2006, la producción mundial de salmones cultivados alcanzó las 1.642 miles de toneladas, de las cuales un 40% (656,8 miles de toneladas) correspondían a Noruega y un 38% (624 miles de toneladas) a Chile, posicionándolo como el segundo productor a nivel mundial.

El virus ISA (Anemia Infecciosa del Salmón) es una enfermedad con grandes efectos en la producción de salmones, ya que provoca importantes mortalidades entre los grupos infectados. La enfermedad no tiene impacto en la salud pública, ya que el virus no afecta al hombre.

La anemia Infecciosa del salmón se encuentra presente en Chile desde 1999, de forma inmune en el Salmón Coho (sin enfermedad clínica). Sin embargo, en junio de 2007 se detectó por primera vez en el Salmón Atlántico, en un centro de cultivo ubicado en la isla Lemuy, Chiloé. El contagio se realiza pez a pez por contacto con peces infectados, contacto con equipos contaminados o con el equipo de personas que manejan peces infectados. A su vez, se ha comprobado que el piojo del salmón o cáligus (*Lepeophtheirus salmonis*) puede transmitir pasivamente el ISA de peces infectados a susceptibles. La mortalidad asociada a brotes de ISA en salmones atlánticos puede variar significativamente entre distintos centros de cultivo y dentro de un mismo centro de cultivo, reportándose mortalidades diarias a nivel de jaula que van entre 0,5 a 1% e incluso mayor.

Dada la legislación vigente en Chile es posible comercializar salmones con el virus ISA, por lo cual la cosecha temprana de peces infectados permite comercializarlos con un tamaño menor al óptimo (con consecuencias negativas para la rentabilidad del negocio), pero sin riesgo para el consumo humano.

Desde junio del 2007 el virus ISA pasó de ser un foco a ser una epidemia infecciosa presente en tres regiones del país, lo cual tuvo serias consecuencias para Chile y la industria del salmón. La epidemia ocasionó una disminución de la siembra de peces desde 30 millones (Enero 2008) a 3.3 millones (Junio 2009), crisis financiera en principales empresas productoras, cierre de centros productivos y plantas de proceso, lo que llevó a una caída en la producción en alrededor de un 50% en el salmón Atlántico.

La crisis también afectó al producto, el peso de cosecha promedio del salmón atlántico antes de la crisis fue de 3,5 kilos y disminuyó a 2,7 kilos, además la tasa de mortalidad aumentó en un 13,5%. La crisis se mantuvo hasta mediados del 2010 lo que ocasionó altas cifras de despidos, mermas en la producción y los problemas financieros de las empresas con los bancos.

Ante la crisis el Servicio Nacional de Pesca (Sernapesca), el cual tiene como misión *“Fiscalizar el cumplimiento de las normas pesqueras y de acuicultura, proveer servicios para facilitar su correcta ejecución y realizar una gestión sanitaria eficaz, a fin de contribuir a la sustentabilidad del sector y a la protección de los recursos hidrobiológicos y su medio ambiente.”*, estableció una serie de planes que consideran medidas de bioseguridad, restricciones de movimientos en la zona afectada, establecimiento de zonas de cuarentena y de vigilancia, con el fin de evitar la propagación del virus, además de medidas respecto al brote y sus focos. Con este grupo de medidas y el apoyo de los productores fue posible controlar la crisis.

Los costos del salmón en Chile han ido en aumento y desde el principio del 2012 estos se sitúan entre US\$1 a US\$1,50 por kilo, junto con los costos ex-jaula que alcanzan los US\$4 (costo reflejado del pez después de haberlo criado, pero antes de ser procesado en la planta) según el informe del Nordea Bank sobre el sector pesquero. Esto se debe a un aumento en los problemas de la condición sanitaria, combinada con múltiples regulaciones en la organización de la gestión del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura (SERNAPESCA). Esto lleva a que los costos en Chile que solían ser US\$1 más bajo que Noruega hace diez años, sean actualmente US\$1 más caro.

1.2 Producción

1.2.1 Producción mundial

Durante 2013, la producción mundial de salmón de cultivo y salvaje creció 7% con respecto al año anterior, lo que equivale a 234 mil toneladas. Dicha alza se explica principalmente producto de la recuperación que tuvo la captura de Salmón Salvaje en relación a la baja presentada durante el año 2012. Para el año 2013 el salmón de cultivo representó un 70% de la producción mundial.

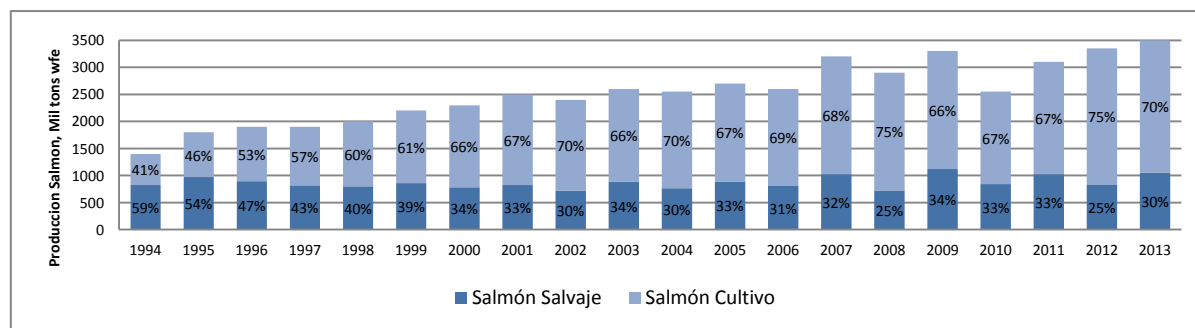


Ilustración 1: Captura de salmón salvaje y producción de salmón cultivado, Fuente: Memoria Anual Multiexport 2013.

Como se observa en la Tabla 1, la producción de salmón cultivado el año 2013 alcanzó las 2.476 mil toneladas, y es liderada por Noruega (49%) y en segundo lugar Chile (30%). La producción mundial de salmón desde el 2003 ha ido en aumento salvo los años 2008 y 2009 en donde la industria acuícola Chilena fue fuertemente afectada por el virus ISA, lo cual provocó una disminución de la producción el 2009 con respecto del año anterior de un 23% y el 2010 con respecto al 2008 de un 34%. En el 2011 Chile logró controlar la crisis por lo que su producción comenzó a crecer nuevamente y por ende la producción mundial también.

Productor	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	% Var	Var
Noruega	579	601	632	654	790	826	936	1.000	1.050	1.233	1.216	-1%	-17
Chile	487	563	603	631	658	663	509	432	609	759	747	-2%	-12
Uk	161	150	120	128	135	137	145	141	157	151	158	5%	7
Canadá	95	92	111	118	119	122	115	118	110	122	120	-2%	-2
Islas Faroe	57	41	21	16	24	44	54	47	62	62	78	26%	16
Irlanda	18	12	12	15	16	13	16	17	19	16	11	-31%	-5
Finlandia	14	14	15	15	15	15	15	15	15	14	14	0%	0
Otros	80	81	80	71	75	81	81	84	79	115	135	18%	20
Total	1.490	1.553	1.592	1.647	1.831	1.901	1.871	1.854	2.101	2.472	2.479	0%	7

Tabla 1: Producción mundial de salmón atlántico, trucha y coho de cultivo, Fuente: Kontali-Subpesca-MEF (ton).

1.2.2 Producción Chilena

Existen diferentes tipos de salmones los cuales se diferencian en tamaño, sabor, color, alimentación, etc., dada estas diferencias existen distintos mercados que los apetecen. En Chile se cultivan 4 tipos, el salmón Atlántico, salmón Coho, salmón Rey y la trucha Arcoíris.

- Salmón Atlántico o Salar: Especie que inicia su ciclo de vida en agua dulce o piscicultura y luego es trasladada al mar para su proceso de engorda por un período de 15 a 20 meses, con el fin de cosecharse con un peso de 4,5 a 5 kilos. En Chile, su cultivo se ubica entre la X y XII región. Disponible durante todo el año, se comercializa principalmente a los mercados de Estados Unidos, Brasil y Unión Europea, bajo el formato de fresco o congelado en filetes o entero.



Ilustración 2: Salmon Atlántico.

- **Salmón Coho:** También conocido como el Salmón Plateado o del Pacífico y originario del Pacífico Norte. Especie que inicia su ciclo de vida en agua dulce o piscicultura y luego es trasladada al mar para su proceso de engorda por un período de 10 a 12 meses, con el fin de cosecharse con un peso de 2,5 a 3 kilos. En Chile, su cultivo se ubica entre la X y XII regiones. Se comercializa principalmente en el mercado japonés bajo el formato congelado HG (sin cabeza). Sus cosechas se concentran entre octubre y marzo.



Ilustración 3: Salmón Coho.

- **Trucha Arcoíris:** Especie que puede ser producida íntegramente en agua dulce, al igual que los anteriores, tiene su primera fase de desarrollo en agua dulce o piscicultura para trasladarse a cultivos de mar por un período de 10 a 12 meses y ser cosechada entre 2,5 a 3 kilos. En Chile, su cultivo se ubica entre la X y XII regiones. Se comercializa principalmente en los mercados de Japón, Rusia, Estados Unidos y Brasil. Su cosecha se produce durante todo el año con un peak entre octubre y febrero.



Ilustración 4: Trucha Arcoíris.

- **Salmón Rey:** Esta especie es originaria del océano Pacífico (en el hemisferio norte) y también del océano Ártico y los mares de Bering, Ojotsk y del Japón. Pesa alrededor de 14 kilos. Su ciclo de producción se desarrolla completamente en la X región y éste dura alrededor de 2 años en total. Japón y Estados Unidos son los principales consumidores de este producto.



Ilustración 5: Salmón Rey.

Para el año 2013 el sector acuícola chileno cosecho un total de 1.054.511 toneladas de productos marinos, de las cuales 490.310 toneladas fueron de salmón Atlántico, 153.853 toneladas de trucha Arcoíris, 148.152 toneladas de salmón Coho o del Pacífico y 983 toneladas de salmón Rey.

Especie	Producción 2013 (Ton)
Salmón Atlántico	490.310
Chorito	243.982
Trucha Arcoíris	153.853
Salmon Pacífico	148.152
Pelillo	9.605
Ostión del Norte	4.261
Otros	3.306
Salmon Rey	986
Ostra del Pacífico	56
Total	1.054.511

Tabla 2: Cosecha por recursos 2013, Fuente: SERNAPESCA.

De acuerdo a los datos entregados por la Aduana de Chile entre noviembre del 2012 y noviembre del 2013, se realizaron exportaciones de salmón por un monto de 3.334 millones de dólares, lo que significa un aumento del 20,2% respecto del 2012, como se observa en la Tabla 3, el 61% de estas exportaciones pertenecen a salmón Atlántico, seguidas por la trucha Arcoíris con un 21%.

Recurso / Ítem	Valor (miles US\$)	
	2012	2013
Salmón del Atlántico	1.330.481	2.080.587
Trucha Arcoíris	824.396	705.090
Salmón del Pacífico	494.741	384.545
Salmón s/e	122.333	158.564
Salmón Rey	2.495	5.589
Total	2.774.446	3.334.375

Tabla 3: Exportaciones de Salmón Noviembre 2012-2013, Fuente: IFOP – Aduanas.

1.3 Productores de Salmón en Chile

Las Áreas Apropriadas para el ejercicio de la Acuicultura (A.A.A.), son todos aquellos espacios geográficos fijados según el artículo 67 de la Ley General de Pesca y Acuicultura sobre bienes nacionales de uso público, en los cuales el Estado está facultado para recibir y tramitar solicitudes de concesión de acuicultura. Las empresas productoras de salmón solo pueden producir en A.A.A en donde el Estado Chileno les haya otorgado la concesión, a estas concesiones se les llamara centros de cultivo de aquí en adelante.

Según la información entregada por la Subsecretaría de pesca y acuicultura, en Chile actualmente existen 1254 centros para el cultivo de salmónes, éstos están repartidos en un total de 102 empresas, en la Tabla 4 se puede observar las 10 empresas con más concesiones, las cuales concentran más del 50% de los centros.

Nº	Empresa	Número de Concesiones
1	MARINE HARVEST CHILE S.A.	126
2	SALMONES MULTIEXPORT S.A.	100
3	EXPORTADORA LOS FIORDOS LTDA.	86
4	EMPRESAS AQUACHILE S.A.	77
5	MAINSTREAM CHILE S.A.	52
6	SALMONES CAMANCHACA S.A.	51
7	CULTIVOS YADRAN S.A.	41
8	ACUINOVA CHILE S.A.	36
9	TRUSAL S.A.	36
10	AGUAS CLARAS S.A.	33

Tabla 4: Concesiones Acuícolas otorgadas para cultivo de salmón, Fuente: Subpesca.

La industria salmonera chilena a través de los años se ha ido concentrando, debido a que los centros tienen una densidad máxima para el cultivo y la cantidad de nuevos centros son acotados, por ende una de las formas de seguir creciendo es a través de la adquisición de la competencia. Además existen legislaciones sanitarias impuestas por SERNAPESCA, como es la de los períodos de descanso, lo cual no permite producir en un sector específico por un determinado tiempo, esta medida ha llevado que muchas de las pequeñas empresas de cultivo del salmón hayan dejado sus labores.

Las principales empresas exportadoras de salmón en Chile se pueden observar en la Tabla 5, el ranking es encabezada por la empresa AquaChile que en la fecha septiembre 2012- 2013 exportó US\$311,9 millones que equivalen a 47.913 toneladas de salmón. En este mismo período la empresa Multiexport superó en exportaciones a la noruega Mainstream, la cual quedó rezagada en el tercer puesto.

Posición	Empresa	Exportaciones (millones US\$)
1	AquaChile	311,9
2	Multiexport	217,9
3	Mainstream Chile	207,4
4	Los Fiordos	177
5	Ventisqueros	131,5
6	Salmones Camanchaca	127
7	Acuinova	107,5
8	Blumar	105,8
9	Granja Marina Tornagaleones	97
10	Australis Mar	95,2

Tabla 5: Ranking exportaciones chilenas por empresa, Fuente: SalmonXpert.

1.4 Ciclo de vida del salmón en cautiverio

Para la crianza del salmón en cautiverio se han tratado de recrear las condiciones de vida silvestre, para esto los peces son mantenidos en jaulas o estanques con flujos abiertos o sistema de recirculación de agua, en donde se manipulan las condiciones de temperatura, oxígeno, pH, etc., con el fin de controlar los procesos biológicos del salmón.



Ilustración 6: Desarrollo del salmón, Fuente: Fundación Sol.

El cultivo del salmón comienza con la selección de reproductores que se utilizarán para extraer las ovas de las hembras y el semen de los machos, cuya mezcla da origen a la ova fertilizada. La incubación de las ovas se produce en agua dulce, en donde éstas completan su desarrollo hasta la eclosión.

La eclosión es el momento en que los alevines rompen el huevo y comienzan a nadar junto con el saco vitelino, esta etapa se acaba cuando los peces absorben la totalidad del saco. El alevinaje se inicia con la primera alimentación y finaliza cuando el pez crece hasta convertirse en un alevín parr o salmón juvenil.

Al terminar el alevinaje se inicia la smoltificación, en donde el pez sufre una serie de cambios fisiológicos y físicos promovidos por las hormonas, estos cambios permiten a los salmones desplazarse del agua dulce a aguas marinas. Durante este proceso el salmón pierde sus marcas “parr”, el estómago se platea, y el dorso se torna verde o pardo.

La engorda es la fase donde los peces comienzan a ser alimentados con dietas especiales y ésta se realiza en balsas jaulas flotantes, estas estructuras son capaces de soportar fuertes vientos, oleajes y corrientes.

Cuando los salmones alcanzan su peso se inicia el proceso de la cosecha, es cuando se levantan las mallas y separan los peces por tamaño, para reunir los que serán extraídos.

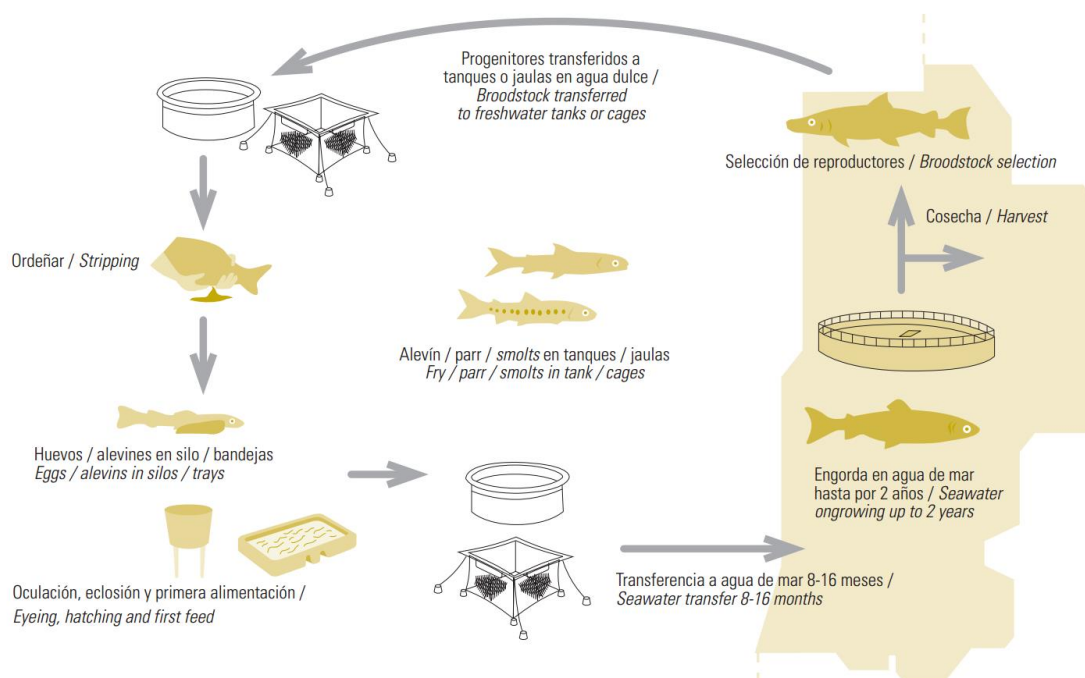


Ilustración 7: Ciclo de vida del salmón en cautiverio, Fuente: Fondo Mundial para la Naturaleza.

2. Multiexport

2.1 Historia Multiexport

En mayo de 1987 inicia sus actividades productivas Alimentos Multiexport S.A., sociedad cuyo objeto es la captura, compra, procesamiento y comercialización de pescados y mariscos de exportación, abastecidos principalmente de fuentes artesanales e industriales.

En forma simultánea al inicio de la salmonicultura en Chile, y como una forma de diversificar el quehacer del grupo Multiexport, en 1988 inicia sus actividades Salmones Multiexport Ltda., con un primer centro de cultivo ubicado en Dalcahue, Chiloé.

En 1991, Multiexport constituye una sociedad filial en la ciudad de Miami denominada Almex USA Inc., actualmente Multiexport Foods USA Inc, y en 1995 inicia una alianza estratégica con Mitsui & Co. El objetivo es comercializar salmónes y truchas de producción propia y de terceros en el mercado norteamericano y japonés.

Como parte de un proceso de integración, en 1996 Salmones Multiexport adquiere el 50% de los activos de agua dulce de Chisal S.A. y, posteriormente, en 1998, se fusiona con Alimentos Multiexport, de esta manera la empresa consta con las etapas de cultivo, procesamiento y comercialización de salmónes.

En 1999 se adquiere la totalidad de Chisal S.A. y, de esta forma, Multiexport logra ubicarse entre las tres empresas salmoneras más importantes del país y entre las 10 más grandes del mundo.

En el año 2006, se pone en marcha una moderna piscicultura de recirculación, la cual permite un mayor control de las variables productivas con un mínimo impacto medioambiental. Por otra parte, finaliza la construcción de una moderna planta de procesamiento con una capacidad de 74.500 toneladas anuales.

A partir de la segunda mitad del año 2007, y luego de haber tenido un buen desempeño económico en el primer semestre del año, surgieron una serie de hechos desafortunados que llevaron a la industria chilena del salmón a la crisis más profunda de su historia, caracterizada por una fuerte caída en los precios internacionales del salmón y la trucha, el alza de los precios de las materias primas, del petróleo y la energía, aumentos de la inflación interna, rápido deterioro del tipo de cambio, y un fuerte deterioro de las condiciones sanitarias y productivas, como consecuencia de un severo cuadro de “caligdocosis” y la aparición del virus ISA en la isla de Chiloé, X Región del país. Durante el transcurso del año

2008 este negativo escenario de la industria salmonicultura nacional se agudizó aún más, en especial por la rápida expansión del virus ISA hacia todas las regiones donde opera la industria (X, XI y XII Regiones), afectando sustancialmente a un gran porcentaje de los centros de cultivo en mar del salmón del atlántico. A esta compleja situación que vivía la industria se sumó, a fines del año, una de las más severas crisis financieras a nivel mundial que se tenga memoria.

Como resultado de la situación anterior, la compañía se vio afectada en sus resultados productivos y financieros, generándose grandes pérdidas patrimoniales e impulsando una compleja reestructuración del negocio y del modelo de operación de la industria.

El año 2009 la industria y gobierno diseñaron de un nuevo modelo productivo para el sector, que modificara reglamentos sanitarios y medioambientales e impulsando un cambio a la actual Ley de Pesca y Acuicultura.

El 2011 fue el año de la consolidación de la industria y de su nuevo modelo productivo-sanitario, bajo el cual se obtuvieron bajas mortalidades, altos pesos promedios y un excelente tratamiento a los casos de ISA que se presentaron, los que no se expandieron más allá de sus centros de origen.

El año 2012 estuvo marcado por un negativo escenario de precios internacionales. Las plantas de Multiexport Foods fueron las primeras, a nivel mundial, en obtener la certificación B.A.P. (Best Aquaculture Practice) de la Global Aquaculture Alliance.

Durante el año 2013 se concretó el Joint Venture entre la filial Salmones Multiexport S.A. y Mitsui & Co. Inc. De esta forma nace Multiexport Pacific Farms S.A., empresa creada con el fin de producir y comercializar las especies trucha y coho con especial énfasis en el mercado asiático.

Durante el primer semestre de 2013, la industria chilena se enfrentó a una desafiante condición sanitaria, producto de un nuevo cuadro de “caligidosis”. Lo anterior dio origen a que uno de centros de producción en agua de mar, junto con dos centros de otras empresas, se viera afectado por virus ISA, lo cual no ocurría desde la crisis de los años 2007 y 2008. No obstante lo anterior, y gracias al actuar coordinado con todos los actores involucrados, fue posible controlar.

2.2 Etapas del negocio

Multiexport Foods es una empresa que está integrada verticalmente en el negocio salmoneero, inicia sus procesos con la reproducción de los peces y los termina con la distribución de sus distintos productos a sus clientes finales. Las etapas del negocio del salmón se dividen en tres:

- Agua dulce
- Agua de mar
- Valor Agregado y ventas

2.2.1 Agua dulce

La división Agua dulce comprende las siguientes etapas productivas:

- I. **Genética y Reproducción:** La producción de ovas representa la primera etapa del ciclo productivo. Multiexport cuenta con un programa de selección genética de sus reproductores, los cuales son chequeados individualmente para que cumplan con todas las condiciones sanitarias y de cultivo. La producción de ovas proviene principalmente de reproductores propios, los cuales son mantenidos durante toda su vida y ciclo productivo en instalaciones de agua dulce en tierra.
- II. **Crianza en Agua Dulce:** La crianza en agua dulce comprende las fases de alevinaje y la de smoltificación. Las pisciculturas de Multiexport Foods permiten un alto porcentaje de recirculación de las aguas (97%). Esto genera un mejor control de las variables productivas.
Durante el año 2008, Multiexport Foods inició un proyecto para el traslado de todos sus centros de crianza en agua dulce a pisciculturas en tierra. De esta manera, a fines de 2008 la totalidad del salmón atlántico y una significativa parte de la producción de truchas, en la fase de crianza en agua dulce, se realiza exclusivamente en pisciculturas en tierra.

2.2.2 Agua de Mar

Esta división se ocupa del cultivo o engorda en agua de mar de los peces desde un peso aproximado de 100 gramos hasta su cosecha de talla comercial, entre 2,5 y 5,5 kilos dependiendo de la especie. La operación se desarrolla en centros de cultivo en la X y XI regiones del país operando 42 centros productivos durante 2013.

En el modelo productivo actual las áreas aptas para cultivo del salmón están organizadas en 62 agrupaciones de concesiones (ACS) para las regiones X y XI y 30 ACS para la explotación acuícola en la región de Magallanes.

A la fecha Multiexport Foods cuenta con 92 concesiones de agua de mar, ubicadas en 23 barrios diferentes, lo que permite garantizar una continua operación productiva. Adicionalmente, la compañía posee activos en trámite para alcanzar las 106 concesiones en un futuro cercano, incluyendo 7 licencias en la región de Magallanes.

Por otro lado, la entrada en vigencia del modelo de gestión de densidades de siembra por agrupación de concesiones, el cual categoriza y castiga a los centros que han presentado mayores pérdidas (muerte de peces), a través de la disminución del número de peces a sembrar en los períodos futuros. De igual manera, establece una calificación sanitaria, en la agrupación de concesiones, que cruza las intenciones de siembra informadas por los productores y finalmente fija una determinada densidad para los titulares del barrio.

Región	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
X	19	16	18	7	9	7	9	8
XI	6	12	21	13	17	26	32	34
Total	25	28	39	20	26	33	41	42

Tabla 6: Número de Centros con operación, Fuente: Memoria anual 2013 Multiexport.

2.2.3 División Valor Agregado

Una vez cosechado el Salmón del Atlántico y la Trucha, Multiexport Foods inicia un proceso con el objetivo de obtener el mayor retorno de la materia prima a través de gestión comercial y procesamiento orientado a obtener el menor costo de transformación. En esta etapa encontramos a la filial Alimentos Multiexport S.A., cuyas principales actividades son el procesamiento de pescados en todas sus formas y productos, tanto propios como de terceros

El principal objetivo de la División de Valor Agregado es maximizar el retorno a materia prima (RMP), rentabilizando al máximo cada kilo de salmón cosechado. Para esto, cuenta con un sistema de gestión integrado y coordinado entre las áreas de cultivo y procesos.

- i. **Procesamiento:** Multiexport Foods cuenta con dos plantas de procesamiento, una dedicada a la elaboración de productos frescos y congelados, y otra a productos ahumados. Ambas cuentan con una capacidad de procesamiento instalada conjunta de aproximadamente

75.000 toneladas de materia prima al año. Durante 2013, estas plantas procesaron un volumen total de 58.600 toneladas.

- ii. **Negocio de Productos Ahumado:** El negocio de productos ahumados agrega mayor valor a la producción, ya que permite más versatilidad en el uso de la materia prima. Hace más de 15 años, Multiexport Foods comenzó a desarrollar este negocio y través de los años la compañía se ha convertido en el mayor productor de Chile y uno de los actores más relevantes a nivel mundial. Durante el año 2013 la compañía exportó 2.568 toneladas de productos ahumados terminados a diversos mercados. Éstos se venden directamente al consumidor en las principales cadenas de retail de Japón, Estados Unidos y Brasil.
- iii. **Ventas y Distribución:** Consta de un equipo humano que tiene el objetivo de establecer sólidas relaciones de largo plazo con los clientes.

3. Descripción del problema

En esta sección se describe la cadena productiva del salmón, para luego enfocarnos en la fase de engorda en agua de mar, con el fin de entender el proceso completo y poder abordar el problema de planificación de cambios de redes que ocurre dentro de ésta.

3.1 Cadena productiva

Como se dijo en la sección anterior el cultivo del salmón está dividido en tres grandes etapas, Agua Dulce, Agua de Mar y División de valor agregado, las primeras dos fases se caracterizan principalmente por el desarrollo y crecimiento de los peces, la última tiene como objetivo principal desarrollar la venta del salmón. A continuación se describe la cadena productiva que tiene una duración aproximada de 32 meses para los salmones y 24 meses para las truchas.

3.1.1 Agua Dulce

Reproducción

Es la primera fase de la cadena de valor, esta etapa comienza con la selección de los salmones aptos para la reproducción, en donde se escogen los peces con características favorables en su crecimiento, resistencia a enfermedades y color, con el objetivo de traspasar sus genes a la nueva población de cultivo. Los reproductores seleccionados se llevan a los centros especializados en la producción de ovas en donde se desova a las hembras y se les extrae el semen a los machos.

Fertilización

Tras la obtención de los gametos de los peces reproductores, la fertilización procura que éstos entren en contacto. Las ovas resultantes de este proceso entran en una etapa de selección que tiene el objetivo de dejar sólo aquellas que tienen las mayores posibilidades de convertirse en peces saludables.

Incubación

Las ovas seleccionadas son mantenidas en estanques de incubación en pisciculturas de agua dulce, en donde se controla la luminosidad, temperatura, oxígeno y pH del agua. Entre 15 días y 1 mes aparecen dos puntos negros en la ova, que corresponderán posteriormente a los ojos del pez, este estado de desarrollo se conoce como “*ova con ojo*” u “*ova ojo*”. En este proceso la manipulación humana es mínima y se reduce a extraer las ovas muertas.

Eclosión

Después de 15 días o un mes de alcanzar el estado de ova *ojo*, los alevines rompen el huevo y comienzan a nadar junto a sus sacos vitelinos, la cual es una protuberancia en el abdomen que mantiene el alimento para el primer período de vida del salmón, al mes de la eclosión la absorción del saco se ha completado, con lo cual el alevín puede desplazarse libremente y tiene que aprender a alimentarse.

Alevines

Proceso que dura entre 12 a 18 semanas en donde los peces se mantienen en pisciculturas. Durante este ciclo los alevines con capacidad de alimentarse crecen rápidamente por lo que son sometidos a dietas solidas de alta calidad hasta alcanzar los 6-15 [grs], en ese estado pueden ser trasladados a centros en ríos o lagos.

Smoltificación

Proceso natural donde hay un cambio físico químico que les permite a los peces adaptarse a un medio con mayor salinidad y corriente, éste ocurre al momento que los alevines alcanzan los 40-125[grs], al terminar este proceso al salmón se le denomina smolt. Esta etapa tiene una duración de 6 a 8 meses.

3.1.2 Agua de Mar

Engorda

La engorda en agua de mar se extiende desde el ingreso de los smolt a los diferentes centros de cultivo en el mar, hasta la cosecha de los peces cuando alcanzan un peso de 2,5 a 5,5 kilos, dependiendo de cada especie.

Esta etapa se preocupa de mantener una alimentación sostenida y crear un ambiente libre de estrés que permita el desarrollo óptimo de los peces. La duración de este proceso es de 12 meses para las truchas, y de 18 meses para el Salmón Atlántico.

Cosecha

Al momento que las truchas han alcanzado un peso de 3 kg y el salmón atlántico 4kg se inicia la fase de cosecha, para esto se utilizan "Well Boats", los cuales trasladan los peces vivos a las plantas de proceso.

En estas embarcaciones los peces reciben condiciones óptimas de densidad y oxigenación, que asegura una llegada a la planta de proceso en excelentes

condiciones de frescura y calidad, lo que finalmente se traduce en la obtención de un producto final de excelencia.

3.1.3 División de valor agregado

Acopio

Una vez cosechados los salmones, éstos son llevados hasta los centros de acopio, los wellboat depositan los peces vivos en los centros de acopio que son balsas-jaulas, donde los peces permanecerán hasta la matanza.

Procesamiento

El proceso de matanza es indoloro para el pez, cuidándose en todo momento los aspectos de bienestar animal y las condiciones sanitarias del proceso. Luego que los peces se encuentran muertos y desangrados, éstos son despachados debidamente refrigerados hacia las plantas de proceso.

Las plantas de proceso reciben la materia prima (salmón entero desangrado), y mediante la utilización de tecnología y mano de obra calificada, la transforman en productos de valor agregado, de acuerdo con los requerimientos de los clientes en los mercados de destino. Estos productos pueden ser filetes (corresponde a filetes sin espinas, con o sin piel, frescos o congelados), salmones enteros, porciones (son porciones de salmón que van selladas al vacío) y salmón ahumado.

Una vez terminado el proceso de planta, los productos son almacenados en un frigorífico, donde se mantienen refrigerados hasta que se llevan a contenedores, listos para ser transportados por tierra, mar o aire.

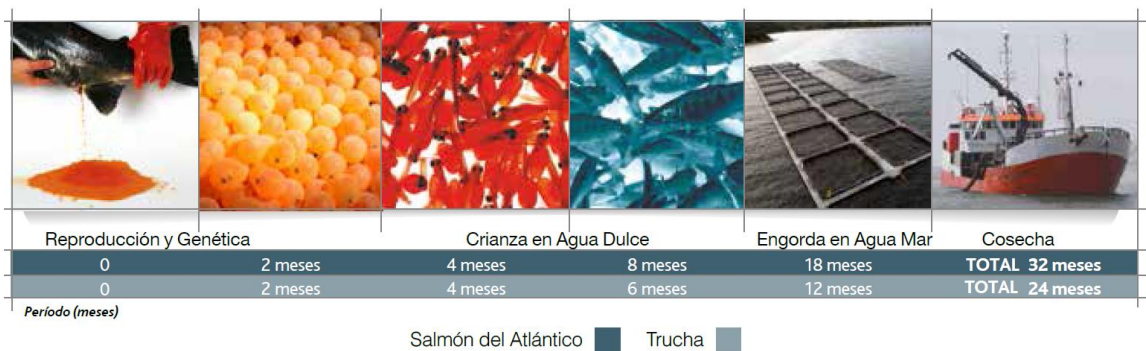


Ilustración 8: Ciclo del salmón de cultivo, Fuente: Multiexport.

3.2 Descripción etapa engorda en agua de mar

El objetivo de esta etapa es lograr que los salmones crezcan sanos hasta su tamaño y peso de cosecha en el menor tiempo posible, la engorda en agua de mar tiene como desafíos optimizar la entrega del alimento, reducir las tasas de mortalidad y mantener un ambiente propicio para la salud de los salmones. La duración de esta etapa varía de 12 a 18 meses según la especie.

Esta etapa inicia con el transporte de los smolts desde centros de agua dulce hacia centros en el mar, los cuales están compuestos por balsas flotantes que contienen entre 12 a 24 jaulas, cada jaula posee una malla pecera donde los salmones van a ser cultivados, por fuera de la balsa se utiliza una malla lobera y por encima una malla pajarera, ambas protegen a los peces de los ataques de lobos marinos y aves.

Dada la regulación chilena, existe una densidad máxima de cultivo por especie o grupo de especie que además depende del grupo de concesión al cual pertenece el centro y de la clasificación de bioseguridad, las densidades van desde 8 kg/m³ hasta los 15 kg/m³, estos valores implican un número máximo de cultivo a ingresar.

3.2.1 Centros de cultivo

Los centros de cultivos son concesiones de espacios marítimos donde las empresas particulares tiene derecho a cultivar una especie acuícola, rigiéndose por la legislación del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura.

Cada centro cuenta con un pontón flotante, desde donde se controlan actividades como la entrega de la alimentación. Adicionalmente, funcionan como bodegas para el almacenamiento del alimento. Existen dos tipos de pontones flotantes, con y sin habitabilidad. Los primeros permiten el alojamiento de los trabajadores en las zonas de concesión más alejadas, lo que hace posible la operación en dichos lugares.

3.2.2 Jaulas

Una jaula debe proveer una adecuada renovación o circulación de agua para satisfacer los requerimientos metabólicos de los peces, además debe ser capaz de absorber y/o desviar las fuerzas ambientales, para mantener la integridad estructural del conjunto.

Una gran variedad de diseños de jaulas ha surgido como resultado del intento de dar solución a un grupo de objetivos o necesidades que involucra el cultivo de

peces en el mar, éstas pueden clasificarse según la naturaleza de la estructura usada para soportar la red, esto divide los diseños en tres categorías, flotantes, semi-sumergibles y sumergible.

Las jaulas que más utilizadas pertenecen a la categoría flotante rígida, éstas son diseñadas con la rigidez estructural necesaria para resistir las cargas a la que estará sometida durante su operación en el mar, producto de los embates del viento, olas y corrientes marinas.

Una jaula está compuesta por pasillos metálicos, flotadores, barandas, articulaciones, redes peces, loberas y pajareras. Los flotadores plásticos bajo la estructura metálica proveen al sistema de boyantes y estabilidad necesaria para su operación.

Entre las dimensiones que más operan están las jaulas de 30 x 30 metros, siendo las distribuciones más comunes los módulos de 10 jaulas (2 jaulas de manga con 5 jaulas de eslora) y los módulos de 12 jaulas (2 jaulas de manga con 6 jaulas de eslora).

3.2.3 Mallas

Para impedir la fuga y depredación de salmones se utilizan tres tipos de mallas: las mallas pecera o de cultivo que permiten contener a los salmones en las jaulas durante todo el proceso de engorda, las mallas loberas que impiden los ataques de lobos marinos y por último las pajareras que son mallas que se ubican por sobre las balsas con el fin de que los pájaros no pueden cazar a los salmones.

Las dimensiones más usadas para las redes peceras son de 30 metros de largo y 30 metros de ancho (30x30) o de 20 metros de largo por 20 metros de ancho (20x20), con profundidades que son de 10 metros o de 17 metros, éstas pueden estar confeccionadas de nylon o poliéster. En Multiexport en la etapa de engorda de agua de mar se emplean únicamente mallas de 30x30.

Durante la etapa de fase marina de engorda a medida que los peces van aumentando de peso y talla es necesario cambiar las redes que conforman la jaula por unas de mayor luz de malla (w). Para el smolt recién ingresado al mar, por un período aproximado de 6 meses se usan redes con luz de malla de 1", posteriormente se cambian las redes por unas con luz de malla de 2" hasta el período de cosecha.

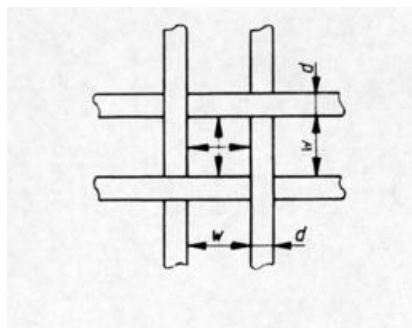


Ilustración 9: Luz de malla

Otra razón por la que se deben efectuar cambios de malla es debido al fouling o incrustación marina, las redes deben mantenerse limpias para poder permitir el libre paso del agua, vital para lograr un adecuado crecimiento de los peces, por esta razón el reemplazado de las redes debido al fouling en los períodos de verano se deben realizar cada 15 días y en el invierno cada 2 meses aproximadamente. No obstante, la aplicación de pinturas antifouling o el lavado in situ a las redes permite prolongar el tiempo entre recambios.

Además de las redes utilizadas para el cultivo de los peces, se requiere instalar perimetralmente a las jaulas las denominadas "mallas loberas", que tiene como objetivo evitar el acercamiento de lobos marinos, dado que sin éstas los lobos pueden romper fácilmente las redes peceras y producir la fuga de los salmones.

3.2.4 Taller

Debido al fouling, incrustación marina y deterioro de materiales en las mallas utilizadas en los centros de cultivo, éstas tienen que ser llevadas a talleres para realizarles mantención.

Los talleres están ubicados en tierra y realizan las funciones de lavado, reparado, impregnado y despacho de las mallas hacia los centros de cultivo, éstos pueden estar integrados a la empresas de cultivo o pertenecer a terceros.

Las tareas que se realizan en un taller son:

- Lavado: Proceso que consiste en desinfectar y remover toda la suciedad impregnada en una malla que viene desde un centro de cultivo.
- Reparación: Una vez lavadas las redes, se ingresan a los galpones en los cuales son revisadas, reparando cualquier rotura que pueda generar futuros escapes de los peces.
- Impregnación: Una vez lavadas y reparadas las mallas pueden ser pintadas con pintura "antifouling" cuyo principio activo es el óxido cuproso. El pintado

tiene un costo adicional pero permite aumentar el tiempo en agua de una red.

- Despacho: Una vez listas las tareas anteriores, se despacha la red a los distintos centros de cultivo.

3.2.5 Barcos

Según las diferentes tareas a realizar se utilizan diferentes tipos de barcos, para el retiro, traslado y entrega de la cosecha se utilizan los barcos llamados Wellboats, que son un tipo de nave especializada para el transporte de peces vivos. Para el cambio de mallas loberas y peceras se utilizan barcos con brazos hidráulicos, debido a la capacidad de los brazos (tamaño del brazo hidráulico) y la experiencia de la tripulación éstos pueden ser utilizados para el recambio de mallas peceras o set loberos.

3.2.6 Factores de deterioro de las mallas

Fouling: Es un término con el que se conocen a las comunidades de seres vivos instaladas sobre diferentes tipos de sustratos sumergidos en el mar, esto ocurre en todo el mundo y es un proceso que siempre ha afectado a las actividades marinas.

El desarrollo de las comunidades está influenciado por una amplia gama de factores, incluida la estacionalidad, profundidad, propiedades químicas y físicas del agua, condiciones hidrodinámicas, orientación y material de los sustratos (Bloecher, et al., 2013).

Las redes compuestas de multifilamentos son un sustrato ideal para el fouling, no es tóxica, contiene grietas que atrapan y protegen a los microorganismos. El agua en torno a los cultivos es propicia para el rápido desarrollo del fouling debido a los nutrientes y carga orgánica del alimento desperdiciado, excreciones y fecas de los peces, estos factores aumentan el crecimiento de las algas y otras comunidades de seres vivos (Hodson, et al., 1997).

En una jaula las principales fuentes de oxígeno en el agua son la fotosíntesis y la mezcla con el oxígeno atmosférico. La capacidad de fotosíntesis de la vecindad de la granja de cultivo normalmente no es suficiente para suplir la demanda de oxígeno de la biomasa de peces, por lo tanto los requerimientos de oxígeno deben ser satisfechos por transporte físico (corrientes de agua), ocasionadas por diferentes medios como vientos, mareas o escorrentías de agua dulce. Se ha demostrado que el transporte físico está limitado por factores tales como el tamaño de las aperturas de la malla (luz de malla), suciedad de la red, configuración de la jaula, la existencia de una picnoclina y la topografía local. Las

condiciones de oxígeno dentro de las jaulas también están influenciadas por los propios peces, a través de factores tales como el consumo de oxígeno y la atenuación o el aumento de la corriente debido a su presencia o movimientos. El nivel de oxígeno disuelto en el agua es un factor clave que afecta el bienestar y desarrollo de los peces, condiciones anóxicas del agua producen una baja en la tasa de crecimiento de los peces (Johansson, et al., 2007), y por ende una mayor duración del período de engorda.

Para la acuicultura el biofouling es un problema perjudicial, tensiona las amarras, hasta 12.5 veces la de una red limpia, encoge las aperturas de la red, lo que causa disrupción en el flujo de agua, y como consecuencia, el intercambio de nutrientes y la remoción de los desechos están restringidos, lo que afecta la salud del cultivo y del medioambiente circundante. Al mismo tiempo el incremento del peso de la red puede afectar negativamente a la estructura, causando tensión estructural, deformación y reduciendo la flotabilidad de las jaulas (Braithwaite, et al., 2007).

También existen efectos indirectos por la acumulación de fouling en las mallas, los que producen un costo extra en el taller en los procesos de lavado y reparación de las redes, además las complejas comunidades de fouling pueden desarrollar stress en el cultivo al proporcionar un hábitat nocivo con enfermedades y parásitos.

Condiciones ambientales: Condiciones de extremo mal tiempo o de mucho sol, aumentan el deterioro que sufren las mallas.

Ataque de lobos marinos: Las redes loberas sufren constantes ataques por parte de lobos marinos, por lo que si esta red no se encuentra en buenas condiciones el lobo marino podrá traspasarla y romper la red pecera para proceder con la captura de salmones.

La permanencia de una malla de cultivo en el agua de mar ocasiona un desgaste continuo de los materiales que la componen, una ruptura en la red produce una fuga de salmones, lo que conlleva una gran pérdida monetaria para la empresa.

Para proteger las mallas de un desgaste que las deje inutilizables éstas deben ser removidas del agua y llevadas a taller para su mantención y reparación, para esto se define un tiempo máximo de permanencia en el agua el cual las redes no deberían superar.

3.2.7 Medidas de prevención

Revisión periódica de las mallas: Proceso en el cual los buzos revisan la acumulación de fouling y verifican si existen rupturas en las redes.

Tratamiento de mallas: La prevención del fouling en acuicultura es complicada, debido a la elección del material de las redes y el peligro que representan las toxinas para las especies cultivadas.

Para aumentar el tiempo máximo de una malla en el agua a éstas se les aplica algún tratamiento, éste puede ser pintura antifouling, recubrimientos de silicona o la aplicación de lavado in situ.

- **Pinturas antifouling:** Una de las principales estrategias utilizadas para disminuir el biofouling en las jaulas y mallas es el uso de pinturas antifouling, éstas han incluido en sus componentes cobre metálico, estaño y plomo. El cobre es ahora el único metal autorizado para ser usado en las pinturas destinadas a la impregnación de redes de peces. Este tratamiento previene la acumulación de biofouling hasta 6 meses debido al desgaste progresivo y lixiviación del cobre. Estudios desarrollados en Clift Sound, Shetland, en donde se comparan la acumulación de fouling en mallas sin tratar (de control) versus mallas pintadas, muestran que el porcentaje de oclusión de la red después de 210 días es de 98,72% para las mallas de control y 3,06% para las pintadas y la cantidad de fouling acumulado después de 10 meses fue de 4.9kg/m² para las mallas de control y 1.8kg/m² para las pintadas (Braithwaite, et al., 2007).

Los antifouling basados en cobre han demostrado ser eficientes, pero su uso no es deseado debido a los problemas ambientales que podrían ocasionar la liberación de toxinas del metal en el mar. Las autoridades de protección ambiental escocesa han encontrado sedimentos debajo de las redes seriamente contaminados con cobre (Miller, 1998). Además la industria Noruega está trabajando significativamente para disminuir la cantidad de antifouling basado en cobre (Hodson, et al., 2000).

- **Recubrimiento de silicona:** Otro tratamiento aplicable a las mallas para disminuir la cantidad de fouling es la utilización de recubrimiento de silicona, que al poseer flexibilidad y no toxicidad los hacen adecuado para la acuicultura de peces. Estudios realizados en centros de cultivo en Tasmania, Australia, demuestran que este procedimiento reduce significativamente la cantidad de fouling y la eficacia de la limpieza in situ (Hodson, et al., 2000).
- **Lavados in situ:** Los tratamientos basados en pinturas en base a cobre o recubrimiento son ineficaces contra las algas a la deriva que se enredan en las jaulas, las cuales son colonizadas por otros micros y macro organismos.

Los procedimientos de reemplazo de redes son intensivos en mano de obra y capital, los cambios frecuente de redes pueden perturbar el régimen de alimentación de los peces, causando una menor tasa de crecimiento. Una solución a estos problemas es el lavado in situ, este procedimiento consiste en la limpieza de los elementos o sistemas utilizados para la realización de acuicultura sin moverlos desde su posición de operación, para esto se utilizan sistemas de aspirado, flujos de agua o cualquier otro medio mecánico.

Los lavados in situ no son comunes debido a la dificultad de la estructura tridimensional de las jaulas, lavados mal efectuados pueden ocasionar que las comunidades vuelvan a crecer más rápido tras repetidas limpiezas dado que quedan restos de algas en las grietas de la superficie, las cuales se pueden regenerar rápidamente. Los resultados muestran que si existe un buen contacto entre las escobillas y la red, la limpieza in situ es muy eficaz, pero la eficacia del limpiado está determinada por el diseño y flexibilidad de la red, lo cual reduce la intensidad del lavado (Hodson, et al., 1997).

En la medida que la cantidad de fouling en la red crece y su adherencia mejora, la presión y el caudal de agua necesaria para lavar una misma superficie de red aumentan, incrementándose por lo tanto los costos del lavado. Lo que produce un círculo virtuoso en el que mantener una frecuencia de lavado adecuado constituye una mejora en la eficiencia y que a su vez mantienen las condiciones adecuada para el cultivo de peces. Por otra parte se minimiza la emisión de materia orgánica al medio ambiente al mantener controlado su crecimiento dentro de una etapa incipiente.

La Ley General de Pesca y Acuicultura en el Artículo 9 numeral 4 señala que: “la limpieza in situ sólo podrá efectuarse respecto de artes de cultivo que no estén impregnadas con anti-incrustantes que contengan como productos activos elementos tóxicos no degradables o bio-acumulables, lo que deberá acreditarse ante SERNAPESCA, previo a su instalación en el respectivo centro. En el evento que el sistema de limpieza in situ corresponda al aspirado con retención de sólidos, no podrán transcurrir más de 20 días corridos entre una actividad de limpieza y otra para un mismo arte de cultivo (elementos o sistemas utilizados para la realización de acuicultura) entre los meses de octubre a marzo y de dos meses entre los meses de abril a septiembre. En el caso que el sistema de limpieza in situ se efectúe mediante un sistema distinto del aspirado con retención de sólidos, no podrán transcurrir más de 15 días corridos entre una actividad

de limpieza y otra para un mismo arte de cultivo entre los meses de octubre a marzo y dos meses entre abril a septiembre (SUBPESCA, 2013).

Cambios periódicos de mallas: Cada malla según la época del año, ubicación geográfica y tratamiento en el cual está sometida puede estar un tiempo máximo en el agua antes de tener que ser cambiada debido a la acumulación de suciedad o pérdida de sus propiedades físicas. La labor de recambio de mallas es intensiva en mano de obra y capital, además se requiere de equipamiento especializado el cual es limitado, por este motivo es necesario programar los cambios de antemano.

El cambio periódico de mallas consiste en que una embarcación destinada exclusivamente para el movimiento y manejo de redes, la cual llamaremos Barco de Redes, va a un centro de cultivo y cambia una malla, que está “sucia” o rota, y la reemplaza por otra que esté limpia y en óptimas condiciones.

Las mallas sucias se trasladan al puerto de carga y por medio de camiones, se llevan a los talleres de mantenimiento y reparado de redes, los cuales al efectuar su labor las dejan listas para su reutilización. Antes de que una malla sea llevada para su uso en los centros de cultivos se decide el tratamiento que se le efectuará, si éste es de pintado o recubrimiento el taller deberá efectuar la tarea respectiva.

4. Modelo MIP

4.1 Situación actual

Como se mencionó en la sección anterior, en la fase de engorda en agua de mar existen diferentes medidas de prevención que pueden ser tomadas por una empresa. Multiexport efectúa revisiones y cambios periódicos a las mallas, además a éstas le pueden aplicar pintura antifouling o lavado in situ, cada una de estas decisiones tiene sus costos, capacidades y limitantes asociadas por lo que es necesario hacer una planificación detallada para poder cumplir a cabalidad el objetivo de la fase de engorda.

Actualmente la empresa tiene un proceso manual sin herramientas específicas para determinar la planificación de los cambio de mallas. Esta metodología se basa principalmente en base a juicios de expertos. El equipo de planificación está compuesto por el jefe de redes y los jefes de área (encargados de un grupo de centros de cultivos). La planificación se compone de una planilla Excel donde se publica el mes estimado de cambio, instalación y remoción de las redes peceras y

loberas para el año actual, día a día estas fechas van siendo modificadas debido a diversas condiciones:

- i) Alto nivel de luz solar, que aumenta el crecimiento de fouling en las redes.
- ii) Malas condiciones climáticas, las cuales impiden a los barcos realizar sus faenas.
- iii) Variabilidad de las capacidades de los talleres de redes.
- iv) Disponibilidad de mallas y/o barcos.
- v) Capacidades de los talleres de redes.

Cabe destacar que la planificación inicial creada por los expertos no es factible ya que no se toma en cuenta las disponibilidades de los barcos ni de las mallas, por esta razón el equipo de planificación se reúne 1 ó 2 horas todo los días para analizar el estado de las mallas, definir la urgencia de las tareas y dada la capacidad del momento realizar las tareas que se puedan.

Las decisiones que toman en relación a la mantención de las mallas de cultivo son:

- Cuándo instalar una malla.
- Cuándo retirar una malla.
- Cuándo cambiar una malla instalada, por una limpia o por otra más grande.
- Si se debe pintar una malla.
- Si se debe realizar lavado in situ a la malla.
- Cuántas mallas se deben comprar y cuando comprarlas.
- Qué barco realiza el cambio de malla.
- Los centros que debe visitar un barco por semana.
- Cuándo realizar cambio de mallas loberas.

Para analizar la dificultad, dimensión e importancia de la planificación es necesario ver el tamaño de la empresa, las capacidades y costos asociados a cada una de las decisiones.

Tamaño

A enero del 2014 Multiexport cuenta con 39 centros activos y 688 jaulas en agua, cada centro puede contener 16, 18, 20 ó 24 jaulas dependiendo de la concesión otorgada por SERNAPESCA.

Los barcos y el personal responsable del cambio de mallas son externos a la empresa, y trabajan por faenas, es decir, Multiexport los contrata para realizar un número determinado de actividades en un período definido, normalmente se cuenta con 4 barcos semanales, aunque éstos pueden ir variando según la disponibilidad, necesidad de la empresa y factores climáticos.

Capacidades

Debido a que los barcos son acotados en el mercado y conseguir barcos extras no es una tarea fácil, la programación se debe hacer pensando en el número de barcos. Cada barco tiene una capacidad máxima, es decir un número máximo de cambios, instalación o remociones de redes en una semana de trabajo.

En un día de trabajo un barco puede realizar 4 instalaciones de mallas, 5 remociones o 3 cambios de mallas (remover una red sucia y colocar una limpia), estas actividades están acotadas debido al tiempo de buceo de la tripulación. Además dado que los centros no se encuentran uno al lado de otro, un barco en una semana no debería visitar más de 3 centros.

Multiexport trabaja con 2 talleres externos ubicados en Puerto Montt, Badinotti Net Service y Nisa Redes, los que están encargados de limpiar, reparar, pintar y despachar las mallas. Cuando una red pecera ingresa al taller toma aproximadamente 3 semanas en volver a ser utilizable y 5 semanas para una red lobera. Aunque la falta de mallas es un problema grave, adquirir nuevas mallas no es un proceso complejo, pero si costoso.

Costos

Para establecer un orden de magnitud del gasto que trae asociada la planificación, se detallan a continuación los costos involucrados.

Actividad	Valor
Costo variable de Instalación de malla	US\$ 960 por malla
Costo variable de cambio de malla	US\$ 1.040 por malla
Costo variable de remoción de malla	US\$ 760 por malla
Costo mantenimiento malla	US\$ 0,43 el m ² de malla
Pintado	US\$ 0,30 el m ² de malla
Lavado In Situ	US\$ 0,26 el m ² de malla
Equipo de buceo para inspeccionar y verificar la condición de las mallas.	US\$ 20.000 mensual
Costo Malla pecera nueva	US\$ 4.500 malla 30x30

Tabla 7: Principales costos planificación de cambio de mallas

Una malla pecera de 1" tiene una superficie de 2083 m², por lo que tiene un costo de mantención de US\$ 911, lavado in situ de US\$ 566 y pintura antifouling de US\$ 701, las redes de 2" tiene una superficie de 2754 m² lo que implica un costo de mantención de US\$1.187, lavado in situ de US\$738 y pintura antifouling de US\$913.

Tomando en las capacidades, tamaños y costos asociados a la planificación de los cambios de las mallas peceras se desarrolla una metodología que permita encontrar soluciones factibles minimizando el costo.

Problemas ocasionados por falta de planificación

Los talleres de redes al no prever la demanda pueden no estar preparados para recibir un cargamento de redes, esto causa que el tiempo en taller se alargue y que los próximos cambios de mallas no se pueden realizar debido a falta de stock.

Al tener una planificación de largo plazo y detallada se puede negociar con los barcos por más de una faena, con lo que se pueden obtener mejores precios, además de asegurar la disponibilidad de éstos en el futuro. Si la planificación detallada se realiza semana a semana es posible no encontrar barcos ya que éstos podrían estar trabajando con otras empresas.

Un stock apropiado de mallas es algo vital para una buena programación ya que esto permite realizar los cambios a tiempo. Un quiebre de stock significa tener mallas sucias en los centros de cultivo lo que puede causar un aumento de las enfermedades, aumento de la tasa de mortandad y una baja en la tasa de crecimiento de los peces. Tener un sobre stock de redes es costoso para la empresa debido a que una malla ronda los US\$ 4.000. Una planificación correcta permite calcular un stock de seguridad adecuado para poder continuar con las operaciones ante cualquier problema o cambio de las condiciones iniciales.

4.2 Justificación del Modelos para la planificación de cambios de mallas en Acuicultura

La producción de salmones en centros acuícolas ha sido estudiada por varios autores, éstos se han enfocado en distintas áreas del proceso productivo. En la literatura se pueden encontrar modelos matemáticos para la planificación de la producción (Forsberg, 1996), entrega de la dieta optima (Odd Inge Forsberg, 2006), identificación del tiempo óptimo para la cosecha (Run Yu, 2009) (Aunsmoa, et al., 2013), modelos de crecimiento (Aunsmoa, et al., 2014), ruteo de barcos para el suministro de alimento a las instalaciones de salmón (Gonzalo Romero, 2013), entre otros.

Esta tesis es un continuación del trabajo desarrollado por F.Cisternas, D.Delle Donne, G.Durán, C.Polgatiz y A.Weintraub sobre la optimización del manejo de las redes de cultivo de salmón utilizando programación entera desarrollado en la empresa Multiexport el año 2008 (Cisternas, et al., 2013) (Polgatiz Monsalve, 2010).

El crecimiento de la empresa, en conjunto con el de la industria salmonera, además de las crisis que han impactado al rubro en los últimos años, han incentivado el desarrollo de nuevas estrategias en:

1. Planificación y metodologías relacionadas con el cambio de redes
2. Procesos de cultivo
3. Etapa de engorda en agua de mar

Los cambios más importantes referentes a la planificación de los cambios de mallas del último tiempo son los siguientes:

- Nace la opción de realizar lavados in situ de las redes con lo cual las duraciones máximas de las redes en agua aumentan.
- Los barcos en vez de trabajar faenas diarias, debido a que eran capaces de volver al puerto después de realizar sus labores, ahora trabajan varios días de corrido en el mar.
- Si las redes se quieren tratar con pintura antifouling éstas tiene que estar previamente en el taller de mantenimiento antes de ser enviadas a los centros de cultivo.
- Se requiere abarcar desde el inicio de la etapa de engorda en agua de mar de un pez hasta su cosecha, por esta razón los escenario crecen de 24 a 90 semanas.
- Se permite flexibilidad en las fechas de instalación, cambio de tipo de malla y remoción de las redes.

- Se agrupan todas las áreas de cultivo, por lo que se trabajan con todos los centros al mismo tiempo.

Debido a los cambios del último tiempo y la gran cantidad de centros y jaulas que se utilizan actualmente, el modelo desarrollado por F.Cisternas (2013) ya no puede ser utilizado por la empresa, esto ocasiona que la tarea de planificación de cambios de mallas se tenga que desarrollar de forma manual.

En esta tesis se decide por efectuar un modelo de programación lineal ya que los estudios anteriores han demostrado sus ventajas y beneficios. Dado los requerimientos de la empresa el objetivo del modelo será optimizar el uso de los recursos con el fin de disminuir los gastos asociados a la fase de engorda.

5. Modelo matemático para la planificación de los cambios de las mallas de cultivo

El fin de esta sección es describir conceptualmente qué es lo que hace el modelo, cuáles son sus limitantes y los resultados que entrega. Cabe mencionar que dadas las características del problema se realizó un MIP para el desarrollo del modelo matemático.

5.1 Descripción conceptual del modelo

Para la instalación, cambio y remoción de mallas loberas y peceras se utilizan barcos con distintas especificaciones, por lo cual estos cambios son independientes, lo que permite resolver el problema de planificación de mallas loberas y peceras por separado, este modelo está enfocado en las mallas peceras.

La planificación de las mallas loberas es más simple y se puede realizar de forma manual, esto se debe a que las restricciones propias de estas mallas limitan el alcance que pudiese tener el modelo en su planificación. Estas mallas son de polietileno, material que no se puede impregnar, a su vez el lavado in situ es operacionalmente complicado de efectuar y riesgoso dado que su mala ejecución repercute en multas económicas para la empresa.

1. Input del Modelo
 - a) Horizonte de tiempo de planificación, expresado en semanas.
 - b) Tipos de red utilizadas y sus características:
 - Dimensión de la red, expresado en m^2 .
 - Peso de la red, expresado en kg.
 - c) Cantidad de centros.
 - d) Cantidad de jaulas.
 - e) Jaulas que pertenecen al centro.
 - f) Flexibilidad expresada en semana a la hora de realizar instalaciones, remociones o cambios de tipo de malla.
 - g) Cantidad de barcos por período de planificación, rendimiento de faena y máxima cantidad de viajes.
 - h) Asignación de barcos a centros de cultivo, indica si el barco puede realizar tareas en un centro.
 - i) Permanencia máxima de una red en el agua en el centro dado el tratamiento al que se somete, expresado en semanas.
 - j) Stock inicial de redes de cultivo.
 - k) Llegada de Stock de redes de cultivo.
 - l) Tiempo de respuesta de talleres de redes en la tarea de mantención de mallas, expresado en semanas.
 - m) Tiempo que toma proceso de pintado de una red en el taller, expresado en semanas.
 - n) Cantidad de lavados in situ a efectuar a una red instalada por un período de tiempo determinado.

- o) Costo de mantención de redes en los talleres, expresados en [US/m²].
 - p) Costos de impregnar pintura antifouling en las redes en los talleres, expresados en [US\$/Kg].
 - q) Costo de la pintura antifouling, expresados en [US\$/Lts].
 - r) Costos de realizar lavado in situ en una malla, expresados en [US\$/m²].
 - s) Costo adquisición redes.
 - t) Costos de traslado, es decir, costo del petróleo asignado por tiempo de faena, expresados en [US\$].
 - u) Costo faena, costo de realizar una instalación, cambio o remoción de una red, expresado en [US\$].
2. A través de la Carta Gantt y los planes de producción de los centros de cultivo es posible definir las fechas de inicio de cultivo, cambio de tipo de mallas y cosecha. Esta información es utilizada para definir cuándo y qué tipo de redes serán requeridas por cada una de las jaulas. Lo anterior será conocido como demanda de mallas el cual es un parámetro dentro del modelo.
 3. La fase de engorda en agua de mar es un proceso continuo, por lo que al iniciar una planificación es necesario definir la situación actual de cada centro, es decir, las jaulas activas (con cultivo), el tiempo en agua y los tratamiento efectuados a cada malla.
 4. Una malla tiene que estar colocada antes de la fecha de ingreso de cultivo, por esta razón se define un parámetro de flexibilidad inicial, el cual indicará la cantidad de semanas que una red puede instalarse antes de que inicie la demanda de mallas en la jaula.
 5. Dado que el crecimiento de los peces no varía sustancialmente de una semana a otra, existe un rango de fechas en donde se debe cambiar el tipo de malla, este parámetro está representado por la variable *flexp*.
 6. Al finalizar el proceso de cosecha las redes quedan sin cultivo. El reglamento impuesto por SERNAPESCA indica que las mallas tiene que ser retiradas en un rango de 3 semanas después de retirar los peces del centro de cultivo en agua de mar.
 7. El modelo fuerza a satisfacer los requerimientos de redes, el cual está dado por la demanda de mallas en conjunto con la flexibilidad, mientras existan peces en las jaulas, éstas tiene que estar con redes y sólo una por jaula.
 8. Para poder instalar una red en una jaula, ésta tiene que estar disponible en el taller (nueva o recién salida de mantención) antes de la fecha de instalación, si a la red se le aplicara el tratamiento de pintura, ésta deberá estar disponible el tiempo necesario para completar el proceso de pintado.

9. El lavado in situ está regulado por SERNAPESCA, las empresas que efectúan este proceso en sus centros de cultivo están obligados a llevar registros y efectuar los lavados dentro del plazo. La regulación implica hacer una cantidad mínima de lavados dentro de un período definido (un lavado cada dos semanas entre octubre a marzo y un lavado cada 8 semanas entre abril a septiembre). Usando la regulación impuesta se calcula la cantidad de lavados necesarios en una red instalada en un período y por una duración definida, esta información se le entrega al modelo como un parámetro.
10. Como fue mencionado anteriormente, el crecimiento del fouling y las condiciones ambientales varían según la ubicación geográfica del centro de cultivo. Esto ocasiona que el máximo tiempo en agua de una malla pueda variar de un centro a otro. Una red no puede estar instalada en un centro por más del tiempo en agua permitido.
11. Para realizar las labores de instalación, cambio y remoción de redes la empresa subcontrata a barcos.
12. Después que un barco realiza un cambio o remoción de redes, las mallas tiene que ir al taller de mantenimiento, donde serán lavadas o desechadas según la condición en que se encuentren, cuando se hayan efectuado todos los procedimientos de limpieza y reparación la red puede ser usada nuevamente en los centros de cultivo.
13. El número de barcos disponibles puede variar de un período a otro al igual que la cantidad de días que trabajarán dentro de una semana.
14. Existen barcos que trabajan solamente dentro de un área específica, por lo que no se les puede asignar trabajos en algunos centros.
15. Tomando en cuenta todos los puntos anteriores, se generan restricciones que permitan cumplir los requerimientos y limitaciones de la fase de engorda.
16. Usando las restricciones y consideraciones antes definidas, el modelo finalmente minimiza el costo total, el cual está compuesto por los costos de mantención de redes, contratación de barcos, lavado in situ, pintado de mallas y compra de redes de cultivo.
17. El modelo entrega como output la información necesaria para poder determinar el plan de mantención y cambios de redes, es decir, la fecha de instalación y extracción de cada red, el barco que efectuará la labor y el tratamiento que tendrá la red. Además se indicará la cantidad de redes utilizadas en cada período, el número de redes necesarias y la cantidad de

redes que deben ser compradas para poder efectuar la planificación entregada por el modelo.

5.2 Formulación del modelo matemático

1. Índices

- j = Jaulas, $j \in \{1, \dots, J\}$ en donde J es el número total de jaulas.
- k = Tipos de mallas, $k \in \{1, \dots, K\}$ en donde K es el número total de tipo de mallas utilizados
- d = Número de períodos que permanecerá la malla en el agua, $d \in \{1, \dots, D\}$ donde D es el número máximo de períodos que puede permanecer una malla bajo el agua.
- t = Período, $t \in \{1, \dots, T\}$ en donde T es el número total de períodos en el horizonte de planificación, medido en semanas.
- p = Establece el tratamiento que se usa en la malla, las opciones son sin tratamiento, pintura antifouling y lavado in situ.

$$p = \begin{cases} 0 & \text{red sin tratamiento} \\ 1 & \text{pintura antifouling} \\ 2 & \text{Lavado in situ} \end{cases}$$

- b = Número de barcos, $b \in \{1, \dots, B\}$ en donde B es el máximo número de barcos que se pueden disponer en una semana del horizonte de planificación.
- c = Número de Centro, $c \in \{1, \dots, C\}$ en donde C es el número total de centros.
- u = períodos sin lavado in situ, $u \in \{1, \dots, U\}$ en donde U es el número máximo de períodos que puede estar una malla sin lavar a la cual se le aplica el tratamiento de lavado in situ.

2. Parámetros

- JC_c = Jaulas que pertenecen al centro c .
- Dem_{jkt} = Demanda de malla tipo k en la jaula j en el período t .
- $Fin_{jkt} = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda por malla tipo } k \text{ de la jaula } j \text{ continua pasado } T. \\ 0 & \sim \end{cases}$

- $Stock_k$ = Stock de malla tipo k al inicio del período de planificación.
- $TStock_{kt}$ = Cantidad de mallas tipo k que entran a stock en el período t.
- $Haux_{kjp} = \begin{cases} 1 & \text{Si existe una malla tipo k instalada en la jaula j con} \\ & \text{tratamiento p al inicio del período de planificación.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $Hist_{kjp}$ = Número de períodos que lleva la malla tipo k en la jaula j con tratamiento p al inicio del período de planificación.
- $HistInSitu_{kj}$ = Número de períodos transcurrido del último lavado in situ de la malla tipo k instalada en la jaula j al inicio del período de planificación.
- $Cantlav_{td}$ = Cantidad de lavados a efectuar si se instala una malla en el período t por d períodos.
- $tlavar_{du}$ = Cantidad de lavados a efectuar a una malla que está puesta al inicio del período de planificación, que va a estar por d períodos y el ultimo lavado se efectuó hace u períodos.
- $Niwt_{cktp}$ = Tiempo máximo de permanencia en el agua en el centro c de una malla tipo k instalada en el período t con tratamiento tipo p.
- $BC_{bc} = \begin{cases} 1 & \text{Si el barco b puede ir al centro c a realizar labores.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $BT_{bt} = \begin{cases} 1 & \text{Si el barco b puede realizar labores en el período t.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $BMaxviajes_{bt}$ = Cantidad máxima de viajes que puede realizar el barco b en el período t.
- $Dtrabajar_{bt}$ = Cantidad de días que puede trabajar el barco b en el período t.
- Aim = Días necesarios para instalar una malla pecera.
- Asm = Días necesarios para remover una malla pecera.
- Acn = Días necesarios para cambiar una malla pecera.
- $Remov_{jkt} = \begin{cases} 1 & \text{Si t es el primer período en que la malla instalada tipo k en} \\ & \text{la jaula j puede ser retirada en t.} \\ 0 & \sim \end{cases}$

- $Remove_{jkt} = \begin{cases} 1 & \text{Si la malla tipo } k \text{ instalada en la jaula } j \text{ puede ser retirada en el período } t. \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $Cambio_{jkt} = \begin{cases} 1 & \text{Si se debe realizar un cambio programado de mallas en el periodo } t \text{ en la jaula } j \text{ por una red tipo } k. \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $Inst_{jkt} = \begin{cases} 1 & \text{Si el período } t \text{ es el último en donde la malla tipo } k \text{ en la jaula } j \text{ puede ser instalada.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $instala_{jkt} = \begin{cases} 1 & \text{Si la malla tipo } k \text{ en la jaula } j \text{ puede ser instalada en el periodo } t. \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $flexp_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{Si la jaula } j \text{ en el período } t \text{ acepta cualquier tipo de malla.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $DiasLab_t$ = Cantidad de días laborales del período t.
- REP = Cantidad de períodos que demora una malla en salir del taller dado que se le realiza mantención.
- $TPintado$ = Cantidad de períodos que demora una malla en ser pintada.
- $Auxinsitu_{jku} = \begin{cases} 1 & \text{Si en la jaula } j \text{ hay una malla tipo } k \text{ que no se lava hace } u \text{ periodos al inicio del horizonte de planificación.} \\ 0 & \sim \end{cases}$

2.1. Costos

- $Ccompr_k$ = Precio de compra de una malla tipo k.
- $Petroleodia$ = Gasto promedio de petróleo por barco en un día de faena
- $Mant_k$ = Costo de mantenimiento de una malla tipo k

- $Paint_k$ = Costo de pintar una malla tipo k
- $Costolav_k$ = Costo del lavado in Situ de una malla tipo k.
- $CInst_k$ = Costo por realizar una instalación de malla pecera.
- $CCambio_k$ = Costo por realizar una cambio de malla pecera.
- $CRemover_k$ = Costo por remover una malla pecera.
- $CIrCentro_c$ = Costo fijo por realizar actividades en un centro
- $CostoSlack$ = Costo variable Slack.

3. Variables

- $XI_{kjtdp} = \begin{cases} 1 & \text{Si se instala una malla tipo k en el período t en la jaula j por d períodos con tratamiento tipo p.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $X_{kjtdp} = \begin{cases} 1 & \text{Si se realiza un cambio de mallas en la jaula j en el período t, removiendo una malla en uso e instalando una de tipo k por d períodos con tratamiento tipo p.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $XR_{kjtdp} = \begin{cases} 1 & \text{Si se realiza un cambio de mallas en las jaulas j, por una de tipo k en el período t, con tratamiento p y con una duración de d periodos, con esta malla se completa el ciclo de la fase de engorda.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- $W_{bct} = \begin{cases} 1 & \text{Si el barco b realiza un viaje al centro c en el período t.} \\ 0 & \sim \end{cases}$
- WAI_{bct} = Número de días que trabaja el barco b en centro c en el período de planificación t instalando mallas.
- WAC_{bct} = Número de días que trabaja el barco b en centro c en el período de planificación t cambiando mallas.

- WAR_{bct} = Número de días que trabaja el barco b en centro c en el período de planificación t removiendo mallas.
- WA_{bt} = Número de días que trabaja el barco b en el período de planificación t.
- WAE_{bct} = Número de cambios de mallas que sobrepasan la capacidad del bote b en el centro c en t (variable slack)
- Un_{kt} = Cantidad de mallas tipo k requeridas para el período t.
- MUn_k = Cantidad total de nets peceras tipo k requeridas para el horizonte de planificación.
- Pn_k = Cantidad de mallas tipo k que es necesario comprar para suplir la demanda del horizonte de planificación.

4. Subconjuntos

$$GI(j, k, t, t', d, p) = t' \in [1..T]: t' \leq t; d \leq Niwt(j_c, k, t, p); d - 1 + Fin(k, j, t' + d) \geq t - t'; Dem(j, k, t' + d) + Flexp(j, t') \geq 1; instala(k, j, t') = 1$$

$$G(j, k, t, t', d, p) = t' \in [0..T]: t' \leq t; d \leq Niwt(j_c, k, t, p); d - 1 + Fin(k, j, t' + d) \geq t - t'; Dem(j, k, t') + Flexp(j, t') \geq 1; Dem(j, k, t' + d) + Flexp(j, t' + d) \geq 1$$

$$GR(j, k, t, t', d, p) = t' \in [0..T]: t' \leq t; d \leq Niwt(j_c, k, t, p); d - 1 + Fin(k, j, t' + d) \geq t - t'; Dem(j, k, t') + Flexp(j, t') \geq 1, remove(j, k, t' + d) = 1$$

$$GH(j, k, d, p) = d \leq Niwt(j_c, k, 0, p) - Hist(k, j, p); Dem(j, k, d) + Flexp(j, d) \geq 1$$

$$GHR(j, k, d, p) = d \leq Niwt(j_c, k, 0, p) - Hist(k, j, p); remove(j, k, d) = 1$$

$$GINS(k, j, t, d) = Insta(k, j, t) \geq 1; Dem(j, k, t + d) + Flexp(j, t + d) \geq 1$$

$$GCAM(k, j, t, d) = Dem(j, k, t) + Flexp(j, t) \geq 1; Dem(j, k, t + d) + Flexp(j, t + d) \geq 1$$

$$GREM(k, j, t, d) = Dem(j, k, t) + Flexp(j, t) \geq 1; remove(j, k, t + d) = 1$$

5. Restricciones

- a) Instalar malla en jaula en donde se inicia el proceso de engorda de peces, es decir, en la jaula no existe un malla puesta en el período que se va a instalar esta nueva malla.

$$\sum_{GI(j,k,t,t',d,p)} XI_{kjt'dp} = 1 \quad \forall k, j, t, Inst(j, k, t) = 1$$

- b) Satisfacer demanda, cumplir con el requerimiento del tipo de malla en las jaulas según el período, la demanda se satisface en todos los períodos menos en los cuales existe flexibilidad.

$$\sum_{GI(j,k,t,t',d,p)} XI_{kjt'dp} + \sum_{G(j,k,t,t',d,p)} X_{kjt'dp} + \sum_{GR(j,k,t,t',d,p)} XR_{kjt'dp} = 1$$

$$\forall k, j, t, Dem_{jkt} = 1, Flexp_{jt} = 0$$

- c) Flexibilidad, permite satisfacer la demanda en períodos determinados, usando redes de 1 ó 2 pulgadas.

$$\sum_{k,GI(j,k,t,t',d,p)} XI_{kjt'dp} + \sum_{k,G(j,k,t,t',d,p)} X_{kjt'dp} + \sum_{k,GR(j,k,t,t',d,p)} XR_{kjt'dp} = 1$$

$$\forall j, t, Flexp_{jt} = 1$$

- d) Remover mallas, instalación de malla en la jaula en que los peces son cosechados durante el tiempo que esta malla está en al agua.

$$\sum_{GR(j,k,t,t',d,p)} XR_{kjt'dp} = 1 \quad \forall k, j, t, Remov_{jkt} = 1$$

- e) Mallas históricas, se decide cuándo sacar una malla que ha sido sacada antes del período de planificación.

$$\sum_{GH(j,k,d,p)} X_{kj0dp} + \sum_{GHR(j,k,d,p)} XR_{kj0dp} \geq Haux_{kjp} \quad \forall kjp$$

- f) Indica la cantidad de instalaciones de mallas realizados por los barcos.

$$\sum_{k,p,j \in JC_c; GINS(k,j,t,d)} XI_{kjtdp} \leq \sum_{b: BC_{bc} \geq 1, BT_{bc} \geq 1} WAI_{bct} \quad \forall c, t$$

- g) Indica la cantidad de cambios de mallas realizados por los barcos.

$$\begin{aligned} \sum_{GCAM(k,j,t,d)} X_{kjtdp} + \sum_{t'+d=t, GCAM(k,j,t',d)} X_{kjt'dp} + \sum_{t'+d=t, GINS(k,j,t',d)} XI_{kjt'dp} \\ + \sum_{GREM(k,j,t,d)} XR_{kjtdp} \leq \sum_{b: BC_{bc} \geq 1, BT_{bc} \geq 1} WAC_{bct} \end{aligned}$$

$$\forall c, t$$

- h) Indica la cantidad de mallas removidas por los barcos.

$$\sum_{k,p,j \in JC_c, t' \in [0..T]; t'+d=t, GREM(k,j,t,d)} XR_{kjt'dp} \leq \sum_{b: BC_{bc} \geq 1, BT_{bc} \geq 1} WAR_{bct} \quad \forall c, t$$

- i) Capacidad máxima del barco, el tiempo de faena no puede ser mayor al número de días que se pueden trabajar en una semana determinada.

$$\sum_{c, BC_{bc} \geq 1, BT_{bt} \geq 1} WAI_{bct} * Aim + WAR_{bct} * Asm + (WAC_{bct}/2) * Ac m - WAE_{bct} \leq Dtrabajar_{bt}$$

$$\forall b, t$$

- j) Tiempo de actividades que realiza un barco en un centro en un periodo específico.

$$\sum_{BC_{bc} \geq 1, BT_{bt} \geq 1} WAI_{bct} * Aim + WAR_{bct} * Asm + \left(\frac{WAC_{bct}}{2}\right) * Ac m - WAE_{bct} = WA_{bct}$$

$$\forall b, t, c$$

k) Definición de número de viajes.

$$WA_{bct} \leq Dtrabajar_{bt} * W_{bct} \quad \forall t, b, c$$

l) Máximo número de viajes por barco, cada barco puede realizar una cantidad determinada de viajes en un cierto período.

$$\sum_c W_{bct} \leq BMaxviajes_{bt} \quad \forall t, b$$

m) Redes usadas en el período t.

$$\begin{aligned} & \sum_{p \neq Pintura, t' \leq t, d \geq t-t'-REP} XI_{kjt'dp} + X_{kjt'dp} + XR_{kjt'dp} \\ & + \sum_{p=Pintura, t' \leq t+Tpintado, d \geq t-t'-REP} XI_{kjt'dp} + X_{kjt'dp} + XR_{kjt'dp} = Un_{kt} \\ & \quad \forall k, t \end{aligned}$$

n) Máximo número de redes tipo k que se necesitan en el periodo t de la planificación.

$$Un_{kt} + \sum_{t' \in [0..T]; t' \leq t} TStock_{kt'} \leq MUn(k) \quad \forall k, t$$

o) Redes necesarias para cumplir los requerimientos de planificación, esto indicará la cantidad de mallas que se tienen que comprar.

$$Pn(k) \geq MUn(k) - Stock_k \quad \forall k$$

p) Cambios programados, cambios de malla que deben realizarse en una fecha específica por alguna razón de fuerza mayor.

$$\begin{aligned} & \sum_{t, d, p; t+d \leq Tend, dem(j, k, t+d) + Flexp(j, t+d) \geq 1} X_{kjt'dp} + \sum_{d, p; d+t \leq Tend, remove(j, k, t+d)=1} XR_{kjt'dp} = 1 \\ & \quad \forall k, j, t, Cambio_{jkt} = 1 \end{aligned}$$

6. Definición de costos

$$\text{Costo Compra Mallas} = \sum_k Pur(k) * Pn(k)$$

$$\text{Costo Mantenición} = \sum_{k,j,t,d,p} Mant_k * (XI_{kjtdp} + X_{kjtdp} + XR_{kjtdp})$$

$$\text{Costo Pintura} = \sum_{k,j,t,d} Paint_k * (XI_{kjtd1} + X_{kjtd1} + XR_{kjtd1})$$

$$\begin{aligned} \text{Costo Lavado in Situ} \\ = \sum_{k,j,t,d} CantidadLav_{td} * (XI_{kjtd2} + X_{kjtd2} + XR_{kjtd2}) * CostoLav_k \end{aligned}$$

$$\text{Costo Petróleo} = \sum_{b,c,t} Petroleodia * Wa_{bct}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo actividades} \\ = \sum_{k,j,t,d,p} CInst_k * XI_{kjtdp} + CCambio_k * X_{kjtdp} + CRemover_k * XR_{kjtdp} \end{aligned}$$

$$\text{Costo Visita Centro} = \sum_{b,t,c} W_{bct} * CIrCentro_c$$

$$\text{Costo Slack} = \sum_{b,c,t} CostoSlack * Wae_{bct}$$

7. Función Objetivo

Minimizar “Costo Mantenición” + “Costo Compra Mallas”+ “Costo Pintura” + “Costo Lavado In Situ” + “Costo Petróleo” + “Costo actividades”+ “Costo Visita Centro” + “Costo Slack”

6. Instancia de evaluación

En el presente capítulo se detalla la instancia de evaluación para el Modelo de planificación de cambios de las mallas en centros de cultivo. La cual ha sido construida en base a la planificación de la empresa salmonera Multiexport Foods S.A comprendida entre enero y diciembre del año 2014.

Para disminuir la cantidad de variables y permitir un rápido funcionamiento del modelo se agruparon las jaulas en conjuntos de a cuatro.

Índices

- Conjuntos de jaulas = $j \in \{1, \dots, 172\}$
- Tipos de mallas = $k \in \{1, 2\}$, en donde, $k = 1$ representa mallas de 1" y $k = 2$ de 2".
- Duración = $d \in \{1, \dots, 36\}$, 36 semanas es la permanencia máxima en agua de una malla.
- Período = $t \in \{1, \dots, 91\}$, período de evaluación de 91 semanas, lo que permite un ciclo completo de cultivo en un centro.
- Barco = $b \in \{1, \dots, 4\}$, máximo de 4 barcos trabajando semanalmente.
- Centro = $c \in \{1, \dots, 39\}$, 39 centros de cultivos con operación.

Parámetros

Taller:

- Tiempo de respuesta taller (REP) = 3 semanas.
- Tiempo de pintado taller (TPintado) = 1 semana.

Barcos:

- $A_{im} = [1]$, tiempo en días laboral que toma realizar una instalación de malla pecera en una jaula.
- $A_{sm} = [1.44]$, tiempo en días laborales que toma realizar un cambio de malla pecera, es decir, remover una malla usada e instalar una limpia.
- $A_{cm} = [0.8]$, tiempo en días laborales que toma remover una malla pecera de una jaula.
- $Max_{viajes_{bt}} = 3 \forall b, t$. Cada barco podrá recorrer a lo más tres centros en una misma semana.

Máximo tiempo en agua mallas de cultivo:

Dado que la empresa no cuenta con información detallada que permita calcular el máximo tiempo en agua según centro de cultivo, este parámetro va a ser estándar para todos los centros. Llamaremos “Verano” al periodo que transcurre entre octubre a marzo e “Invierno” al periodo entre abril a septiembre.

- Sin tratamiento:
 - Verano: 4 semanas
 - Invierno: 10 semanas.
- Pintura antifouling:
 - Verano: 12 semanas.
 - Invierno: 20 semanas.
- Lavado In situ:
 - 36 semanas.

Stock inicial:

- Mallas 1"=0
- Mallas 2"=0

Costos:

- $C_{compr_k} = \text{US\$ } 4.500 \forall k$
- $P_{etroleodia} = \text{US\$ } 500$
- $M_{ant_1} = \text{US\$ } 911$ y $M_{ant_2} = \text{US\$ } 1.187,25$
- $P_{aint_1} = \text{US\$ } 701$ y $P_{aint_2} = \text{US\$ } 913,25$
- $C_{ostolav_1} = \text{US\$ } 566,25$ y $C_{ostolav_2} = \text{US\$ } 738$
- $C_{Inst_k} = \text{US\$ } 960 \forall k$
- $C_{Cambio_k} = \text{US\$ } 1.040 \forall k$
- $C_{Remover_k} = \text{US\$ } 760 \forall k$
- $C_{IrCentro_c} = 0 \forall c$

7. Resultados

A continuación se presentan la comparación entre los resultados entregados por los modelos matemático versus la planificación desarrollada por el grupo de expertos de la empresa Multiexport. La instancia a evaluar es la planificación para el año 2014.

La planificación desarrollada por expertos para el período 2014 utiliza el tratamiento de pintura antifouling en todas las redes que se instalarán en los centros de cultivo, por este motivo y para poder hacer una mejor comparación se crean dos modelos matemáticos, el primero es el explicado anteriormente (capaz de poner redes sin tratamientos, pintadas y con lavado in situ) y el segundo que considera pintar todas las redes, de aquí en adelante los modelos estarán denotados por MM y MMP respectivamente.

7.1 Comparación planificación expertos versus MM y MMP

Costo de mantención: Costo asociado a la limpieza y reparación de las redes, esta labor como se explica en los capítulos anteriores se desarrolla en los talleres de mantención y se les efectúa a todas las redes que salen de los centros de cultivos.

	Planificación expertos	MMP	MM
Redes tipo 1" utilizadas	552	456	348
Redes tipo 2" utilizadas	2.472	2.408	1.860
Costo de mantención [US\$]	3.437.752	3.274.314	2.525.313

Tabla 8: Resultados costo de mantención

En la Tabla 8 se observa la cantidad de redes utilizadas por las diferentes planificaciones, en este punto se toman en cuenta las redes instaladas al inicio del período de planificación. El modelo MMP utilizó un total de 2.864 redes en comparación con las 3.024 de la planificación de expertos, esto equivale a una disminución de un 5.3% en el uso de las mallas. El modelo MM logra una disminución de un 27% en el uso de redes, esto se debe a que a las redes que se les aplica lavado in situ pueden permanecer en agua un tiempo mayor que las pintadas.

La diferencia en los costos de mantención entre la planificación de experto y MMP equivale a US\$163.440 y US\$912.44 con respecto a MM, lo anterior equivale a un ahorro de un 4.8% y 26,5% respectivamente en lo referente a limpieza y reparación de las redes en los talleres de mantenimiento.

El uso de lavado in situ permite que las redes puedan estar más tiempo en el agua, lo que hace posibles que se necesiten menos ciclos de cambios de mallas en el proceso de engorda de los peces, esto trae como consecuencia una menor necesidad de mallas que se traduce en un menor costo de mantención.

Los modelos matemáticos tratan de alargar el tiempo en agua de las mallas tipo 1" con el fin de realizar sólo una instalación de éstas por jaula, en cambio la planificación de expertos realiza reemplazos de este tipo de mallas, lo que al final conlleva a un mayor uso y requerimientos de redes tipo 1".

Costo de redes: Son los costos asociados a la adquisición de nuevas redes, debido a que las mallas en stock no permiten cumplir los requerimientos de la planificación, la adquisición de redes no es un problema ya que existen proveedores capaces de satisfacer la demanda del sector.

	Planificación expertos	MMP	MM
Cantidad de redes tipo 1" a comprar	212	136	116
Cantidad de redes tipo 2" a comprar	152	136	84
Costo redes tipo 1" [US\$]	954.000	612.000	522.000
Costo redes tipo 2" [US\$]	684.000	612.000	378.000
Costo total adquisición redes [US\$]	1.638.000	1.224.000	900.000

Tabla 9: Resultados costo de redes.

En la Tabla 9 se puede observar las cantidades de redes a adquirir para poder cumplir la planificación, la comparación entre el MMP y la planificación de expertos indica que en el primero se ahorra 76 redes tipo 1" y 16 redes tipo 2", lo que equivale a un ahorro monetario de US\$ 414.000, es decir, MMP permite reducir en un 25% los costos de adquisición de redes.

Con respecto a MM existe un ahorro sustancial en la adquisición de redes, equivalente a US\$738.000, como se dijo anteriormente el uso de lavado in situ permite extender la duración en agua de una malla, lo que permite al final utilizar una menor cantidad de éstas.

Las diferencias entra la planificación desarrollada por expertos y los modelos matemáticos, es que la primera no toma en cuenta la disponibilidad de redes a la hora de planificar instalaciones o cambios de mallas, es decir, no se consideran las redes que se cambiaron en períodos anteriores y los tiempos que éstas se demoran en estar operativas nuevamente.

Efectuar manualmente el punto antes descrito es complicado debido a que es necesario ajustar los tiempos de salida y permanencia en taller de una malla con

las nuevas instalaciones o cambios de redes, esta tarea se complejiza más si existen 39 centros que contienen un total de 688 jaulas en donde puede existir una red.

Al tener un stock insuficiente de mallas el modelo matemático prefiere maximizar el tiempo en agua de las mallas tipo 1" y en el primer cambio reemplazarlas por mallas tipo 2", esto permite tener un menor gasto en adquisición de redes tipo 1" y dado que los peces necesitan permanecer más tiempo en mallas tipo 2" que en tipo 1", la adquisición de redes de dos pulgadas es más rentable en el tiempo.

Mantener un stock adecuado de redes es de suma importancia, ya que permite hacer los cambios en los tiempos correctos, con esto se logra que el ambiente en donde viven los peces sea propicio para su crecimiento.

Tratamientos: Los costos asociados en tratamientos se pueden dividir en 2 categorías, la primera es el uso de pintura antifouling y la segunda es el lavado in situ, cabe destacar que usar uno de estos tratamientos no es necesario u obligatorio en la realidad actual. Como se explicó anteriormente la planificación desarrollada por expertos y el Modelo MMP fueron restringidos a utilizar la política de pintado en todas las mallas, por esta razón no existen redes con lavados in situ y sin tratamiento en los resultados obtenidos.

A continuación se presentan la cantidad de redes utilizadas según cada tratamiento y los gastos respectivos a éstos.

- Sin Tratamiento: Redes a las cuales no se les aplicó ni pintura antifouling ni lavado in situ, el uso de éste no tiene un costo extra.

	Planificación expertos	MMP	MM
Redes tipo 1" Sin Tratamiento	0	0	0
Redes tipo 2" Sin Tratamiento	0	0	188

Tabla 10: Resultados cantidad de redes sin tratamiento.

El modelo MM es el único que tiene permitido poner redes sin tratamientos, pero como se observa en la Tabla 10 no pone ninguna malla tipo 1" y sólo 188 de las 1.860 utilizadas de tipo 2", la razón de este resultado es que los tiempos en agua de las mallas sin tratamiento son muy bajos, si se comparan con las mallas pintadas la duración es un tercio del tiempo en verano y la mitad en invierno. Al tener una duración menor los cambios de redes tienen que ser más frecuentes por lo que se necesita una mayor cantidad de barcos y redes, esto último trae consigo mayores costos en mantención, barcos y adquisición de redes.

- Pintura Antifouling: Redes a las cuales se les aplica pintura antifouling en el taller de mantenimiento, para poder aplicar este tratamiento las redes tiene

que estar en el taller antes de llevarla a los centros de cultivo para su instalación.

	Planificación expertos	MMP	MM
N° de redes tipo 1" Pintadas	464	368	80
N° de redes tipo 2" Pintadas	2008	1.944	532
Costo pintado redes tipo 1" [US\$]	728.944	578.128	125.680
Costo pintado redes tipo 2" [US\$]	4.524.024	4.379.832	1.198.596
Costo Total pintado [US\$]	5.252.968	4.957.960	1.324.276

Tabla 11: Resultados pintura antifouling.

El modelo MM pinta aproximadamente un 75% menos de mallas y su costo en pintura es de un 25% respecto a la planificación de expertos y al modelo MMP.

Debido a que la planificación de expertos y MMP obliga a pintar todas las redes, el costo de pintura está estrechamente relacionado con la cantidad de redes que se utilizaron en la planificación. La diferencia del costo de pintado entre la planificación de expertos y MMP es de US\$295.008.

- Lavado in situ: Redes a las cuales se les aplica lavado en los centros de cultivo, en este proceso se respeta la normativa sobre la cantidad de lavados impuesta por SERNAPESCA.

	Planificación expertos	MMP	MM
N° de redes tipo 1" con Lavado In situ	0	0	180
N° de redes tipo 2" con Lavado In situ	0	0	672
N° de lavados a redes tipo 1"	0	0	976
N° de lavados redes tipo 2"	0	0	3508
Costo lavados redes tipo 1" [US\$]	0	0	490.928
Costo lavado redes tipo 2" [US\$]	0	0	2.332.820
Costo Total lavado in situ [US\$]	0	0	2.823.748

Tabla 12: Resultados lavado in situ.

MM es el único capaz de aplicar el lavado in situ, este modelo decide por lavar aproximadamente un 52% de las mallas, lo que lleva a que este tratamiento sea el preferido al momento de planificar. La cantidad de redes a las cuales se le aplicará este tratamiento es de 852 y el número de lavados que se realizarán es de 4.484, esto equivale a un promedio de 5,2 lavados por mallas.

	Planificación expertos	MMP	MM
Costo Pintado [US\$]	5.252.968	4.957.960	1.324.276
Costo Lavado In situ [US\$]	0	0	2.823.748
Costo Total tratamientos [US\$]	5.252.968	4.957.960	4.148.024

Tabla 13: Resultado costos tratamientos

En la tabla anterior se pueden observar los gastos asociados a los tratamientos por cada planificación, el costo más elevado se encuentra en la desarrollada por expertos el cual supera los 5 millones de dólares. El modelo MMP permite un ahorro en tratamientos de un 5,6% respecto a la planificación actual, en cambio MM ahorra un monto de US\$1.104.944 (21%), es necesario mencionar que para alcanzar esta cifra hay permitir el lavado in situ y el uso de mallas sin tratamiento.

En el modelo MM la cantidad de mallas pintada asciende a 612 y las con lavado in situ a 856, al observar los tiempos en que cada mallas se instala se logra visualizar una preferencia en los tratamientos de pintado y lavado según fecha, entre abril y septiembre se opta por el lavado de mallas ya que sólo se requiere un lavado cada cuatro semanas, en cambio de octubre a marzo la cantidad de lavados requeridos por malla se duplica, es decir un lavado cada dos semanas, esto ocasiona que el precio del pintado sea más económico en estas fechas y por ende es la opción que se prefiere.

Costo Barcos: Este costo agrupa el gasto en petróleo y el de las faenas, es decir, las labores que efectuarán los barcos en los centros de cultivo (instalaciones, cambios y remociones de mallas).

	Planificación expertos	MMP	MM
Costo Barco [US\$].	3.383.420	3.308.420	2.508.100

Tabla 14: Resultados costo barcos.

El costo de barcos difiere en US\$75.000 entre la planificación de expertos y MMP, esto supone un ahorro de un 2,2% respecto a la condición actual, este ahorro se debe al menor número de redes utilizadas que se traduce en menos cambios de redes para los barcos.

Un aspecto importante a destacar es que la planificación desarrollada por expertos, en aproximadamente un 11% de los períodos, el número total de actividades sobrepasa la capacidad de 4 barcos, por lo que si no se pueden conseguir barcos extras ésta no sería factible.

MMP		
Barcos	Utilización	Promedio tiempo faena [días de trabajo]
Barco 1	64%	3,5
Barco 2	62%	4,0
Barco 3	68%	4,6
Barco 4	59%	4,1
Promedio Barcos	63%	4,1

Tabla 15: Resultados MMP uso de barcos.

En la Tabla 15 se muestra el uso de los barcos en la planificación MMP. Se tiene que éstos se usan en promedio un 63% de los períodos, esto equivale a que un barco se le otorga faenas en promedio 57 de las 90 semanas de la planificación. En el caso de asignar una faena, un barco se demorará en promedio 4,1 días en efectuarla.

MM		
Barcos	Utilización	Promedio tiempo faena [días de trabajo]
Barco 1	52%	4,4
Barco 2	36%	4,4
Barco 3	30%	5,1
Barco 4	48%	4,8
Promedio Barcos	41%	4,7

Tabla 16: Resultados MM uso de barcos.

Los resultados del uso de barco del modelo MM se pueden observar en la Tabla 16, éstos indican una utilización promedio de los barcos del 41%, lo que es 22% menor que la del modelo MMP, pero la duración de las faenas son 0,6 días más largas.

La utilización de todos los tipos de tratamiento permite aumentar el número de centros de cultivos sin tener que subir la cantidad de barcos con los que se trabajan.

Costo total: Agrupa los costos de mantención, adquisición de redes, tratamientos y barcos. Este costo indica lo que se va a gastar en la etapa de engorda de agua de mar con respecto a la instalación, cambio y remoción de redes peceras.

Costos	Planificación expertos [US\$]	MMP [US\$]	Ahorro uso modelo matemático [US\$]	% de ahorro uso modelo matemático	% de ahorro respecto al ahorro total
Mantenición	3.437.754	3.274.314	163.440	4,75%	17,25%
Adquisición redes	1.638.000	1.224.000	414.000	25,27%	43,70%
Tratamientos	5.252.968	4.957.960	295.008	5,62%	31,14%
Barcos	3.383.420	3.308.420	75.000	2,22%	7,92%
Total	13.712.142	12.764.694	947.448	6,91%	100,00%

Tabla 17: Resultados costos totales MMP.

En la tabla anterior se presenta una comparación entre la planificación de expertos versus el modelo MMP. Como se observa, la planificación de expertos tiene un costo final de US\$13.712.142, donde el mayor gasto se encuentra en los tratamientos, el cual representa un 38% del total.

El modelo MMP tiene un costo total de US\$12.764.694, este valor es un 6,91% más económico que la planificación de expertos, el ahorro más significativo que MMP genera es en la adquisición de redes, hay que destacar que el alto monto con compras de mallas se debe a que existe un déficit de éstas al inicio del período de planificación, esta situación no debería ocurrir en planificaciones futuras dado que una red puede ser utilizada por varios años si es que se respetan los plazos que ésta puede estar en el agua y si se realizan las mantenciones de forma apropiada.

Costos	Planificación expertos [US\$]	MM [US\$]	Ahorro uso modelo matemático [US\$]	% de ahorro uso modelo matemático	% de ahorro respecto al ahorro total
Mantenición	3.437.754	2.525.313	912.441	26,54%	25,13%
Adquisición redes	1.638.000	900.000	738.000	45,05%	20,33%
Tratamientos	5.252.968	4.148.024	1.104.944	21,03%	30,43%
Barcos	3.383.420	2.508.100	875.320	25,87%	24,11%
Total	13.712.142	10.081.437	3.630.705	26,48%	100,00%

Tabla 18: Resultados costos totales MM.

En la Tabla 18 se pueden observar la diferencia de los costos asociados a la planificación actual y a MM, el uso de modelo difiere con respecto a la planificación de expertos en US\$3.630.705 al final de las 90 semanas, esto equivale a un ahorro de un 26,48%.

El mayor ahorro que produce MM está en los tratamientos, éste representa el 30,46% del ahorro total. Hay que destacar que tanto en mantención, adquisición de redes y barcos se produce una disminución significativa de los costos.

Una de las ventajas de la utilización de los lavados in situ es que permite mantener una malla en agua por más períodos que la pintura antifouling, con esto se logra disminuir la cantidad de redes que se utilizarán en la planificación, esto al final se ve reflejado en menores costos en mantención, barcos y adquisición de mallas.

Un problema asociado a la planificación de expertos es que es muy estática, es decir, la duración de una red en agua dado el tiempo que los peces llevan en las jaulas es igual para todas, lo que conlleva a un mayor gasto en adquisición de redes ya que no se toma en cuenta el tiempo que una red tiene que estar en mantención para poder ser utilizada nuevamente. Otro punto importante es que el tiempo en agua de una red es menor al máximo permitido, esto les permite en caso de no contar con barcos tener flexibilidad en las fechas de cambio de las mallas, aunque esta flexibilidad permita adecuarse a las condiciones cambiantes de la industria no aprovecha de manera eficiente los recursos económicos.

El uso de los modelos matemáticos entrega una claridad con respecto a qué labores semanales efectuará cada barco, la ventaja de esto es que se puede negociar el precio de las faenas por el conjunto de tareas que un barco realizará a lo largo de la planificación o un período predefinido y no solamente por las tareas de la semana. Además proporciona seguridad a las empresas que prestan el servicio de barcos con respecto al trabajo que se les otorgará a lo largo de la planificación, con lo cual éstos deberían contar con disponibilidad de barcos al momento de efectuar labores entregadas con antelación.

La adquisición de redes es una inversión de largo plazo por lo que es necesario analizarla sobre el tiempo de vida útil de ella y no en la duración de la planificación.

Finalmente, los modelos matemáticos permiten un ahorro significativo respecto a la situación actual, pero para poder efectuar estas planificaciones de manera correcta es necesario contar con disponibilidad de barcos, redes y taller de mantenimiento, cualquier problema en estos ítems ocasionará atrasos en los cambios de mallas lo que se traducirá en costos extras para la empresa.

8. Análisis de Sensibilidad

8.1 Centro Único

El primer escenario a evaluar es un caso hipotético, donde la empresa tiene solamente un centro con 20 jaulas, donde se cultivarán salmones desde la quinta semana de planificación (fecha: 12-05-2014). Este caso permitirá entender los costos individuales del centro, se evaluarán dos instancias: una donde existe un stock de redes y otra en que no se tiene disponibilidad de mallas.

Tamaño Centro	Con Stock	Sin Stock
Costo planificación [US\$]	346.535	592.495
Días de Faenas	30,6	30,6
Cantidad de pintados	20	28
Redes lavado	40	40
Cantidad lavados in situ	160	176
Redes sin tratamiento	20	12
Costo Pintura [US\$]	45.060	63.084
Costo lavado [US\$]	99.920	111.856
Costo Barcos [US\$]	112.100	112.100
Costo Mantenición [US\$]	89.455	89.455
Costo adquisición redes [US\$]	0	216.000
N° máximo de redes 1" usadas simultáneas	20	20
N° máximo de redes 2" usadas simultáneas	40	28
N° de Redes tipo 1" compradas	0	20
N° de Redes tipo 2" compradas	0	28

Tabla 19: Resultados análisis sensibilidad centro único.

En la Tabla 19 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad de centro único, se observa que los procesos tiene un costo de US\$346.535 para el caso donde existe stock de redes y de US\$592.492 en el caso contrario. El costo de adquisición de redes para el segundo caso (sin stock) asciende a US\$216.000 y representa la compra de 20 mallas tipo 1" y 28 de tipo 2". Si para el primer caso (con stock) se evalúa la compra de mallas, éste requeriría 20 mallas tipo 1" y 40 de tipo 2" lo que tiene un valor de US\$270.000, si a este valor se le suma al costo total de planificación del caso con stock de redes se alcanzan los US\$616.535, lo que representaría efectuar la misma planificación del primer caso, pero comprando las redes, si se resta este último monto con el costo de planificación, del caso sin stock, se obtiene US\$24.040, esta diferencia se puede interpretar como el ahorro que permite el modelo al tomar en cuenta que las mallas pueden volver a ser usadas después de salir del taller de mantenimiento y tener la capacidad de decidir en qué períodos se instalan, cambian y remueven las redes.

8.2 Precios Tratamiento

Para entender la influencia del precio de los tratamientos en la planificación se muestra a continuación distintos escenarios donde el precio actual de un tratamiento varía mientras los otros costos se mantiene constantes, se toma como situación base el modelo MM.

Variación en el precio del pintado de redes	Costo planificación [US\$]	Redes pintadas	Redes lavadas	Cantidad de lavados in situ	Redes sin tratamiento	Variación del costo con respecto a situación base
20%	10.341.844	516	876	4.800	288	2,60%
10%	10.213.669	604	840	4.228	208	1,30%
0	10.078.777	612	976	4.480	192	0,00%
-10%	9.942.443	692	824	4.044	184	-1,40%
-20%	9.787.891	768	772	3.740	184	-2,90%

Tabla 20: Resultados análisis de sensibilidad variación del precio en el pintado de redes.

Como es de esperar un aumento en el precio del pintado disminuye la cantidad de redes a pintar, pero no necesariamente aumenta la cantidad de lavados. Al aumentar en un 20% el precio del pintado, el costo de la planificación aumenta en un 2,6%, por esta razón es necesario cuidar los costos de procesos de pintado ya que pequeñas variaciones se ven reflejadas en el valor final de la planificación.

Variación porcentual en el precio del lavado in situ	Costo planificación [US\$]	Redes pintadas	Redes lavado	Cantidad lavados in situ	Redes sin tratamiento	Variación del costo con respecto a situación base
20%	10.552.552	904	740	2.876	216	4,70%
10%	10.347.877	712	808	3.912	200	2,67%
0	10.078.777	612	976	4.480	192	0,00%
-10%	9.800.920	584	844	4.704	208	-2,76%
-20%	9.463.993	440	916	5.544	220	-6,10%

Tabla 21: Resultados análisis de sensibilidad variación del precio en el lavado in situ.

Al aumentar el precio de los lavados, la pintura antifouling empieza a ser más viable con lo cual el número de redes a pintar aumenta, en el caso contrario, si el precio de los lavados disminuyen la cantidad de mallas pintadas también lo hace.

Dado los precios actuales una variación en el costo del lavado in situ afecta en mayor medida a la planificación que el pintado, una disminución en el precio en

torno al 20% logra que el costo de la planificación baje un 6,1%, en cambio un aumento del 20% ocasiona un costo final un 4,7% más caro.

Si se analiza en caso de un solo centro con stock, presentado en el punto anterior, para que éste no use la opción de lavado in situ el precio actual de este tratamiento tiene que subir un 109%, o el precio del pintado disminuir en un 65%, para que la opción de pintura no sea económicamente factible su precio tiene que aumentar en un 114% o el precio del lavado in situ disminuir en un 43%, se observa que existen amplios márgenes de precios donde el lavado y el pintado pueden coexistir como opciones válidas de tratamientos para las redes.

8.3 Tipos de tratamiento

Debido a que la pintura antifouling basadas en cobre y el lavado in situ liberan desechos, es posible que en un futuro las empresas no quieran usar estos tratamientos o que SERNAPESCA prohíba su uso, por estas razones se presenta a continuación los resultados de la planificación en los casos en que alguno o ambos tratamientos no pueden ser ocupados.

Tratamiento eliminado	Costo planificación [US\$]	Días de Faenas	Costo Tratamiento [US\$]	Costo mallas [US\$]	Redes tipo 1	Redes tipo 2	Variación del costo con respecto a situación base
Lavado In situ	11.974.091	957	4.009.460	1.170.000	120	140	18,80%
Pintura	10.877.438	685	5.013.332	864.000	116	76	7,92%
Lavado y pintura	Infactible						

Tabla 22: Resultados análisis de sensibilidad eliminar tratamientos.

En la tabla anterior se observan los resultados del modelo MM al quitar la opción de algún tratamiento. En el caso de que se elimine el lavado y la pintura, con lo cual sólo queda la opción de poner redes sin tratamientos no existe un resultado factible, esto se debe a que la capacidad de los barcos no da abasto al aumento de la cantidad de cambios de redes requeridos, dado que la duración en el agua de las mallas sin tratar es significativamente menor a la del pintado y lavado.

La eliminación del lavado in situ aumenta los costos de la planificación en un 18,8%, que proviene principalmente de un aumento en la adquisición de mallas de un 30% y de un aumento del uso de redes en un 34%. Si se compara los resultados de MMP con el modelo en que se elimina el lavado in situ, se obtiene que este último es un 6% más económico, es decir, permitir el uso de redes sin tratar en la planificación permite ahorrar US\$790.603.

No usar pintura antifouling implica costos adicionales de un 7,92%. Aunque este modelo utilice un 0,5% menos de mallas y adquiera un 96% de las redes de MM, los costos asociados a los tratamientos aumentan en un 21%.

8.4 Cantidad Barcos

La cantidad de barcos y el tiempo necesario para efectuar una faena son algunas de las variables que limitan los cambios de redes que se pueden efectuar en una semana de trabajo, por esta razón se evaluará el impacto que tienen estas variables en la planificación.

Variación cantidad de barcos	Variación % de tiempo faena	Costo planificación [US\$]	Promedio duración faenas [45 semanas]	% de semanas con faenas [45 semanas]	Promedio duración faenas[90 semanas]	% de semanas con Faenas [90 semanas]	Variación % del precio con respecto a MM
2	20%	10.125.471	4,98	45%	4,9	31%	0,5%
2	10%	10.089.861	4,75	43%	4,84	29%	0,1%
2	0%	10.054.868	4,3	44%	4,28	30%	-0,2%
2	-10%	10.020.329	4,01	41%	3,88	30%	-0,6%
2	-20%	9.985.727	3,63	41%	3,67	28%	-0,9%
1	20%	10.145.509	5,09	53%	4,9	37%	0,7%
1	10%	10.098.489	4,41	56%	4,49	37%	0,2%
1	0%	10.056.781	4,28	52%	4,29	36%	-0,2%
1	-10%	10.020.874	4,1	49%	4,2	33%	-0,6%
1	-20%	9.985.552	3,87	46%	3,84	32%	-0,9%
0	20%	10.166.789	5,32	64%	4,99	46%	0,9%
0	10%	10.124.177	4,65	67%	4,57	46%	0,5%
0	0%	10.078.777	4,62	62%	4,66	41%	0,0%
0	-10%	10.042.464	4,58	56%	4,44	39%	-0,4%
0	-20%	9.987.671	3,92	57%	3,96	39%	-0,9%
-1	20%	10.205.332	5,73	80%	5,33	57%	1,3%
-1	10%	10.155.463	5,26	80%	5,01	56%	0,8%
-1	0%	10.109.687	5,01	76%	4,77	53%	0,3%
-1	-10%	10.068.049	4,67	74%	4,36	53%	-0,1%
-1	-20%	10.015.073	4,17	73%	4,08	50%	-0,6%
-2	20%	Infactible					
-2	10%	Infactible					
-2	0%	Infactible					
-2	-10%	Infactible					
-2	-20%	10.059.052	5,16	89%	4,89	62%	-0,2%

Tabla 23: Resultado análisis de sensibilidad variación en el número de barcos y los tiempos de faena.

En la Tabla 23 se presenta cómo varia el modelo MM al cambiar la cantidad de barcos y el tiempo en que se demoran éstos en efectuar las faenas, en esta tabla se puede observar el promedio de las duraciones de las faenas y porcentaje de semanas con faenas en las primeras 45 y 90 semanas, además de la variación del costo final de la planificaciones con respecto a MM.

Una disminución de dos barcos (equivalente a tener 2 barcos disponibles) implica que el problema no se pueda resolver por falta de capacidad, pero si se consigue disminuir los tiempo de faena en un 20% se logra encontrar una solución factible, en la cual los barcos en las primeras 45 semanas son usados el 89% y las faenas tiene una duración promedio de 5,16 días.

Tener 3 barcos para efectuar las faenas permite, sin problemas, encontrar solución no importando si existe un aumento del 20% en los tiempos de faena. El número de semanas que se usan los barcos superan el 73% en las primeras 45 semanas, por lo que todavía existe un pequeño margen para crecer. Con 4 ó más barcos se tiene un capacidad ociosa sobre 33% en todos los casos.

Los cambios en la cantidad de barcos y tiempos de faena ocasionan una variación máxima de los costos de las planificaciones de -0,9% a 1,3% con respecto a MM.

Si la disponibilidad de barcos varía semana a semana sin que ésta se pueda predecir al inicio del período de planificación, al modificar el modelo con la nueva cantidad de barcos éste puede retornar un solución infactible, dado que los cambios pasados dejaron cierta configuración en las mallas y se requiere una capacidad superior de barcos, por esta razón es de vital importancia tener asegurado un cierto número a lo largo de la planificación.

8.5 Máxima cantidad de viajes

Dado las limitaciones físicas y de carga laboral de los barcos, existe el parámetro que limita la cantidad de viajes que éstos pueden realizar en una semana de trabajo, en la Tabla 24 se muestran los resultados que se obtienen al existir una variación del máximo número de viajes semanales por barco.

Variación en la número máximo de viajes por barco	Costo planificación	Promedio Duración Faena [45 semanas]	% de semanas con Faenas [45 semanas]	Promedio Duración Faena[90 semanas]	% de semanas con Faenas [90 semanas]	Variación % del precio con respecto a MM
+2	10.078.777	4,46	43%	4,53	63%	0,0%
+1	10.078.777	4,86	39%	4,99	57%	0,0%
0	10.078.777	4,66	41%	4,62	62%	0,0%
-1	10.096.033	4,29	45%	4,46	65%	0,2%
-2	10.144.431	3,92	49%	4,22	68%	0,7%

Tabla 24: Resultados análisis de sensibilidad variación en el máximo número de viajes.

Como se muestra en la tabla anterior al aumentar la cantidad de posibles viajes sobre 4 (variación de 1 ó más viajes) no representa un beneficio para la planificación generada por el modelo MM, pero disminuir los viajes a 2 ó 1 por semana implica un aumento de los costos en un 0,2% y 0,7% respectivamente.

El aumento de la cantidad de viajes puede ser un punto relevante cuando el porcentaje de semanas con faenas es alto, es decir, si se tienen pocos barcos disponibles, pero que pueden recorrer varios centros las duraciones de las faenas entregadas podrán ser más altas, con lo cual se aprovechará de mejor manera la capacidad de cada barco.

8.6 Tiempo de respuesta de Taller de mantenimiento

Al remover un malla en uso desde los centros de engorda éstas se encuentran sucias y dañadas por lo que tienen que ir hacia los talleres de mantenimiento para efectuarles las labores de limpieza y reparación, claramente cuando estas redes están pasando por los procesos de mantenimiento no pueden ser utilizadas en los centros de engorda. En la Tabla 25 se presentan los resultados al existir una variación del tiempo de respuesta de los talleres.

Variación en semanas del tiempo de respuesta de talleres	Costo planificación [US\$]	Costo adquisición mallas [US\$]	Compra de Redes tipo 1	Compra de Redes tipo 2	Variación % del precio con respecto a MM
+2	10.313.359	1.116.000	116	132	2,3%
+1	10.204.650	1.008.000	116	108	1,2%
0	10.078.777	900.000	116	84	0,0%
-1	9.979.267	792.000	116	60	-1,0%
-2	9.807.483	594.000	100	32	-2,7%

Tabla 25: Resultados análisis de sensibilidad variación del tiempo de respuesta de talleres de mantenimiento.

El aumento o disminución del tiempo de respuesta del taller de mantenimiento afecta principalmente al costo de adquisición de mallas, si los talleres demorasen una semana en efectuar los procesos de limpieza y mantención se comprarían 84 redes menos que en el modelo MM, esto es equivalente a un ahorro de un 2.7%, en cambio un aumento de 2 semanas en taller implica un gasto adicional de US\$243.582 o un 2.3% del costo de planificación de MM.

Si se quiere invertir para disminuir en 2 semanas el tiempo de respuesta del taller, el monto máximo sería de US\$271.294, si la opción que se tiene es pagar un extra por cada red que se envía a mantención, el gasto podría llegar a ser de un máximo de US\$130 por malla. Para el caso de disminuir en 1 semana el tiempo de una malla en taller, el monto máximo a invertir es de US\$99.510, o pagar US\$50 extras por cada red en mantención.

Variaciones en los tiempos de respuesta del taller afectan a la cantidad de mallas que se requieren comprar, por este motivo es recomendable llevar un control de los estados de las mallas en taller que permita saber con claridad cuando éstas estarán disponibles, y de esta manera poder reprogramar los cambios de redes si es que éstas van a estar listas antes de la fecha programada o si sufrieron un imprevisto que retrase su salida.

8.7 Tiempo de permanencia en Agua

El tiempo de permanencia máxima de una red en el agua establece la cantidad máxima de períodos que esta red puede ser utilizada en un centro antes de ser llevada a los talleres de mantención, para entender cómo varía la solución del modelo a partir de diferentes rangos de permanencia se presenta a continuación variaciones de tiempo en agua para los diferentes tratamientos.

Variación en semanas del tiempo en agua	Tratamiento	Costo planificación [US\$]	Cantidad redes pintadas	Cantidad lavados in situ	Redes sin tratamiento instaladas	% de ahorro respecto a MM
2	Pintura	9.741.642	728	3.472	220	3,30%
1	Pintura	9.922.707	652	4.104	196	1,50%
0	Pintura	10.078.777	612	4.480	192	0,00%
-1	Pintura	10.284.437	604	4.940	152	-2,00%
-2	Pintura	10.476.570	512	5.472	200	-3,90%
2	Lavado	10.075.489	612	4.532	180	0,00%
1	Lavado	10.078.149	612	4.536	180	0,00%
0	Lavado	10.078.777	612	4.480	192	0,00%
-1	Lavado	10.078.777	612	4.480	192	0,00%
-2	Lavado	10.079.425	612	4.480	196	0,00%
2	Sin Tratamiento	10.025.428	660	3.828	348	0,50%
1	Sin Tratamiento	10.059.588	632	4.232	296	0,20%
0	Sin Tratamiento	10.078.777	612	4.480	192	0,00%
-1	Sin Tratamiento	10.160.575	684	4.444	96	-0,80%
-2	Sin Tratamiento	10.189.315	132	4.640	52	-1,10%

Tabla 26: Resultados análisis de sensibilidad variación en semanas del tiempo de permanencia en agua.

Un aumento de 1 ó 2 semanas del tiempo en agua de las redes pintadas significa un ahorro de un 1,5% y 3,3% respectivamente, en cambio un aumento en las semanas que puede estar una malla, a la que se le aplica lavado in situ, no implica un ahorro relevante dado que el costo asociado a estas redes viene por parte de efectuar un lavado, los cuales se tienen que hacer cada 2 u 8 semanas dependiendo del período del año. Aunque las variaciones del tiempo en agua de las redes sin tratamiento hacen que el número de mallas que no usan pintura ni lavado in situ varíen, los ahorros no superan el 0,5% dado que al no usar tratamientos el tiempo en agua es menor y por ende los gastos en barcos, mantención y redes aumentan.

En el caso de que se encuentre una pintura o proceso de pintado que permita que una malla en el agua pueda durar más tiempo sumergida, la inversión máxima en un período de 90 semanas puede ser de US\$337.135, en caso de que el proceso de pintado de cada red sea más caro éste puede subir un 23% como máximo. Para el caso de aumentar el tiempo en agua en una semana de las mallas pintadas, la inversión en el período de planificación puede alcanzar los US\$156.070, o que el costo por red pintada aumente en un máximo de un 12%. En el caso contrario donde el tiempo de una malla pintada sumergida disminuya

en 2 ó 1 semana, el costo por el tratamiento de cada red tiene que descender en un 29% y 14% respectivamente.

Tras el análisis de sensibilidad realizado se observa que las variables que más influyen en la planificación son la existencia del lavado in situ junto con su costo, además de la permanencia en agua de las mallas pintadas, por esta razón es recomendable mejorar el procesos del pintado para que el tiempo en agua de estas mallas pueda extenderse por algunas semanas y de esta manera ahorrar en la planificación. Otra variable quizás no muy relevante en el costo, pero si en la factibilidad de la planificación es el número de barcos, falta de éstos en una semana implica no poder hacer los cambios de redes, lo que conlleva a dejar redes sucias en los centros, lo que afecta el objetivo principal de la fase de engorda que es el rápido crecimiento de los peces.

Mejorar los tiempos de respuesta de los talleres permite tener las mallas disponibles nuevamente en un menor tiempo, esto ocasiona que se requiera adquirir una menor cantidad de redes, y dado que las redes tienen un alto costo, mejorar este parámetro produce un ahorro significativo.

La variaciones en los tiempos de faena no representan un gran ahorro o costo para la empresa dado que a los barcos se les paga por la labor que éstos efectuarán en los centros de engorda y no por el tiempo que éstos demoran. Las ventajas de tener faenas más rápidas es que los peces se estresan menos ante el cambio de mallas y que se utiliza un menor número de barcos en la planificación lo cual es relevante debido a que éstos son escasos en el mercado.

La cantidad de viajes no es un parámetro relevante con el número de barcos actuales, pero podría tomar una mayor importancia si es que la cantidad de cambios de redes está cerca de la capacidad máxima de los barcos disponibles.

Los tratamientos son de vital importancia dado que sin éstos no se podría efectuar la planificación actual a causa que las redes sin tratamientos tienen una duración en agua muy bajo. Dado el precio y el tiempo en agua el tratamiento más relevante es el lavado in situ, el cual se utiliza mayormente en el período de invierno, en cambio el pintado se prefiere para verano. Se recomienda buscar maneras de bajar los precios o aumentar el tiempo en agua ya que esto llevara a tener ahorros importantes en futuras planificaciones.

Finalmente, es necesario controlar y estandarizar los tiempos de faena y respuesta de taller para que sus variaciones no afecten la planificación definida. Además de medir de forma precisa el tiempo que puede estar una malla sumergida con los diferentes tratamientos dadas las condiciones ambientales, y de esta manera poder aprovechar al máximo los recursos disponibles.

9. Conclusiones

En la presente tesis se ha abordado el problema de planificación de los cambios de mallas en el cultivo de salmón, específicamente enfocado a la etapa de engorda en agua de mar de la cadena de valor. Se ha construido, formulado y resuelto un modelo de programación el cuál incorpora los requerimientos propios de las operaciones que se requieren efectuar al momento de planificar el cambio de una red. El modelo ha sido creado basándose en las operaciones reales de la empresa productora de salmones Multiexport Foods S.A., la cual opera en la ciudad de Puerto Montt.

Usar MIP mejora la solución actual del problema y ayuda al desarrollo de una mejor planificación. La utilización de este modelo permite realizar una planificación a un horizonte de 90 semanas, mientras que en la actualidad esta se resuelve día a día. El principal uso para la herramienta es a nivel táctico, debiéndose ejecutar, en general, una vez cada semana o cada dos semanas (pudiendo actualizar el valor de los parámetros con información más reciente), hay que destacar que también tiene un gran uso a nivel estratégico ya que permite evaluar inversiones a mediano plazo como se observó en el análisis de sensibilidad.

El modelo permite elaborar escenarios con variables que no son controlables, cómo variaciones climáticas, o condiciones laborales extraordinarias en el arriendo de barcos o reparación de mallas. Esto da la posibilidad de realizar simulaciones y de esta manera evaluar configuraciones y posibilidades de inversión a un mucho menor costo y tiempo.

Se responde al interrogante de cuándo y qué tratamientos se tiene que utilizar, es decir, si es rentable el uso de la pintura antifouling o lavado in situ en la planificación. La respuesta de estas preguntas depende del período de permanencia en el agua, la época del año en que se instalará la red y los costos asociados a cada tratamiento. Dada la situación actual todos los tratamientos son rentables y se usan en condiciones específicas por ejemplo la pintura antifouling es preferible en verano, en cambio el lavado in situ en invierno.

Los barcos son un recurso imprescindible a la hora de efectuar la planificación, además estos son escasos y tiene un alto costo de arriendo y mano de obra. La herramienta permite saber si el número de barcos con los que se está trabajando es suficiente y además da a conocer las fechas en que cada uno de estos tendrá trabajo. Esta información permite mejorar la planificación actual, dado que una gran parte de los problemas actuales se generan debido a que no se tiene barcos disponibles ya que como las empresas que prestan el servicio no tiene conocimiento de las labores que deberán efectuar y por ende se ven obligadas a buscar y trabajar con otros clientes.

Al tener la información de las fechas de instalación, cambio y remoción de cada malla, se puede informar a los talleres de reparación sobre el flujo de redes que

recibirán, lo que les permite ajustar sus recursos tanto de mano de obra como de materiales, de esta forma podrán disminuir sus costos y tiempos de reparación, y sobre todo la incertidumbre del tiempo que tardarán en reparar las mallas.

Los tiempos de planificación se reducen notablemente y la calidad a nivel de detalle es mucho mejor. El ahorro de tiempo permitiría solucionar los problemas que se producen en el día a día y evaluar distintos escenarios en donde se tengan diferentes fechas de cultivo, capacidades y precios. Con esta información es posible estudiar diferentes posibilidades de inversión con el fin de mejorar los procesos asociados a los cambios de mallas.

Los análisis de sensibilidad llevados a cabo en este trabajo sobre los principales parámetros del modelo, han permitido evaluar el impacto que tiene cada uno de estos y su importancia en la solución planteada. El parámetro de mayor importancia es la duración en el agua de una malla, entre mayor es el tiempo que puede permanecer una malla sumergida, menor es la cantidad de cambios, mantenciones y adquisición de redes requeridas. Por esta razón se recomienda estudiar alternativas que permitan aumentar los tiempos en agua de las mallas, como por ejemplo el uso de recubrimientos de silicona o mallas de cobre.

Para aplicar el modelo propuesto en alguna otra empresa de cultivo de salmones se requiere que ésta levante información sobre la duración en agua de las mallas con o sin tratamientos en sus diferentes centros de cultivo. Una vez en funcionamiento el modelo es necesario ir ajustando estos tiempos según las condiciones ambientales.

En la práctica el modelo construido puede llegar a ser un elemento diferenciador para la industria, ya que la gran cantidad de información que se debe manejar, como la gran cantidad de decisiones que se deben tomar, hacen que la planificación sea muy difícil de realizar en forma eficiente y global.

Por último, desde el punto de vista de la investigación, algunas de las líneas de trabajo que podrían seguirse son:

- Dado que los barcos tienen que viajar desde un centro a otro en una misma faena, se podría agregar al modelo el ruteo de barcos, esto permitiría evaluar el consumo de petróleo además de establecer correctamente los tiempos de viaje y de trabajo en los centros.
- El clima y el crecimiento del fouling pueden ocasionar que las labores de cambio de mallas se tengan que efectuar antes o después de lo previsto. Por esta razón incorporar la estocasticidad de estas variables al modelo podría ayudar a entender y mejorar las decisiones de cuándo efectuar un cambio de red.

10. Bibliografía

Anon., 2013. *aqua.cl*. [En línea]

Available at: <http://www.aqua.cl/2013/10/11/costos-de-produccion-de-salmon-en-chile-alcanza-us50kg-desde-principios-de-2012/>
[Último acceso: 5 Mayo 2014].

Aunsmoa, A., Krontveita, R., Valleb, P. S. & Bohlin, J., 2014. Field validation of growth models used in Atlantic salmon farming. *Aquaculture*, Issue 428-429, pp. 249-257.

Aunsmoa, A., Skjervea, E. & Midtlynga, P. J., 2013. Accuracy and precision of harvest stock estimation in Atlantic salmon farming. *Aquaculture*, Volumen 396–399, pp. 113-118.

Aunsmo, A., Krontveit, R., Valle, P. S. & Bohlin, J., 2014. Field validation of growth models used in Atlantic salmon farming. *Aquaculture*, Volumen 428–429, p. 249–257.

Bloecher, N., Olsen, Y. & Guenther, J., 2013. Variability of biofouling communities on fish cage nets: A 1-year field study at a Norwegian salmon farm. *Aquaculture*, Volumen 416-417, pp. 302-309.

Braithwaite, R. A., Carrascosa, M. C. C. & McEvoy, L. A., 2007. Biofouling of salmon cage netting and the efficacy of a typical copper-based antifoulant. *Aquaculture* 262 (2007) 219–226, Volumen 262, p. 219–226.

Cisternas, F. y otros, 2013. Optimizing salmon farm cage net management using integer programming. *Journal of the Operational Research Society*, 64(5), p. 735–747.

Daniel Nieto, R. N. E. G. L. G. y. D. B., 2010. *Sistemas de producción de smolt en Chile, Análisis de alternativas desde la perspectiva ambiental, sanitaria y económica*, s.l.: WWF Chile.

Forsberg, O. I., 1996. Optimal stocking and harvesting of size-structured farmed fish: A multi-period linear programming approach. *Mathematics and Computers in Simulation*, Volumen 42, pp. 299-305.

Frode Oppedala, T. D. L. H. S., 2011. Environmental drivers of Atlantic salmon behaviour in sea-cages: A review. *Aquaculture*, 311(1-4), pp. 1-18.

Gonzalo Durán, M. K., 2008. *Industria del Salmón*, Fundación Sol.

- Gonzalo Romero, G. D. J. M. A. W., 2013. An approach for efficient ship routing. *International Transactions in Operational Research*, 20(6), p. 767–794.
- Hodson, S. L., Burke, C. M. & Bissett, A. P., 2000. Biofouling of fish-cage netting: the efficacy of a silicone coating and the effect of netting colour. *Aquaculture*, Volumen 184, pp. 277-290.
- Hodson, S. L., Lewis, T. E. & Burke, C. M., 1997. Biofouling of fish-cage netting: efficacy and problems of in situ cleaning. *Aquaculture*, Volumen 152, pp. 77-90.
- Instituto de Fomento Pesquero, 2013. *Evaluación ambiental de las actividades de lavado in situ*, Santiago, Chile.
- Johansson, D. y otros, 2007. The influence of the pycnocline and cage resistance on current flow, oxygen flux and swimming behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in production cages. *Aquaculture*, Volumen 265, p. 271–287.
- Jorge Fernández C., L. E. B., 2006. *Estudio de la Cadena Productiva del Salmón, a través de un Análisis Estratégico de Costos*, Santiago: CAPIC.
- Lavín, R. A. H., 2012. *Identificación de puntos críticos en el proceso de mantenimiento de redes de los centros de cultivos de salmón*, Puerto Montt, Chile.
- Mancilla, E. A. O., 2009. *Reconocimiento e inspección de centros de cultivos*, Valdivia.
- María José Abud Sittler, M. J. B. G. F. S. F., 2009. *La industria del salmón y el recurso natural agua*, Santiago, Chile.
- Nylund A., H. T. H. K. N. F. & L. P., 1994. Mechanisms for transmission of infectious salmon anaemia. *Diseases of Aquatic Organisms*, Volumen 19, pp. 95-100.
- Odd Inge Forsberg, A. G. G., 2006. Modeling optimal dietary pigmentation strategies in farmed Atlantic salmon: Application of mixed-integer non-linear mathematical programming techniques. *Aquaculture*, Volumen 261, pp. 118-124.
- Ortiz, N. E. C., 2009. *Estrategia de diversificación relacional marmau s.a. Servicios integrales*, Santiago, Chile.
- Paredes, C. E. T., 2006. *Análisis de jaula circular de hdpe mediante el método de elementos finitos*, Valdivia, Chile.

Polgatiz Monsalve, C. R., 2010. *Programación matemática para el uso eficiente de mallas de cultivo en una empresa salmonera*, Santiago, Chile: Universidad de Chile.

Run Yu, P. L., 2009. Optimal harvest time in continuous aquacultural production: The case of nonhomogeneous production cycles. *Int. J. Production Economics*, Volumen 117, p. 267–270.

SalmonChile, S. d. P., 2008. *Anemia Infecciosa del Salmón en Chile*.

Servicio nacional de pesca, U. d. a., 2008. *Balance de la situación sanitaria de la anemia infecciosa del salmón en Chile de julio del 2007 a julio del 2008*, Valparaíso.

SUBPESCA, 2013. *Evaluación ambiental de las actividades*.

Trond Bjørndal, D. E. L. A. W., 2004. Operational research models and the management of fisheries and aquaculture : A review. *European Journal of Operational Research*, Volumen 156, pp. 533-540.

W, C. A. A. y. G. B., 2001. Efectos de la Salmonicultura en las Economías Campesinas de la Región de Los Lagos, Chile. *Revista Austral de Ciencias Sociales*, 2(5), pp. 93-106.

11. Anexo

11.1 Fouling



Ilustración 10: Biofouling en redes.



Ilustración 11: Comparación de mallas con y sin biofouling.

11.2 Centros Multiexport

Nº	Centros	Jaulas
1	Abtao	20
2	Allan	14
3	Apiao	16
4	Arbolito	24
5	Bolados	16
6	Broken	16
7	Cabras	16
8	Chalacayec	16
9	Chaparano	16
10	Chelin	20
11	Cholga	16
12	Delta	16
13	Ganso	16
14	Guapo	16
15	Huyar	16
16	Izaza	24
17	Jorge	24
18	Llaguepe	18
19	Luz	14
20	Marcacci	24
21	Margarita	16
22	May	24
23	Mayhew	16
24	Ninualac	16
25	NN	16
26	NNTrucha	16
27	P. Bonita	16
28	Pearson	24
29	Pelada	16
30	Polla	16
31	Refugio	16
32	Rowlett	16
33	Soledad	24
34	Stokes	24
35	Teuquelin	16
36	Teuquelin N	16
37	Wickham	16
38	Williams	14
39	Yelen	12
	Total	688

Tabla 27: Centros Multiexport.

11.3 Solución gráfica



